

Т. Г. ТІГАРЄВА

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА



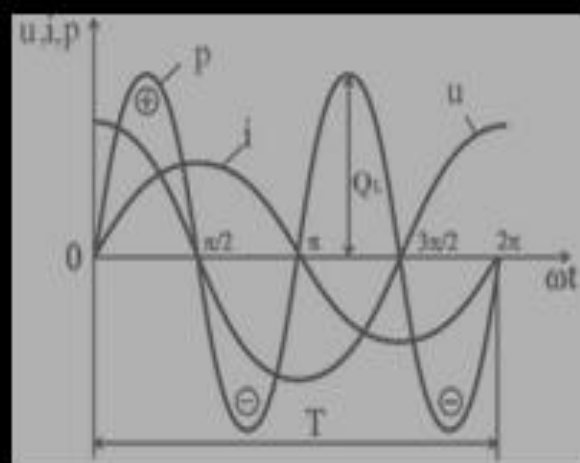
$$I = \frac{U}{R}$$

$$R = \frac{U}{I}$$

$$U = IR$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$$

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_L + \vec{U}_C$$



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Т.Г. ТІГАРСЬВА

# ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК

Одеса

2016

УДК 621.3 (075)  
ББК 31.2  
Т 39

ЗАТВЕРДЖЕНО  
Вченою Радою Одеської державної  
академії будівництва та архітектури  
протокол № 10 від 26 травня 2016 р.

Т. Г. Тігарєва  
«Електротехніка». Навчальний посібник. – Одеса, ОДАБА, 2016  
-195с.

Укладач:  
старший викладач кафедри фізики ОДАБА Т. Г. Тігарєва

Рецензенти:  
Кадацький А.Ф. – д.т.н., професор, завідувач кафедри Теорії  
електричних кіл та електроживлення Одеської національної академії  
зв'язку ім. О.С. Попова  
Ніколенко І.М. – к.т.н., доцент кафедри фізики Одеської націо-  
нальної академії харчових технологій

В навчальному посібнику викладені теоретичні положення та-  
ких основних розділів електротехніки, як теорія однофазних та три-  
фазних електричних кіл, трансформатори, електродвигуни, електрич-  
ні вимірювання, основи електропостачання промислових підпри-  
ємств. Наведені питання для самоперевірки, приклади розв'язання за-  
дач та умови задач для самостійного розв'язання.

Навчальний посібник призначений для студентів будівельних  
ВНЗ спеціальностей 192 «Будівництво та цивільна інженерія» та 133  
«Галузеве машинобудування».

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	8
ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЇЇ МІСЦЕ В СУЧАСНОМУ СВІТІ.....	10
РОЗДІЛ 1	
ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	12
1.1. Електричні кола. Основні відомості та визначення .....	12
1.2. Закони електричних кіл постійного струму.....	14
1.3. Послідовне включення елементів .....	15
1.4. Паралельне включення елементів.....	16
1.5. Змішане включення елементів .....	17
1.6. Перетворення «трикутник-зірка».....	18
Питання для самоконтролю до розділу 1 .....	21
Приклади розв'язання задач до розділу 1 .....	22
Задачі для самостійного розв'язання до розділу 1 .....	25
РОЗДІЛ 2	
ОДНОФАЗНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ .....	27
2.1. Синусоїдальні величини (ЕРС, струм, напруга) та їх графічне зображення. Форми подання електротехнічних величин.....	28
2.2. Основні елементи в колах змінного струму.....	34
2.2.1. Активні елементи (резистори).....	35
2.2.2. Ємнісні елементи (конденсатори).....	37
2.2.3. Ідеальні індуктивні елементи .....	39
2.2.4. Реальні індуктивні елементи .....	41
2.3. Потужність в колах змінного струму .....	42
2.4. Коефіцієнт потужності.....	48
2.4.1. Трикутники потужностей, напруг та опорів .....	48
2.5. Нерозгалужене коло змінного струму з активним опором, індуктивністю та ємністю .....	49
2.5.1. Розрахунок нерозгалуженого кола з активним опором, індуктивністю та ємністю. Другий закон Кірхгофа .....	49
2.5.2. Резонанс напруг .....	51
2.6. Розгалужене коло з активним опором, індуктивністю та ємністю.....	52
2.6.1. Розрахунок розгалуженого кола.....	52
2.6.2. Резонанс струмів.....	55
2.6.3. Компенсація реактивної потужності .....	57
Питання для самоперевірки до розділу 2 .....	60
Приклади розв'язання задач до розділу 2 .....	61

Задачі для самостійного розв'язання до розділу 2.....	65
РОЗДІЛ 3	
ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА .....	68
3.1. Попередні відомості й визначення .....	68
3.2. Спосіб об'єднання в трифазне коло «зірка» («Y») .....	69
3.2.1. Властивості з'єднання «зірка - зірка» («Y - Y») .....	71
3.2.2. Послідовність розрахунку трифазного кола «зірка-зірка».....	72
3.3. Схема об'єднання приймачів в трифазне коло за схемою «трикутник-трикутник» .....	74
3.3.1. Властивості схеми «трикутник» .....	75
3.3.2. Послідовність розрахунку схеми .....	75
3.4. Порівняльна характеристика схем «Y» й «Δ» .....	77
3.5. Підключення трифазних приймачів до мережі .....	77
3.6. Аварійні режими роботи трифазних схем «зірка» та «трикутник».....	78
3.6.1. Обрив лінійного дроту в схемі «зірка» .....	78
3.6.2. Коротке замикання однієї з фаз в схемі «зірка».....	79
3.6.3. Обрив однієї з фаз в схемі «трикутник» .....	80
3.6.4. Обрив одного лінійного дроту в схемі «трикутник» .....	81
3.7. Потужність в трифазних схемах .....	82
Питання для самоконтролю до розділу 3.....	84
Приклади розв'язання задач до розділу 3 .....	85
Задачі для самостійного розв'язання до розділу 3.....	89
РОЗДІЛ 4 .....	91
ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ .....	91
4.1. Електровимірювальні прилади .....	91
4.1.1. Загальні відомості про електровимірювальні прилади .....	91
4.1.2. Класифікація електровимірювальних приладів .....	93
4.1.3. Вибір електровимірювального приладу.....	94
4.1.4. Побудова та фізичні принципи дії електровимірювальних приладів різних систем .....	95
4.2. Практичні електровимірювання .....	99
4.2.1. Вимірювання сили струму.....	99
4.2.2. Вимірювання напруги .....	101
4.2.3. Вимірювання активної потужності .....	102
4.2.5. Вимірювання коефіцієнта потужності .....	104
4.2.6. Вимірювання опорів.....	104
Питання для самоконтролю до розділу 4.....	106
Приклади розв'язання задач до розділу 4.....	107
Задачі для самостійного розв'язання до розділу 4.....	109

## РОЗДІЛ 5

ТРАНСФОРМАТОРИ .....	111
5.1. Призначення трансформаторів .....	111
5.3. Втрати енергії в трансформаторі .....	115
5.4. Дослід холостого ходу трансформатора .....	115
5.5. Дослід короткого замикання трансформатора .....	117
5.6. Робота трансформатора під навантаженням. Зовнішні характеристики однофазного трансформатора .....	118
5.7. Конструкції однофазних трансформаторів .....	121
5.8. Трифазні трансформатори .....	123
5.9. Схеми та групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора .....	124
Питання для самоконтролю до розділу 5 .....	126
Приклади розв'язання задач до розділу 5 .....	127
Задачі для самостійного розв'язання до розділу 5 .....	130

## РОЗДІЛ 6

ЕЛЕКТРИЧНІ ДВИГУНИ .....	132
6.1. Поняття про електродвигун .....	132
6.2. Класифікація двигунів .....	133
6.3. Двигун постійного струму та принцип його дії .....	135
6.3.1. Конструкція двигуна постійного струму (ДПС) .....	137
6.3.2. Різновиди двигунів постійного струму .....	138
6.3.3. Рівняння роботи електродвигуна .....	140
6.3.4. Пуск двигуна постійного струму з паралельним збудженням .....	141
6.3.5. Регулювання частоти обертання .....	142
6.4. Асинхронні двигуни .....	144
6.4.1. Конструкція та принцип дії асинхронного двигуна .....	144
6.4.2. Коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності та механічні характеристики асинхронного двигуна. Номінальний струм двигуна .....	148
6.4.3. Пуск асинхронного двигуна .....	151
6.4.4. Однофазний асинхронний двигун .....	151
6.5. Синхронні двигуни .....	152
Питання для самоконтролю до розділу 6 .....	154
Приклади розв'язання задач до розділу 6 .....	155
Задачі для самостійного розв'язання для розділу 6 .....	158

## РОЗДІЛ 7

ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ .....	160
7.1. Джерела та схеми електропостачання підприємств .....	160
7.2. Розрахунок повної електричної потужності навантажень .....	161

7.3. Компенсація реактивної потужності .....	163
Повна споживана потужність .....	163
7.4. Розрахунок фазних струмів .....	165
7.5. Принципи вибору силових щитів об'єктів .....	166
електропостачання .....	166
7.6. Загальні принципи вибору кабелів та дротів .....	166
7.7. Визначення пікових навантажень та вибір пристроїв захисту електромереж підприємства .....	168
7.7.1. Пікові навантаження .....	168
7.7.2. Вибір запобіжників та автоматичних вимикачів .....	169
7.8. Розрахункові навантаження освітлювальних установок .....	170
7.9. Заземлення .....	171
7.9.1. Занулення .....	171
7.9.2. Розрахунок робочого заземлення .....	172
7.9.3. Послідовність розрахунку заземлення .....	173
Питання для самоконтролю до розділу 7 .....	177
Приклади розв'язання задач до розділу 7 .....	178
Задачі для самостійного розв'язання до розділу 7 .....	181
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	183
ДОДАТОК А .....	185
ДОДАТОК Б .....	186
ДОДАТОК В .....	188
ПРЕДМЕТНИЙ ПОКАЖЧИК .....	191

## ПЕРЕДМОВА

Навчальний посібник «Електротехніка» призначений для студентів будівельних вищих навчальних закладів спеціальностей 192 «Будівництво та цивільна інженерія», 133 «Галузеве машинобудування». Навчальний посібник «Електротехніка» повинен допомогти студентам опанувати основні розділи електротехніки:

- теорія електричних кіл (однофазних та трифазних);
- електричні вимірювання;
- електрообладнання;
- основи електропостачання та розподілу електроенергії.

На викладання електротехнічних дисциплін, таких, як «Електротехніка у будівництві», «Електропостачання та електрообладнання у будівництві», «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка», в будівельних ВНЗ відводиться небагато навчальних годин. Але глибокі знання та практичні навички в галузі електротехніки та електропостачання є необхідними для якісної підготовки інженерно-технічних фахівців будівельної та інших видів промисловості.

Курс електротехніки є дисципліною фундаментальної підготовки інженерів неелектротехнічних спеціальностей, які хоч і не будуть в процесі практичної роботи проектувати та створювати електротехнічні установки, але повинні кваліфіковано їх експлуатувати, приймати участь в розробці автоматизованого управління виробництвом, створенні енергозберігаючих технологій, мати змогу правильно використовувати електротехнічну апаратуру та електрообладнання під час проведення наукових досліджень.

Інженер будь-якої спеціальності має знати устрій, принцип дії, характеристики та експлуатаційні можливості електричних машин, електровимірювальних пристроїв, різноманітного електрообладнання. Сучасний кваліфікований інженер повинен вміти управляти електротехнічним обладнанням та регулювати його.

Існуючи підручники та навчальні посібники з електротехнічних дисциплін найчастіше розраховані на досить великий обсяг як лекційних, так і лабораторних та практичних занять, ніж це передбачено в будівельних ВНЗ. Користування такою навчальною літературою, призначеною скоріше для майбутніх фахівців з електротехніки, ніж для будівельників, є доволі складною задачею для наших студентів. При цьому деякі теми, які розглядаються на лекціях, потребують пог-



либленого вивчення, а деякий матеріал студенти змогли б опанувати самостійно, користуючись навчальною літературою.

Отже, виявляється потреба в створенні навчального посібника з електротехніки для студентів будівельних ВНЗ, в якому б висвітлювались усі необхідні розділи, при чому викладання було б досить стислим і в той же час зрозумілим.

Зміст та методика викладання матеріалу навчального посібника «Електротехніка» враховує, що під час вивчення курсу фізики студенти досягли достатнього рівня знань стосовно електричних явищ та фізичних законів електромагнітного поля, а також володіють математичним апаратом на достатньому рівні.

За допомогою цього навчального посібника студенти як різноманітних будівельних спеціальностей, так і майбутні машинобудівники, матимуть змогу поглибити свої знання з тих тем, які викладаються в лекційному курсі, отримати додаткові практичні знання та навички, необхідні в роботі. Приклади розв'язання задач, питання для самоперевірки та задачі для самостійного розв'язання мають допомогти студентам в оволодінні електротехнікою. Робота з навчальним посібником «Електротехніка» послугує вдалим доповненням до вже існуючих методичних матеріалів: конспекту лекцій, методичних вказівок до розв'язання задач з електротехніки, методичних вказівок до лабораторних робіт з усіх електротехнічних дисциплін.

Автор висловлює велику подяку всім, хто брав участь у редагуванні, рецензуванні посібника, та й просто допомагав корисними порадами.

## ЗАДАЧІ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЇЇ МІСЦЕ В СУЧАСНОМУ СВІТІ

Задачею електротехніки як сучасної галузі науки і техніки є розв'язання питань, що стосуються виробництва, передачі, перетворення та використання електроенергії в процесах промислового виробництва, будівництві, наукових дослідженнях, побуті.

Закони електрики та електромагнетизму створюють підґрунтя функціонування багатьох електричних, електромагнітних та електронних пристроїв та систем. В усіх галузях діяльності людини широко використовуються різноманітні машини й механізми, нагрівальні та освітлювальні прилади. Використання електроенергії зробило можливим створення нових технологічних процесів в промисловості, дозволило автоматизувати сучасне виробництво. Важко недооцінити роль електроенергії та різноманітних електричних та електронних пристроїв в розвитку науки, освіти та й побуті сучасної людини.

Практичні навички фахівців неелектротехнічних спеціальностей повинні полягати в умінні розраховувати струми та напруги в різноманітних електричних схемах, визначати потужність того чи іншого електричного пристрою, забезпечити правильне підключення та безпечну експлуатацію електротехнічного обладнання.

### Електричне коло та його основні елементи

**Джерело електроенергії** (електричний генератор, акумулятор, сонячна батарея, вітровий генератор тощо) слугує для перетворення неелектричних видів енергії (механічної, хімічної, світлової тощо) в енергію електричного струму. Джерело характеризують два основні параметри – електрорушійна сила (ЕРС)  $\mathcal{E}$  та внутрішній опір  $R_0$  в колах постійного струму або повний внутрішній опір  $Z_0$  в колах змінного струму.

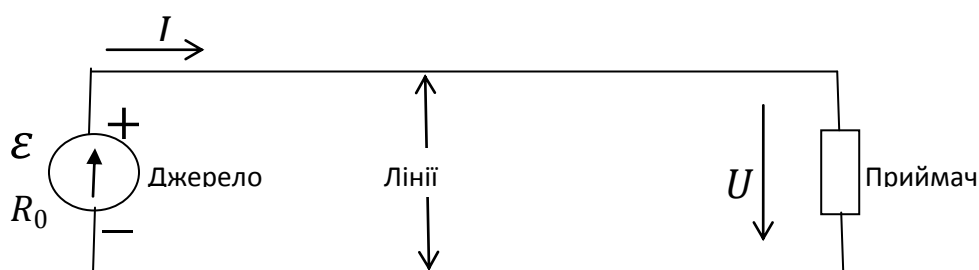
**Приймач** (споживач) електроенергії – це пристрій, в якому електроенергія перетворюється в енергію іншого виду: в електродвигунах – в механічну, в електронагрівачах – в теплову, в освітлювальних приладах – в світлову, в конденсаторах – в енергію електричного поля, в котушках індуктивності – в енергію магнітного поля.

Джерело електроенергії та її приймачі між собою зв'язують так звані **лінії** – провідники, якими тече струм з малими втратами електроенергії (інколи під час розрахунків цими втратами взагалі

нехтують). Лінії – це різноманітні лінії електропередачі, лінії зв'язку, електричні мережі, з'єднувальні дроти. В разі необхідності урахування опору ліній на електричній схемі вони позначаються у вигляді окремих опорів.

Усю сукупність приладів, з яких складається шлях електричного струму, називають **електричним колом**. Звісно, крім джерел, приймачів, з'єднувальних дротів до електричних кіл також входять **перетворювачі** електроенергії (трансформатори, випрямлячі, перетворювачі частоти), а також комутуючі, захисні та електровимірювальні пристрої.

Спрощена схема енергопостачання споживача



На наведеній схемі додатні напрями електрорушійної сили  $\mathcal{E}$ , напруги на приймачеві  $U$ , струму  $I$  показані стрілками.

За додатний напрям ЕРС між виведеннями джерела приймають напрям, в якому позитивні заряди пересувалися би під дією сторонніх сил, тобто від меншого потенціалу до більшого.

За додатний напрям напруги та струму приймають напрям, в якому пересувалися би позитивні заряди під дією електричного поля, тобто від більшого потенціалу до меншого.

В якості основних елементів в електротехніці розглядаються три види приймачів: резистивний (активний)  $R$ , ємнісний  $C$ , та індуктивний  $L$ . Два останні відносяться до реактивних приймачів та використовуються в колах змінного струму. Резистивні елементи використовуються як в колах постійного, так і змінного струму.

# РОЗДІЛ 1

## ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Задачею теорії електричних кіл є розрахунок сил струмів та напруг на кожній ділянці електричного кола.

### 1.1. Електричні кола. Основні відомості та визначення

Найважливішими поняттями електротехніки є електричний струм, напруга й електричний опір. Ці поняття докладно розглядалися в курсі фізики, однак, не зайвим буде нагадати наступні визначення:

– *електричним струмом*  $I$  називається впорядкований рух електричних зарядів. Сила струму дорівнює заряду, що проходить крізь переріз провідника за одиницю часу, та вимірюється в Амперах ( $A$ );

– *напругою (спаданням напруги)*  $U$  на однорідній ділянці кола називається різниця потенціалів електричного поля на кінцях цієї ділянки. Одиницею виміру напруги є Вольт ( $B$ );

– *електричним опором (або просто - опором)*  $R$  називається величина, що залежить від форми й розмірів провідника, а також від властивостей матеріалу, з якого він зроблений.

$$R = \rho \frac{\ell}{S}, \quad (1.1)$$

де  $\rho$  – питомий опір провідника;

$\ell$  – довжина провідника;

$S$  – площа поперечного перерізу провідника.

Поняття опору впливає з експериментально встановленого Георгом Омом закону, відповідно до якого *сила струму, що тече в провіднику, пропорційна спаданню напруги на цьому провіднику:*

$$I = gU \quad (1.2)$$

Коефіцієнт пропорційності  $g$  називається *електричною провідністю*, а обернена провідності величина  $R$  – *опором провідника*.

$$R = \frac{1}{g} \quad (1.3)$$

Одиницею виміру опору є Ом ( $Om$ ).

Основною характеристикою електричного струму є **сила струму** (в електротехніці прийнято говорити просто «струм»). Таким чином, струм в електротехніці – це, з одного боку, фізичне явище, а з іншого

боку – характеристика цього явища.

Електричний струм за характером його зміни підрозділяється на постійний і змінний.

**Постійним** називається струм, що не змінюється в часі. Струм, що не підкоряється цій умові, тобто змінюється із часом, називається **змінним**.

Прийняті умовні позначення сили струму:

$I$  – для фіксованих значень струму,

$i(t)$  – для залежних від часу значень струму.

Аналогічно, **напруга**, що не змінюється із часом, називається **постійною** ( $U$ ), а та, що змінюється – **змінною** і позначається  $u(t)$ .

Застосовувані в електротехніці поняття електричної енергії, потужності, частоти електричного струму, а також електроємності й індуктивності провідника були уведені в курсі фізики. В додатку А наведені найбільш поширені одиниці виміру електротехнічних величин, їх позначення, а також співвідношення між основними та похідними одиницями виміру.

**Електрорушійна сила (ЕРС,  $\mathcal{E}$ )** – це сила неелектричної природи, яка переміщує електричні заряди проти напрямку дії сил електричного поля. Одиниця виміру ЕРС – Вольт ( $V$ ).

**Потужність споживання енергії споживачем** дорівнює добутку напруги на приймачеві на силу струму через нього:

$$P = U \cdot I \quad (1.4)$$

**Потужність затрат енергії джерелом** дорівнює добутку ЕРС джерела на силу струму через нього:

$$P_{дж} = \mathcal{E} \cdot I \quad (1.5)$$

Одиниця виміру потужності – Ватт ( $W$ ).

**Вузлом** електричного кола називають точку, в якій з'єднуються не менше трьох провідників. Якщо два вузла електричного кола з'єднані лінією, то на схемі їх можна замінити одним вузлом.

## 1.2. Закони електричних кіл постійного струму

Протікання струмів в електричних колах регламентується законами Кірхгофа і балансом потужностей.

**Перший закон Кірхгофа** описує співвідношення струмів у вузлах електричного кола, тобто в місцях з'єднання трьох і більше провідників:

**алгебраїчна сума струмів, що сходяться в будь-якому вузлі електричного кола, дорівнює нулю:**

$$\sum I_k = 0 . \quad (1.6)$$

При обчисленні алгебраїчної суми струми, що входять у вузол, і струми, що виходять з вузла, беруться з протилежними знаками.

Інше формулювання цього закону: *Сума вхідних у вузол струмів дорівнює сумі струмів, що виходять із нього.*

**Другий закон Кірхгофа** описує напруги в замкнених контурах електричного кола: **алгебраїчна сума електрорушійних сил (ЕРС) в будь-якому замкненому контурі електричного кола дорівнює сумі падінь напруги на елементах цього контуру:**

$$\sum \varepsilon_n = \sum U_m . \quad (1.7)$$

При обчисленні алгебраїчних сум ЕРС, що діють уздовж обраного напрямку обходу контуру, беруться зі знаком "+", а ЕРС, які діють проти обраного напрямку обходу контуру, беруться зі знаком "-"; аналогічно визначаються знаки напруг.

**Баланс потужності** виконується в замкнених електричних колах в цілому: **алгебраїчна сума потужностей, що витрачаються всіма джерелами ЕРС в замкненому електричному колі, дорівнює сумі потужностей, споживаних приймачами в цьому колі:**

$$\sum P_{дж_n} = \sum P_{пр_m} ; \text{ або } \sum (\varepsilon_n \cdot I_k) = \sum (U_m \cdot I_m) \quad (1.8)$$

При обчисленні алгебраїчної суми потужності джерел, в яких ЕРС збігаються за напрямком зі струмом, беруться зі знаком "+", а

потужності джерел, в яких ЕРС спрямовані протилежно струму, беруться зі знаком "-".

**Лінійним колом** називається коло, що складається з лінійних елементів, тобто таких елементів, сила струму через які прямо пропорційна напрузі на них:  $I = gU$ . Для лінійних елементів є справедливим **закон Ома для ділянки кола**: сила струму через лінійний елемент прямо пропорційна напрузі на елементі і обернено пропорційна його опору:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.9)$$

Для лінійних елементів **закон Джоуля – Ленца** може бути висловлений одним з наступних співвідношень:

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R} = UI, \quad (1.10)$$

де  $P$  – потужність виділення тепла при проходженні струму через елемент.

Важливою характеристикою лінійної електричної схеми є її **еквівалентний опір**: якщо до схеми підвести напругу  $U$  і виміряти струм  $I$ , що протікає при цьому через схему, то відношення величини поданої напруги до зареєстрованої сили струму називатиметься еквівалентним опором схеми:

$$R_{\text{екв}} = \frac{U}{I}, \quad (1.11)$$

тобто **еквівалентний опір** - це такий опір, яким можна замінити схему відповідно до закону Ома для ділянки кола. Поряд з еквівалентним опором схеми можна визначити її еквівалентну провідність:

$$g_{\text{екв}} = \frac{1}{R_{\text{екв}}}. \quad (1.12)$$

Еквівалентний опір схеми можна визначити і теоретично, не вдаючись до досліду. Для знаходження еквівалентних опорів за певних включеннях елементів існують прості правила.

### 1.3. Послідовне включення елементів

Елементи включені послідовно, якщо між ними відсутні вузли схеми. Послідовне з'єднання трьох приймачів показано на рис. 1.1.

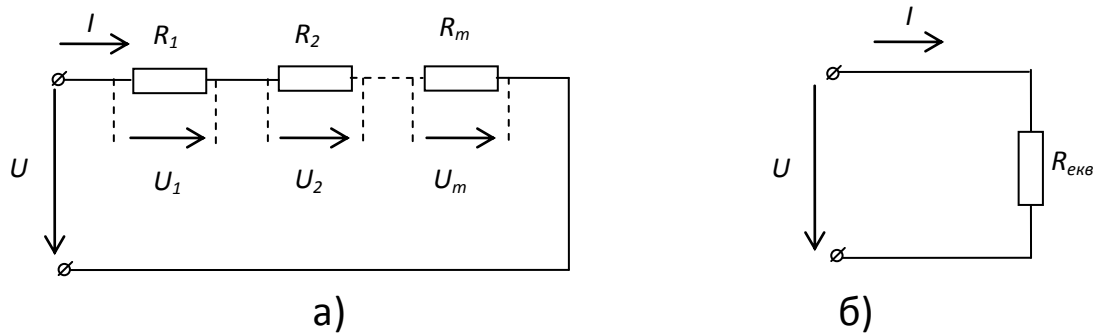


Рис. 1.1. Схема послідовного з'єднання приймачів (а)  
та її еквівалентна схема (б)

**Еквівалентний опір послідовно з'єднаних приймачів** дорівнює сумі опорів цих приймачів, або:

$$R_{екв} = \sum R_m . \quad (1.13)$$

#### 1.4. Паралельне включення елементів

Елементи включені паралельно, якщо вони підключені до однієї і тієї ж пари вузлів схеми. Паралельне з'єднання трьох приймачів показано на рис. 1.2.

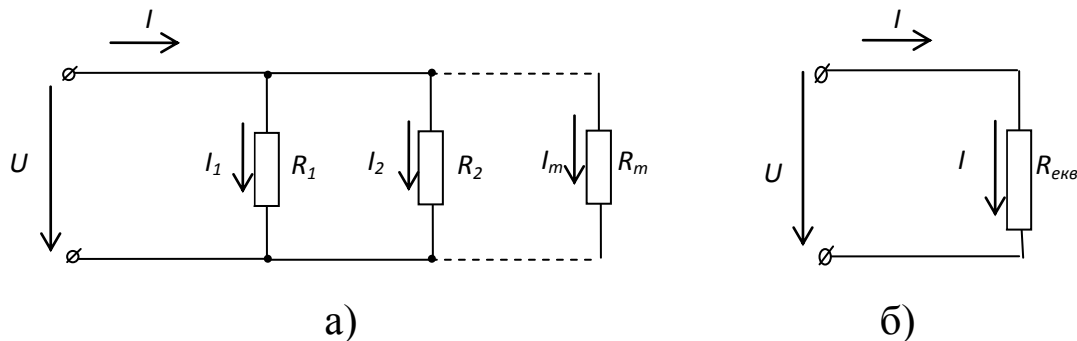


Рис. 1.2. Схема паралельного з'єднання (а)  
та її еквівалентна схема (б)

**Провідність паралельно з'єднаних приймачів** дорівнює сумі провідностей цих приймачів:

$$\frac{1}{R_{екв}} = \sum \frac{1}{R_m} . \quad (1.14)$$

**Звідси випливає, що при паралельному з'єднанні приймачів**



$$R_{\text{екв}} = \frac{1}{\sum \frac{1}{R_m}} \quad (1.15)$$

### 1.5. Змішане включення елементів

Змішане включення елементів – це будь-яка комбінація послідовних та паралельних з'єднань елементів. Розрахунок еквівалентного опору складних електричних схем проводиться в кілька етапів. На першому етапі в схемі відшукують фрагменти, які є послідовними або паралельними з'єднаннями, і обчислюють їх еквівалентні опори. Потім замінюють кожен розрахований фрагмент схеми на один приймач, опір якого дорівнює еквівалентному опору даного фрагмента.

Після таких заміन схема стає простіше, і в ній можна знову шукати фрагменти з послідовно або паралельно включеними елементами. Процедуру заміни фрагментів схеми на їх еквівалентні опори повторюють до тих пір, поки вся схема не буде зведена до одного елемента, опір якого і буде еквівалентним опором всієї схеми. Приклад такої схеми показаний на рис. 1.3.

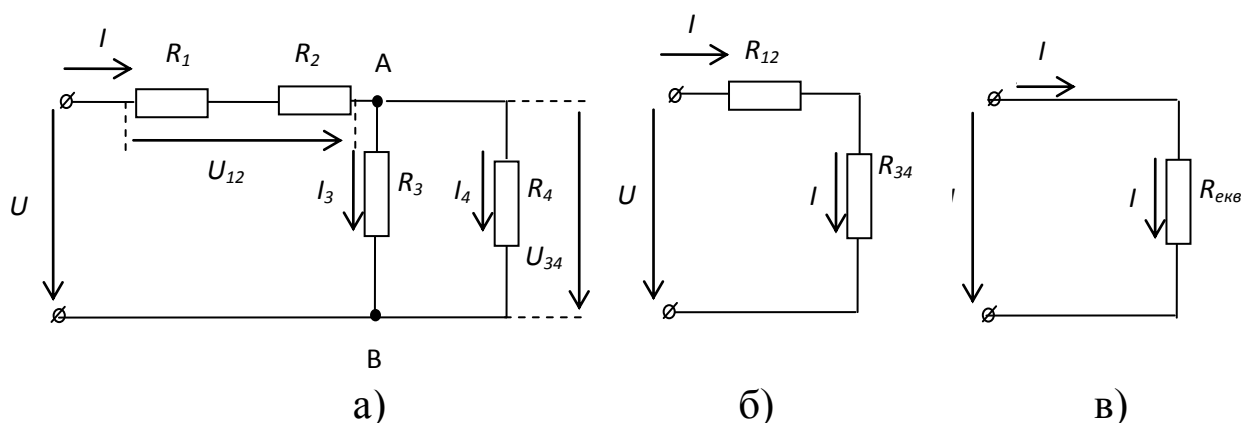


Рис. 1.3. Схема змішаного з'єднання елементів (а) та її еквівалентні схеми б), в)

У цій схемі можна виділити два паралельні елементи, включені між вузлами А та В:  $R_3$  та  $R_4$ . Замінімо цей фрагмент схеми одним резистором  $R_{34}$ ; його еквівалентний опір знаходиться з рівняння

$$\frac{1}{R_{34}} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4},$$

тобто:

$$R_{34} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4}} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4}.$$

Послідовно з'єднані елементи  $R_1$  та  $R_2$  теж можна замінити еквівалентним опором

$$R_{12} = R_1 + R_2.$$

Тепер наша схема зведена до послідовного з'єднання елементів  $R_{12}$  та  $R_{34}$ :

$$R_{\text{екв}} = R_{12} + R_{34}.$$

Остаточно отримуємо:

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_2 + \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} \quad (1.16)$$

Підкреслимо, що для змішаних схем відсутня загальна формула знаходження еквівалентного опору: для кожної конкретної схеми знаходиться своя власна формула для  $R_{\text{екв}}$ .

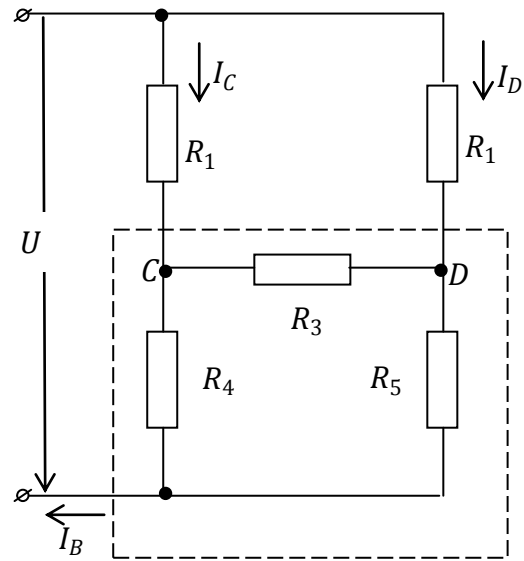


Рис. 1.4. Міст Уїтстона

### 1.6. Перетворення «трикутник-зірка»

Крім послідовного, паралельного, змішаного з'єднань елементів існують й інші схеми, які неможливо звести до комбінації послідовно й паралельно з'єднаних елементів. Наприклад, в одному з різновидів мостових схем, яка зветься мостом Уїтстона, жодну пару опорів у цій схемі не можна кваліфікувати як послідовно або паралельно включені.

Отже, до цієї схеми незастосовні основні правила знаходження еквівалентних опорів. Розрахунок еквівалентного опору схем такого типу здійснюється методом еквівалентного перетворення «трикутник» - «зірка».

На рис. 1.4 наведений один з різновидів мостових схем, який називають чотириплечим мостом, або мостом Уїтстона. Жодну пару опорів у цій схемі не можна вважати з'єднаною послідовно або паралельно.

При еквівалентному перетворенні частина електричного кола замінюється новими елементами з іншим їх з'єднанням. При цьому опори нових елементів повинні бути такими, щоб проведена заміна не

призвела до зміни розподілу струмів та напруг у ділянках кола, не підлеглих змінам. Оскільки властивості кола виявляються в результатах вимірів напруг між вузлами та струмів, що проходять по гілках кола, то при такій заміні нове коло виявиться еквівалентним старому.

На рис. 1.4 опори  $R_3, R_4, R_5$  з'єднані трикутником. Розглянемо перетворення «трикутник – зірка» (« $\Delta$ - $Y$ »). Ділянку кола  $R_{BC}-R_{CD}-R_{BD}$ , яка обмежена вузлами  $B, C, D$  (рис. 1.5, ліворуч), замінимо новими елементами  $R_B-R_C-R_D$ , з'єднаними за схемою «трипроменева зірка» і підключеними до тих же місць вихідного кола  $B, C, D$  (рис. 6, праворуч). При цьому в новій схемі, яку називають схемою заміщення, додається ще один вузол –  $E$ .

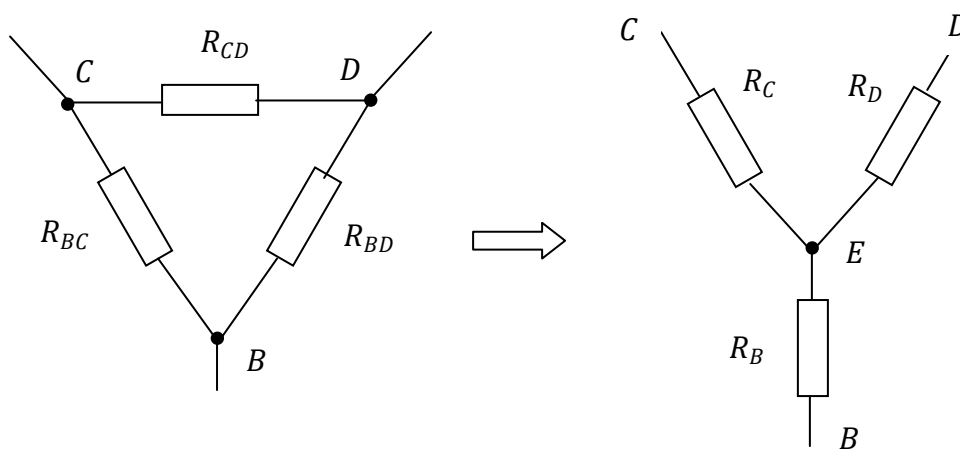


Рис. 1.5. Еквівалентне перетворення «трикутник–зірка»

Застосуємо це перетворення для розрахунку еквівалентного опору чотириплечого моста. Замінимо резистори  $R_3, R_4, R_5$ , включені між вузлами  $B, C, D$  (виділена пунктиром область на рис. 1.4) новими резисторами  $R_B, R_C, R_D$ , з'єднаними в трипроменевою зірку (виділена область на рис. 1.6). В результаті заміни струм, що виходить з вузла  $B$ , та струми, що втікають у вузли  $C$  і  $D$  (струми  $I_B, I_C$  й  $I_D$  відповідно), мають не змінитися. Це означає, що не повинна змінитись провідність між вузлами  $B-C, B-D, C-D$ .

Розглянемо провідність обох схем між вузлами  $B-C$ . У вихідній схемі ця провідність здійснюється по двох каналах протікання струму: через резистор  $R_4$  (його провідність дорівнює  $\frac{1}{R_4}$ ) та через

ланцюжок послідовно з'єднаних резисторів  $R_3 - R_5$ . Провідність цього ланцюжка становить  $\frac{1}{R_3+R_5}$ . Сумарна провідність обох каналів струму становить:

$$\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3+R_5}.$$

У схемі заміщення провідність між цими ж вузлами здійснюється по ланцюжку резисторів  $R_B - R_C$ , провідність цього ланцюжка:

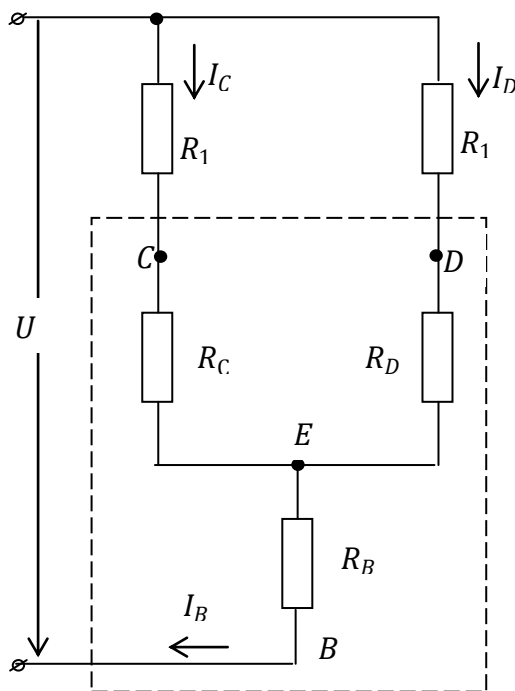


Рис. 1.6. Еквівалентна заміна « $\Delta$ - $Y$ »

$$\frac{1}{R_B+R_C}.$$

Провідності в обох схемах, як вже відзначалось, мають бути рівними:

$$\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3+R_5} = \frac{1}{R_B+R_C}.$$

Аналогічно розглядаються провідності в обох схемах між вузлами  $B-D$  та  $C-D$ .

У підсумку отримаємо систему з трьох лінійних рівнянь (1.17) із трьома невідомими, яку можливо розв'язати відносно  $R_B, R_C, R_D$ , тобто виразити останні через  $R_3, R_4, R_5$ :

$$\begin{cases} \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3+R_5} = \frac{1}{R_B+R_C} \\ \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_3+R_4} = \frac{1}{R_B+R_D} \\ \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4+R_5} = \frac{1}{R_C+R_D} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} R_B = \frac{R_4 \cdot R_5}{R_3+R_4+R_5} \\ R_C = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3+R_4+R_5} \\ R_D = \frac{R_3 \cdot R_5}{R_3+R_4+R_5} \end{cases} \quad (1.17)$$

Розрахована в такий спосіб схема заміщення за своїми властивостями еквівалентна вихідній схемі. Після заміщення розрахунок еквівалентного опору схеми є цілком зрозумілим.

Замінімо послідовний ланцюжок  $R_1 - R_C$  на один резистор  $R_{1C} = R_1 + R_C$ . Аналогічно замінімо ланцюжок  $R_2 - R_D$  на один резистор  $R_{2D} = R_2 + R_D$ . Тепер у схемі можна виділити два паралельних елементи:  $R_{1C}$  та  $R_{2D}$ . Замінімо цей фрагмент одним резистором  $R_{1C2D}$ , еквівалентний опір якого можна знайти з рівняння

$$\frac{1}{R_{1C2D}} = \frac{1}{R_{1C}} + \frac{1}{R_{2D}}, \quad (1.18)$$

тобто

$$R_{1C2D} = \frac{1}{\frac{1}{R_{1C}} + \frac{1}{R_{2D}}}. \quad (1.19)$$

Таким чином,

$$R_{1C2D} = \frac{1}{\frac{1}{R_1 + R_C} + \frac{1}{R_2 + R_D}}. \quad (1.20)$$

Отже, наша схема зведена до послідовного з'єднання елементів  $R_B$  та  $R_{1C2D}$ . Остаточно отримаємо еквівалентний опір кола з рис. 1.4:

$$R_{\text{екв}} = R_{1C2D} + \frac{1}{\frac{1}{R_1 + R_C} + \frac{1}{R_2 + R_D}}. \quad (1.21)$$

### Питання для самоконтролю до розділу 1

1. Що таке лінійний елемент, лінійне коло?
2. Що означає розрахувати електричне коло?
3. Що називають вузлом електричного кола, гілкою електричного кола?
4. Що таке електричний опір, електрична провідність?
5. Від чого залежить електричний опір провідника?
6. Які з'єднання елементів називаються послідовними, паралельними, змішаними?

7. Чи вичерпують назви «послідовне», «паралельне», «змішане» всі можливі з'єднання елементів? Як ще з'єднують елементи?
8. Як формулюється 1 закон Кірхгофа?
9. Як формулюється 2 закон Кірхгофа?
10. Як визначаються знаки членів рівнянь, складених за законами Кірхгофа?
11. Що називають еквівалентним опором ділянки кола?
12. За якими формулами розраховуються еквівалентні опори при послідовному та при паралельному з'єднанні елементів?
13. Що називають електричною потужністю?
14. Як визначити потужність, не маючи ватметра?
15. Запишіть формули розрахунку потужності постійного струму, якщо відомі: а) струм та опір; б) напруга та опір; в) струм та напруга.
16. Назвіть одиниці виміру ЕРС, струму, напруги, електричного опору, електричної потужності.
17. Як зміниться потужність, яку коло з послідовним з'єднанням елементів споживає з джерела струму, якщо до кола додати ще один послідовно з'єднаний елемент?
18. Як зміниться потужність, яку коло з паралельним з'єднанням елементів споживає з джерела струму, якщо до кола додати ще один паралельно з'єднаний елемент?
19. Якщо маємо дві електричні спіралі з різними значеннями опорів, скільки варіантів потужності електронагрівача можна отримати та яким чином?

### Приклади розв'язання задач до розділу 1

*Приклад 1.* Розрахувати електричне коло, що зображене на рис.1.7. Вважати

$$U = 20 \text{ В};$$

$$R_1 = 2 \text{ Ом}; R_2 = 10 \text{ Ом};$$

$$R_3 = 3 \text{ Ом}; R_4 = 1 \text{ Ом};$$

$$R_5 = 4 \text{ Ом}; R_6 = 5 \text{ Ом}.$$

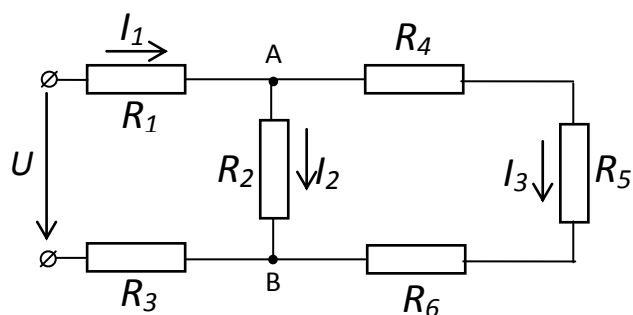


Рис. 1.7. Електрична схема до прикладу 1

*Розв'язання:*

Розрахунок електричного кола означає визначення усіх струмів його гілок ( $I_1, I_2, I_3$ ) та усіх напруг, що діють в цьому колі. Для визначення струму  $I_1$  необхідно розрахувати еквівалентний опір кола. Для цього спочатку розрахуємо еквівалентний опір для послідовно з'єднаних опорів  $R_4, R_5, R_6$ .

$$R_{456} = R_4 + R_5 + R_6 = 1 + 4 + 5 = 10 \text{ Ом.}$$

Тепер розрахуємо еквівалентний опір ділянки кола між вузлами А та В ( $R_2$  та  $R_{456}$  з'єднані паралельно):

$$R_{AB} = \frac{R_2 \cdot R_{456}}{R_2 + R_{456}} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5 \text{ Ом.}$$

Тепер еквівалентний опір кола складається з послідовно з'єднаних  $R_1, R_{AB}, R_3$ :

$$R_{\text{екв}} = R_1 + R_{AB} + R_3 = 2 + 5 + 3 = 10 \text{ Ом.}$$

Визначимо загальний струм за законом Ома:

$$I_1 = \frac{U}{R_{\text{екв}}} = \frac{20}{10} = 2 \text{ А.}$$

Напруга на елементі  $R_1$ :  $U_1 = I_1 \cdot R_1 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ В.}$

Напруга на елементі  $R_3$ :  $U_3 = I_1 \cdot R_3 = 2 \cdot 3 = 6 \text{ В.}$

Напруга між вузлами А та В:  $U_{AB} = I_1 \cdot R_{AB} = 2 \cdot 5 = 10 \text{ В.}$

Тоді

$$I_2 = \frac{U_{AB}}{R_2} = \frac{10}{10} = 1 \text{ А;}$$

$$I_3 = \frac{U_{AB}}{R_{456}} = \frac{10}{10} = 1 \text{ А.}$$

Не становить праці переконатися в тому, що закони Кірхгофа для розрахованих струмів та напруг схеми виконуються.

*Приклад 2.* До електричного кола, яке зображене на рис. 1.8, підведена постійна напруга  $U = 200 \text{ В}$ . Струм нерозгалуженої ділянки ла  $I = 0,8 \text{ А}$ .  $R_1 = 300 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 600 \text{ Ом}$ . Знайти значення  $R_3, R_4, R_5$ , якщо відомо, що вони рівні між собою.

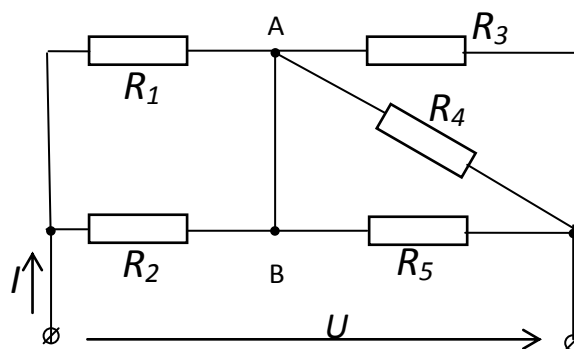


Рис. 1.8. Електрична схема до прикладу 2

*Розв'язання:*

Для розв'язання задачі перетворимо електричну схему, враховуючи, що вузли А та В можна замінити одним вузлом, бо між ними немає опору. Тоді схема буде мати вигляд, зображений на рис. 1.9. Опори  $R_1$  та  $R_2$  з'єднані паралельно, отже їх еквівалентний опір

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{300 \cdot 600}{300 + 600} = 200 \text{ Ом.}$$

Еквівалентний опір для  $R_3, R_4$  та  $R_5$ , які теж між собою з'єднані паралельно та до того ж рівні між собою за умовою задачі, дорівнює

$$R_{345} = \frac{1}{\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}} = \frac{1}{\frac{3}{R}} = \frac{R}{3}.$$

За законом Ома

$$U = I \cdot R_{\text{екв.}}$$

Еквівалентний опір усього кола можна представити тепер як  $(R_{12} + R_{345})$ . Після підстановки отримаємо:

$$U = I \cdot (R_{12} + R_{345}) = I \cdot \left(200 + \frac{R}{3}\right);$$

звідки значення невідомих опорів:

$$R = \frac{U}{I} - 200 = \frac{200}{0,8} - 200 = 50 \text{ Ом.}$$

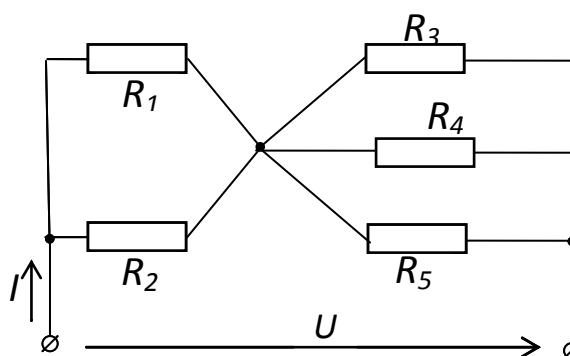


Рис. 1.9. Еквівалентна схема до прикладу 2



### Приклад 3.

Скласти рівняння законів Кірхгофа для вузлів та контурів схеми на рис. 1.10.

Розв'язання:

Для вузла А:  $I_1 - I_2 - I_3 = 0$ .

Для вузла В:  $I_2 + I_3 - I_1 = 0$ .

Для контуру  $R_1 R_4 R_5 R_6 R_3$ :

$$I_1 \cdot R_1 + I_3 \cdot R_5 + I_3 \cdot R_6 + I_1 \cdot R_3 - U = 0.$$

Для контуру  $R_4 R_5 R_6 R_2$ :

$$I_3 \cdot R_4 + I_3 \cdot R_5 + I_3 \cdot R_6 - I_2 \cdot R_2 = 0.$$

Для контуру  $R_1 R_2 R_3$ :

$$I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 + I_1 \cdot R_3 - U = 0.$$

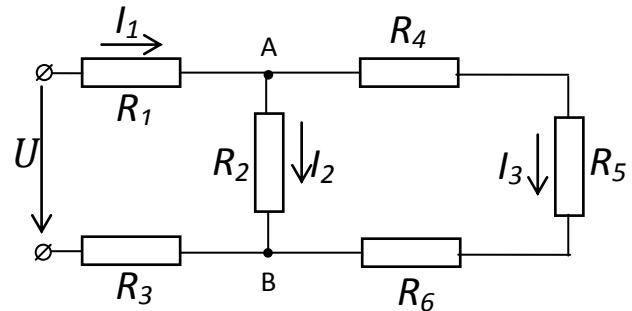


Рис. 1.10. Електрична схема до прикладу 3

### Задачі для самостійного розв'язання до розділу 1

1. З вольфраму, питомий опір якого становить  $0,054 \text{ Ом м/мм}^2$ , виготовлено провідник довжиною 30 см. Визначити діаметр цього провідника, якщо його опір  $0,05 \text{ Ом}$ .

Відповідь:  $d=3,1 \text{ мм}$ .

2. Три провідники з'єднані паралельно. Опір першого  $6 \text{ Ом}$ , другого  $8 \text{ Ом}$ , третього –  $12 \text{ Ом}$ . Струм, що тече другим провідником, дорівнює  $3 \text{ А}$ . Визначити загальний струм кола.

Відповідь:  $I = 9 \text{ А}$ .

3. До обмотки збудження електродвигуна, яка має опір  $R_1 = 50 \text{ Ом}$ , послідовно підключено реостат, опір якого можна змінювати від  $0$  до  $100 \text{ Ом}$ . Визначити граничні значення зміни струму обмотки збудження за допомогою реостату. Напряга, що прикладена до кола, становить  $200 \text{ В}$ .

*Відповідь:*  $I_1 = 4 \text{ А}$ ,  $I_2 = 1,33 \text{ А}$ .

4. Визначити опір мідного кабелю, який складається з 7 дротів діаметром 1,7 мм, якщо довжина кабелю 706 м, а питомий опір міді 0,018 Ом м/мм<sup>2</sup>.

*Відповідь:*  $R = 0,8 \text{ Ом}$ .

5. На цоколі електричної лампи напис: 100 Вт, 220 В. Який опір лампи?

*Відповідь:*  $R = 484 \text{ Ом}$ .

6. Потужність електродвигуна постійного струму 5,5 кВт. Який струм споживає двигун, якщо напруга мережі 220 В?

*Відповідь:*  $I = 25 \text{ А}$ .

7. Розрахувати потужність, споживану електричною схемою на рис. 1.10, якщо відомо, що  $R_1 = 15 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 35 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 10 \text{ Ом}$ ;  $R_5 = 20 \text{ Ом}$ ;  $R_6 = 70 \text{ Ом}$ ,  $U = 20 \text{ В}$ .

*Відповідь:*  $P = 4 \text{ Вт}$ .

8. Якою буде потужність електричної схеми з рис. 1.10, якщо при тих самих опорах  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$  включити послідовно з опором  $R_1$  опір  $R_7 = 25 \text{ Ом}$ , а послідовно з опором  $R_3$  опір  $R_8 = 25 \text{ Ом}$ ? Визначити струм, що виходить з джерела напруги.

*Відповідь:*  $P = 2,67 \text{ Вт}$ ;  $I = 1,33 \text{ А}$ .

## РОЗДІЛ 2

### ОДНОФАЗНІ КОЛА ЗМІННОГО СТРУМУ

Змінним струмом можна назвати будь-який струм, що змінюється з часом. В електротехніці найчастіше використовується струм, що змінюється за синусоїдальним законом. Змінний синусоїдальний струм широко використовується в усіх галузях промисловості та в побуті. Це обумовлено тим, що генератори змінного синусоїдального струму більш економічні, надійні та мають простішу конструкцію у порівнянні з джерелами постійного струму. Крім того, саме змінний синусоїдальний струм можливо трансформувати, тобто підвищувати чи знижувати напругу за допомогою трансформаторів, що робить можливим передачу електроенергії на великі відстані. До того ж двигуни, що працюють саме на змінному струмі, частіше за все використовуються для приводу найрізноманітніших виробничих механізмів. У випадку необхідності змінний струм може бути перетворений на постійний струм.

Розглянемо принцип дії генератора синусоїдальної ЕРС.

Якщо металеву рамку примусити обертатися в однорідному магнітному полі, магнітний потік, зчеплений з контуром рамки, буде змінюватися за законом:

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t,$$

де  $\omega t$  – кут між нормаллю до рамки та силовими лініями магнітного поля.

Магнітний потік буде максимальним, коли площа рамки перпендикулярна до силових ліній магнітного поля, і дорівнюватиме нулю, коли лінії магнітного поля не перетинають площину рамки.

Згідно закону магнітної індукції, при обертанні рамки в магнітному полі в ній буде виникати ЕРС індукції

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi}{dt} = \Phi_m \omega \sin \omega t.$$

Якщо замкнути електричне коло рамки та увімкнути в нього гальванометр, то стрілка гальванометра буде відхилятися то в один, то в інший бік, що свідчить про те, що струм змінює напрям. Дійсно, у відповідності до правила Ленца індукційний струм у замкненому провіднику завжди має такий напрям, що створюваний цим струмом власний магнітний потік протидіє тим змінам зовнішнього магнітного потоку, які збуджують індукційний струм. Отже, в колі рамки

з'являється струм, який змінюється за синусоїдальним законом. Носії заряду в провіднику(електрони) при цьому здійснюють коливальні рухи під дією синусоїдальної ЕРС.

Для отримання синусоїдальної ЕРС в генераторі байдуже, чи буде провідник перетинати нерухоме магнітне поле, чи магнітне поле, що рухається буде перетинати нерухомий провідник.

Найчастіше в генераторах змінного струму котушка статора є нерухомою (вона замінює рамку), а обертається ротор – магніт або електромагніт (рис. 2.1), який постачається постійним струмом від спеціального генератора – збудника постійного струму, або від спеціального пристрою – випрямляча. Обертання ротора забезпечується за рахунок води, що падає (гідроелектростанції), дії вітру (вітрові електростанції), дії газу або пари під тиском (теплові електростанції), тощо.

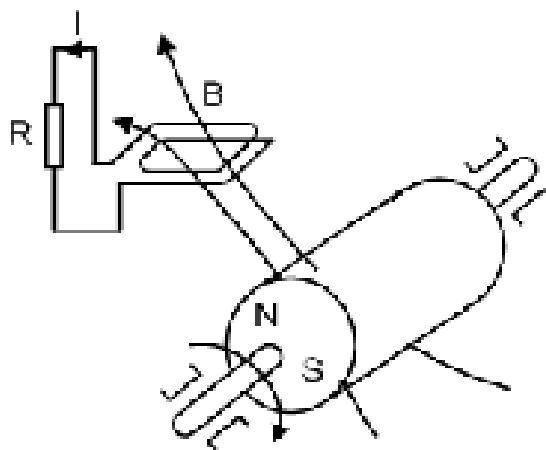


Рис. 2.1. Принципова схема генератора змінного струму

## 2.1. Синусоїдальні величини (ЕРС, струм, напруга) та їх графічне зображення. Форми подання електротехнічних величин

В лінійних електричних колах синусоїдальні струми виникають під дією синусоїдальних електрорушійних сил (ЕРС), які, в свою чергу, з'являються при рівномірному обертанні провідника у вигляді рамки в однорідному магнітному полі.

Залежність від часу **синусоїдальної ЕРС** має вигляд:

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_m \sin(\omega t + \varphi_{0\mathcal{E}}), \quad (2.1)$$

де  $\mathcal{E}$  – миттєве (поточне) значення ЕРС;

$\mathcal{E}_m$  – амплітудне значення ЕРС;

$\omega$  – циклічна частота, або кутова швидкість обертання рамки в магнітному полі;

$t$  – час;

$\varphi_{0\mathcal{E}}$  – початкова фаза коливання ЕРС;

$(\omega t + \varphi_{0\mathcal{E}})$  – фаза коливання ЕРС.

З фізичної точки зору фаза коливання – це кут між площиною рамки, що обертається в магнітному полі, та напрямом вектора магнітної індукції в момент часу  $t$ .

Графік синусоїдальної ЕРС при  $\varphi_0 = 0$  наведено на рис.2.2. **Періодом коливання  $T$**  називається час, за який відбувається одне повне коливання. Період синусоїдальної функції дорівнює  $2\pi$ .

**Частота коливання  $f$**  – величина, що обернена періоду:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

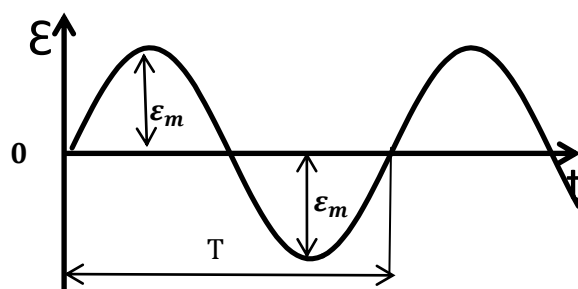


Рис. 2.2. Графік синусоїдальної ЕРС

Частота показує кількість повних коливань періодичної величини за одиницю часу. Одиниця виміру частоти – Герц (Гц, Hz).  $1\text{Гц}=\text{с}^{-1}$ .

Частоту та циклічну частоту зв'язує співвідношення:

$$\omega = 2\pi f \quad (2.3)$$

**Змінний синусоїдальний струм**, викликаний наявністю синусоїдальної ЕРС, описує рівняння:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_{0i}), \quad (2.4)$$

де  $i$  – миттєве (поточне) значення струму;

$I_m$  – амплітудне значення струму;

$\varphi_{0i}$  – початкова фаза коливання струму.

Аналогічним рівнянням можна описати **змінну синусоїдальну напругу**:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi_{0u}), \quad (2.5)$$

де  $u$  – миттєве (поточне) значення напруги;

$U_m$  – амплітудне значення напруги;

$\varphi_{0u}$  – початкова фаза коливання напруги.

Графіки синусоїдальних струму та напруги наведено на рис. 2.3.

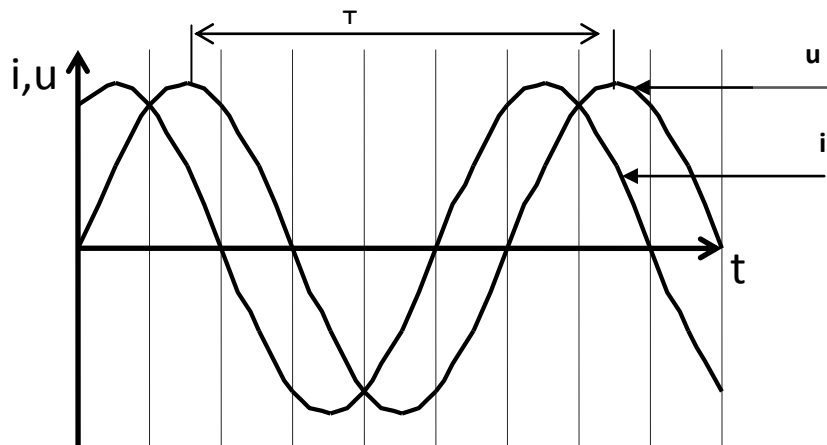


Рис. 2.3. Графіки синусоїдальних струму та напруги

Струм і напруга однакової частоти можуть досягати амплітудних значень неодноразомно, тобто мати так звану різницю фаз  $\varphi$  (рис. 2.3).

$$\varphi = \varphi_u - \varphi_i \quad (2.6)$$

**Різниця фаз** – це доля періоду, на яку одна синусоїдальна функція випереджує іншу або запізнюється відносно неї. Вимірюється різниця в долях періоду або в кутових градусах. При цьому період  $2\pi$  відповідає куту  $360^\circ$ .

Різницю фаз вважаємо **додатною**, якщо напруга випереджує струм (тобто раніше за струм досягає амплітудного значення), і **від'ємною**, якщо напруга відстає від струму. Саме останній випадок зображено на рис. 3.3 – струм випереджує напругу на  $\varphi = \frac{1}{6}T$ , тобто різниця фаз струму і напруги на рис. 3.3:

$$\varphi = -\frac{2\pi}{6} = -60^\circ.$$

Для кількісної характеристики змінного струму введено поняття діючого значення. **Діюче значення  $I$  періодичного змінного струму є його середнім квадратичним значенням за період.**

Можна також стверджувати, що **діюче значення** змінного синусоїдального струму – це значення такого постійного струму, при проходженні якого в тому самому резисторі опором  $R$  за час одного

періоду  $T$  виділяється стільки ж теплоти, скільки й при проходженні синусоїдального струму, про який йдеться.

Для синусоїдального струму **діюче значення**

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad (2.7)$$

де  $I$  – діюче значення струму;

$I_m$  – амплітудне значення струму.

**Діюче значення** періодичної змінної синусоїдальної **напруги**

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}, \quad (2.8)$$

де  $U$  – діюче значення напруги;

$U_m$  – амплітудне значення напруги.

Доведемо формули (2.7) та (2.8).

При синусоїдальному струмі  $i = I_m \sin \omega t$  кількість теплоти, що виділяється в резисторі  $R$  за час  $T$  відповідно до закону Джоуля-Ленца

$$\tilde{Q} = \int_0^T i^2 R dt, \quad (2.9)$$

При постійному струмі кількість теплоти, яка виділяється в провіднику за той самий час  $T$  становить:

$$Q = I^2 RT. \quad (2.10)$$

Відповідно до визначення,  $\tilde{Q} = Q$ , тоді

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (2.11)$$

Обчислимо інтеграл :

$$\begin{aligned} \int_0^T i^2 dt &= I_m^2 \int_0^T (\sin \omega t)^2 dt = I_m^2 \int_0^T \frac{dt}{2} - I_m^2 \int_0^T \frac{\cos 2\omega t}{2} dt = \\ &= \frac{I_m^2}{2} \int_0^T dt = \frac{I_m^2}{2} T \end{aligned} \quad (2.12)$$

Підставивши (3.12) в (3.11), отримаємо:

$$I = \sqrt{\frac{1 \cdot I_m^2 T}{T \cdot 2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad (2.13)$$

що і потрібно було довести.

Аналогічно можливо показати, що діюче значення змінної синусоїдальної напруги  $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$ .

Таким чином, діючі значення синусоїдальних величин у  $\sqrt{2}$  раз менше їхніх амплітудних значень. **Електровимірювальні пристрої зазвичай вимірюють саме діючі значення змінних струму та напруги**, знаючи які, завжди можна обчислити амплітудні значення. Так, наприклад, якщо вольтметр показує 220 В синусоїдальної напруги, то амплітуда такої напруги  $U_m = \sqrt{2} \cdot 220 = 311$  В.

Під час розрахунку кіл змінного струму доводиться виконувати певні дії зі змінними струмами та напругами. Наприклад, користуючись першим чи другим законами Кірхгофа, які, до речі, розповсюджуються і на кола змінного струму, знадобиться додавати синусоїдальні функції різних аргументів, що становить певну складність. Розрахунок кіл синусоїдального струму значно спрощується, якщо виконувати його за допомогою векторних діаграм.

**Векторні діаграми.** При побудові векторних діаграм синусоїдальні функції (ЕРС, струм, напруга та ін.) умовно зображуються у вигляді векторів, довжини яких в обраному масштабі дорівнюють діючим значенням відповідних синусоїдальних функцій (в деяких випадках їх амплітудним значенням), а кути між цими векторами відповідають різницям фаз між функціями. На рис. 2.4 представлена векторна діаграма струму та напруги, що відповідає графікам, зображеним на рис. 2.3. Струм на цій діаграмі випереджує напругу на кут

$$\varphi = -\frac{2\pi}{6} = -60^\circ.$$

При побудові векторних діаграм початкові фази синусоїдальних величин відкладають від умовного напрямку проти руху годинникової стрілки. Черговість слідування векторів (випередження чи відставання)

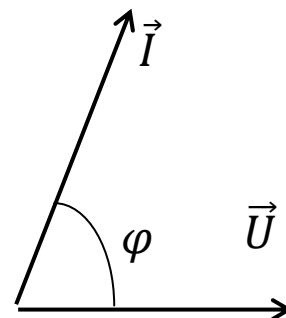


Рис. 2.4. Векторна діаграма струму та напруги



визначається при уявному обертанні діаграми проти руху годинникової стрілки.

В багатьох випадках є доцільним один з векторів приймати за **опорний вектор**, а всі інші вектори будувати, відкладаючи різницю фаз від цього опорного вектора.

Крім наведених способів представлення коливань – аналітичного (формули (2.1), (2.4), (2.5), графічного (рис. 2.2, 2.3) та векторного (рис. 2.4), в електротехніці використовується подання електротехнічних величин за допомогою комплексних чисел, записаних в алгебраїчній, тригонометричній чи у показовій формі. Алгебраїчна форма зручна для операцій додавання чи віднімання, а операції множення, ділення та піднесення до ступеню зручніше виконувати, користуючись показовою формою запису комплексного числа.

Будь-який вектор однозначно зображується комплексним числом, що відповідає координатам кінця цього вектора. Комплексне число  $\dot{A}$  має дійсну складову  $A'$  та уявну складову  $A''$ :

$$\dot{A} = A' + jA'', \quad (2.14)$$

де  $A'$  – координата точки  $A$  на дійсній вісі;

$A''$  – координата точки  $A$  на уявній вісі;

$j = \sqrt{-1}$  – уявна одиниця.

Тригонометрична форма запису комплексного числа:

$$\dot{A} = A(\cos\varphi + j\sin\varphi), \quad (2.15)$$

де  $A$  – модуль комплексного числа, рівний довжині вектора  $OA$ ;  
 $\varphi$  – аргумент комплексного числа, тобто кут, на який вектор  $OA$  повернутий відносно додатного напрямку дійсної вісі (рис. 2.5).

Додатним вважається кут повороту проти руху годинникової стрілки.

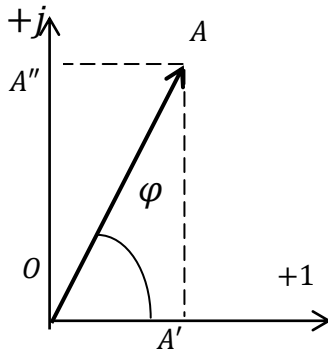


Рис. 2.5. До тригонометричної форми запису комплексного числа

Показова форма запису комплексного числа:

$$\dot{A} = A e^{j\varphi} \quad (2.16)$$

Комплексне діюче значення електрорушійної сили:

$$\dot{\mathcal{E}} = \mathcal{E} \cdot e^{j\varphi_{0\mathcal{E}}} ; \quad (2.17)$$

комплексне діюче значення напруги:

$$\dot{U} = U \cdot e^{j\varphi_{0u}} ; \quad (2.18)$$

комплексне діюче значення струму:

$$\dot{I} = I \cdot e^{j\varphi_{0i}} ; \quad (2.19)$$

де  $\mathcal{E}$ ,  $U$ ,  $I$  – модулі комплексних ЕРС, напруги та струму відповідно;

$\varphi_{0\mathcal{E}}$ ,  $\varphi_{0u}$ ,  $\varphi_{0i}$  – аргументи комплексних чисел (початкові фази коливання відповідних синусоїдальних величин).

Аналогічні формули існують і для амплітуд синусоїдальних електрорушійної сили, напруги та струму  $\dot{\mathcal{E}}_m$ ,  $\dot{U}_m$ ,  $\dot{I}_m$ .

Слід зазначити, що закони Кірхгофа виконуються в колах змінного струму в алгебраїчній формі лише для миттєвих значень змінних струмів та напруг. Для амплітудних та діючих значень закони Кірхгофа виконують виключно в векторній формі, що буде розглянуто в наступних розділах.

## 2.2. Основні елементи в колах змінного струму

Основні елементи, з яких складаються кола змінного струму, можна розділити на **активні** (резистори) та **реактивні** (ідеальні індуктивні та ємнісні елементи).

В активних елементах відбувається незворотне перетворення енергії електричного струму в інші види енергії – механічну, теплову, енергію випромінювання. В реактивних елементах енергія

електричного струму зворотним чином перетворюється на енергію електричного поля конденсатора (ємності) або на енергію магнітного поля в котушках індуктивності і циркулює в електричному колі. Тому за рахунок використання реактивних елементів неможливо отримати корисну роботу.

Повний опір лінійного приймача електроенергії – це коефіцієнт пропорційності між діючими значеннями струму та напруги на ньому (**закон Ома для змінного струму**):

$$Z = \frac{U}{I} \quad (2.20)$$

Введемо поняття **комплексного повного опору**  $\dot{Z}$ :

$$\begin{aligned} \dot{Z} &= \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U_m e^{j(\omega t + \varphi_{0u})}}{I_m e^{j(\omega t + \varphi_{0i})}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\sqrt{2}}{I_m} \cdot e^{j(\omega t + \varphi_{0u} - \omega t - \varphi_{0i})} = \\ &= \frac{U}{I} e^{j(\varphi_{0u} - \varphi_{0i})} = Z e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (2.21)$$

Таким чином, повний опір та різниця фаз є відповідно модулем та аргументом комплексного повного опору  $\dot{Z}$ .

### 2.2.1. Активні елементи (резистори)

Як відомо, електричний струм являє собою упорядкований рух електронів в провіднику. Рухаючись, електрони зіштовхуються з іонами кристалічної решітки, при цьому їх кінетична енергія перетворюється в теплову енергію, тобто провідник нагрівається, теплова енергія розсіюється в навколишній простір. Цей процес є необоротним процесом перетворення енергії. Кількість перетвореної енергії залежить від опору  $R$ . Тому цей опір називають активним. Одиниця виміру активного опору – Ом.

Елементи електричного кола, які мають лише активний опір, **називають резисторами**.

В **активних** елементах різниця фаз струму та напруги  $\varphi = 0$ , тобто струм та напруга співпадають по фазі.

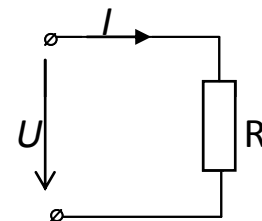


Рис. 2.6. Електричне коло з резистором

З формули (2.21) та закону Ома випливає, що комплексний повний опір активного елемента дорівнює його активному опорі:

$$\dot{Z} = R \quad (2.22)$$

Для миттєвих значень напруги та струму кола, що зображено на рис. 2.6, у відповідності до закону Ома маємо:  $u = iR$ . Звідси, враховуючи, що  $u = U_m \sin \omega t$ , отримаємо:

$$i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t. \quad (2.23)$$

З рівняння (2.23) видно, що струм в активному елементі співпадає за фазою з напругою на цьому елементі, отже,  $\varphi_R = 0$ .

Амплітуда цього струму:  $I_m = \frac{U_m}{R}$ .

Графіки струму та напруги на активному елементі (резисторі), а також векторна діаграма діючих значень струму та напруги на ньому представлені на рис. 2.7.

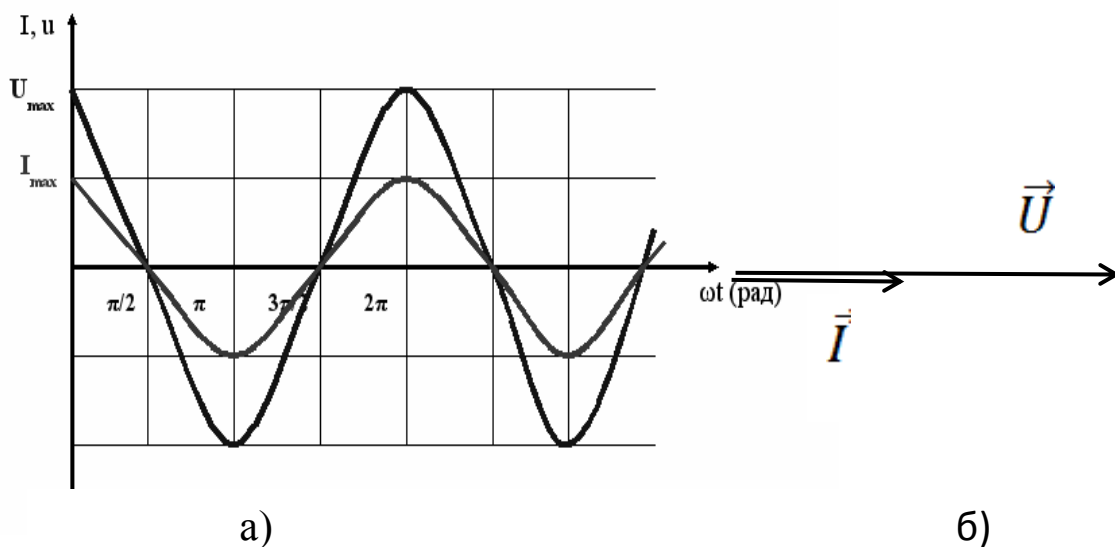


Рис. 2.7. Графіки струму та напруги (а) та їх векторна діаграма (б) для резистора

### 2.2.2. Ємнісні елементи (конденсатори)

Конденсатором називається елемент, утворений двома паралельними пластинами з матеріалу, що проводить електричний струм, між якими знаходиться тонкий шар діелектрика. Основною характеристикою конденсатора є його електроємність. Ємність конденсатора  $C$  визначає той електричний заряд, який накопичується на пластинах конденсатора при різниці потенціалів між ними в 1 В. Одиницею виміру ємності є Фарада (Ф, F). Частіше користуються більш дрібними величинами – мікрофарадами (мкФ,  $\mu F$ ) або пікофарадами ( $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ;  $1 \text{ пкФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

Звісно, що включення конденсатора до кола постійного струму утворює розрив кола. Але якщо включити конденсатор в коло змінного струму, прибори зафіксують протікання струму в такому колі. Це пояснюється тим, що конденсатор – це елемент, який перетворює енергію джерела в енергію електричного поля.

Незважаючи на те, що пластини конденсатора розділені діелектриком, при змінній напрузі струм в колі з конденсатором існує. Це пояснюється тим, що синусоїдальна напруга безперервно змінюється за значенням та за напрямом, отже й заряд на пластинах конденсатора теж безперервно змінюється. Це змінення заряду та пов'язаний з ним рух електронів і є електричним струмом в колі.

Опір, що створює конденсатор змінному струму, називають **ємнісним опором** та позначають  $X_C$ . Одиницею виміру ємнісного опору, як і активного, є **Ом**. Ємнісний опір залежить від ємності конденсатора та частоти змінного струму. Чим більшою буде ємність конденсатора, тим більший заряд буде перенесено під час його заряду та розряду, отже тим більшим буде струм в колі. Збільшення струму в колі свідчить про зменшення опору цього кола, тобто, **зі збільшенням ємності ємнісний опір зменшується**.

Збільшення частоти струму збільшує величину заряду, що переноситься колом, тому що заряд (так само і розряд) має здійснитися скоріше, ніж при низькій частоті. Зростання величини заряду, що переноситься в одиницю часу, відповідає збільшенню струму в колі, тобто зменшенню його опору.

**Отже, зі збільшенням частоти змінного струму ємнісний опір зменшується.**

Якщо ж зменшувати частоту змінного струму і довести її до

нуля (тобто перетворити струм зі змін-ного на постійний), ємнісний опір, збі-льшуючись, стане безкінечно великим, що і спричинить розрив кола в момент, коли в колі з'явиться постійний струм.

Розглянемо конденсатор ємністю  $C$ , до якого прикладена змінна напруга  $U$  (рис. 2.8).

Тоді заряд на конденсаторі

$$Q = Cu = CU_m \sin \omega t.$$

Знайдемо миттєвий струм в колі конденсатора:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \omega CU_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}), \quad (2.24)$$

де амплітудне значення струму:

$$I_m = \omega CU_m = \frac{U_m}{1/\omega C} \quad (2.25)$$

З виразу (2.24) видно, що струм в колі з ємністю є синусоїдаль-ним та випереджує напругу по фазі на  $\frac{\pi}{2}$ , тобто на чверть періоду.

Отже, для ємнісного елемента різниця фаз струму та напруги

$$\varphi_C = -90^\circ.$$

Повний комплексний опір такого елемента:

$$\dot{Z} = \frac{1}{\omega C} e^{-j\frac{\pi}{2}} \quad (2.26)$$

Для ідеального ємнісного елемента повний опір дорівнює ємніс-ному опору:

$$Z = X_C.$$

На рис. 2.9 зображено векторну діаграму та графіки струму й напруги ємнісного елемента.

Ємнісний опір (з формули 2.25) обернено пропорційний частоті змінного струму в колі :

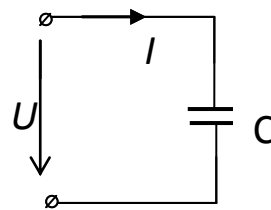


Рис. 2.8. Електричне коло з конденсатором

$$X_C = 1/\omega C = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.27)$$

де  $f$  – частота змінного струму;  
 $C$  – ємність конденсатора.

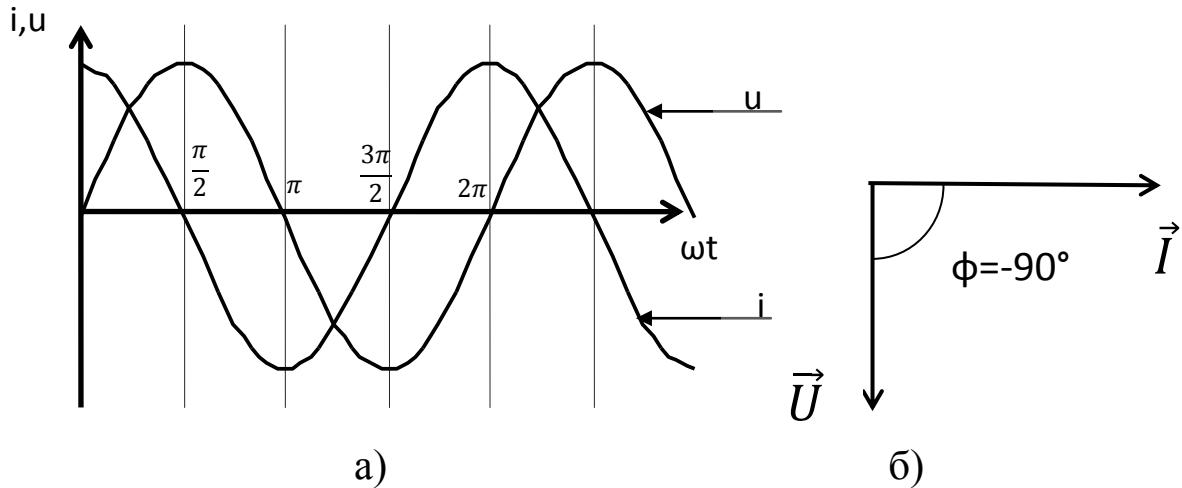


Рис. 2.9. Графіки струму та напруги (а) та їх векторна діаграма (б) для ємнісного елемента

### 2.2.3. Ідеальні індуктивні елементи

Змінний струм, що тече котушкою, створює магнітний потік  $\Phi$ , який згідно до закону електромагнітної індукції індукуює в провіднику ЕРС самоіндукції

$$e_L = -w \frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{di}{dt}, \quad (2.28)$$

де  $w$  – кількість витків в котушці;

$L$  – індуктивність котушки.

Одиницею виміру індуктивності є Генрі (Гн, Н), на практиці часто застосовують мілігенрі (мГн, мН).  $1\text{ мГн} = 10^{-3} \text{ Гн}$ .

Індуктивність  $L$  теоретично властива усім провідникам зі струмом. Але у багатьох випадках вона є настільки малою, що її наявністю можна знехтувати. Значну індуктивність мають обмотки та котушки, що складаються з великої кількості витків дроту.

Розглянемо котушку індуктивності та припустимо, що її активний опір настільки малий, що їм можна знехтувати. В цьому

випадку котушка є **ідеальним індуктивним елементом**. Підключення такого елемента до мережі постійного струму викликало би коротке замикання. Але якщо такий елемент підключити до джерела змінного струму, короткого замикання не буде. Це свідчить про те, що котушка індуктивності чинить опір змінному струму, тим самим обмежуючи його величину.

Для електричної схеми, яка зображена на рис. 2.10, згідно другому закону Кірхгофа

$$u - u_L = 0;$$

де  $u_L$  – падіння напруги на індуктивному елементі.

Враховуючи, що  $u_L = -e_L$  (рис.3.11), отримаємо:

$$u + e_L = 0. \quad (2.29)$$

З урахуванням того, що

$$u = U_m \sin \omega t$$

та формули (2.28), рівняння (2.29) набуває вигляду

$$U_m \sin \omega t - L \frac{di}{dt} = 0, \quad \text{або} \quad \frac{di}{dt} = \frac{U_m}{L} \sin \omega t.$$

Розв'язавши це рівняння, отримаємо вираз для струму в колі:

$$i = \frac{U_m}{L} \int \sin \omega t dt = -\frac{U_m}{\omega L} \cos \omega t = \frac{U_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (2.30)$$

З урахуванням того, що амплітуда струму  $I_m = \frac{U_m}{\omega L}$ , кінцевий вираз для струму

$$i = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}). \quad (2.31)$$

З формули (2.31) видно, що в колі з ідеальним індуктивним елементом струм змінюється за синусоїдальним законом та відстає по фазі від напруги на  $\frac{\pi}{2}$ , тобто на чверть періоду.

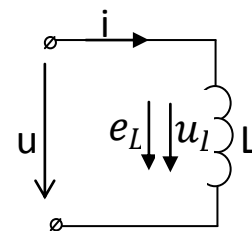


Рис. 2.10. Електричне коло з індуктивністю



Отже, для **ідеального індуктивного** елемента різниця фаз струму та напруги

$$\varphi_L = 90^\circ.$$

Комплексний повний опір такого елемента:

$$\dot{Z} = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (2.31)$$

Індуктивний опір прямо пропорційний частоті змінного струму в колі може бути описаний формулою:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.32)$$

Одиницею виміру індуктивного опору є Ом.

На рис. 2.11 зображено векторну діаграму і графіки струму та напруги ідеального індуктивного елемента.

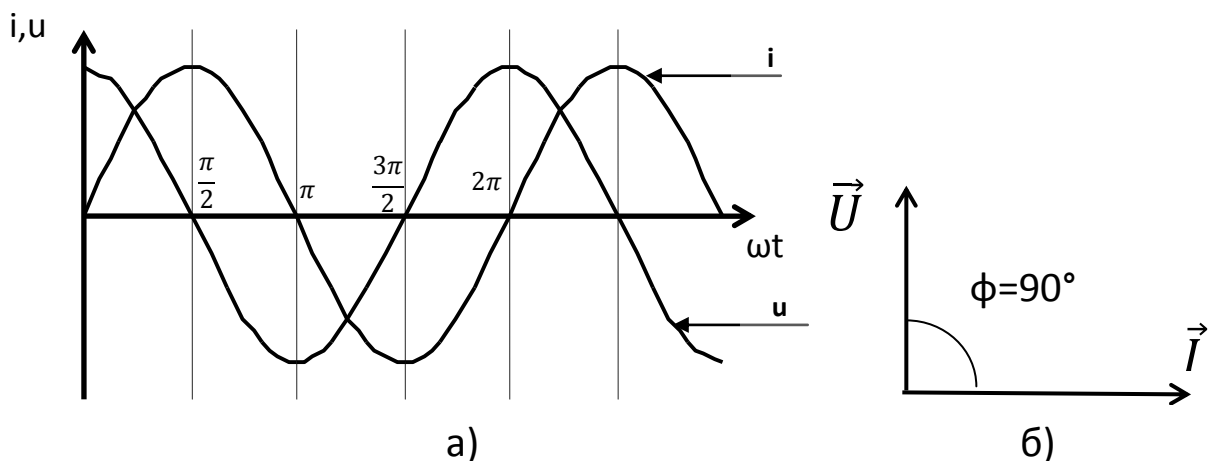


Рис. 2.11. Графіки струму та напруги (а) та їх векторна діаграма (б) для ідеального індуктивного елемента

#### 2.2.4. Реальні індуктивні елементи

Реальний індуктивний елемент (рис. 2.12) (катушка індуктивності) відрізняється від ідеального тим, що змінний струм в ньому супроводжується не тільки перетворенням енергії електричного струму в енергію магнітного поля, але й перетворенням електричної енергії в теплову в дроті, яким намотана катушка. Реальні індуктивні елементи називають ще **активно-індуктивними**.

Комплексний повний опір такого елемента:

$$\dot{Z} = R + jX_L \quad (2.33)$$

Модуль повного опору активно-індуктивного елемента:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}, \quad (2.34)$$

де  $R$  – активна складова опору;

$X_L$  – реактивна (індуктивна)

складова опору.

Різниця фаз струму та напруги активно-індуктивного елемента додатна (струм відстає від напруги), менша  $90^\circ$  та розраховується за формулою:

$$\varphi = \arctg \frac{X_L}{R} \quad (2.35)$$

Слід зазначити, що в принципі кожен елемент електричного кола має одночасно і активний опір, і індуктивність, і ємність. Так, наприклад, реостат, що складається з великої кількості витків дроту, має наряду з активним опором деяку ємність (між окремими його витками), та індуктивність, наявність якої пов'язана з магнітним полем, яке створено його обмоткою. Але найчастіше при розрахунках обмежуються однією, основною характеристикою даного елемента, нехтуючи іншими внаслідок їх малого значення. В разі необхідності елемент може представлятися кількома параметрами. Наприклад, котушка індуктивності може бути подана як послідовне з'єднання індуктивності  $L$  та активного опору  $R$ .

Внаслідок того, що за рахунок ємності та індуктивності неможливо отримати корисну роботу, тобто процеси перетворення енергії в цих елементах є оборотними, ємність та індуктивність називають реактивними елементами, а їх опори  $X_C$  та  $X_L$  – **реактивними опорами**. Детальніше процеси перетворення енергії в активних та реактивних елементах будуть розглянуті в наступному розділі.

### 2.3. Потужність в колах змінного струму

Розглянемо коло змінного струму, яке містить активний та реактивний елемент. Миттєве значення потужності кола синусоїдального струму дорівнює добутку миттєвих значень напруги та струму:

$$p = ui \quad (2.36)$$

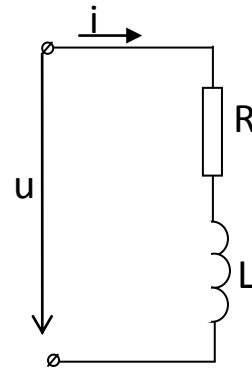


Рис. 2.12. Коло з реальним індуктивним елементом

Якщо до кола прикладена напруга  $u = U_m \sin \omega t$ , а струм дорівнює  $i = I_m \sin(\omega t - \varphi)$  (рис. 3.13,а), миттєва потужність

$$p = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \\ = 2UI (\sin^2 \omega t \cos \varphi - \sin \omega t \cos \omega t \sin \varphi).$$

Після перетворень отримаємо:

$$p = UI[\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)]. \quad (2.37)$$

З формули (2.37) видно, що миттєве значення потужності має дві складові: одна з них,  $UI \cos \varphi$ , не залежить від часу, а інша,  $UI \cos(2\omega t - \varphi)$ , змінюється періодично з частотою  $2\omega$ . Внаслідок цього миттєве значення потужності також змінюється з подвійною частотою (рис.2.13).

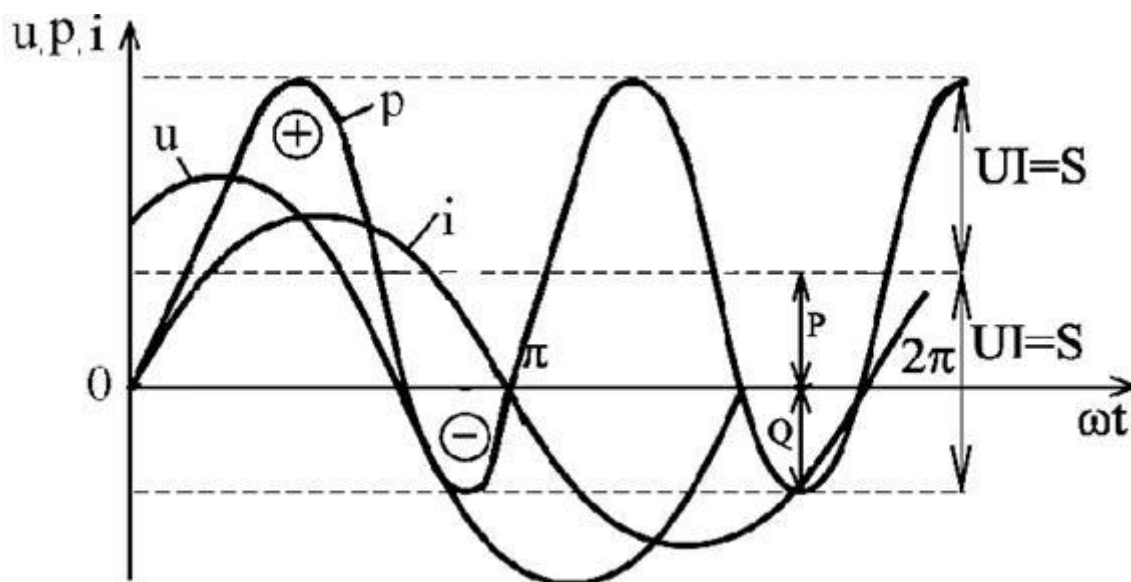


Рис. 2.13. Графіки струму, напруги та миттєвої потужності кола з активним та реактивним елементами

Відзначимо, що, як видно з рис. 2.13, потужність додатна, коли напрям напруги та струму співпадають, і вона від'ємна, коли струм та напруга мають різні знаки. Знак потужності «+» означає, що енергія передається від джерела приймачеві, і навпаки, реактивний приймач віддає енергію джерелу, коли потужність має знак «-» .

Зі співвідношення для роботи, яка здійснюється за один період

$$\int_0^T p dt = P_{\text{ср}} \cdot T,$$

де  $p$  – миттєва потужність;

$t$  – час;

$P_{\text{ср}}$  – середня потужність;

$T$  – період,

знайдемо середню потужність:  $P_{\text{ср}} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ .

Підставивши замість  $p$  вираз (2.37), отримаємо:

$$P_{\text{ср}} = \frac{UI}{T} \cos \varphi \int_0^T dt - \frac{UI}{T} \int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt.$$

Оскільки  $\int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt = 0$ , то

$$P_{\text{ср}} = UI \cos \varphi ,$$

тобто середня потужність дорівнює постійній складовій миттєвого значення потужності.

Середня потужність характеризує частину потужності, яка передається від джерела до приймача з наступним її перетворенням в інші види енергії, тобто незворотний, або активний, процес. Тому ця середня потужність називається активною потужністю

$$P = UI \cos \varphi . \quad (2.38)$$

Одиниця вимірювання потужності – Ват (Вт, W). Похідні одиниці вимірювання – кіловат (кВт, kW), мегават (МВт, MW).  $1 \text{ кВт} = 10^3 \text{ Вт}$ ,  $1 \text{ МВт} = 10^6 \text{ Вт}$ .

Якщо електричне коло складається тільки з **активного** елемента, опір якого  $R$ ,  $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$ , тому в цьому випадку

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R} . \quad (2.39)$$

При наявності лише активного елемента уся електроенергія перетворюється в теплову або інші види енергії, миттєве значення потужності завжди додатне (рис. 2.14).

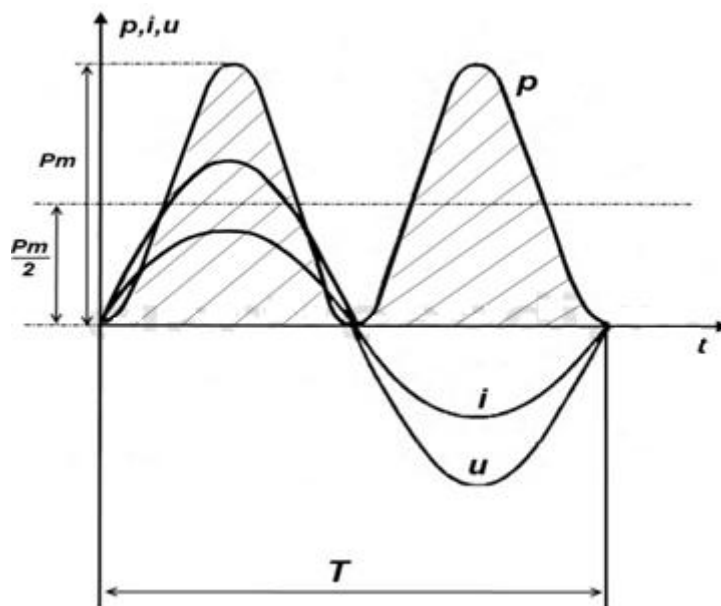


Рис. 2.14. Графіки струму, напруги та потужності в колі з активним елементом

Якщо електричне коло складається лише з індуктивного елемента, зсув фаз  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , тоді формула миттєвої потужності (2.37) набуває вигляд:

$$p = -UI \sin 2\omega t.$$

Бачимо, що миттєва потужність має лише змінну складову. Впродовж одного періоду електрична енергія двічі передається від джерела до індуктивного приймача та назад (рис. 2.15). Вся енергія запасається в магнітному полі котушки, а потім повністю віддається джерелу. Така енергія обміну називається реактивною, а потужність, що відповідає інтенсивності передачі енергії, отримала назву **реактивної потужності**  $Q_L$ .

$$Q_L = U_L \cdot I = X_L \cdot I^2 = \frac{U_L^2}{X_L} = b_L U_L^2, \quad (2.40)$$

де  $b_L = \frac{1}{X_L}$  – індуктивна провідність.

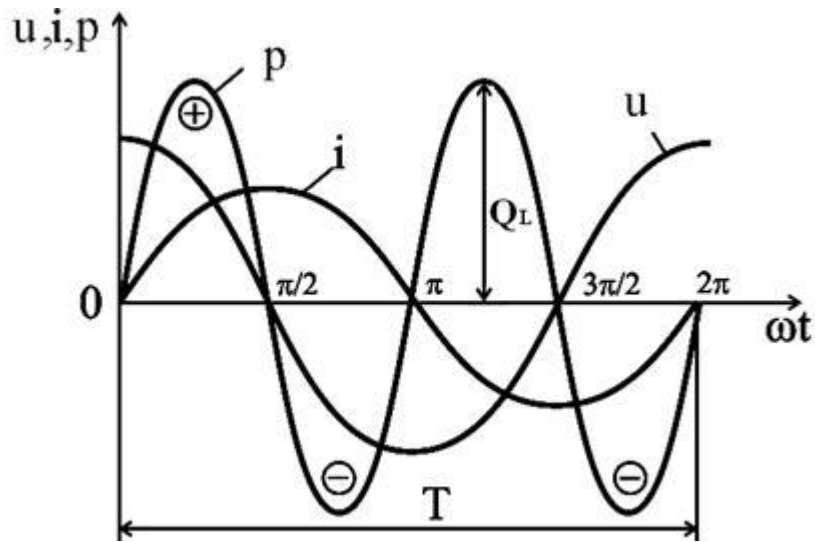


Рис. 2.15. Графіки струму, напруги та потужності в колі з індуктивним елементом

Якщо в коло включити конденсатор, то зсув фаз  $\varphi = -\frac{\pi}{2}$ , тоді формула миттєвої потужності (2.37) набуває вигляд:

$$p = UI \sin 2\omega t,$$

що відрізняється лише знаком від миттєвої потужності для індуктивного елемента. В колі з ємністю відбувається обмін реактивною енергією, яка запасається в електричному полі конденсатора, між ємнісним елементом та джерелом (рис. 2.16).

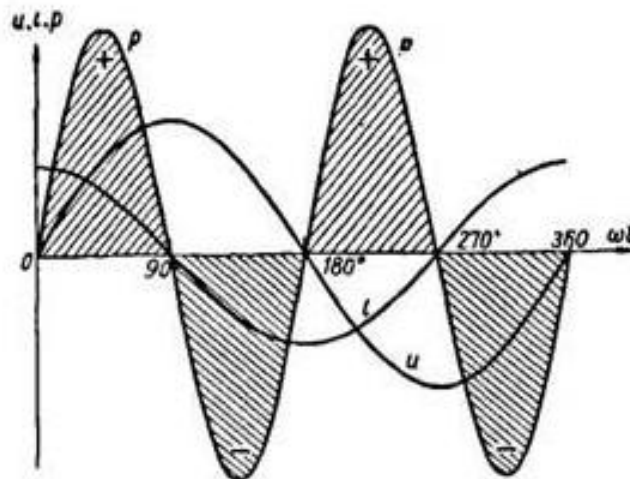


Рис. 2.16. Графіки струму, напруги та потужності в колі з ємнісним елементом

Інтенсивність обміну енергією характеризує **реактивна потужність**

$$Q_C = U_C \cdot I = X_L \cdot I^2 = \frac{U_C^2}{X_C} = b_C U_C^2, \quad (2.41)$$

де  $b_L = \frac{1}{X_L}$  – ємнісна провідність.

В загальному випадку, коли в колі є активний та реактивні елементи, реактивний опір кола

$$X = X_L - X_C. \quad (2.42)$$

Реактивна потужність кола

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2.43)$$

Для реактивної потужності кола вірним є вираз

$$Q = (X_L - X_C) \cdot I^2 = X_L \cdot I^2 - X_C \cdot I^2 = Q_L - Q_C \quad (2.44)$$

Реактивна потужність має знак «+», коли індуктивна потужність більша за ємнісну, і навпаки.

Амплітуда змінної потужності дорівнює  $UI$  та називається повною потужністю  $S$ .

$$S = UI = ZI^2 = \frac{U^2}{Z} = y \frac{U^2}{Z}, \quad (2.44)$$

де  $y = \frac{1}{Z}$  – повна провідність кола.

З формул (2.38) та (2.43) випливає, що

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (2.44)$$

Одиницею вимірювання реактивної потужності є вольт-ампер реактивний (Var), та кіловольт-ампер реактивний (кВАр).

Повну потужність вимірюють у вольт-амперах (ВА) та кіловольт-амперах (кВА).

Незважаючи на те, що назви одиниць вимірювання активної, реактивної та повної потужностей є різними, розмірність цих одиниць однакова –  $\frac{\text{Джоуль}}{\text{с}}$ .

## 2.4. Коефіцієнт потужності

**Коефіцієнтом потужності** називають відношення активної потужності до повної потужності. Коефіцієнт потужності дорівнює косинусу кута (різниці фаз) між струмом та напругою:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (2.45)$$

Коефіцієнт потужності показує, яка частка повної потужності є активною потужністю, тобто яка доля усієї електроенергії перетворюється в інші види енергії в електричному колі.

В разі, коли  $\cos \varphi = 1$ , тобто коли  $Z = R$ , повна потужність дорівнює активній потужності.

Коефіцієнт потужності є важливим енергетичним показником електроприймачів. Чим більшим є  $\cos \varphi$ , тим меншим є струм, при якому відбувається перетворення електричної енергії в інші види енергії. Це впливає з формули

$$I = \frac{P}{U \cos \varphi} \quad (2.46)$$

Зменшення струму, в свою чергу, призводить до скорочення втрат електроенергії (вони пропорційні квадрату значення сили струму), а також здешевлює облаштування ліній та пристроїв для передачі електроенергії.

### 2.4.1. Трикутники потужностей, напруг та опорів

З формули (2.44) видно, що активну, реактивну та повну потужності можливо графічно зобразити у вигляді прямокутного трикутника, де  $P$  та  $Q$  є катетами, а  $S$  – гіпотенуза (рис. 2.17, а)).

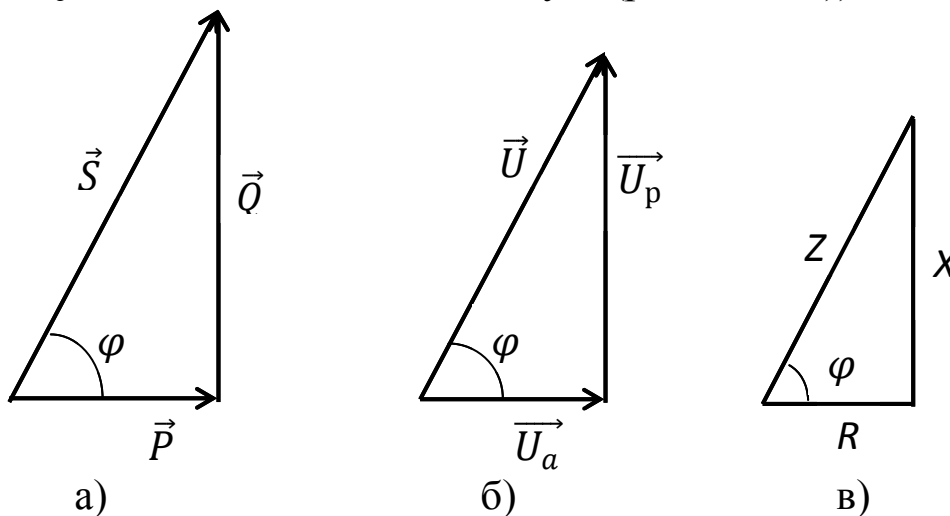


Рис. 2.17. Трикутники а) потужностей; б) напруг; в) опорів



Кут між векторами  $\vec{P}$  та  $\vec{S}$  дорівнює різниці фаз струму та напруги кола. Якщо розділити довжини векторів, що утворюють трикутник потужностей, на величину струму, отримаємо подібний до першого трикутник напруг: активної, реактивної та повної (рис. 2.17, б). Ще раз розділивши довжини сторін трикутника на струм, отримаємо трикутник опорів (рис. 2.17, в), подібний до двох перших.

## 2.5. Нерозгалужене коло змінного струму з активним опором, індуктивністю та ємністю

### 2.5.1. Розрахунок нерозгалуженого кола з активним опором, індуктивністю та ємністю. Другий закон Кірхгофа

Нерозгалужене коло змінного струму з активним опором, реальним індуктивним елементом (катушкою) та ємністю зображено на рис. 2.18.

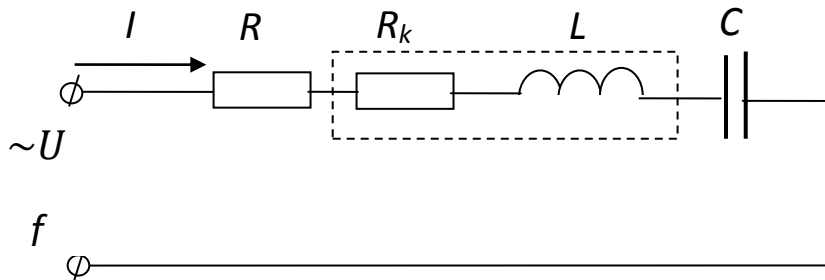


Рис. 2.19. Нерозгалужене коло змінного струму

Розрахуємо це коло, тобто визначимо струм в колі, зсув фаз між струмом та напругою, а також визначимо спадання напруги на кожному з елементів окремо.

Повний опір кола з послідовно з'єднаними активним, індуктивним та ємнісним елементами (з рис. 2.17):

$$Z = \sqrt{(R + R_k)^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (2.47)$$

Діюче значення струму, що тече в колі, визначимо за законом Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(R+R_k)^2+(X_L-X_C)^2}} \cdot \quad (2.48)$$

Різницю фаз струму в колі та напруги, яка підведена до кола, можливо визначити за формулою:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R + R_k}. \quad (2.49)$$

Визначимо діючі значення падінь напруг на окремих елементах кола:

$$\begin{aligned} U_R &= I \cdot R; \\ U_k &= I \cdot Z_k; \\ U_C &= I \cdot X_C; \end{aligned} \quad (2.50)$$

де  $Z_k$  – повний опір реального індуктивного елемента (катушки),

$U_k$  – напруга на катушці.

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2} \quad (2.51)$$

Різниці фаз між струмом та напругою на окремих елементах становлять: на резисторі:  $\varphi_R = 0$ ; на ємності:  $\varphi_C = -90^\circ$ ; на реальному індуктивному елементі зсув фаз визначається за формулою:

$$\varphi_k = \operatorname{arctg} \frac{X_L}{R_k} \quad (2.52)$$

Побудуємо векторну діаграму струму та напруг в колі. Для цього візьмемо в якості опорного вектор струму  $I$ , який є однаковим для всіх елементів кола. Оберемо зручний масштаб для розрахованих попередньо напруг  $U_R$ ,  $U_k$ ,  $U_C$ . Відкладемо вектори напруг під відповідними кутами до вектора струму, після чого знайдемо їх векторну суму  $\vec{U}$  (рис. 2.19).

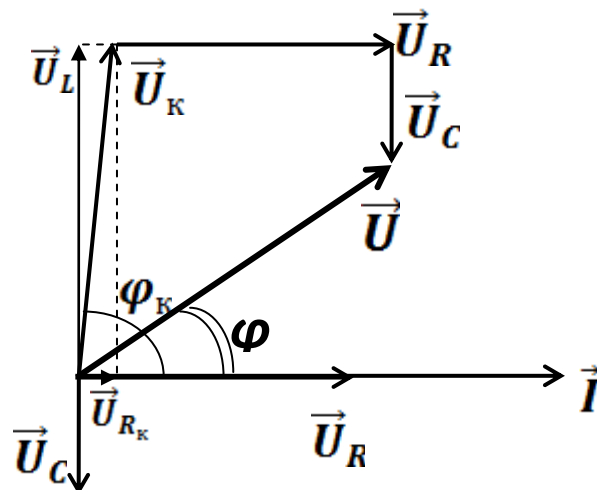


Рис. 2.19. Векторна діаграма струму та напруг в нерозгалуженому колі

На рис. 2.19 показано також розкладання вектора напруги на котушці  $\vec{U}_k$  на дві складові: активну  $\vec{U}_{Rk}$  та реактивну  $\vec{U}_L$ .

**Другий закон Кірхгофа** для наведеного на рис. 2.17 нерозгалуженого кола змінного струму формулюється таким чином:

*Векторна сума напруг на окремих елементах нерозгалуженого кола змінного струму дорівнює напрузі на вході в коло:*

$$\vec{U} = \vec{U}_R + \vec{U}_k + \vec{U}_C, \quad (2.53)$$

або в комплексній формі:

$$U = U_R + U_k + U_C \quad (2.54)$$

Таким чином, довжина отриманого побудовою вектора  $\vec{U}$  має дорівнювати діючому значенню напруги, яка підведена до кола, а кут  $\varphi$  на діаграмі має співпадати з різницею фаз, яка розрахована за формулою (2.49).

На рис. 2.19 зображено випадок, коли різниця фаз струму та напруги на вході в коло  $\varphi > 0$ . Тоді кажуть, що коло в цілому має **активно-індуктивний характер**, при цьому  $X_L > X_C$ .

Якщо виявиться, що в колі  $X_C > X_L$ , то різниця фаз  $\varphi < 0$ , а коло в цілому має **активно-ємнісний характер**. Окремий інтерес являє собою випадок, коли різниця фаз струму та напруги відсутня, тобто  $\varphi = 0$ . Такий випадок розглянемо окремо в наступному розділі.

### 2.5.2. Резонанс напруг

Режим роботи нерозгалуженого кола змінного струму, при якому різниця фаз струму та напруги дорівнює нулю, носить назву **резонансу напруг**.

Причиною виникнення резонансу напруг є рівність індуктивного та ємнісного опорів:

$$X_L = X_C, \quad (2.55)$$

звідки впливає рівність напруг на індуктивному та ємнісному елементах:

$$U_L = U_C . \quad (2.56)$$

Значення  $U_L$  та  $U_C$  можуть бути дуже великими, але вони діють у протифазах, тому компенсують одне одного, а загальна напруга кола дорівнює напрузі на активному елементі  $U_R$ . Векторна діаграма струму та напруг, що відповідає явищу резонансу напруг, представлена на рис. 2.20.

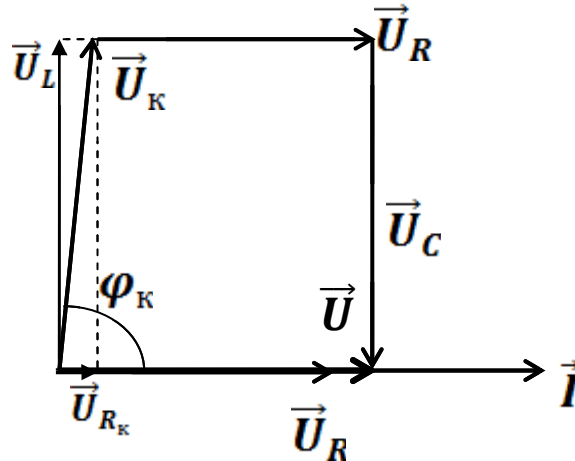


Рис. 2.20. Векторна діаграма струму та напруг при резонансі напруг

При відомих значеннях  $L$  та  $C$  резонанс напруг в колі виникає при так званій резонансній частоті

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.57)$$

При резонансі напруг повний опір кола  $Z$  є мінімальним для даного кола і дорівнює активному опорі; струм в колі набуває максимальної для даного кола величини.

Резонанс напруг в колі можна досягнути двома шляхами: зміною параметрів  $L$  та  $C$  при постійній частоті джерела або зміною частоти джерела при незмінних параметрах  $L$  та  $C$ .

## 2.6. Розгалужене коло з активним опором, індуктивністю та ємністю

### 2.6.1. Розрахунок розгалуженого кола

Розглянемо розгалужене електричне коло, що має дві паралельні гілки. Таке коло зображено на рис. 2.21. Коло увімкнено до джерела

змінної напруги  $U$  частотою  $f$ . Кожна з гілок складається з резистора, індуктивного та ємнісного елементів, що з'єднані між собою послідовно.

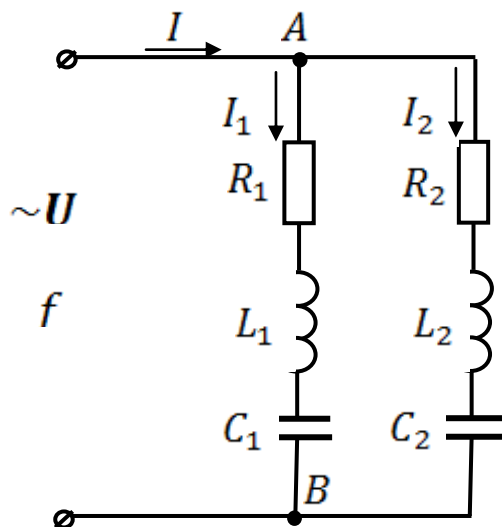


Рис. 2.21. Розгалужене коло змінного струму

Напруга, під якою знаходиться кожна з гілок кола, дорівнює напрузі джерела струму  $U$ , тому що гілки кола з'єднані паралельно.

Повні опори гілок кола знайдемо за формулами:

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2} \quad (2.58)$$

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (X_{L2} - X_{C2})^2} \quad (2.59)$$

Струми гілок електричного кола знайдемо за законом Ома:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2}} \quad (2.60)$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (X_{L2} - X_{C2})^2}} \quad (2.61)$$

Визначимо також різниці фаз між напругою і струмом в гілках:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{X_{L1} - X_{C1}}{R_1} \quad (2.62)$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_{L2} - X_{C2}}{R_2} \quad (2.63)$$

Згідно до **першого закону Кірхгофа** струм нерозгалуженої частини кола дорівнює векторній сумі струмів гілок  $I_1$  та  $I_2$ :

$$\vec{I} = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 \quad (2.64)$$

Для побудови векторної діаграми оберемо в якості опорного вектора вектор напруги  $\vec{U}$ , оскільки вона однакова для обох гілок схеми. Оберемо масштаб струму та відкладемо вектори струмів  $\vec{I}_1$  та  $\vec{I}_2$  під кутами відповідно  $\varphi_1$  та  $\varphi_2$  до вектора напруги  $\vec{U}$  (припустимо, що  $\varphi_1 < 0$ , а  $\varphi_2 > 0$ ), (рис.2.22).

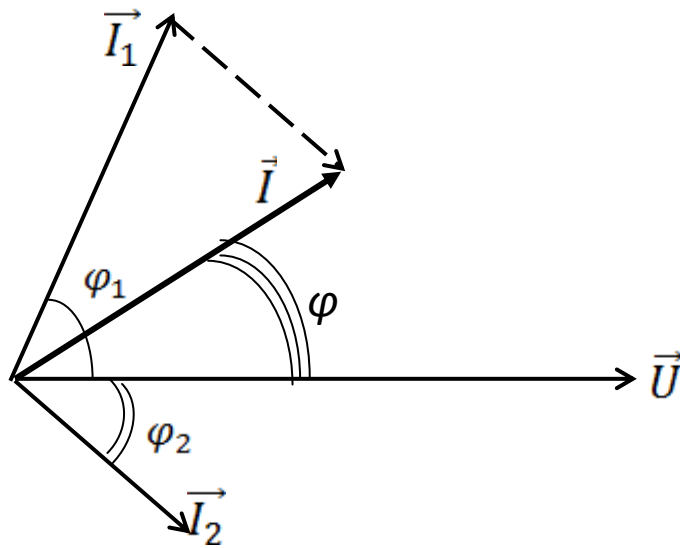


Рис. 2.22. Векторна діаграма струмів розгалуженого кола з двох гілок

Графічно знайдемо суму векторів  $\vec{I}_1$  та  $\vec{I}_2$  – вектор  $\vec{I}$ . Вимірявши довжину цього вектора, дізнаємось величину струму  $\vec{I}$  в нерозгалуженій частині кола. Одночасно з діаграми можна дізнатись значення куту зсуву фаз між струмом та напругою в нерозгалуженій частині кола.

Зазначимо, що описаний спосіб визначення загального струму та зсуву фаз можна застосувати не лише для кола, що складається з двох паралельних гілок, а для будь-якої кількості гілок.

Проаналізуємо побудовану векторну діаграму. Бачимо, що різниця фаз між загальним струмом та напругою  $\varphi < 0$ , (струм на векторній діаграмі випереджає напругу). При іншому співвідношенні величин струмів  $\vec{I}_1$  та  $\vec{I}_2$  та інших різницях фаз струмів та напруг в

гілках цей кут може бути додатним, або рівним нулю. Останній випадок заслуговує на особливий розгляд.

### 2.6.2. Резонанс струмів

Режим роботи електричного кола з паралельним з'єднанням гілок, при якому різниця фаз між струмом та напругою в нерозгалуженій частині кола дорівнює нулю, називається **резонансом струмів**.

Розглянемо коло, в якому паралельно з'єднані індуктивний елемент і конденсатор (рис. 2.23).

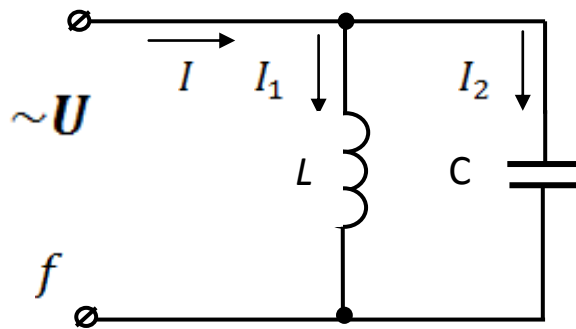


Рис. 2.23. Коло з паралельним з'єднанням індуктивності та ємності

Умовою виникнення резонансу струмів є рівність індуктивної та ємнісної провідностей гілок кола:

$$b_L = b_C, \quad (2.65)$$

де  $b_L$  – реактивна провідність гілки з індуктивністю;

$b_C$  – реактивна провідність гілки з ємністю.

$$b_L = \frac{1}{\omega L}, \quad (2.66)$$

$$b_C = \omega C, \quad (2.67)$$

де  $\omega$  – циклічна частота струму.

Резонанс струмів відбувається при частоті змінного струму

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.68)$$

Проекція вектора струму на вектор напруги називається **активною** складовою струму  $\vec{I}_a$ , а його проекція на напрям, який є

перпендикулярним до вектора напруги, називається **реактивною** складовою струму  $\vec{I}_p$  (рис. 2.24).

Таким чином, кожен з векторів можна представити як векторну суму його активної та реактивної складових:

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{p1}; \quad (2.69)$$

$$\vec{I}_2 = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{p2}; \quad (2.70)$$

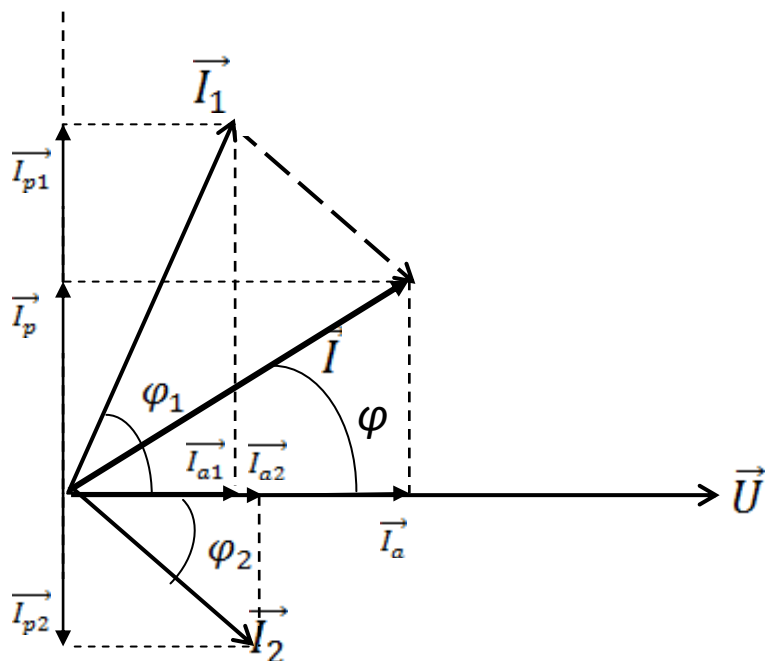


Рис. 2.24. Побудова активних та реактивних складових струмів

Сумарний вектор загального струму:

$$\vec{I} = \vec{I}_a + \vec{I}_p, \quad (2.71)$$

При цьому:  $\vec{I}_a = \vec{I}_{a1} + \vec{I}_{a2}; \quad (2.72)$

$$\vec{I}_p = \vec{I}_{p1} + \vec{I}_{p2}. \quad (2.73)$$

Зсув фаз між загальним струмом  $\vec{I}$  та напругою розрахуємо за формулою:

$$\varphi = \arctg \frac{I_p}{I_a}. \quad (2.74)$$



Активні та реактивні складові струму можна виразити через діюче значення струму та функції кута різниці фаз наступним чином:

$$I_a = I \cos \varphi; \quad (2.61)$$

$$I_p = I \sin \varphi. \quad (2.62)$$

Функція  $\cos \varphi$  є додатною в інтервалі  $-\frac{\pi}{2} < \varphi < \frac{\pi}{2}$ , тому  $I_a$  має завжди додатне значення. Функція  $\sin \varphi$  приймає від'ємні значення при  $-\frac{\pi}{2} < \varphi < 0$  та додатні значення при  $0 < \varphi < \frac{\pi}{2}$ . Тому реактивні складові струму можуть приймати як додатні (у активно-індуктивних приймачів), так і від'ємні значення (у активно-ємнісних приймачів). З формул (2.73) та (2.74) видно, що зсув фаз  $\varphi = 0$ , якщо реактивні складові струмів гілок будуть рівними за величиною та протилежними за знаком:

$$\vec{I}_{p1} = -\vec{I}_{p2} \quad (2.63)$$

Таким чином, резонанс струмів в розгалуженому електричному колі настає, коли сума реактивних складових усіх паралельних гілок кола дорівнює нулю. Ця властивість використовується для підвищення коефіцієнта потужності активно-індуктивних приймачів електроенергії.

### 2.6.3. Компенсація реактивної потужності

Розглянемо електричне коло з активним та індуктивним елементами (рис.2.25), до якого підведена змінна напруга  $U$  частотою  $f$ .

Струм, що тече в колі (активно-індуктивному приймачі) –  $I_{\Pi}$ , різниця фаз струму та напруги –  $\varphi_{\Pi}$  (рис. 2.26). Коефіцієнт потужності такого активно-індуктивного приймача значно менше одиниці, тобто потребує підвищення.

Якщо паралельно активно-індуктивному приймачеві підключити ємнісний елемент, зсув фаз струму та напруги в нерозгалуженій частині

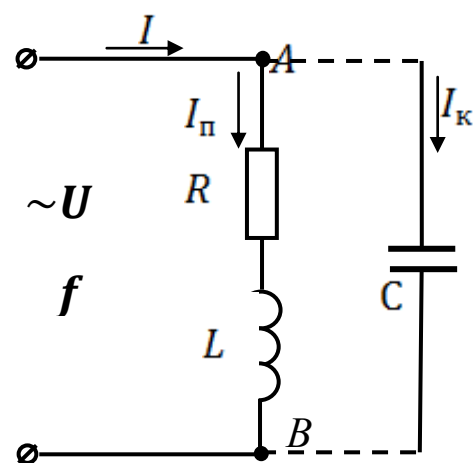


Рис. 2.25. Схема кола з двома паралельними гілками

кола зменшиться, коефіцієнт потужності зросте за рахунок того, що частина реактивної потужності, яка обумовлена індуктивністю, буде компенсована реактивною потужністю конденсатора, що коливається у протилежній фазі з потужністю індуктивності.

Такий метод підвищення коефіцієнта потужності має назву «компенсація реактивної потужності».

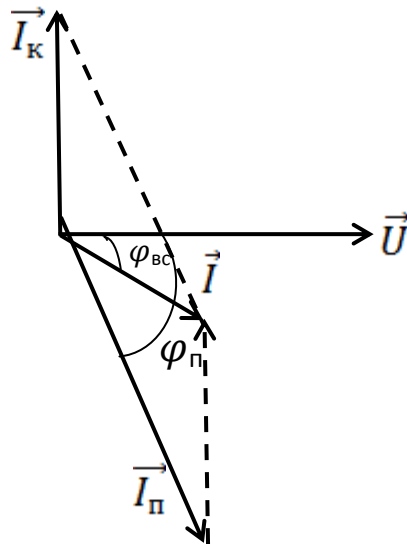


Рис. 2.26. Векторна діаграма струмів та напруги кола

Після паралельного під'єднання конденсатора  $C$  в колі з'являється ще одна гілка, струм якої  $I_K$ . Струм конденсатора випереджає напругу  $U$  на кут  $90^\circ$  (рис. 2.26). Застосувавши перший закон Кірхгофа для вузла А, отримаємо, що струм нерозгалуженої частини кола дорівнює векторній сумі струмів  $\vec{I}_P$  та  $\vec{I}_K$ :

$$\vec{I} = \vec{I}_P + \vec{I}_K. \quad (2.64)$$

З діаграми на рис. 2.26 видно, що струм  $\vec{I}$  менший за струм  $\vec{I}_P$ , який був в лінії до приєднання конденсатора  $C$ . Зменшилась також і різниця фаз (кут  $\varphi_K$ ) порівняно з  $\varphi_P$ , тому коефіцієнт потужності електричного кола в цілому збільшився.

Важливо зазначити, що після паралельного підключення конденсатора режим роботи приймача не змінився: такими ж самими лишилися його активна потужність, струм, напруга та зсув фаз на приймачеві. Але повна потужність, яку споживає коло з електричної

мережі, та струм лінії електропередачі від джерела електроенергії та зсув фаз в цій лінії зменшились.

Задавшись належним (встановленим) значенням коефіцієнта потужності  $\cos \varphi_{\text{вст}}$ , можна розрахувати необхідну для його досягнення ємність конденсатора, який необхідно підключити паралельно до наявного активно-індуктивного приймача.

Компенсацію реактивної потужності демонструє діаграма потужностей (рис. 2.27):

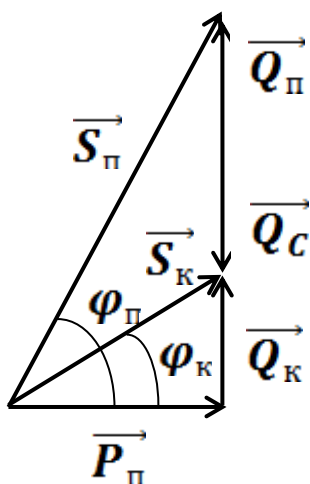


Рис. 2.27. Діаграма потужностей при компенсації реактивної потужності приймача за допомогою конденсатора

На рис. 2.27:

$P_{\text{п}}$  – активна потужність приймача;

$Q_{\text{п}}$  – реактивна потужність приймача до компенсації;

$S_{\text{п}}$  – повна потужність приймача до компенсації;  $Q_{\text{с}}$  – реактивна потужність конденсатора, що компенсує;

$Q_{\text{к}}$  – реактивна потужність кола після компенсації;

$Q_{\text{с}}$  – реактивна потужність конденсатора, що компенсує;

$S_{\text{к}}$  – повна потужність приймача після компенсації;

$\varphi_{\text{п}}$  та  $\varphi_{\text{к}} = \varphi_{\text{вст}}$  – різниці фаз струму та напруги до та після компенсації відповідно.

Реактивну потужність конденсатора, що компенсує, можна розрахувати за формулою:

$$Q_{\text{с}} = P_{\text{п}}(\operatorname{tg} \varphi_{\text{п}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{к}}), \quad (2.65)$$

де  $P_{\Pi}$  – активна потужність;

$\varphi_{\Pi}$  та  $\varphi_{\kappa}$  – різниці фаз струму та напруги до та після компенсації відповідно.

Ємність конденсатора, що компенсує реактивну потужність приймача:

$$C = \frac{Q_c}{2\pi f U^2} \quad (2.66)$$

де  $U$  – напруга, яка підведена до кола;

$f$  – частота змінного струму.

Підвищення коефіцієнту потужності призводить до скорочення теплових втрат в електричному колі та зменшує капітальні та експлуатаційні витрати на електротехнічне обладнання. До того ж внаслідок зменшення струму, що тече від джерела електроенергії до приймача, можна використовувати дроти або кабелі з меншим поперечним перерізом жил, що дозволяє економити кольорові метали.

Слід зазначити, що Правила улаштування електроустановок (ПУЕ) вимагають значень коефіцієнту потужності для промислових підприємств в межах (0,92...0,95).

### **Питання для самоперевірки до розділу 2**

1. Яким чином генерують змінний синусоїдальний струм?
2. Що називають періодом та частотою змінного струму?
3. Що називають діючим значенням змінного струму та діючим значенням напруги?
4. Що таке різниця фаз синусоїдальних функцій? Як визначається знак різниці фаз?
5. Яким чином зображуються на векторних діаграмах синусоїдальні функції?
6. Які елементи називають активними, а які реактивними?
7. Як залежать опори конденсатора та індуктивності від частоти змінного струму? (наведіть формули).
8. Які значення мають різниці фаз струму та напруги для ідеальних індуктивного та ємнісного елементів?
9. Що таке резонанс напруг та в яких колах він може спостерігатись?
10. Що таке резонанс струмів та в яких колах він може спостерігатись?

11. Накресліть схематичні векторні діаграми, які ілюструють явища а) резонансу напруг, б) резонансу струмів.

12. Що називають активною та реактивною складовими змінного струму ?

13. Сформулюйте закони Кірхгофа для кіл змінного струму.

14. Що таке миттєве значення потужності змінного струму?

15. Що таке активна, реактивна та повна потужність?

16. Дайте визначення коефіцієнту потужності. Які значення він має мати на промислових підприємствах згідно ПУЕ?

17. Для чого потрібно підвищувати коефіцієнт потужності та яким чином це можна зробити?

### Приклади розв'язання задач до розділу 2

*Приклад 1.* Написати рівняння струму та напруги та визначити активну потужність кола, векторна діаграма якого зображена на рис.2.28. Активний опір  $R = 20$  Ом, частота  $f = 100$  Гц.

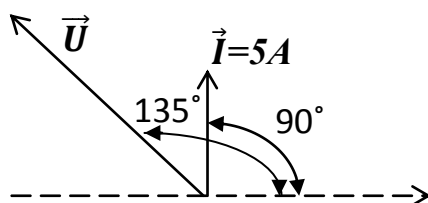


Рис. 2.28. Векторна діаграма струму та напруги

*Розв'язання.* З рис.2.28 видно, що початкові фази струму становить  $90^\circ$ , а напруги –  $135^\circ$ , отже, напруга випереджує струм на  $\varphi = 45^\circ$ . Загальні рівняння струму та напруги однакової частоти мають вигляд:

$$i = I_m \sin(\omega t + 90^\circ);$$

$$u = U_m \sin(\omega t + 135^\circ).$$

Оскільки відомо, активний опір  $R = 20$  Ом, то повний опір

$$Z = \frac{R}{\cos \varphi} = \frac{20}{\cos 45^\circ} = 20\sqrt{2} \text{ (Ом)}.$$

Тоді діюче значення напруги становитиме згідно закону Ома

$$U = I \cdot Z = 5 \cdot 20\sqrt{2} = 100\sqrt{2} \text{ (В)}.$$

Активну потужність кола знайдемо з рівняння:

$$P = U \cdot I \cos \varphi = 100\sqrt{2} \cdot 5 \frac{\sqrt{2}}{2} = 500 \text{ (Вт)}$$

Знайдемо циклічну частоту:

$$\omega = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 100 = 200\pi \left(\frac{\text{рад}}{\text{с}}\right).$$

Знайдемо амплітудні значення струму та напруги:

$$I_m = \sqrt{2} \cdot I = \sqrt{2} \cdot 5 \approx 7,05 \text{ (A)}$$

$$U_m = \sqrt{2} \cdot U = \sqrt{2} \cdot 100\sqrt{2} = 200 \text{ (В)}$$

Тепер рівняння струму та напруги мають вигляд:

$$i = 7,05\sin(200\pi t + 90^\circ); u = 200\sin(200\pi t + 135^\circ).$$

*Приклад 2.* Резистивний ( $R = 90 \text{ Ом}$ ), індуктивний ( $L = 34 \text{ мГн}$ ,  $R_k = 10 \text{ Ом}$ ) і ємнісний елементи сполучені послідовно і увімкнені до джерела змінної напруги  $U = 25 \text{ В}$  частотою  $f = 500 \text{ Гц}$ . В колі тече струм  $200 \text{ мА}$ , що відстає по фазі від напруги.

Накреслити схему кола, знайти його повний опір. Визначити реактивні опори котушки і конденсатора ( $X_L$  та  $X_C$ ). Обчислити ємність конденсатора, що увімкнений в коло. Визначити, при якій ємності конденсатора в колі буде спостерігатись резонанс напруг. Чому дорівнюватиме струм при резонансі напруг?

*Розв'язання.* Накреслимо електричну схему кола:

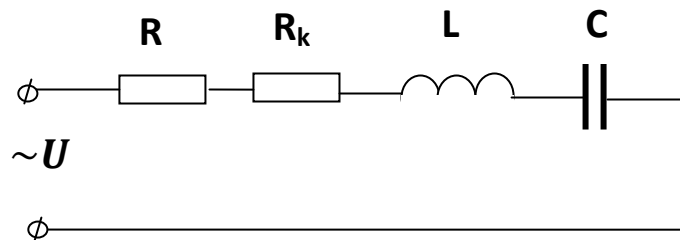


Рис. 2.29. Електрична схема до прикладу 2

Повний опір кола знайдемо з закону Ома:

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{25}{0,2} = 125 \text{ (Ом)}.$$

Модуль реактивного опору кола:

$$|X| = \sqrt{Z^2 - (R + R_k)^2} = \sqrt{125^2 - (90 + 10)^2} = 75 \text{ (Ом)}.$$

Індуктивний опір кола:

$$X_L = 2\pi fL = 2\pi \cdot 500 \cdot 34 \cdot 10^{-3} = 106,76 \text{ (Ом)}.$$

Оскільки з умови задачі відомо, що струм відстає по фазі від напруги, можна зробити висновок, що навантаження в цілому має активно-індуктивний характер, тобто індуктивний опір більший за ємнісний. Тому величина ємнісного опору:

$$X_C = X_L - X = 106,76 - 75 = 31,76 \text{ (Ом)}.$$

Ємність конденсатора:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2\pi \cdot 500 \cdot 31,76} = 10,03 \text{ (мкФ)}.$$

Умова виникнення резонансу напруг:  $X_L = X_C$ . Тому резонанс напруг буде мати місце в колі при ємності конденсатора:

$$C_0 = \frac{1}{2\pi f X_L} = \frac{1}{2\pi \cdot 500 \cdot 106,76} = 2,98 \text{ (мкФ)}.$$

При резонансі напруг повний опір кола дорівнює його активно-опорові, тому струм при резонансі напруг:

$$I = \frac{U}{R + R_k} = \frac{25}{90 + 10} = 0,25 \text{ (А)}.$$

*Приклад 3.* Приймач електричної енергії являє собою активно-індуктивне навантаження з повним опором  $Z=110$  Ом і коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi = 0,8$  при частоті струму в мережі  $f = 50$  Гц. Приймач вмикають до мережі з напругою  $U=220$  В, частотою 50 Гц. Визначити струм, споживаний приймачем. Для підвищення коефіцієнта потужності паралельно навантаженню увімкнути конденсатор, зобразивши схему кола. Припускаючи, що конденсатор дозволяє домогтися резонансу струмів, розрахувати струм конденсатора  $I_C$ , його опір  $X_C$  та ємність  $C$ . Визначити струм, споживаний усім колом. Побудувати векторну діаграму.

*Розв'язання:* струм, споживаний активно-індуктивним приймачем, знайдемо за законом Ома:

$$I_n = \frac{U}{Z} = \frac{220}{110} = 2 \text{ А}.$$

Схема кола після підключення конденсатора має вигляд, зображений на рис.2.30:

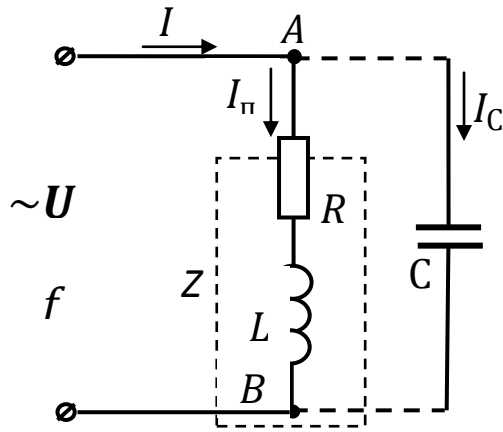


Рис.2.30. Електрична схема кола до прикладу 3

Знайдемо активну та реактивну складові струму приймача:

$$I_a = I_n \cos \varphi = 2 \cdot 0,8 = 1,6 \text{ A}$$

$$I_p = I_n \sin \varphi = 2 \cdot 0,6 = 1,2 \text{ A}$$

При резонансі струмів після підключення конденсатора різниця фаз струму та напруги в нерозгалуженій частині кола дорівнює нулю ( $\varphi_k = 0$ ), реактивна складова загального струму дорівнює нулю, тобто реактивна складова струму приймача та струм конденсатора рівні за величиною і протилежні за знаком:  $\vec{I}_C = -\vec{I}_p$ .

Тому струм конденсатора:  $I_C = 1,2 \text{ A}$ .

Струм в нерозгалуженій частині кола дорівнює активній складовій струму приймача:  $I = I_a = 1,6 \text{ A}$ .

Опір конденсатора:  $X_C = \frac{U}{I_C} = \frac{220}{1,2} = 183,3 \text{ Ом}$ .

Ємність конденсатора, що компенсує реактивну потужність приймача:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 183,3} = 17,4 \text{ мкФ}$$

Для побудови векторної діаграми визначимо різницю фаз  $\varphi$  приймача за відомим  $\cos \varphi = 0,8$ . Отримаємо, що  $\varphi = 37^\circ$  (рис. 2.31). Оберемо масштаб для струму і побудуємо вектор струму  $\vec{I}_n$  під кутом  $\varphi$  до опорного вектора напруги  $\vec{U}$ .



Розкладемо вектор  $\vec{I}_n$  на складові  $\vec{I}_a$  та  $\vec{I}_p$ .

Вектор  $\vec{I}_C$  проведемо під кутом  $\varphi_C = -90^\circ$  до вектора  $\vec{U}$ . Застосуємо перший закон Кірхгофа для знаходження загального струму кола:

$$\vec{I} = \vec{I}_n + \vec{I}_C.$$

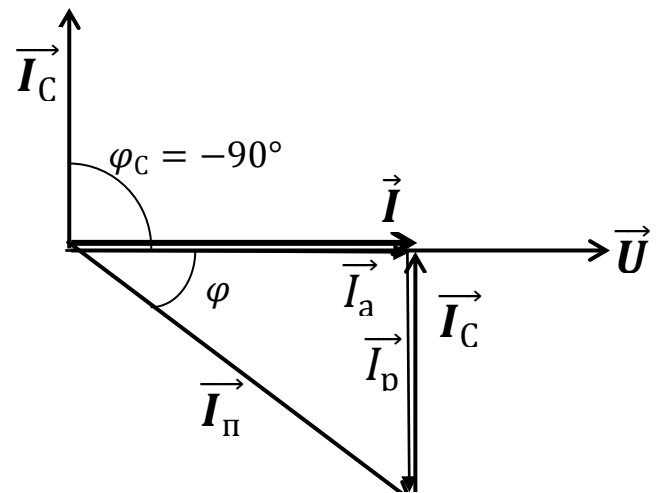


Рис.2.31. Векторна діаграма струмів та напруги до прикладу 2

### Задачі для самостійного розв'язання до розділу 2

1. Група електричних ламп розжарювання загальною потужністю  $P = 900$  Вт увімкнена в мережу змінного струму з напругою  $u = 169\sin(314t + 60^\circ)$ . Визначити діюче значення струму та написати його рівняння. Знайти миттєві значення потужностей в лампах в моменти часу  $t_1 = 0,005$  с и  $t_2 = 0,01$  с.

*Відповідь:* при  $t_1 = 0,005$  с:  $p_1 = 448$  Вт; при  $t_2 = 0,01$  с:  $p_2 = 1344$  Вт.

2. Котушка індуктивності увімкнена в мережу синусоїдального струму. Відомо, що в момент часу  $t = 0$  миттєве значення струму  $i = 5$  А та досягає додатного максимуму через  $t_1 = 2,5$  мс. Період  $T = 0,02$  с. Визначити амплітудне значення струму, початкову фазу та кутову частоту. Записати вираз для миттєвого значення струму. Розрахувати індуктивність котушки, якщо відомо, що її активний опір  $R = 6,28$  Ом.

*Відповідь:*  $I_m = 7,07$  А;  $\varphi_0 = 45^\circ$ ;  $\omega = 314$  рад/с;  $L = 20$  мГн.

3. Яким є характер нерозгалуженого кола (активно-індуктивним, активно-ємнісним, активним), якщо в результаті вимірювання напруг на його елементах отримали:

а)  $U_L = 160$  В;  $U_C = 370$  В

б)  $U_L = 220 \text{ В}; U_C = 100 \text{ В}$

в)  $U_L = 80 \text{ В}; U_C = 80 \text{ В}$ .

4. Виміри падінь напруг в нерозгалуженому колі дали такі результати:  $U_L = 150 \text{ В}; U_C = 300 \text{ В}; U_R = 150 \text{ В}$ . Яка різниця фаз в цьому колі? Напряга з яким діючим значенням подається на це коло?

*Відповідь:*  $\varphi - 45^\circ; U = 211 \text{ В}$ .

5. В коло змінного струму частотою 50 Гц увімкнені послідовно котушка з активним опором  $R = 30 \text{ Ом}$  та індуктивним  $X_L = 50 \text{ Ом}$  та конденсатор, ємність якого  $C = 318 \text{ мкФ}$ . Напряга на конденсаторі  $U_C = 100 \text{ В}$ .

Визначити струм в колі, напругу на котушці та на вході в коло, активну та реактивну потужності кола. Побудувати векторну діаграму.

*Відповідь:*  $I = 10 \text{ А}; U_k = 583 \text{ В}; U = 500 \text{ В}$ .

6. Маємо групу електричних ламп з номінальною напругою 220 В та потужністю 1000 Вт. Розрахувати індуктивність котушки (ємність конденсатора), яку треба увімкнути послідовно з групою ламп, щоб при напрузі в колі 380 В та частоті струму 50 Гц напруга на лампах дорівнювала номінальній.

*Примітка.* Вважати, що втрати в котушці та конденсаторі відсутні.

*Відповідь:*  $L = 216,7 \text{ мГн}; C = 46,8 \text{ мкФ}$ .

7. До джерела змінної напруги  $U = 25 \text{ В}$  частотою  $f = 1000 \text{ Гц}$  увімкнено електричне коло, що містить послідовно з'єднані резистивний ( $R = 140 \text{ Ом}$ ), індуктивний ( $L = 20 \text{ мГн}, R_k = 10 \text{ Ом}$ ) і ємнісний ( $C = 1,75 \text{ мкФ}$ ) елементи. Визначити реактивні опори котушки і конденсатора ( $X_L$  та  $X_C$ ). Розрахувати повний опір кола  $Z$  та струм  $I$ . При якій ємності конденсатора буде мати місце резонанс напруг? Який додатковий конденсатор  $C_{\text{дод}}$  необхідно підключити до існуючого, щоб домогтися резонансу напруг? Показати на схемі підключення додаткового конденсатора. Яким буде струм  $I_0$  при резонансі напруг?

*Відповідь:*  $X_L = 125,6 \text{ Ом}; X_C = 91 \text{ Ом}; Z = 153,9 \text{ Ом}; I = 0,162 \text{ А}; C_0 = 1,27 \text{ мкФ}; C_{\text{дод}} = 4,64 \text{ мкФ}$  (послідовно),  $I_0 = 0,17 \text{ А}$ .

8. В колі, що зображено на рис.2.30, спостерігається резонанс струмів. Відомо, що  $U = 35 \text{ В}$ ;  $f = 750 \text{ Гц}$ ;  $I_1 = 350 \text{ мА}$ ; коефіцієнт потужності гілки, що містить індуктивність  $\cos\varphi_1 = 0,75$ . Розрахувати активні та реактивні складові струму  $I_1$ , струм конденсатора  $I_C$ , визначити опір конденсатора і його ємність, а також струм у спільній ділянці кола. Чому дорівнює повна потужність  $S$ , споживана колом?

*Відповідь:*  $I_{a1} = 0,263 \text{ А}$ ;  $I_{p1} = I_C = 0,232 \text{ А}$ ;  $X_C = 151 \text{ Ом}$ ;  $C = 1,41 \text{ мкФ}$ ;  $I = 0,263 \text{ А}$ ;  $S = 9,2 \text{ ВА}$ .

9. Для електричного кола, зображеного на рис.2.32, відомо, що  $I_1 = 300 \text{ мА}$ ,  $I_2 = 200 \text{ мА}$ ,  $\cos\varphi_1 = 0,9$ ,  $\cos\varphi_2 = 0,8$ .

Розрахувати загальний струм кола, активну, реактивну і повну потужності  $P$ ,  $Q$ ,  $S$ , споживані всім колом, а також визначити коефіцієнт потужності усього кола  $\cos\varphi$ . Побудувати векторну діаграму струмів та напруг кола та діаграму потужностей кола.

*Відповідь:*  $I = 0,43 \text{ А}$ ;  $P = 12,9$

$\text{Вт}$ ;  $Q \approx 0$ ;  $S \approx 12,9 \text{ ВА}$ ;  $\cos\varphi \approx 1$ .

10. Двигун змінного струму увімкнено в мережу з напругою  $380 \text{ В}$  частотою  $50 \text{ Гц}$ . Активна потужність двигуна  $100 \text{ кВт}$ ,  $\cos\varphi = 0,707$ . Визначити, конденсатор якої ємності треба увімкнути паралельно двигуну, щоб коефіцієнт потужності усього кола дорівнював одиниці.

*Відповідь:*  $C = 2211 \text{ мкФ}$ .

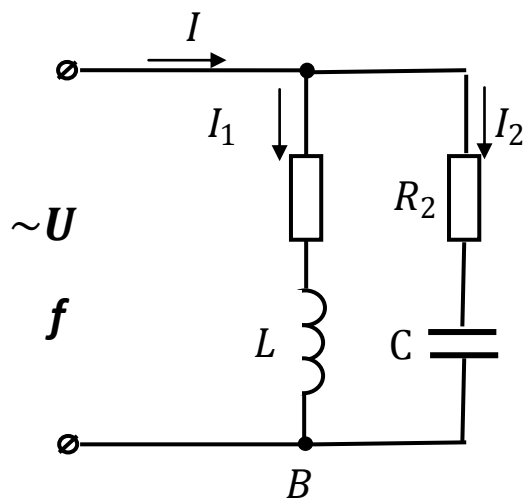


Рис.2.32. До задачі 9

## РОЗДІЛ 3

### ТРИФАЗНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА

#### 3.1. Попередні відомості й визначення

**Трифазна система** була розроблена наприкінці XIX століття видатним електротехніком М.О. Доліво-Добровольським. Завдяки тому, що передача електроенергії на великі відстані найбільш економічна саме при використанні трифазних систем, і тому, що саме трифазні двигуни мають великі переваги перед іншими видами двигунів з точки зору надійності, відносної простоти конструкції, легкості експлуатації, трифазні системи дуже широко використовують в усьому світі. Електроенергія виробляється трифазними генераторами, передається до місць споживання трифазними лініями та використовується переважно трифазними приймачами.

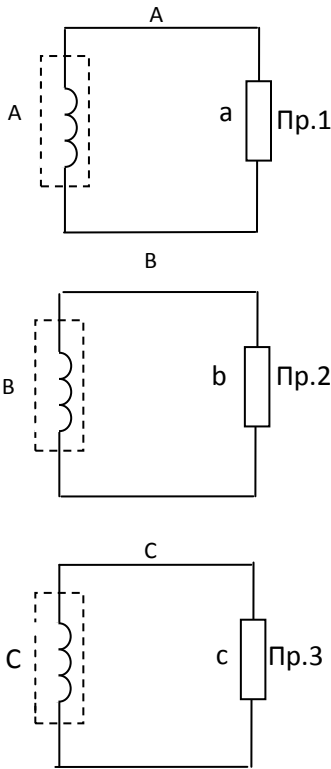


Рис. 3.1. Однофазні частини трифазного кола

**Трифазною системою, або трифазним колом** називається об'єднання певним чином в одне коло трьох однофазних кіл, що задовольняють певним вимогам.

Кожна однофазна частина трифазного кола називається **фазою** цього кола. Фази позначаються літерами А, В, С. Заголовними літерами прийнято позначати фази генератора, а маленькими літерами – фази приймача (рис. 3.1).

Для утворення трифазного кола необхідно, щоб фази генератора задовольняли наступним вимогам :

1.  $\varepsilon_A = \varepsilon_B = \varepsilon_C$  – електрорушійні сили генераторів однакової частоти однофазних кіл, тобто їх напруги, повинні бути рівними між собою.

2.  $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 120^\circ = \frac{2\pi}{3}$  – фази напруг генераторів різних однофазних кіл (тобто фаз) повинні відрізняються на третину періоду, тобто на  $120^\circ$  (рис. 3.2).

Слід розуміти, що слово «фаза» вживається в попередньому реченні у двох різних змістах: як аргумент синусоїдальної функції

напруги, і як частина трифазного кола.

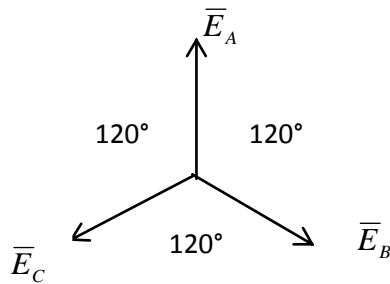


Рис. 3.2. Векторна діаграма ЕРС фаз генераторів трифазного кола

Найпоширенішими способами об'єднання однофазних кіл у трифазне коло є способи «зірка», позначуваний звичайно «Y», і «трикутник», позначуваний «Δ».

### 3.2. Спосіб об'єднання в трифазне коло «зірка» («Y»)

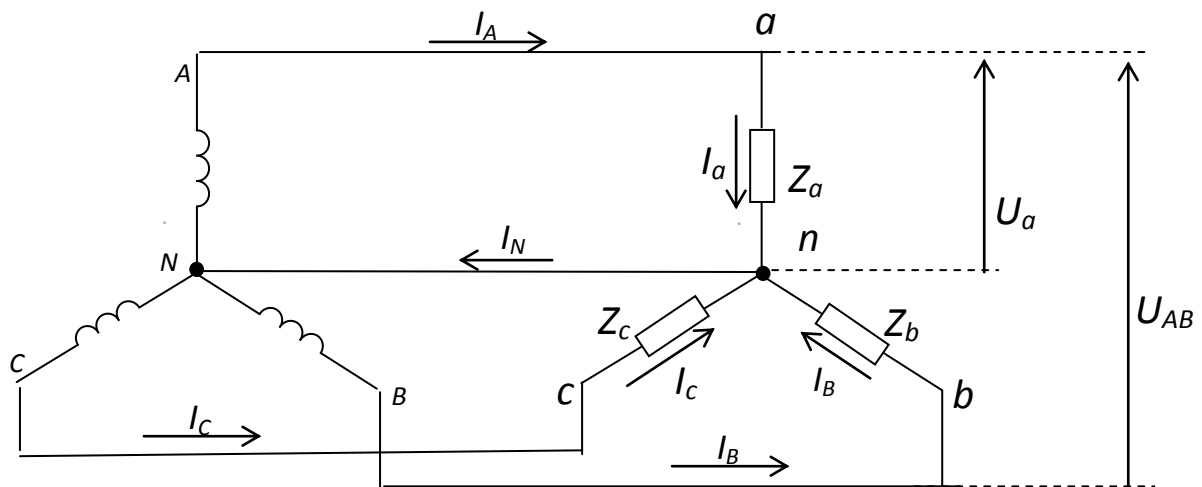


Рис. 3.3. Схема трифазного кола «зірка-зірка» («Y-Y»)

На рис. 3.3. представлена схема об'єднання в трифазне коло трьох однофазних кіл за схемою «зірка-зірка». Це означає, що кінці фаз генератора з'єднані в одну точку (N), та кінці фаз приймача теж з'єднані в одну точку (n).

Для позначення елементів трифазної схеми потрібно ввести певну термінологію. На рис. 3.3:

$A, B, C$  – початки фаз генератора;  $a, b, c$  – початки фаз приймача;  $Z_a, Z_b, Z_c$  – повні опори відповідних фаз приймача; точки  $N$  й  $n$  – так звані нейтральні точки.

Дріт  $Nn$  називається нейтральним дротом, а струм, що тече по ньому – нейтральним струмом  $I_N$ , або **струмом нейтрального дроту**.

Дроти  $Aa, Bb, Cc$  називаються лінійними дротами, а струми, що течуть по цим дротам – відповідними **лінійними струмами**, які позначаються  $I_A, I_B, I_C$ .

Струми, що течуть через фази приймача, називаються **фазними струмами** й позначаються  $I_a, I_b, I_c$ . Напруги на фазах приймача називаються фазними напругами й позначаються  $U_a, U_b, U_c$ .

Зображення на рис.3.3 схема відповідає **чотиридротовій** схемі.

**Фазна напруга** діє між нейтральним і відповідним лінійними дротами.

Напруги, що діють між початками різних фаз приймача (або генератора), називаються **лінійними напругами** й позначаються  $U_{ab}, U_{bc}, U_{ca}$ . Ці ж напруги діють між лінійними дротами.

Навантаження (приймач) трифазного кола називається **симетричним**, якщо всі три фази приймача однакові, тобто рівні активні складові фаз приймача :

$$R_a = R_b = R_c$$

і рівні реактивні складові фаз приймача:

$$X_a = X_b = X_c,$$

звідки випливає, що рівні й повні опори фаз приймача:

$$Z_a = Z_b = Z_c$$

Однак слід розуміти, що рівності повних опорів фаз приймача недостатньо, щоб цей приймач був симетричним, тому що рівність повних опорів ще не означає рівність активних і реактивних складових повного опору.

Приклад такого несиметричного приймача наведено на рис. 3.4.

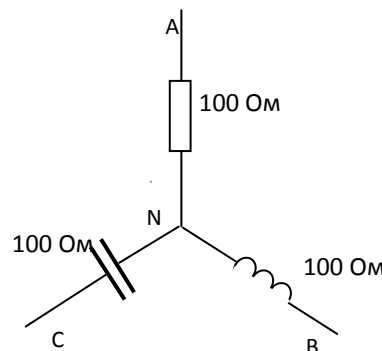


Рис. 3.4. Несиметричний приймач

### 3.2.1. Властивості з'єднання «зірка - зірка» («Y - Y»)

1. Лінійні й фазні струми відповідних фаз рівні між собою :

$$I_A = I_a ; I_B = I_b ; I_C = I_c \quad (3.1)$$

2. Всі фази приймача підключені паралельно до відповідних фаз генератора (за допомогою лінійних дротів і нейтрального дроту). Тому фазні напруги приймача дорівнюють фазним напругам генератора, і, отже, рівні між собою за величиною:

$$U_a = U_b = U_c \quad (3.2)$$

Різниця фаз напруг на фазах приймача дорівнює  $120^\circ$ , або однієї третині періоду. Як й у генератора:

$$\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = 120^\circ = \frac{2\pi}{3}. \quad (3.3)$$

Таким чином, векторна діаграма фазних напруг приймача має вигляд, представлений на рис. 3.5, і являє собою систему трьох симетричних векторів :  $U_a = U_b = U_c$

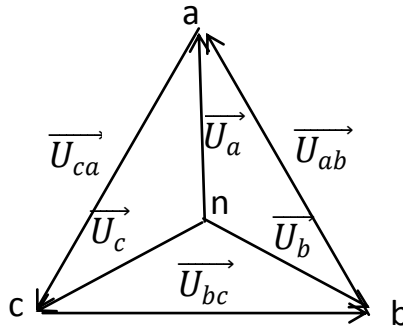


Рис. 3.5. Векторна діаграма фазних та лінійних напруг схеми «зірка»

**Зауваження:** Ця властивість притаманна трифазному колу при наявності нейтрального дроту, а також при його відсутності в тому випадку, якщо приймач симетричний. Інакше кажучи, рівність фазних напруг неможлива у випадку несиметричного навантаження при відсутності нейтрального дроту.

3. Лінійні напруги приймача, ґрунтуючись на справедливості другого закону Кірхгофа, можна представити як векторні різниці відповідних фазних напруг ( рис. 3.5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \overrightarrow{U_{ab}} = \overrightarrow{U_a} - \overrightarrow{U_b} ; \\ \overrightarrow{U_{bc}} = \overrightarrow{U_b} - \overrightarrow{U_c} ; \\ \overrightarrow{U_{ca}} = \overrightarrow{U_c} - \overrightarrow{U_a} . \end{array} \right. \quad (3.4)$$

Таким чином, діюче значення лінійних напруг дорівнює векторній різниці відповідних фазних напруг.

В окремому випадку симетричного навантаження, або при несиметричному навантаженні, але при наявності нейтрального дроту, тобто тоді, коли справедлива властивість 2, між лінійними й фазними напругами існує співвідношення:

$$U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi} \quad (3.5)$$

Студентам пропонується самостійно одержати це співвідношення, використовуючи знання геометрії.

Значення лінійних напруг, які передбачені державними стандартами та використовуються на практиці (127 В, 220 В, 380 В, 660 В) відрізняються одне від іншого саме в  $\sqrt{3} = 1,73$  рази.

Звернемо увагу, що співвідношення (3.5) не є справедливим, якщо навантаження є несиметричним при відсутності нейтрального дроту.

Умова (3.5) обов'язково повинна виконуватися в електричних мережах, тому при несиметричному навантаженні обов'язкова наявність нейтрального дроту. Відсутність нейтрального дроту (тридротова схема) припустима тільки при цілком симетричному навантаженні.

### 3.2.2. Послідовність розрахунку трифазного кола «зірка-зірка»

а) Розраховують фазні струми за законом Ома:

$$I_a = \frac{U_a}{Z_a} ; \quad I_b = \frac{U_b}{Z_b} ; \quad I_c = \frac{U_c}{Z_c}; \quad (3.6)$$

б) розраховують різниці фаз фазних струмів і відповідних фазних напруг:

$$\varphi_a = \arctg \frac{X_a}{R_a}; \quad \varphi_b = \arctg \frac{X_b}{R_b} ; \quad \varphi_c = \arctg \frac{X_c}{R_c}; \quad (3.7)$$



в) розраховують струм нейтрального дроту. У відповідності до першого закону Кірхгофа (див. рис. 3.3), **струм нейтрального дроту дорівнює векторній сумі діючих значень фазних струмів:**

$$\vec{I}_N = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c \quad (3.8)$$

Для знаходження струму нейтрального дроту необхідно:

- 1) побудувати векторну діаграму фазних напруг;
- 2) доповнити її векторами фазних струмів;
- 3) знайти суму векторів фазних струмів.

Перед усім треба вибрати масштаб для струму (масштаб напруги в цьому випадку не має значення, тому що ніякі дії з векторами напруг виконуватись не будуть). Вектори струмів відкладаємо в оберненому масштабі під розрахованими по формулах (3.7) кутами до фазних напруг. Потім виконуємо векторне додавання. Вимірюємо довжину результуючого вектора й, користуючись масштабом струму, визначаємо силу струму в нейтральному дроті (рис. 3.6).

Для визначеності припущено, що при розрахунках різниць фаз отримали:  $\varphi_a > 0$ ;  $\varphi_b < 0$ ;  $\varphi_c < 0$ .

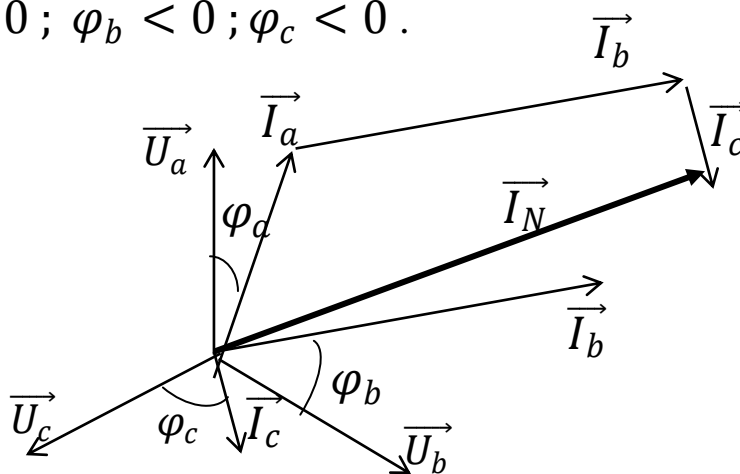


Рис. 3.6. Визначення струму нейтрального дроту за допомогою векторної діаграми

Розглянемо окремий випадок – симетричний приймач. Для симетричного приймача справедливо:

$$\begin{cases} I_a = I_b = I_c \\ \varphi_a = \varphi_b = \varphi_c \end{cases} \quad (3.9)$$

Отже, при симетричному навантаженні фазні струми утворять систему трьох симетричних векторів (рис. 3.7), сума яких, тобто нейтральний струм, дорівнює нулю. Це легко довести геометрично, що й пропонується студентам зробити самостійно.

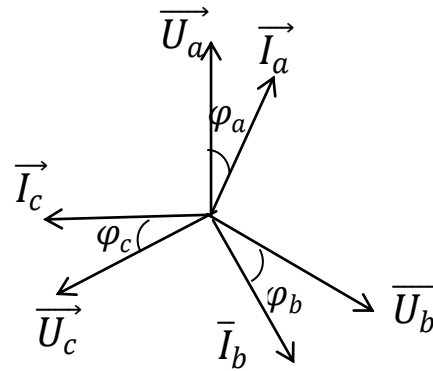


Рис. 3.7. Векторна діаграма симетричного приймача

**Висновок:** При симетричному навантаженні нейтральний дріт не потрібний. Застосовується так звана тридротова лінія, що складається із трьох лінійних проводів.

Приклади симетричного навантаження: трифазний електродвигун, трансформатор. Ці види електроустаткування підключаються трьома проводами. У всіх інших випадках, коли навантаження несиметричне, нейтральний дріт є обов'язковим.

**Роль нейтрального дроту полягає в збереженні симетрії фазних напруг.** Відсутність нейтрального дроту при несиметричному навантаженні приводить до виникнення так званого «перекосу фаз», а точніше, перекосу фазних напруг – при цьому в одних фазах напруга зростає, а в інших – зменшується. У зв'язку з винятковою роллю нейтрального дроту в ньому забороняється встановлювати будь-які пристрої захисту.

### 3.3. Схема об'єднання приймачів в трифазне коло за схемою «трикутник-трикутник» (« $\Delta$ - $\Delta$ »)

На рис. 3.8 зображена схема з'єднання однофазних кіл у трифазне коло «трикутник-трикутник».

Фази генератора позначаються  $AB$ ,  $BC$ ,  $CA$ , а фази приймача – відповідно  $ab$ ,  $bc$ ,  $ca$ . По лінійним проводам  $Aa$ ,  $Bb$ ,  $Cc$  протікають лінійні струми  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ . Струми, позначені  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$  – це фазні струми.

З рис. 3.8 видно, що фази приймача з'єднані паралельно з фазами генератора. До вузлів  $a$ ,  $b$ ,  $c$  можливо застосувати 1-й закон Кірхгофа, що дасть можливість розрахувати лінійні струми  $I_{ab}$ ,  $I_{bc}$ ,  $I_{ca}$ .

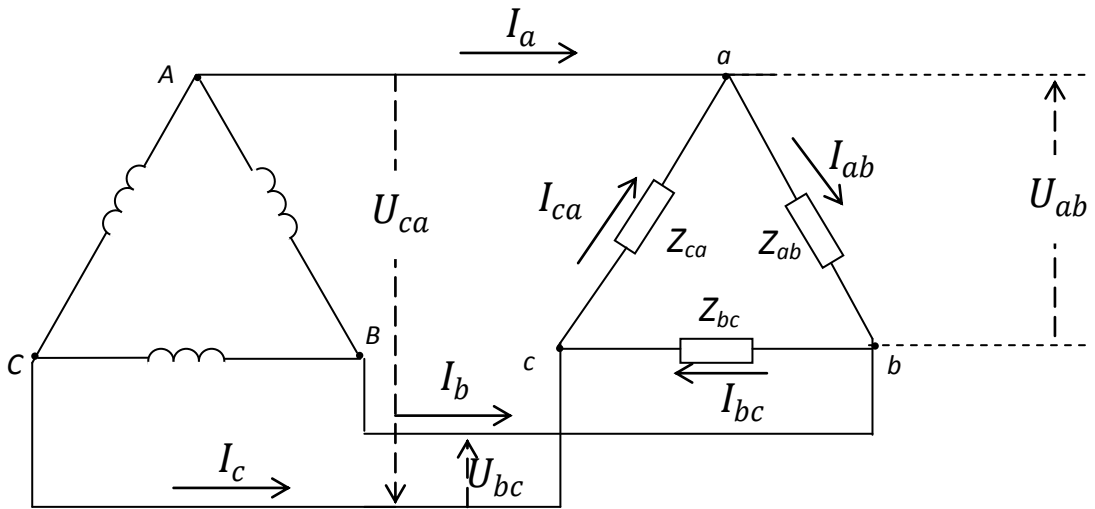


Рис. 3.8. Схема з'єднання однофазних кіл у трифазне коло «трикутник – трикутник» (« $\Delta - \Delta$ »)

### 3.3.1. Властивості схеми «трикутник»

1. Фазна й лінійна напруги тотожно рівні між собою:

$$U_{\phi} \equiv U_{\text{л}} \text{ – (це та сама напруга);}$$

2. Співвідношення між фазними й лінійними струмами: відповідно до першого закону Кірхгофа лінійні струми рівні векторним різницям відповідних фазних струмів:

$$\begin{cases} \vec{I}_a = \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca}; \\ \vec{I}_b = \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab}; \\ \vec{I}_c = \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc}. \end{cases} \quad (3.10)$$

### 3.3.2. Послідовність розрахунку схеми

а) розраховують фазні струми за законом Ома:

$$\begin{cases} I_{ab} = \frac{U_{ab}}{Z_{ab}}; \\ I_{bc} = \frac{U_{bc}}{Z_{bc}}; \\ I_{ca} = \frac{U_{ca}}{Z_{ca}}; \end{cases} \quad (3.11)$$

б) розраховують різниці фаз фазних струмів і фазних напруг:

$$\begin{cases} \varphi_{ab} = \arctg \frac{X_{ab}}{R_{ab}}; \\ \varphi_{bc} = \arctg \frac{X_{bc}}{R_{bc}}; \\ \varphi_{ca} = \arctg \frac{X_{ca}}{R_{ca}}; \end{cases} \quad (3.12)$$

в) розраховують лінійні струми  $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$  згідно зі співвідношеннями (3.10), тобто за допомогою побудови векторної діаграми фазних струмів і напруг та знаходження векторних різниць відповідних фазних струмів.

Послідовність дій:

- 1) побудувати векторну діаграму фазних напруг;
- 2) розрахувати фазні струми;
- 3) доповнити діаграму фазних напруг векторами фазних струмів;
- 4) знайти лінійні струми  $\vec{I}_a$ ,  $\vec{I}_b$ ,  $\vec{I}_c$  (векторні різниці фазних струмів).

Прийнято будувати векторну діаграму фазних напруг у вигляді рівнобічного трикутника, при цьому кути між відповідними фазними напругами становитимуть по  $120^\circ$  :

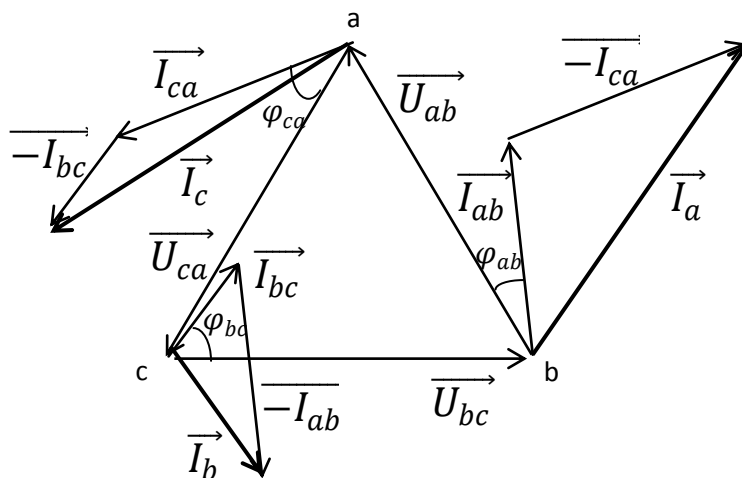


Рис. 3.9. Векторна діаграма для визначення лінійних струмів

**Зауваження:** Студентам пропонується самостійно довести, використовуючи знання геометрії, що при симетричному приймачеві справедливо наступне співвідношення:

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi \quad (3.13)$$

Спосіб з'єднання фаз генератора, загалом кажучи, не зв'язаний зі способом з'єднання фаз приймача, тому можливі різні способи з'єднання, наприклад « $\Delta$ - $Y$ », « $Y$ - $\Delta$ ».

### 3.4. Порівняльна характеристика схем « $Y$ » й « $\Delta$ »

- У схемі «зірка» у загальному випадку використовується чотири дроти, а в схемі «трикутник» – три.
- У схемі «зірка» є два рівні напруги: лінійна й фазна, а в схемі «трикутник» – один рівень напруги (лінійна тотожно дорівнює фазній).
- Для симетричних навантажень справедливо:
  - схема «зірка» – виконується співвідношення  $U_L = \sqrt{3} U_\phi$  ;
  - схема «трикутник» – виконується співвідношення

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\phi.$$

- У схемі «зірка» фазний і лінійний струми однакові;
- У схемі «трикутник» однакові фазна й лінійна напруги.

### 3.5. Підключення трифазних приймачів до мережі

Зазвичай електроенергія передається споживачеві на високій напрузі, тому що це економічно вигідно, а потім напругу знижують до 380 В за допомогою трансформаторних підстанцій або трансформаторів. До трансформатора підключають трьома дротами, тому що він являє собою симетричне навантаження – обмотки його фаз однакові.

Як правило, фази трансформатора, які є джерелом електропостачання для багатьох промислових об'єктів, з'єднані за схемою «зірка», і від трансформатора до споживача йде чотири дроти: три лінійних й один нейтральний. Це дає можливість використати два різні рівні напруги.

Якщо споживач електроенергії підключається між лінійними проводами, тобто за схемою « $\Delta$ », він одержує лінійну, більш високу напругу. А якщо споживач підключений за схемою « $Y$ », тобто між лінійними і нейтральними дротами, він одержує фазну, більш низьку

напругу. Приклад підключення двох трифазних приймачів, розрахованих на різну напругу (220 В и 380 В), показаний на рис. 3.10.

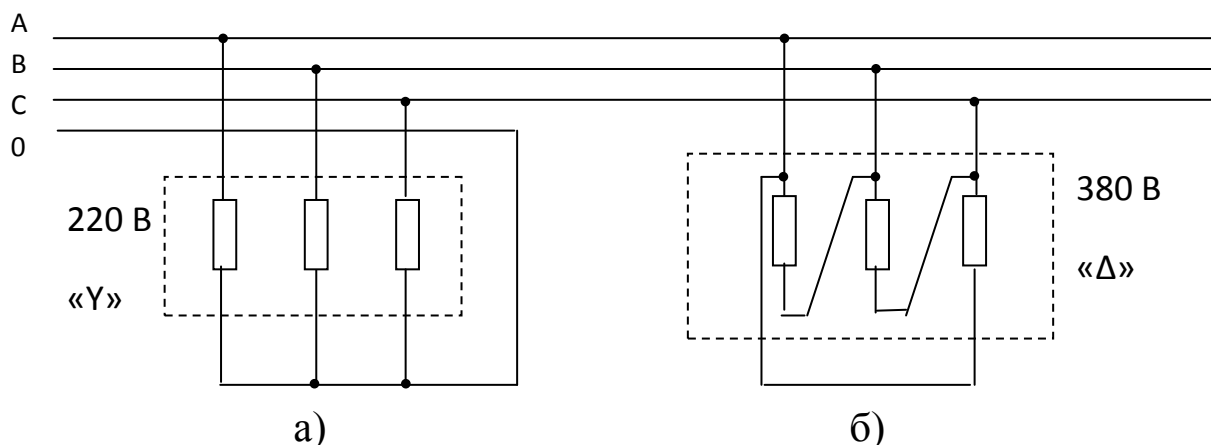


Рис. 3.10. Підключення трифазних приймачів до мережі за схемою «зірка» (а) та за схемою «трикутник» (б)

### 3.6. Аварійні режими роботи трифазних схем «зірка» та «трикутник»

При з'єднанні однофазних приймачів за схемою «зірка» без нейтрального дроту представляють інтерес два аварійні випадки несиметричного навантаження: обрив лінійного дроту і коротке замикання однієї з фаз.

#### 3.6.1. Обрив лінійного дроту в схемі «зірка»

У разі обриву одного лінійного дроту, наприклад, «А», дві інші фази виявляються з'єднаними послідовно по відношенню до лінійної напруги, в нашому випадку  $U_{bc}$  (див. рис. 3.3), внаслідок чого по колу з двох фаз тече струм

$$I_b = I_c = \frac{U_{bc}}{\sqrt{(R_b + R_c)^2 + (X_b + X_c)^2}}, \quad (3.14)$$

де  $R_b, R_c, X_b, X_c$  – активні та реактивні складові опорів приймачів у фазах В та С.

Величини напруг в «здорових» фазах визначаються як

$$U_\phi = I_\phi \cdot Z_\phi \quad (3.15)$$

На векторній діаграмі напруг такого кола (рис. 3.11) точка «п» зміщується на лінію вектора  $\vec{U}_{bc}$  (порівняйте з рис. 3.5, на якому ця точка знаходиться в геометричному центрі трикутника abc). Струм

в приймачі з обірваним лінійним дротом дорівнює нулю.

### 3.6.2. Коротке замкнення однієї з фаз в схемі «зірка»

У разі короткого замикання однієї фази, наприклад «А» (рис. 3.12), за відсутності нейтрального дроту потенціали точок «а» і «п» збігаються (на векторній діаграмі напруг точка «п» зміститься в точку «а» – див. рис. 3.13), таким чином  $U_a = 0$ , а фазні напруги на «здорових» фазах приймача будуть дорівнювати лінійним:

$$\vec{U}_b = \vec{U}_{ab}; \quad \vec{U}_c = \vec{U}_{ca},$$

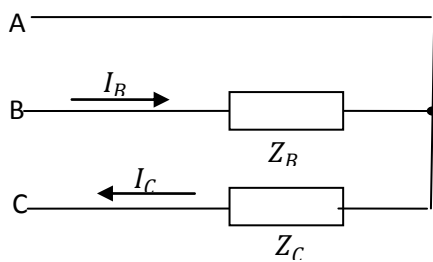


Рис. 3.12. Схема з'єднання «зірка» при короткому замиканні фази «А»

тобто зростуть в  $\sqrt{3}$  раз. У стільки ж зростуть і величини струмів в «здорових» фазах. Незважаючи на те, що напруга замкнутої накоротко фази дорівнює нулю, струм в ній не дорівнює нулю. Для нашого прикладу його можна визначити з векторного рівняння

$$\vec{I}_a = -(\vec{I}_b + \vec{I}_c) \quad (3.16)$$

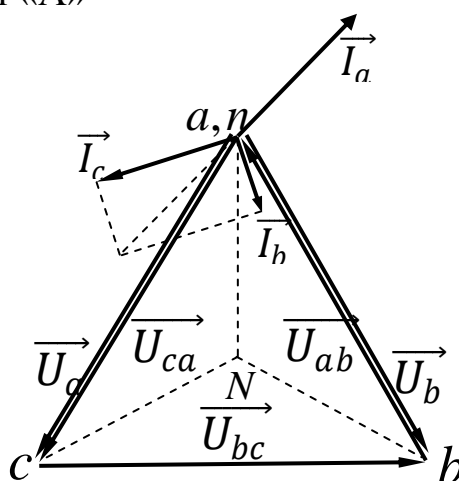


Рис. 3.13 Векторна діаграма струмів та напруг кола «зірка» в разі короткого замикання фази «А»

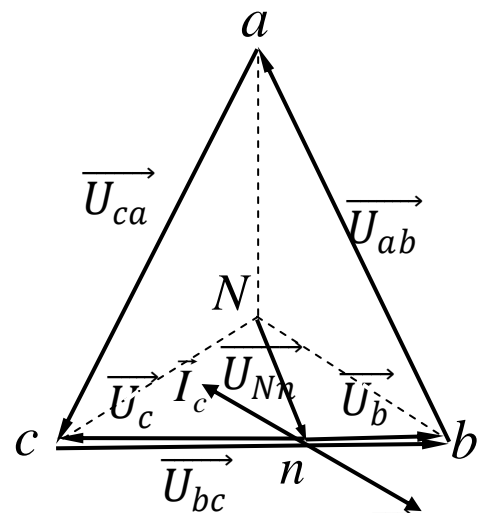


Рис. 3.11. Векторна діаграма струмів та напруг трифазного кола «зірка» в разі обриву одного з лінійних дротів

### 3.6.3. Обрив однієї з фаз в схемі «трикутник»

При обриві однієї фази (наприклад, «са», рис. 3.14) її струм дорівнює нулю, інші фазні струми при цьому не змінюються, тому що ці фази підключені до тих самих лінійних напруг, що і до аварії. Так, при обриві в колі фазного навантаження «са» лінійні струми будуть дорівнювати:

$$\begin{cases} \vec{I}_A = \vec{I}_{ab} \\ \vec{I}_B = \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab} \\ \vec{I}_C = \vec{I}_{bc} \end{cases} \quad (3.17)$$

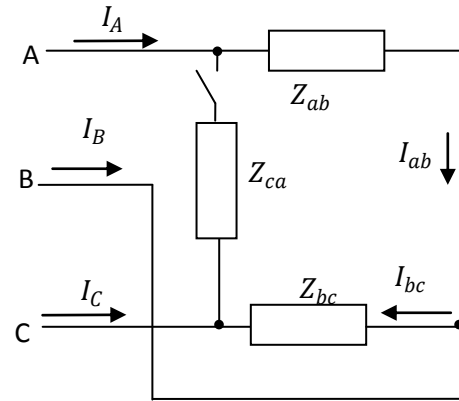


Рис. 3.14. Схема з'єднання «трикутником» при обриві однієї з фаз («са»)

Векторна діаграма напруг та струмів схеми «трикутник» при обриві однієї з фаз («са») наведена на рис. 3.15.

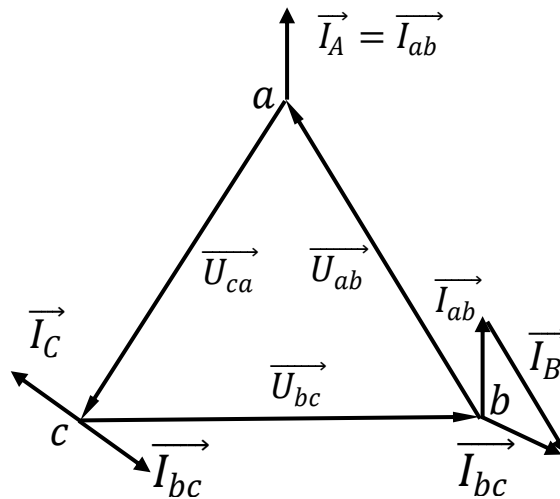


Рис. 3.15. Векторна діаграма струмів та напруг при обриві однієї з фаз приймача, з'єднаного за схемою «трикутник»



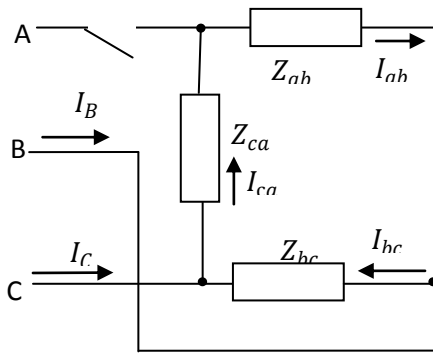


Рис. 3.16. Схема з'єднання «трикутником» при обриві одного з лінійних дротів («А»)

### 3.6.4. Обрив одного лінійного дроту в схемі «трикутник»

При обриві одного лінійного дроту напруга залишається незмінною тільки в тій фазі, яка не пов'язана з обірваним лінійним дротом (рис. 3.16). Так, при обриві лінійного дроту «А», напруга на фазі «bc» дорівнюватиме лінійній напрузі  $\overrightarrow{U_{bc}}$ , тобто буде такою самою, як і до обриву. Приймачі фаз «ab» і «ac» виявляться з'єднаними

послідовно і підключеними до напруги  $U_{bc}$ .

В силу цього  $\overrightarrow{U_{ca}} + \overrightarrow{U_{ab}} = \overrightarrow{U_{bc}}$ , та

$$I_{ab} = I_{ca} = \frac{U_{bc}}{\sqrt{(R_{ab} + R_{ca})^2 + (X_{ab} + X_{ca})^2}}, \quad (3.18)$$

Зсув по фазі струму  $I_{bc}$  складає:

$$\varphi_{bc} = \arctg \frac{X_{bc}}{R_{bc}}, \quad (3.19)$$

а струму  $I_{ab}$  також, як і  $I_{ca}$

$$\varphi_{ab} = \varphi_{ca} = \arctg \frac{X_{ab} + X_{ca}}{R_{ab} + R_{ca}}. \quad (3.20)$$

З векторної діаграми (рис. 3.17) маємо, що

$$\overrightarrow{I_B} = \overrightarrow{I_{bc}} + \overrightarrow{I_{ab}}, \quad (3.21)$$

$$\overrightarrow{I_C} = -\overrightarrow{I_B}. \quad (3.22)$$

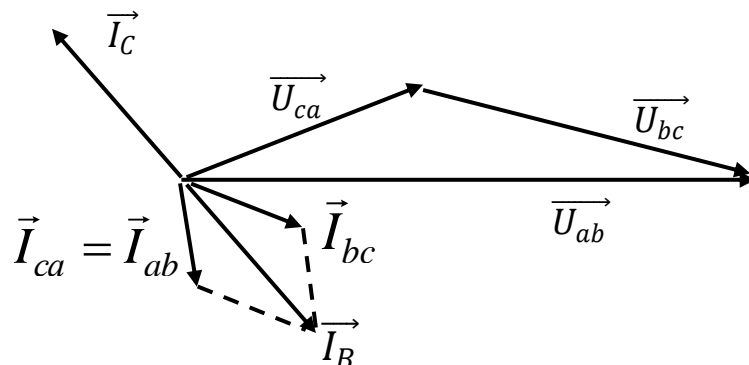


Рис. 3.17. Векторна діаграма струмів та напруг при обриві лінійного дроту «А» приймача, з'єданого «трикутником»

### 3.7. Потужність в трифазних схемах

Миттєве значення активної потужності окремої фази (фазна потужність) визначається таким самим чином, як і активна потужність однофазного кола: добутком миттєвих значень фазних напруг та струмів:

$$\begin{cases} p_A = u_A \cdot i_A \\ p_B = u_B \cdot i_B \\ p_C = u_C \cdot i_C \end{cases} \quad (3.23)$$

При симетричній системі фазних напруг:

$$\begin{cases} u_A = U_{Am} \sin \omega t; \\ u_B = U_{Bm} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}); \\ u_C = U_{Cm} \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}). \end{cases} \quad (3.24)$$

В загальному випадку несиметричного навантаження фазні струми відповідно дорівнюють:

$$\begin{cases} i_A = I_{Am} \sin(\omega t - \varphi_A); \\ i_B = I_{Bm} \sin \left[ (\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \varphi_B \right]; \\ i_C = I_{Cm} \sin \left[ (\omega t - \frac{4\pi}{3}) - \varphi_C \right], \end{cases} \quad (3.25)$$

де  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  – різниця фаз між струмом та напругою у відповідних фазах.

Якщо підставимо в формули (3.23) вирази (3.24) та (3.25) для фазних напруг та струмів, отримаємо значення активних миттєвих фазних потужностей:

$$\begin{cases} p_A = U_A \cdot I_A [\cos \varphi_A - \cos(2\omega t - \varphi_A)]; \\ p_B = U_B \cdot I_B \left[ \cos \varphi_B - \cos(2\omega t - \left(\frac{2\pi}{3}\right) - \varphi_B) \right] \\ p_C = U_C \cdot I_C \left[ \cos \varphi_C - \cos(2\omega t - \left(\frac{4\pi}{3}\right) - \varphi_C) \right], \end{cases} \quad (3.26)$$

де  $U_A, U_B, U_C$  – фазні напруги;

$I_A, I_B, I_C$  – фазні струми трифазної системи.

Миттєва активна потужність трифазного приймача дорівнює сумі миттєвих активних потужностей окремих фаз:

$$p = p_A + p_B + p_C \quad (3.27)$$

Знайдемо миттєву потужність симетричного приймача в симетричній трифазній системі ( $U_A = U_B = U_C$ ;  $I_A = I_B = I_C = I_\phi$ ;  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$ ). Для цього підставимо вирази (3.26) в формулу (3.27).

Після проведення тригонометричних перетворень отримаємо:

$$p = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi. \quad (3.28)$$

Таким чином, миттєва активна потужність трифазної системи з симетричним приймачем не залежить від часу. Сума змінних складових миттєвих значень фазних потужностей в рівняннях (3.26) дорівнює нулю, бо вони мають однакову амплітуду та зсунуті по фазі одна відносно одної на кут  $\frac{2\pi}{3}$ .

Системи, потужність яких вважається постійною впродовж усього часу спостереження, називаються врівноваженими. Навпаки, системи, в яких присутня складова потужності, яка змінюється з подвійною частотою системи, називаються неврівноваженими. Відсутність коливань миттєвої потужності у врівноважених системах дозволяє передавати електроенергію на великі відстані без втрат на електромагнітне випромінювання. Цією перевагою трифазних систем визначається їх широке використання.

Активна потужність приймача завжди визначається як середня за період миттєва потужність:  $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$ , і в нашому випадку

$$P = p = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi. \quad (3.29)$$

Потужність трифазного приймача зручніше обчислювати через лінійні напруг та струм, тому що лінійні величини легше виміряти.

Беручи до уваги, що при з'єднанні фаз «зіркою»

$$U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}, \quad \text{та} \quad I_\phi = I_L,$$

а при з'єднанні фаз «трикутником»

$$I_\phi = \frac{I_L}{\sqrt{3}}, \quad \text{та} \quad U_\phi = U_L,$$

в обох випадках отримаємо з формули (3.29):

$$P = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi. \quad (3.30)$$

Ця формула, як вже відзначалося, є справедливою як для схеми «зірка», так і для схеми «трикутник», але лише у випадках симетричного приймача.

Неважко довести, що реактивна потужність симетричного трифазного приймача

$$Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi, \quad (3.31)$$

а його повна потужність незалежно від схеми з'єднання («зірка» чи «трикутник»):

$$S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}. \quad (3.32)$$

У загальному випадку несиметричного приймача його активна потужність дорівнює сумі активних фазних потужностей:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (p_A + p_B + p_C) dt.$$

Отже, для несиметричного приймача:

$$P = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C. \quad (3.33)$$

### Питання для самоконтролю до розділу 3

1. Що потрібно для утворення симетричної трифазної системи ЕРС?
2. Як на практиці отримують трифазну систему ЕРС?
3. Накресліть схему з'єднання зіркою обмоток джерела та фаз приймача.
4. Які напруги в трифазному колі називають фазними та які – лінійними?
5. Яке співвідношення між лінійними та фазними напругами в симетричній трифазній схемі зірка?
6. Які струми в трифазному колі називають фазними та які – лінійними?
7. Яке навантаження в трифазній схемі називають симетричним?
8. Чи буде симетричним трифазний приймач, в одній фазі якого резистор з  $Z_A = R = 50 \text{ Ом}$ ; в другій фазі – конденсатор з  $Z_B = X_C = 50 \text{ Ом}$ ; в третій фазі – індуктивність з  $Z_C = X_L = 50 \text{ Ом}$ ?
9. В чому полягає роль нейтрального дроту?

10. Чому в нейтральному дроті ніколи не встановлюють запобіжники?

11. Чому дорівнює струм нейтрального дроту при симетричному приймачеві?

12. Як розрахувати струм нейтрального дроту несиметричного приймача?

13. Накресліть схему з'єднання зіркою обмоток джерела та трикутником – фаз приймача.

14. Яке співвідношення між лінійними та фазними струмами в симетричній трифазній схемі трикутник?

15. Порівняйте схеми зірка та трикутник за властивостями.

16. Як впливає обрив нейтрального дроту на фазні напруги несиметричного приймача?

17. Як впливає обрив одного з лінійних дротів в схемі зірка на фазні напруги та струми?

18. Як змінюються напруги та струми у випадку короткого замикання однієї з фаз в трифазній схемі трикутник?

19. Чому при симетричному навантаженні застосовують тридротовий зв'язок джерела з приймачем?

20. Наведіть приклади симетричних навантажень.

### **Приклади розв'язання задач до розділу 3**

#### *Приклад 1.*

Фазна напруга генератора, з'єданого зіркою, дорівнює 220 В. Трифазний симетричний приймач, з'єднаний зіркою, має активний опір фази  $R=4$  Ом; реактивний опір фази  $X_L=3$  Ом. Визначити фазні та лінійні струми та активну, реактивну та повну потужності приймача.

*Розв'язання:*

Повний опір фази приймача:  $Z_\phi = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$  Ом.

Лінійний та фазний струми в схемі зірка однакові:

$$I_L = I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi} = \frac{220}{5} = 44 \text{ А.}$$

Коефіцієнт потужності фаз приймача

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z_\phi} = \frac{4}{5} = 0,8.$$

Лінійна напруга схеми зірка  $U_L = \sqrt{3} U_\phi = \sqrt{3} \cdot 220 = 380$  В.

Активна потужність схеми

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 44 \cdot 0,8 = 23,14 \text{ кВт.}$$

Реактивна потужність схеми:

$$Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 44 \cdot 0,6 = 17,36 \text{ кВАр.}$$

Повна потужність схеми

$$S = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 44 = 28,93 \text{ кВА.}$$

*Приклад 2.*

Трифазний асинхронний двигун, обмотки якого з'єднані трикутником, підключений до мережі з лінійною напругою 220 В. Визначити лінійні та фазні струми двигуна, якщо він розвиває потужність 5 кВт при  $\cos \varphi = 0,75$ .

*Розв'язання:*

Лінійний струм трифазного двигуна знайдемо з формули активної потужності:

$$I_{\text{л}} = \frac{P}{\sqrt{3} U_{\text{л}} \cos \varphi} = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,75} = 17,5 \text{ А.}$$

Фазний струм симетричного приймача, яким є асинхронний трифазний двигун  $I_{\text{ф}} = \frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{17,5}{\sqrt{3}} \approx 10 \text{ А.}$

*Приклад 3.*

В мережу з лінійною напругою 220 В підключений симетричний приймач, з'єднаний зіркою. Повний опір фази приймача  $Z_{\text{ф}} = 10 \text{ Ом.}$  Її активний опір  $R_{\text{ф}} = 8 \text{ Ом.}$  Визначити активну потужність приймача.

*Розв'язання:*

Коефіцієнт потужності симетричного приймача

$$\cos \varphi = \frac{R_{\text{ф}}}{Z_{\text{ф}}} = \frac{8}{10} = 0,8.$$

Фазна напруга для схеми зірка  $U_{\text{ф}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В.}$

Фазний та лінійний струм дорівнюють

$$I_{\text{ф}} = I_{\text{л}} = \frac{U_{\text{ф}}}{Z_{\text{ф}}} = \frac{127}{10} = 12,7 \text{ А.}$$

Активна потужність приймача

$$P = 3 U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi = 3 \cdot 127 \cdot 12,7 \cdot 0,8 = 3,87 \text{ кВт.}$$

*Приклад 4.*

До трифазної лінії електропередач з лінійною напругою 220 В (рис. 3.18) по трифазній схемі підключені три однофазних приймачі, кожен з яких розрахований на напругу  $U_{\phi} = 127$  В.  $X_L = X_C = 70,9$  Ом;  $R_1 = 100$  Ом;  $R_2 = R_3 = 70,9$  Ом. Накреслити схему підключення; визначити фазні струми  $I_1, I_2, I_3$ ; побудувати векторну діаграму струмів та напруг; визначити лінійні струми та струм лінійного дроту  $I_N$ , якщо він потрібний для збереження симетрії фазних напруг.

*Розв'язання:* Оскільки кожен з однофазних приймачів розрахований на напругу 127 В, а лінійна напруга трифазної мережі теж становить 220 В, тобто  $U_L = \sqrt{3}U_{\phi}$ , такі однофазні приймачі мають бути підключені до цієї мережі за схемою «зірка» (рис. 3.19).

Визначимо повний опір кожної з фаз приймача:

$$Z_{\phi 1} = R_1 = 100 \text{ Ом};$$

$$Z_{\phi 2} = \sqrt{R_2^2 + X_L^2} = \sqrt{70,9^2 + 70,9^2} = 99,9 \approx 100 \text{ Ом};$$

$$Z_{\phi 3} = \sqrt{R_3^2 + X_C^2} = \sqrt{70,9^2 + 70,9^2} = 99,9 \approx 100 \text{ Ом}.$$

Отже, повні фазні опори усіх фаз виявилися рівними, це означає, що рівними між собою за величиною виявляться і фазні струми всіх фаз:

$$I_1 = I_2 = I_3 = \frac{U_{\phi}}{Z_{\phi}} = \frac{127}{100} = 1,27 \text{ А}.$$

Але фазові кути фаз А, В, С не є однаковими:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{0}{R_1} = \arctg 0 = 0^{\circ};$$

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_L}{R_2} = \arctg \frac{70,9}{100} = \arctg(0,709) \approx 35,3^{\circ};$$

$$\varphi_3 = \arctg \frac{-X_C}{R_3} = \arctg \frac{-70,9}{100} = \arctg(-0,709) \approx -35,3^{\circ}.$$

Таким чином, навантаження виявилось несиметричним, тому в схемі підключення необхідним для збереження симетрії фазних напруг є нейтральний дріт (рис. 3.19).

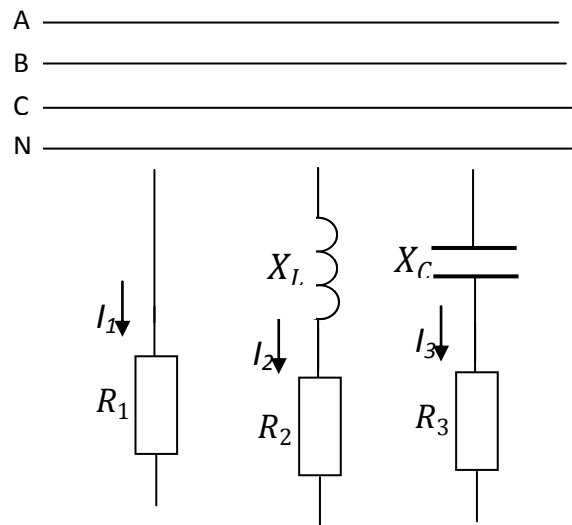


Рис. 3.18. До прикладу 4

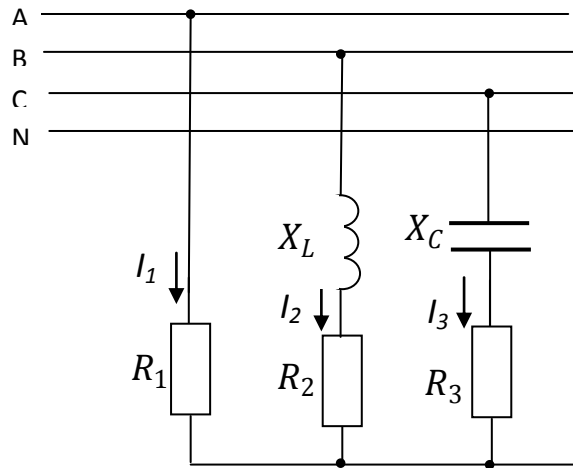


Рис. 3.19. Схема з'єднання однофазних приймачів до прикладу 4

Лінійні струми в схемі «зірка» дорівнюють фазним струмам, отже  $I_A = I_B = I_C = I_1 = I_2 = I_3 = 1,27 \text{ А}$ .

Струм нейтрального дроту визначимо за допомогою побудови векторної діаграми. Спочатку побудуємо діаграму фазних напруг у вигляді симетричної системи трьох векторів.

Масштаб напруги в цьому випадку не має значення, тому що ніяких дій з векторами напруги здійснювати не будемо, ці вектори потрібні нам лише для того, щоб вірно визначити напрями векторів фазних струмів. Оберемо масштаб для струму. Від точки *n* на діаграмі напруг будемо відкладати вектори струмів під відповідними кутами  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  до фазних напруг  $U_{\phi 1}, U_{\phi 2}, U_{\phi 3}$  (рис. 3.20).

Знайдемо суму цих векторів, як показано на рис. 3.20. Вимірявши довжину вектора  $I_N$  та користуючись масштабом, визначимо величину струму нейтрального дроту  $I_N$ . До речі, знайти значення  $I_N$  можливо не тільки за допомогою вимірювання довжини побудованого вектора на діаграмі, а й за допомогою, наприклад, проєціювання векторів на дві взаємно

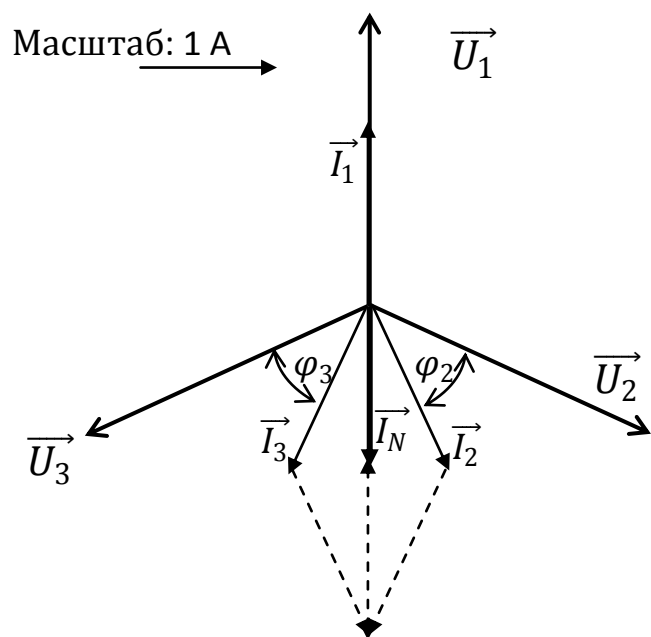


Рис. 3.20. Векторна діаграма напруг та струмів до розв'язання прикладу 4



перпендикулярні вісі, чи за допомогою будь-якого існуючого метода складання векторів.

В нашому випадку отримано:  $I_N = 1,04 \text{ A}$ .

### Задачі для самостійного розв'язання до розділу 3

1. Активна потужність трифазного кола  $P = 40 \text{ кВт}$ ; реактивна  $Q = 30 \text{ кВт}$ . Визначити коефіцієнт потужності кола.

*Відповідь:*  $\cos \varphi = 0,8$ .

2. До трифазного трансформатору з лінійною напругою на вторинній обмотці  $380 \text{ В}$  зіркою підключені електричні лампи потужністю  $40 \text{ Вт}$  кожна по  $100$  штук в кожній фазі та трифазний асинхронний двигун потужністю  $P = 10 \text{ кВт}$ ,  $\text{ККД} = 85\%$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ .

Нехтуючи опором дротів, визначити лінійний струм двигуна.

*Відповідь:*  $I_{\text{л}} = 38,5 \text{ A}$ .

3. До трифазної мережі з лінійною напругою  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$  по трифазній схемі підключені три однофазні активні приймачі  $R_1 = 220 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 110 \text{ Ом}$ ;

$R_3 = 55 \text{ Ом}$  (рис. 3.21). Визначити схему, за якою здійснено підключення («зірка» або «трикутник»); розрахувати струми  $I_1, I_2, I_3$ ; побудувати векторну діаграму струмів та напруг; визначити струм нейтрального дроту  $I_N$ .

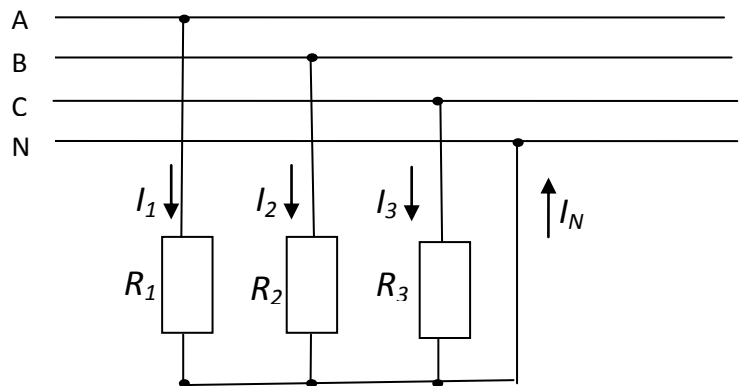


Рис. 3.21. До задачі 3

*Відповідь:* фазні струми приймача  $I_1 = 1 \text{ A}$ ;  $I_2 = 2 \text{ A}$ ;  $I_3 = 4 \text{ A}$ ; лінійні струми  $I_A = 1 \text{ A}$ ;  $I_B = 2 \text{ A}$ ;  $I_C = 4 \text{ A}$ ; струм нейтрального дроту  $I_N \approx 2,65 \text{ A}$  (з векторної діаграми).

4. Трифазний двигун з номінальною потужністю на валу  $14 \text{ кВт}$  та коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi = 0,88$  при повному навантаженні підключений до трифазної мережі з лінійною напругою  $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$ . При цьому струм в дротах, що йдуть до двигуна, дорівнює  $47,5 \text{ A}$ . Знайти ККД двигуна.

*Відповідь:*  $\eta = 88\%$ .

5. В трифазній схемі, що зображена на рис. 3.22, визначити фазні струми та фазні напруги, якщо: а) стався обрив лінійного дроту «А»; б) сталося коротке замикання фази «а» приймача.

Лінійна напруга трифазної мережі  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ ;  $R_1 = 100 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = R_3 = 80 \text{ Ом}$ ;  $X_L = X_C = 60 \text{ Ом}$ .

*Відповідь:* а) при обриві лінійного дроту «А» фазні струми приймача:  $I_a = 0$ ;  $I_b = I_c = 1,1 \text{ А}$ ; фазні напруги:  $U_a = 0$ ;  $U_b = 110 \text{ В}$ ;  $U_c = 110 \text{ В}$ .

6. На таблиці трифазного електродвигуна наведені наступні відомості:  $P = 7 \text{ кВт}$ ;  $\eta = 87\%$ ;  $\cos \varphi = 0,87$ ;  $U = 220/127 \text{ В}$ . Визначити споживану електричну потужність двигуна. Знайти струм в дротах, що йдуть до двигуна, в двох випадках: значення напруги  $220 \text{ В}$  та  $127 \text{ В}$ . Поясніть, як саме потрібно з'єднати обмотки двигуна в цих випадках.

*Відповідь:* Споживана електрична потужність  $P_e = 8,05 \text{ кВт}$ ;  $I_1 = 24,3 \text{ А}$ ;  $I_2 = 42,1 \text{ А}$ .

7. До трифазної мережі з лінійною напругою  $U_{\text{л}} = 36 \text{ В}$  по трифазній схемі підключені три однофазні приймачі (рис. 3.23), кожний з яких розрахований на напругу  $U_{\text{ф}} = 36 \text{ В}$ ;  $X_L = X_C = R = 18 \text{ Ом}$ .

Накреслити схему підключення; визначити усі фазні струми; побудувати векторну діаграму струмів та напруг; визначити лінійні струми та струм нейтрального дроту, якщо цей дріт потрібен у схемі.

*Відповідь:* фазні струми приймача  $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = 2 \text{ А}$ ; лінійні струми:  $I_A = 2 \text{ А}$ ;  $I_B = 1,03 \text{ А}$ ;  $I_C = 1,03 \text{ А}$ .

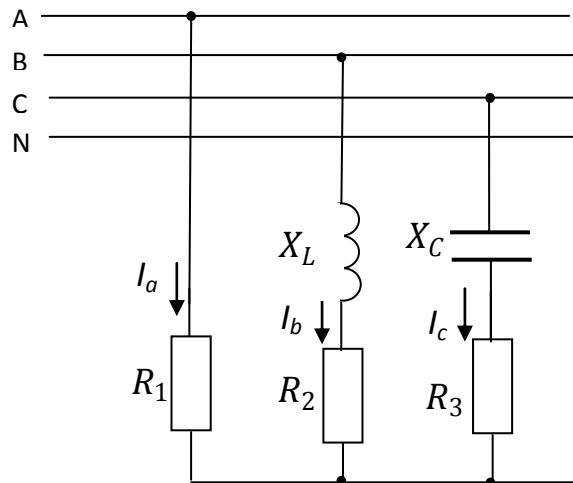


Рис. 3.22. Схема з'єднання однофазних приймачів до задачі 5

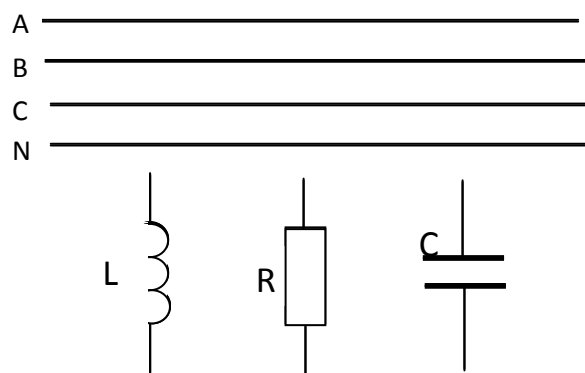


Рис. 3.23. До задачі 7

## **РОЗДІЛ 4**

### **ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ**

Термін «вимірювання» означає знаходження фізичної величини шляхом досліду з використанням спеціальних технічних засобів. Електричні вимірювання мають важливе значення в електротехніці. Без якісних електричних вимірювань не можливе успішне та безаварійне використання електротехнічного обладнання та приладів.

До найбільш важливих та розповсюджених електричних вимірювань можна віднести вимірювання опорів, струмів, напруг, потужностей та фазових кутів.

#### **4.1. Електровимірювальні прилади**

##### **4.1.1. Загальні відомості про електровимірювальні прилади**

Призначенням електровимірювальних приладів є відображення різноманітних електричних величин (наприклад, сили струму, напруги, активних і реактивних потужностей та енергій, коефіцієнта потужності, опору, індуктивності, ємності та інших) у зручній для сприйняття формі.

В залежності від того, безперервними функціями або дискретними сигналами є показання приладу, розрізняють відповідно аналогові та цифрові електровимірювальні прилади. Також, в залежності від можливостей приладів, розрізняють прилади, що показують, прилади, що реєструють, а також самописці.

Основна частина електровимірювального приладу це вимірювальний механізм. В корпусі приладу, окрім вимірювального механізму, розташовані допоміжні частини, такі як блок живлення, затиски для підключення, перемикачі меж вимірювань, коректор, який потрібний для установки стрілки приладу на нульову позначку, та інші). Рухома частина вимірювального механізму закріплюється на вертикальній або горизонтальній вісі. Стрілка приладів, що показують, пересувається вздовж шкали з певною кількістю поділок.

Принцип дії вимірювального механізму засновується на таких фізичних явищах, як електромагнетизм, або на тепловій дії електричного струму. Ці явища призводять до виникнення обертаючого моменту, завдяки чому рухома частина вимірювального механізму разом з покажчиком (стрілкою) повертається на певний кут, пропорційний значенню тієї фізичної величини, яка вимірюється. Для того, щоб

стрілка приладу не відхилялася до кінця шкали при будь-якому значенні вимірюваної величини, кінцями до вісі та корпусу приладу прикріплюється пружина з немагнітного сплаву (наприклад, бронзи), яка створює момент, що спрямований протилежно обертаючому моменту, під дією якого повертається вісь рухомої частини вимірювального приладу. Для того, щоб стрілка приладу зупинялась на позначці шкали за час, не більший за 4с, прилади мають так звані «заспокоювачі» – групу циліндричних магнітів. Для забезпечення зберігання положення стрілки на нульовій позначці при будь-якому положенні приладу застосовуються противаги, що врівноважують.

Основні технічні та експлуатаційні характеристики електровимірювальних приладів позначені на лицевому боці приладу за допомогою умовних знаків (Додаток Б).

Перелічимо основні характеристики електровимірювальних приладів згідно з загально прийнятими визначеннями [4, 5, 10,12].

**Межа вимірювання** приладу ( $A_{max}$ ) – це найбільше значення фізичної величини, яке можливо виміряти певним приладом.

**Ціна поділки** – це кількість одиниць вимірюваної фізичної величини, що міститься в одній поділці шкали приладу:

$$C_n = \frac{A_{max}}{n_{max}}; \quad (4.1)$$

де  $C_n$  – ціна поділки приладу;

$A_{max}$  – межа вимірювання приладу;

$n_{max}$  – кількість поділок на шкалі приладу.

**Чутливість** приладу – це кількість поділок шкали, на яку відхиляється стрілка приладу, коли вимірювана фізична величина змінюється на одну одиницю:

$$S_n = \frac{n_{max}}{A_{max}} \quad (4.2)$$

Слід зазначити, що чутливість приладу та ціна його поділки – це взаємно оборотні величини.

**Показання приладу** – це значення фізичної величини, яке вимірює прилад (визначається шляхом множення ціни поділки приладу на кількість поділок, на яку відхилилася стрілка приладу при вимірюванні):

$$A = C_n \cdot n, \quad (4.3)$$

де  $A$  – показання приладу;

$n$  – кількість поділок, на яке відхилилася стрілка приладу при вимірюванні.

**Абсолютна похибка** – це різниця між показанням приладу та дійсним значенням вимірюваної фізичної величини:

$$\Delta A = A - A_d, \quad (4.4)$$

де  $\Delta A$  – абсолютна похибка;

$A$  – показання приладу;

$A_d$  – дійсне значення вимірюваної фізичної величини.

**Відносна похибка** – відношення абсолютної похибки до дійсного значення вимірюваної фізичної величини (виражене у відсотках):

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A_d} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

**Клас точності** приладу – відношення максимальної абсолютної похибки (яка встановлюється при проектуванні приладу) до межі вимірювання приладу (виражене у відсотках):

$$\gamma = \frac{\Delta A_{max}}{A_{max}} \cdot 100\% \quad (4.6)$$

Для більш точних вимірювань рекомендується обирати таку межу вимірювань, при якій показання приладу будуть знаходитися на останній третині шкали приладу. При цьому похибка вимірювання буде меншою, ніж при виборі іншої межі вимірювань.

Важливо, щоб під час вимірювань вимірювальний прилад не змінював режим роботи контролюваного об'єкта, отже, при роботі електровимірювальний прилад має споживати мінімальну потужність.

#### 4.1.2. Класифікація електровимірювальних приладів

Для вимірювання електричних величин найбільш частіше застосовуються наступні прилади:

- сили струму – *амперметр*;
- напруги – *вольтметр*;
- потужності – *ватметр*;
- електроенергії – *електричний лічильник*;
- коефіцієнта потужності – *фазометр*;
- опору – *омметр*, *вимірювальний міст*;
- частоти – *частотомір*.

Крім вимірюваних фізичних величин електровимірювальні прилади розрізняються за наступними ознаками: рід струму; клас точності; принцип дії; спосіб відліку та характер шкали; характер застосування й установки.

**За родом струму** прилади поділяються так:

- прилади, призначені для вимірювання на постійному струмі;
- прилади, призначені для вимірювання на змінному струмі;
- прилади, призначені для вимірювання на постійному і змінному струмі.

**За класом точності:** існують вісім класів точності приладів: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

**За принципом дії** прилади підрозділяються так:

- магнітоелектричні;
- електромагнітні;
- електродинамічні;
- індукційні;
- термоелектричні;
- випрямні;
- інші.

**За способом відліку** прилади можуть бути такими, що показують (з безпосереднім відліком по шкалі) та такими, що реєструють (самописці, осцилографи). Шкала приладів, що показують, може бути рівномірною (якщо всі поділки однакові) та нерівномірною (не всі поділки однакові). Слід зазначити, що більш точне вимірювання можливо здійснювати за допомогою рівномірної шкали.

**За характером застосування** прилади підрозділяються на стаціонарні (встановлювані на одному місці), переносні, транспортні (для мобільних установок). Встановлювати прилади можна вертикально (щитові прилади), горизонтально та під кутом до горизонталі.

### **4.1.3. Вибір електровимірювального приладу**

Порядок вибору електровимірювального приладу:

1. визначається вимірювана фізична величина та прилад для вимірювань (сила струму – амперметр, напруга – вольтметр, потужність – ватметр і так далі);
2. визначається рід струму в колі (постійний, змінний);
3. визначається необхідний клас точності приладу;

4. визначається характер застосування й установки;
5. визначається система приладу (магнітоелектрична, електромагнітна і так далі);
6. визначається межа вимірювання приладу;
7. визначається ціна поділки приладу.

#### 4.1.4. Побудова та фізичні принципи дії електровимірювальних приладів різних систем

Обертальний момент рухомої частини механізму приладу **магнітоелектричної системи** (рис. 4.1) виникає за рахунок взаємодії магнітного поля постійного магніту 1, який має підковоподібну форму, з котушкою індуктивності 2 (рамкою зі струмом), розташованою всередині магніту. Котушка індуктивності закріплена на одній вісі зі стрілкою приладу 3, тому кут повороту стрілки приладу пропорційний куту повороту рамки зі струмом. Пружина 5 створює протидіючий момент, завдяки чому стрілка приладу не відхиляється при кожному вимірюванні на максимальний кут. Шкала такого приладу є рівномірною.

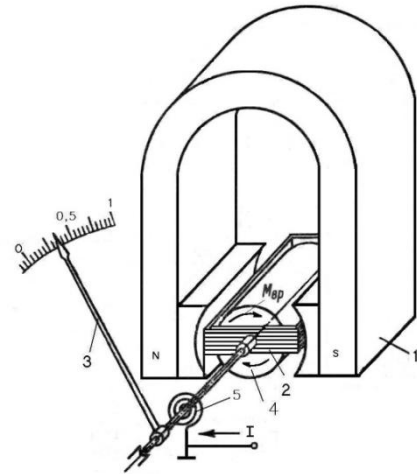


Рис. 4.1. Конструкція приладу магнітоелектричної системи

Прилади цієї системи використовуються для вимірювань у колах постійного струму. Для можливості застосування в колах змінного струму необхідно залучати перетворювальні прилади – випрямлячі, термоелектричні перетворювачі.

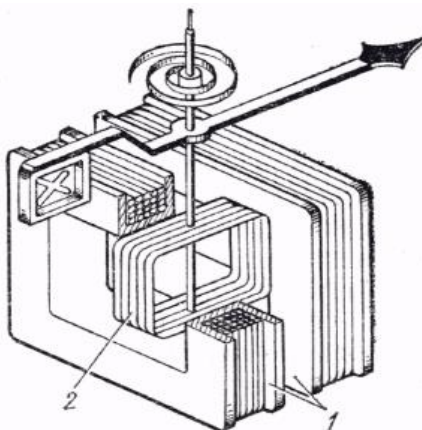


Рис.4.2. Конструкція приладу електромагнітної системи з плоскою котушкою

Вимірювальний механізм приладу **електромагнітної системи** (рис. 4.2) складається з двох котушок індуктивності (нерухомої 1 та рухомої 2). При протіканні електричного струму в провідниках котушок виникає електромагнітна сила. В результаті

рухома котушка (яка знаходиться усередині нерухомої котушки) відхиляється на кут, пропорційний значенню вимірюваної величини. Разом з цією котушкою відхиляється стрілка приладу, вказуючи на шкалі значення вимірюваної величини.

Прилади цієї системи використовуються для вимірювань у колах як постійного, так і змінного струмів. В колі змінного струму такі прилади вимірюють діюче значення струму. Шкала приладів електромагнітної системи є нерівномірною. Першу чверть шкали приладу вважають не придатною для вимірювань, що пов'язане з недостатньою чутливістю приладу при значеннях вимірюваної величини менших за 20-25% від верхньої межі вимірювання. Прилади електромагнітної системи дозволяють вимірювати струми 200–300 А при прямому включенні в мережу. Вольтметри такої системи виготовляють на напругу до 660В.

В приладах **електродинамічної системи** (рис. 4.3) нерухома котушка 2 складається з двох частин, між якими розташована вісь з закріплених на ній рухомою котушкою 1. Струм до рухомої котушки подається за допомогою двох пружин 4, які одночасно слугують для створення протидіючого моменту. Як і прилади електромагнітної системи, електродинамічні прилади використовуються для вимірювань у колах як постійного, так і змінного струмів. Електродинамічний прилад може використовуватися не тільки для вимірювання струмів, але і для вимірювання напруг (вольтметр), активної потужності (ватметр), зсуву фаз (фазометр).

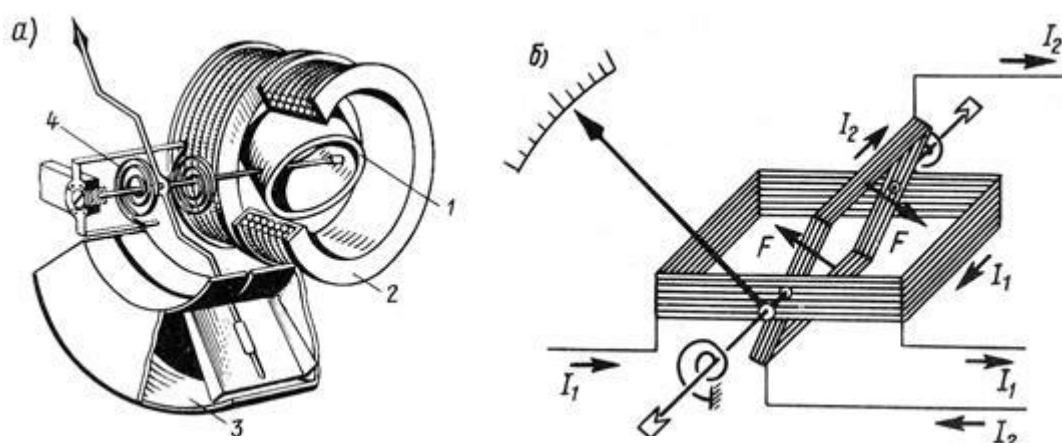


Рис. 4.3. Конструкція (а) та принцип дії приладу електродинамічної системи (б)



Для цього застосовують різні способи взаємного включення котушок. Якщо обмотки котушок виготовлені з двох секцій, можливим є змінювати межі вимірювань струму в два рази.

Електродинамічні прилади чутливі до зовнішніх магнітних полів, тому вони мають спеціальний захисний екран (на рис. 4.3 він не показаний).

Вимірювальний механізм приладу **індукційної системи** (рис.4.4) складається з двох нерухомих котушок індуктивності 1 та 5 (зсунутих у просторі на певний кут у просторі одна до одної) та рухомої металевої частини 3 (диска, циліндра), яка розміщується між котушками. Одну котушку включають паралельно мережі, а іншу послідовно. Струми, що протікають у котушках, створюють два магнітних потоки, які викликають появу вихрових струмів у рухомій частині вимірювального механізму. В результаті електромагнітної взаємодії з нерухомими котушками рухома частина починає обертальний рух.

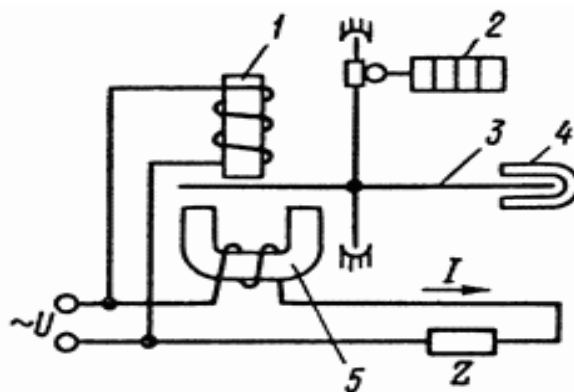


Рис.4.4. Принципова схема приладу індукційної системи

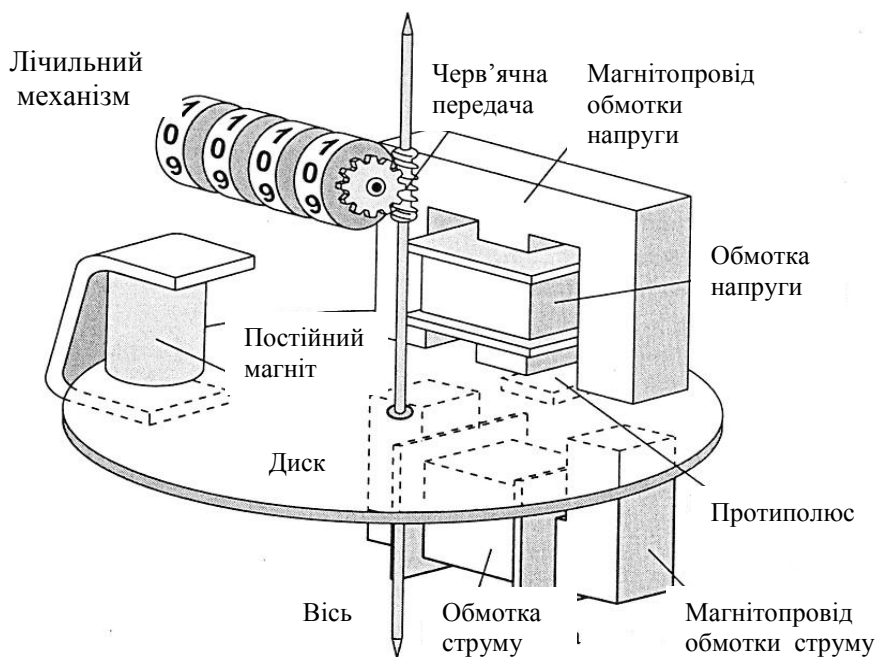


Рис. 4.5. Конструкція індукційного лічильника електроенергії

Прилади цієї системи найчастіше використовують, для вимірювання потужності та енергії в колах змінного струму (лічильники електроенергії (рис.4.5)), але можуть бути застосовані і в якості амперметра чи вольтметра.

Оскільки вихрові струми рухомої частини залежать від частоти змінного струму, її відхилення від номінального значення впливає на правильність показань лічильника електричної енергії.

В приладах **термоелектричної системи** використовують термопари, що мають спай двох різнорідних металів (мідь - константан, залізо - константан та ін.) у сукупності з приладом магнітоелектричної системи (рис.4.6). До спаю термопари 1 приєднаний провідник 2, по якому проходить вимірюваний електричний струм.

При нагріванні спаю термопари під дією струму в ньому з'являється постійна термо-ЕРС незалежно від того, яким є струм – постійним чи змінним. Вимірювальний механізм магнітоелектричної (МЕВ) системи під'єднується до двох інших кінців металевих провідників термопари. Поява термо-ЕРС у котушці вимірювального механізму призводить до появи постійного струму. Вимірювальний механізм працює подібно до такого ж механізму магнітоелектричної системи, але може використовуватися в колах як постійного, так і змінного струмів.

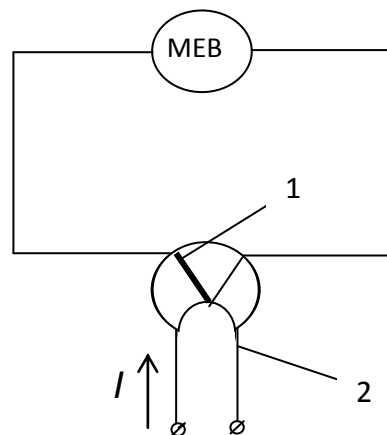


Рис. 4.6. Принципова схема приладу термоелектричної системи

Якщо об'єднати прилад магнітоелектричної системи з одним чи кількома напівпровідниковими випрямлячами, отримаємо прилад **випрямної системи**. За рахунок напівпровідникових випрямлячів, вимірювальний механізм магнітоелектричної системи живиться постійним струмом. Прилади цієї системи використовуються для вимірювань у колах постійного та змінного струмів (для вимірювання невеликих значень), а також для здійснення вимірювань у колах з підвищеною частотою струму (понад 50 Гц).

В мережах змінного струму з метою розширення меж вимірювань, а також для відокремлення вимірювальних приладів від дротів

високої напруги заради безпеки, застосовують **вимірювальні трансформатори напруги та струму** (рис. 4.7).

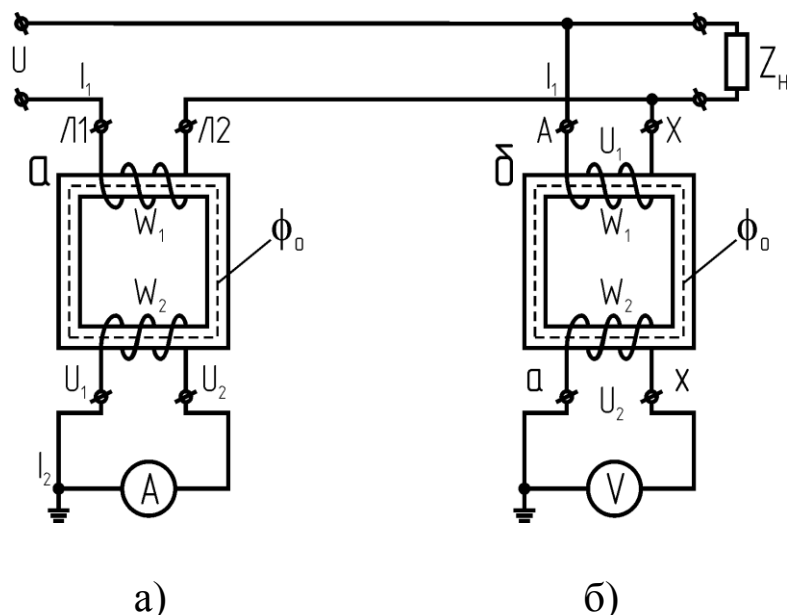


Рис. 4.7. Схеми включення вимірювальних трансформаторів струму а) та напруги б)

Відношення струму первинної обмотки трансформатора до струму вторинної обмотки, називають коефіцієнтом трансформації трансформатора струму. Він вказується у паспорті трансформатора у вигляді дробі, наприклад, 150/5 А. Відношення напруги первинної обмотки до напруги вторинної обмотки називають коефіцієнтом трансформації трансформатора напруги, наприклад 6000/100. Знаючи коефіцієнти трансформації та покази амперметрів та вольтметрів, підключених до вторинної обмотки, неважко розрахувати струм та напругу первинної обмотки.

## 4.2. Практичні електровимірювання

### 4.2.1. Вимірювання сили струму

Для вимірювання сили струму в колі служить амперметр, позначення якого на принципових електричних схемах – А. Амперметр включається послідовно в коло, у якому виконується вимірювання.

Для запобігання впливу вимірювального приладу на режим роботи електричного кола амперметр має мати мінімальний опір котушки вимірювального механізму, тоді сила струму в колі майже не зміниться при включенні амперметру. Тому для виготовлення кату-

шки вимірювального механізму амперметра використовують дріт з великим перерізом та невеликою кількістю витків.

В колах постійного струму для вимірювання струмів найчастіше використовуються магнітоелектричні прилади, рідше – електромагнітні амперметри, в колах змінного струму – переважно електромагнітні амперметри, а при підвищених умовах точності вимірювань – електродинамічні амперметри.

Звісно, при виборі амперметра межа вимірювання приладу повинна перевищувати очікуване значення сили струму в колі.

В тому випадку, коли треба розширити межі вимірювання амперметра, використовують трансформатори струму або шунти. Шунт включається в коло послідовно, а паралельно йому вмикається амперметр (рис. 4.8).

Для схеми на рис.4.8 справедливе рівняння

$$I_A R_A = I_{\text{ш}} R_{\text{ш}},$$

або: 
$$I_{\text{ш}} = \frac{I_A R_A}{R_{\text{ш}}},$$

де  $I_A$  – максимально припустимий струм амперметра;

$I_{\text{ш}}$  – струм шунта;

$R_A$  – внутрішній опір амперметра;

$R_{\text{ш}}$  – опір шунта.

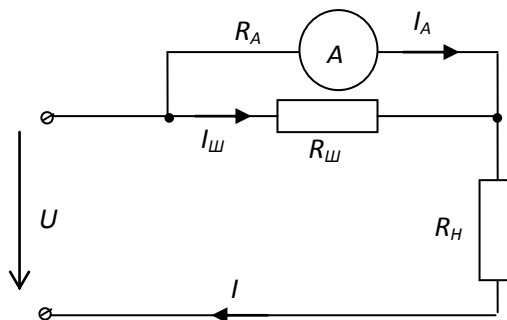


Рис. 4.8. Схема включення амперметра з використанням шунта для збільшення межі вимірювання

Згідно до першого закону Кірхгофа  $I = I_A + I_{\text{ш}}$ , тобто:

$$\frac{I}{I_A} = 1 + \frac{R_A}{R_{\text{ш}}},$$

де  $I$  – струм, ще протікає через навантаження  $R_H$ .

Вираз 
$$n = \frac{R_A}{R_{\text{ш}}} \tag{4.7}$$

називається коефіцієнтом розширення межі вимірювання амперметру. Опір шунта, який забезпечує розширення межі в  $n$  разів визначається формулою:

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n-1} \quad (4.8)$$

#### 4.2.2. Вимірювання напруги

Для вимірювання напруги в колі служить вольтметр, літерне позначення якого на електричних схемах -  $V$ . Вольтметр включають паралельно навантаженню, на якому виконується вимірювання. Для запобігання впливу вольтметра на режим роботи електричного кола, в якому здійснюють вимірювання, опір котушки вимірювального механізму повинний бути великим порівняно з опором кола, тоді напруга в колі не зміниться при включенні вольтметра. Тому котушку вимірювального механізму виконують з дроту з невеликим перерізом та великою кількістю витків.

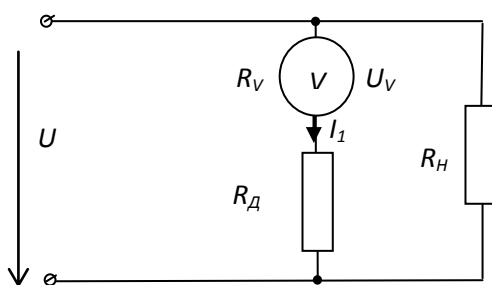


Рис. 4.9. Схема включення вольтметра з додатковим опором для розширення межі вимірювання

Межа вимірювання приладу має перевищувати очікуване значення напруги в колі. В разі необхідності розширення меж вимірювання вольтметра, використовують трансформатори напруги або додаткові опори, які включаються послідовно з вольтметром (рис. 4.9).

Нехай  $U_V$  – максимально припустима напруга вольтметра. Тоді напруга, яка діє на навантаженні  $R_H$

$$U = I_1 R_V + I_1 R_D, \quad (4.9)$$

де  $I_1$  – струм через вольтметр;

$R_V$  – внутрішній опір вольтметра;

$R_D$  – додатковий опір.

Розділивши рівняння (4.9) на  $U_v$  та позначивши коефіцієнт розширення межі вимірювання вольтметра  $m = \frac{U}{U_v}$ , отримаємо

$$m = \frac{I_1 \cdot (R_v + R_d)}{U_v} \quad (4.10)$$

Враховуючи, що  $U_v / I_1 = R_v$ , визначимо величину додаткового опору, який забезпечує розширення межі вимірювання вольтметра в  $m$  разів:

$$R_d = R_v (m - 1) . \quad (4.11)$$

### 4.2.3. Вимірювання активної потужності

Для вимірювання активної потужності в колі служить ватметр, позначення якого на принципових електричних схемах -  $W$ . Водночас, активну потужність можна визначити, якщо перемножити показники амперметра, включеного послідовно навантаженню, та вольтметра, включеного паралельно навантаженню (рис.4.10). Найчастіше використовують однофазні ватметри електродинамічної системи.

Вимірювальний механізм ватметра має дві котушки: нерухому та рухому, з якою зв'язана стрілка приладу. Нерухома котушка (так звана струмова обмотка) складається з невеликої кількості витків. Для неї використовують дрід з великим перерізом. Нерухома струмова обмотка вмикається в коло послідовно до навантаження. Рухома котушка (обмотка напруги) разом з послідовно з'єднаним з нею додатковим опором

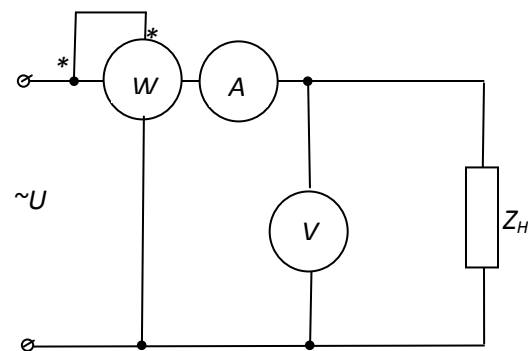


Рис. 4.10. Схема вимірювання потужності ватметром та амперметром з вольтметром

включається в коло паралельно навантаженню. Обмотка напруги має велику кількість витків, для неї використовують дрід із маленьким поперечним перерізом. При протіканні струму в обох котушках виникає обертаючий момент, прямо пропорційний струмам у котушках. Сила струму в рухомій котушці пропорційна напрузі в колі, тому що вона включається паралельно. Сила струму в нерухомій котушці пропорційна силі струму в колі, тому що вона включається послідовно. Таким чином, на рухому котушку діє обертаючий момент, пропорційний активній потужності в колі. Отже, у ватметра є дві межі вимірювання: за струмом і за напругою.

Для розширення меж вимірювання ватметра використовують шунти і додаткові опори (або трансформатори струму і напруги).

Принципова електрична схема включення ватметра для вимірювання активної потужності, яку споживає навантаження в однофазному колі змінного струму, показана на рис. 4.10.

В симетричних трифазних колах активну потужність можна виміряти за допомогою одного ватметра, збільшивши втричі його показник для однієї фази.

В несиметричних чотиридротових трифазних колах активну потужність вимірюють трьома ватметрами, кожен з яких включають між нейтральним дротом та одним з лінійних дротів. Активна потужність схеми дорівнює сумі показань усіх трьох ватметрів.

В тридротових трифазних схемах для вимірювання активної напруги користуються так званим методом двох ватметрів. Активна потужність схеми в цьому випадку дорівнює алгебраїчній сумі показань ватметрів. Цей метод може бути застосований при будь-якій схемі з'єднання фаз – зірка чи трикутник. Детальніше з методами вимірювання активної потужності в трифазних колах можна ознайомитися в [10].

#### 4.2.4. Вимірювання реактивної потужності

Реактивна потужність в колах однофазного синусоїдального струму вимірюється варметрами (рис. 4.11). Резистори  $R_1$  та  $R_2$  й індуктивність  $L$  штучно викликають зсув струму в котушці на  $90^\circ$  відносно напруги. При цьому обертаючий момент буде пропорційним  $\sin \varphi$ :

$$M_{\text{оберт}} = k_1 UI \sin \varphi,$$

отже, кут відхилення рухомої частини варметра буде пропорційним реактивної потужності:

$$\alpha = k_2 Q.$$

Для вимірювання реактивної потужності несиметричних трифазних кіл застосовний метод трьох варметрів.

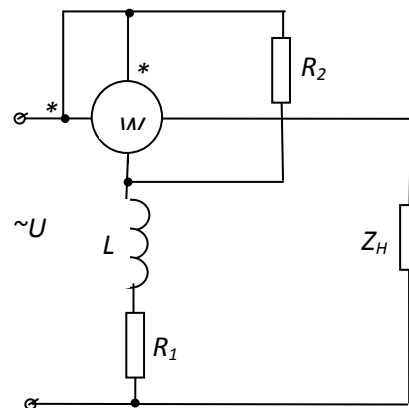


Рис. 4.11. Схема включення варметра для визначення реактивної потужності

Для вимірювання електричної енергії використовують індукційні лічильники, схеми включення яких такі самі, як схеми включення ватметрів.

#### 4.2.5. Вимірювання коефіцієнта потужності

Значення коефіцієнта потужності можна визначити за показаннями амперметра, вольтметра та ватметра:

$$A_w = A_v \cdot A_A \cdot \cos \varphi \quad (4.12)$$

де  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності;

$A_w$  – показання ватметра, Вт;

$A_v$  – показання вольтметра, В;

$A_A$  – показання амперметра, А.

Коефіцієнт потужності можна також визначити за допомогою електровимірювального приладу, який називають фазометром, який позначається на принципових електричних схемах –  $\varphi$ .

Однофазний фазометр є сполученням двох приладів для вимірювання активної та реактивної потужності – ватметра та варметра, що мають спільну рухому систему.

#### 4.2.6. Вимірювання опорів

Опори різних елементів електричних кіл змінюються в дуже широкому діапазоні – від долей Ом до мільйонів Ом. Опори умовно розділяють на малі (до 1 Ом), середні (від 1 до 100 кОм) та великі (більші 100 кОм). Для вимірювання опорів існують прямий (за допомогою омметра) та непрямі методи – метод порівняння (за допомогою мостів та потенціометрів) та так званий метод вольтметра та амперметра.

При застосуванні *методу вольтметра й амперметра* елемент кола з опором, що вимірюється, ставиться у нормальні робочі умови. Цей метод ґрунтується на використанні закону Ома для ділянки кола, яка є елементом з опором  $R_x$ , що вимірюється. Значення  $R_x$  знаходять за відомим спадом напруги  $U_x$  між його затискачами та струмом  $I_x$ , що існує в ньому, за формулою

$$R_x = \frac{U_x}{I_x}. \quad (4.13)$$

Вимірювання спаду напруги  $U_x$  та струму  $I_x$  здійснюються за допомогою схем, що зображені на рис. 4.12 (а, б).

Вимірювальні частини цих схем не забезпечують одночасного точного вимірювання спаду напруги  $U_x$  та струму  $I_x$ .



Схема а) використовується для виміру малих опорів, подібних до опору амперметра, та значно менших за опір вольтметра, а схема б) – для виміру середніх опорів, тобто якщо  $R_x$  значно більше за опір амперметра.

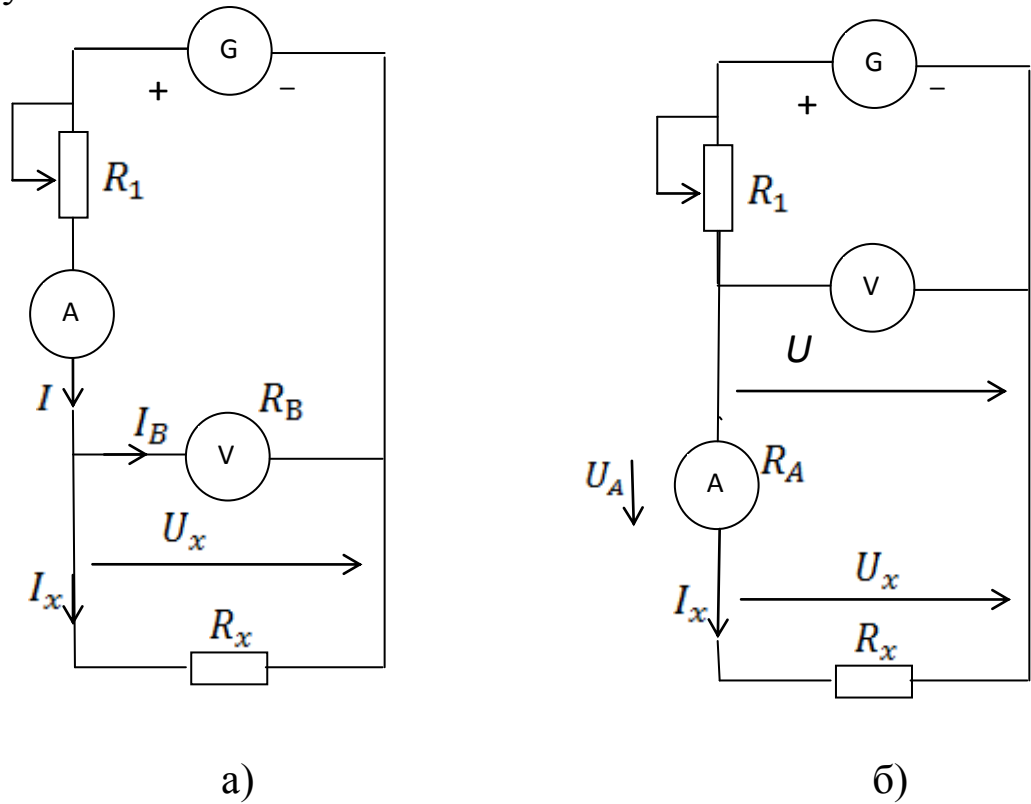


Рис. 4.12. Схеми для вимірювання опорів, що потребують урахування: а) провідності вольтметра; б) опору амперметра

Більш точні значення вимірюваної величини опору отримаємо, якщо врахувати струм через вольтметр  $I_V$  для схеми на рис. 4.12, а). При цьому замість формули (4.13) користуються формулою

$$R_x = \frac{U_x}{I_x - I_V} = \frac{U_x}{I_x - \frac{U_x}{R_V}}, \quad (4.14)$$

де  $R_V$  – опір вольтметра.

Для схеми рис. 4.12, б) для уточнення результатів виміру потрібно врахувати опір амперметра, тобто замість формули (4.13) користуватись формулою

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U - U_A}{I_x} = \frac{U}{I_x} - \frac{U_A}{I_x} = \frac{U}{I_x} - R_A, \quad (4.15)$$

де  $R_A$  – опір амперметра.

При вимірюванні опорів методом вольтметра й амперметра треба добирати магнітоелектричні вимірювальні прилади з такими межами вимірювання, щоб їх покази наближалися до номінальних значень, що забезпечує найменші похибки вимірювання.

Щоб виміряти опори від 1 до 1 000 000 Ом, які не знаходяться в робочих колах, можна застосувати одинарний міст постійного струму з трьома відомими резисторами  $R_2, R_3, R_4$  і одним резистором  $R_x = R_1$ , опір якого треба виміряти. Цей метод детально розглядався в розділі «Електрика» курсу фізики.

Для *прямого вимірювання* опорів використовують *омметри* – магнітоелектричні прилади з шкалою, проградуєваною в Омах, з власним джерелом електричної енергії постійної напруги (сухий гальванічний елемент), влаштовані з послідовною або паралельною схемою. Прилади з послідовною схемою більш придатні для вимірювання великих опорів, а прилади з паралельною схемою – для вимірювання невеликих опорів.

Згідно вимогам ПУЕ [12], опір ізоляції дротів повинен бути не менше 1000 Ом на кожен вольт робочої напруги. Наприклад, для мережі з робочою напругою 220 В опір ізоляції має бути не менше 220000 Ом, або 0,22 МОм. Тому вимірювання таких великих опорів є важливою задачею з точки зору забезпечення безпеки персоналу, що обслуговує електроустановки, та й самого електрообладнання.

Вимірювання великих опорів ізоляції обмоток двигунів, опір ізоляції між двома обмотками тощо виконується за допомогою *мегаомметра*. Вбудоване внутрішнє джерело живлення *мегаомметра* має напругу 500, 1000, 2500 В, що дає можливість виявити слабкі місця ізоляції. При користуванні мегаомметром треба стежити, щоб електричні кола, в яких проводяться вимірювання, були знеструмлені, інакше прилади можуть бути пошкоджені. Доторкатися до затискачів приладу під час роботи з мегаомметром *небезпечно для життя*.

#### **Питання для самоконтролю до розділу 4**

1. Що означає виміряти фізичну величину?
2. Назвіть основні електротехнічні величини та прилади для їх вимірювання.
3. Перерахуйте системи електровимірювальних приладів за принципом дії.

4. Прилади яких систем використовуються переважно в колах постійного струму, а яких – в колах змінного струму?
5. Які основні умовні позначення, що характеризують електровимірювальні прилади, ви знаєте?
6. Що називається ціною поділки приладу?
7. Що називається межею виміру приладу?
8. Що таке чутливість вимірювального приладу?
9. Що називають класом точності вимірювального приладу?
10. Як підключається для здійснення вимірів амперметр?
11. Як підключається для здійснення вимірів вольтметр?
12. Як розширити межі вимірів амперметра? Наведіть формулу розрахунку опору шунта.
13. Як розширити межі вимірів вольтметра? Наведіть формулу розрахунку додаткового опору .
14. Який внутрішній опір повинен мати амперметр, щоб не впливати на режим роботи кола?
15. Який внутрішній опір повинен мати вольтметр, щоб не впливати на режим роботи кола?
16. Як можна виміряти активну потужність, не маючи ватметра?
17. Як включають в електричне коло обмотки ватметра?
18. Як виміряти коефіцієнт потужності кола?
19. До приладів якої системи належить лічильник електричної енергії?
20. Які існують методи вимірювання опорів?
21. Яким приладом вимірюють дуже великі опори, наприклад опір ізоляції дротів?

#### **Приклади розв'язання задач до розділу 4**

##### *Приклад 1.*

Визначити опір шунта, необхідного для вимірювання струму 25А, до амперметра, який розрахований на вимірювання струму 10 А, якщо внутрішній опір амперметра 0,008 Ом.

##### *Розв'язання.*

Визначимо, у скільки разів потрібно збільшити межу вимірювань:  $n = \frac{25 \text{ А}}{10 \text{ А}} = 2,5$ . Згідно з формулою (4.8) опір шунта

$$R_{\text{ш}} = \frac{R_A}{n-1} = \frac{0,008}{2,5-1} = 0,0053 \text{ Ом.}$$

### Приклад 2.

Визначити значення додаткового опору, якщо вольтметром, який розрахований на 25 В, потрібно виміряти напругу 175 В. Внутрішній опір вольтметра 1200 Ом.

*Розв'язання.*

Визначимо, у скільки разів потрібно збільшити межу вимірювань:

$$m = \frac{175 \text{ В}}{25 \text{ В}} = 7.$$

Згідно з формулою (4.11) додатковий опір

$$R_d = R_v(m - 1) = 1200(7 - 1) = 7200 \text{ Ом}.$$

### Приклад 3.

Ватметр, шкала якого містить 160 поділок, має межу вимірювання за струмом 40 А та межу вимірювання за напругою 400 В. При включенні ватметра в коло його стрілка відхилилася на 82 поділки. Визначити ціну поділки приладу та активну потужність у колі.

*Розв'язання.*

Межа вимірювання приладу:

$$P_{max} = I_{max} U_{max} = 40 \cdot 400 = 16000 \text{ Вт}.$$

Ціна поділки приладу:

$$C_{\Pi} = 16000 : 160 = 100 \text{ Вт}$$

Активна потужність у колі:  $P = C_{\Pi} \cdot n = 100 \cdot 82 = 8200 \text{ Вт}.$

### Приклад 4.

Котушка індуктивності підключена до однофазного джерела енергії. У коло котушки включені ватметр, вольтметр і амперметр. Після подачі напруги на затиски котушки показання приладів склали: ватметра – 210 Вт, вольтметра – 127 В, амперметра – 6 А. Визначити коефіцієнт потужності котушки.

*Розв'язання.*

З формули активної потужності  $P = UI \cos \varphi$ , коефіцієнт потужності котушки:

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{A_W}{A_V \cdot A_A} = \frac{210}{127 \cdot 6} = 0,28$$

### Приклад 5.

На щитку лічильника електроенергії позначено: 1 кВт-год = 12000 обертів якорю. Під час перевірки лічильника диск зробив 130 обертів за 40 с. Визначити потужність, яку споживає мережа.

*Розв'язання.*

$$1 \text{ кВт-год} = 1000 \text{ Вт-год} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Вт} \cdot \text{с}.$$

$$\text{Одному оберту відповідає енергія } \frac{3,6 \cdot 10^6 \text{ Вт-с}}{12000 \text{ об}}.$$

Електроенергія, яку спожила мережа за 130 обертів:

$$\frac{3,6 \cdot 10^6}{12000} \cdot 130 = 3,9 \cdot 10^4 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 39 \text{ кВт} \cdot \text{с}.$$

$$\text{Споживана мережею потужність: } \frac{39 \text{ кВт} \cdot \text{с}}{40 \text{ с}} = 0,975 \text{ кВт}.$$

*Приклад б.*

Для вимірювання змінного струму амперметр, шкала якого має 200 поділок та розрахована на 20 А, включено через трансформатор струму 500/5 А. Показ амперметра  $n=132$  поділки. Визначити струм в первинній мережі.

*Розв'язання.*

Визначимо ціну поділки амперметра:

$$C_{\text{п}} = \frac{I_{\text{max}}}{n_{\text{max}}} = \frac{20 \text{ А}}{200} = 0,1 \text{ А}$$

Визначимо коефіцієнт трансформації трансформатора струму:

$$K_{\text{тр}} = \frac{I_1}{I_2} = 500/5 = 100.$$

$$\text{Показ амперметра: } A_A = C_{\text{п}} \cdot n = 0,1 \text{ А} \cdot 132 = 13,2 \text{ А}.$$

Враховуючи коефіцієнт трансформації трансформатора струму, отримаємо струм первинної мережі:

$$I = A_A \cdot K_{\text{тр}} = 13,2 \cdot 100 = 1320 \text{ А}.$$

#### **Задачі для самостійного розв'язання до розділу 4**

1. Прилад показує струм 9,9 А. Дісне значення струму дорівнює 10 А. Визначити абсолютну та відносну похибки та клас точності приладу. Шкала приладу має 200 поділок та розрахована на 20 А.

*Відповідь:*  $\Delta I = -0,1 \text{ А}$ ;  $E = 1 \%$ ; клас точності 0,5.

2. Опір шунта, підключеного до амперметра, у 50 разів менше опору приладу. Який струм протікає в колі, якщо амперметр показує струм 1 А.

*Відповідь:*  $I = 51 \text{ А}$ .

3. Вольтметром, призначеним для вимірів до 20 В, потрібно виміряти 110 В. Визначити додатковий опір, якщо внутрішній опір вольтметра становить 1800 Ом.

*Відповідь:*  $R_d = 8100 \text{ Ом}$ .

4. Які похибки (абсолютна та відносна) ватметра, якщо він показує 130 Вт при напрузі 220 В, струмі 0,7 А та коефіцієнті потужності 0,85?

*Відповідь:* Абсолютна похибка дорівнює -0,9 Вт; відносна похибка -0,68%.

5. Частотомір на 220 В має опір 7000 Ом. Розрахуйте додатковий опір для можливості включення частотоміру на напругу 380 В.

*Відповідь:* Додатковий опір  $R_d = 5091 \text{ Ом}$ .

6. Ватметр на 200 В, 5 А, що має 200 поділок, включений через вимірювальні трансформатори напруги 2000/100 В та струму 600/5 А. Визначити потужність первинної мережі, якщо показ ватметра 82 поділки.

*Відповідь:* 984 кВт.

7. Однофазний ватметр на 150 В, 5 А, 250 поділок включений в трифазне коло з симетричним навантаженням фаз через вимірювальні трансформатори 500/100 В та 40/5 А. Показ ватметра – 50 поділок. Визначити потужність трифазного кола.

*Відповідь:* 18 кВт

## РОЗДІЛ 5 ТРАНСФОРМАТОРИ

### 5.1. Призначення трансформаторів

*Однофазний трансформатор* – це статичний електромагнітний апарат змінного струму, що на основі явища електромагнітної індукції перетворює електричну енергію з одним співвідношенням напруги й струму в електричну енергію з іншим співвідношенням напруги й струму тієї ж частоти.

Приймачі електроенергії зазвичай розташовані на значній відстані від місця її генерації, тобто електростанцій. Ця відстань інколи дорівнює сотням та тисячам кілометрів. Втрати потужності (для однієї жили лінії), як відомо з закону Джоуля-Ленца, прямо пропорційні довжині лінії електропередачі та квадрату струму, що тече цією лінією:

$$\Delta P_{\text{л}} = I^2 \cdot R_{\text{п}} \cdot L, \quad (5.1)$$

де  $I$  – струм, що тече в лінії, А;

$R_{\text{п}}$  – опір 1 км лінії електропередач, Ом/км;

$L$  – довжина лінії, км.

Отже, стає зрозумілим, що знизити ці втрати при передачі потужності на великі відстані можливо лише за рахунок зменшення струму. Для передачі великої потужності  $S = UI$  без надмірних втрат потрібно підвищувати напругу та зменшувати струм.

Втрата напруги в лінії електропередачі

$$\Delta U_{\text{л}} = I \cdot R_{\text{п}} \cdot L. \quad (5.2)$$

де  $I$  – струм, що тече в лінії, А;

$R_{\text{п}}$  – опір 1 км лінії електропередач, Ом/км;

$L$  – довжина лінії, км.

Бачимо, що зменшення струму зменшить і втрати напруги в лініях електропередачі. Важливо й те, що менший струм вимагає й меншого значення площі поперечного перерізу дротів, якими йде струм.

Враховуючи сказане, в місцях виробництва електроенергії (на електричних станціях) напругу підвищують до 35 – 750 кВ та вище та передають електроенергію до місць споживання, де за допомогою знижувальних підстанцій відбувається зниження напруги спочатку до рівня 3– 10 кВ, а безпосередньо перед приймачами до 660, 380, 220 В.

## 5.2. Устрій та принцип дії однофазного трансформатора

Однофазний двообмотковий трансформатор складається із замкнутого феромагнітного магнітопроводу, виконаного з тонких листів електротехнічної сталі, вкритих лаком для ізоляції один від одного. На магнітопроводі розташовані дві незалежні, індуктивно зв'язані між собою обмотки з ізольованих мідних або алюмінієвих дротів круглого або прямокутного перерізу. Одна з обмоток трансформатора, яка називається **первинною** та має кількість витків  $w_1$ , підключається до джерела електроенергії змінного струму. Друга обмотка, до якої підключаються приймачі, називається **вторинною** та має кількість витків  $w_2$ .

Однофазний трансформатор має обмотку **вищої** напруги (ВН), яка намотується дротом меншого перерізу й має більшу кількість витків, та обмотку **нижчої** напруги (НН), яка виконана дротом більшого перерізу і має меншу кількість витків. Номінальні струми обмоток обернено пропорційні напругам обмоток. Початки обмоток позначаються буквами  $A, a$ , а кінці обмоток –  $X, x$ .

Умовні позначення трансформаторів наведені на рис. 5.1.

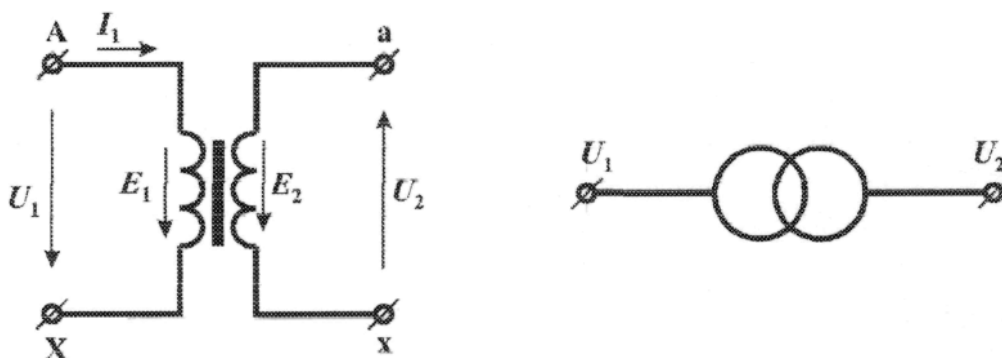


Рис. 5.1. Умовні позначення трансформатора на електричних схемах

На табличці, що прикріплюється до трансформатора, вказані його номінальні величини:

- потужність  $S_n$ ;
- первинна  $U_{1н}$  та вторинна  $U_{2н}$  напруги;
- первинний  $I_{1н}$  та вторинний  $I_{2н}$  струми;
- напруга короткого замикання  $U_{к\%}$
- частота  $f$ ,
- потужність  $P_0$  при холостому ході трансформатора
- потужність  $U_k$ , що відповідає досліду короткого замикання.



Всі названі величини відповідають номінальному тепловому режиму при температурі 40°C.

Принципова електромагнітна схема трансформатора наведена на рис. 5.2.

Розглянемо принцип дії однофазного двох обмоткового трансформатора. Змінна напруга  $U_{1H}$ , що підведена до первинної обмотки трансформатора, обумовлює появу в ній струму  $i_1$ , що збуджує у сердечнику, який є магнітопроводом, змінний магнітний потік  $\Phi$ . Частина потоку замикається навколо первинної обмотки по сердечнику та повітря, створюючи поле розсіювання.

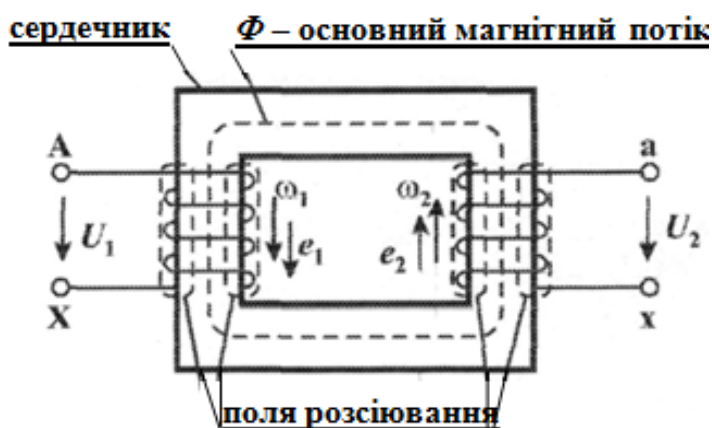


Рис. 5.2. Електромагнітна схема трансформатора

Основний магнітний потік  $\Phi$  індукуює в обмотках ЕРС

$$e_1 = -\omega_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_{12} = -\omega_2 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (5.3)$$

Для магнітного потоку, який змінюється за гармонічним законом

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (5.4)$$

де  $\Phi$  та  $\Phi_m$  – миттєве та амплітудне значення потоку (Вб);  $\omega$  – частота змінного струму.

З урахуванням формули (5.4) формули (5.3) матимуть вигляд:

$$\begin{cases} e_1 = -\omega_1 w \Phi_m \sin\left( wt - \frac{\pi}{2} \right) = -E_{m1} \sin\left( wt - \frac{\pi}{2} \right); \\ e_2 = -\omega_2 w \Phi_m \sin\left( wt - \frac{\pi}{2} \right) = -E_{m2} \sin\left( wt - \frac{\pi}{2} \right); \end{cases} \quad (5.5)$$

де  $E_{m1} = \omega_1 w \Phi_m$ ;  $E_{m2} = \omega_2 w$ .

Діючи значення первинної та вторинної ЕРС

$$\begin{cases} E_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega_1 w \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \omega_1 \Phi_m = 4,44 f \omega_1 \Phi_m; \\ E_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} = \frac{\omega_2 w \Phi_m}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f \omega_2 \Phi_m = 4,44 f \omega_2 \Phi_m. \end{cases} \quad (5.6)$$

$\omega_1$  та  $\omega_2$  – числа витків первинної та вторинної обмотки трансформатора відповідно;

$\Phi_m$  – амплітудне значення магнітного потоку ( $B\delta$ ).

Відношення ЕРС первинної обмотки до ЕРС вторинної обмотки, яке дорівнює відношенню чисел витків цих обмоток, називається **коефіцієнтом трансформації** трансформатора:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = K \quad (5.7)$$

Таким чином, для отримання напруги, вищої за напругу генератора, необхідно, щоб число витків вторинної обмотки було більшим за число витків первинної обмотки трансформатора:

$$\omega_2 > \omega_1.$$

В цьому випадку трансформатор буде **підвищувальним**.

Для того ж, щоб трансформатор був **знижувальним**, необхідно, щоб кількість витків вторинної обмотки була меншою за кількість витків первинної обмотки:

$$\omega_2 < \omega_1.$$

### 5.3. Втрати енергії в трансформаторі

В трансформаторі, як й у будь-якому пристрої, що перетворює енергію, існують деякі втрати енергії. Ці втрати визначаються, в основному, двома причинами:

1) подоланням опору проводів – електричні, втрати, або втрати у міді ( $P_e$  – потужність електричних втрат);

2) перемагнічуванням магнітопроводу – магнітні втрати, або втрати у сталі ( $P_m$  – потужність магнітних втрат).

Для потужності повних втрат енергії в трансформаторі справедливе співвідношення

$$P = P_e + P_m. \quad (5.8)$$

Зазначимо, що  $P_e$  пропорційна  $I_1^2$ , а  $P_m$  пропорційна  $U_1^2$ .

Втрати в сталевому сердечнику визначають з досліду холостого ходу трансформатора, а втрати в міді – з досліду короткого замикання трансформатора.

До параметрів трансформатора належать:

- $X_m$  (Ом) – реактивний опір взаємоіндукції між обмотками, обумовлений дослідом холостого ходу;
- $R_k$  (Ом) – активний опір обох обмоток трансформатора;
- $X_k$  (Ом) – індуктивний опір обох обмоток трансформатора;
- $Z_k$  (Ом) – повний власний опір трансформатора.

Значення  $R_k$ ,  $X_k$ ,  $Z_k$  також знаходять із досліду короткого замикання, а тому вони й зветься опорами короткого замикання.

### 5.4. Дослід холостого ходу трансформатора

Дослід холостого ходу використовують для визначення низки характеристик трансформатора.

**Холостим ходом трансформатора** називається робота трансформатора при розімкнутому колі вторинної обмотки, тобто при відсутності навантаження. В цьому випадку струм  $I_2 = 0$ . Струм, який тече при цьому в первинній обмотці, називають струмом холостого ходу  $I_0$ . Струм  $I_0$  порівняно з номінальним струмом первинної обмотки трансформатора, невеликий, він становить лише 3–10%  $I_{1н}$ , тому

спадання напруги в первинній обмотці є малим у порівнянні з  $U_1$  та  $E_1$ . Отже, можна вважати, що під час холостого ходу  $U_1 \approx E_1$ . У вторинній обмотці струму немає, тому напруга на затисках розімкненої вторинної обмотки  $U_{20} = E_2$ . Отже, маємо, що коефіцієнт трансформації

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1}{U_{20}} \quad (5.9)$$

Таким чином, для визначення коефіцієнту трансформації трансформатора достатньо виміряти напруги на затисках первинної та вторинної обмоток та знайти їх відношення (при розімкнутій вторинній обмотці).

Дослід холостого ходу також дає можливість визначити так звані «магнітні втрати», або «втрати у сталі» трансформатора, які обумовлені перемагнічуванням його сталевого сердечника. Спочатку визначивши втрати на нагрів у первинній обмотці («електричні втрати», або «втрати в міді») за формулою

$$P_{e1} = I_0^2 \cdot R_1, \quad (5.10)$$

де  $R_1$  – активний опір первинної обмотки.

Ці втрати, до речі, є дуже незначними при досліді холостого ходу внаслідок невеликого значення  $I_0$ . Після цього можливо знайти втрати в сталі сердечника:

$$P_{ст} = P_1 - P_{e1}, \quad (5.11)$$

де  $P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1$  – потужність, що підводиться до трансформатора.

Слід зауважити, що втратами в активному опорі первинної обмотки часто взагалі нехтують, бо вони значно менші магнітних втрат внаслідок малої величини струму  $I_0$ .

При проведенні досліді холостого ходу до первинної обмотки підводять напругу, яку поступово підвищують від 0 до  $1,1U_1$ . При цьому знімають покази вимірювальних пристроїв, спираючись на які будують *характеристики холостого ходу*. Так називають залежності струму  $I_0$ , потужності  $P_0$  та коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$  від напруги  $U_1$ . З побудованих характеристик визначають значення

номінального струму  $I_0$  та потужності  $P_0$ , та  $\cos \varphi$ , що відповідають номінальній напрузі  $U_{1н}$ .

### 5.5. Дослід короткого замикання трансформатора

Для визначення втрат в міді (електричних втрат) проводять дослід **короткого замикання трансформатора**, тобто вимірюють потужність при накоротко замкнутій вторинній обмотці. В цьому випадку потужність витрачається на втрати в міді та в сталі. На первинну обмотку подається знижена напруга (її поступово збільшують від 0 до  $U_{1k} = (4,5 \dots 10,5) \%$  від  $U_1$ , доки значення струму первинної обмотки не досягне значення  $I_{1н}$ ).

Магнітний потік в сталевому сердечнику є пропорційним напрузі на первинній обмотці. З цього випливає, що зниження напруги викличе зменшення магнітного потоку, внаслідок чого втрати в сталевому сердечнику будуть набагато меншими, ніж при номінальній напрузі. Нехтуючи втратами в сталевому сердечнику, можна вважати, що вся потужність, споживана трансформатором, йде на втрати в обмотках трансформатора, тобто електричні втрати. Таким чином, виміряні ватметром в процесі досліду короткого замикання втрати потужності можна вважати номінальними втратами на нагрів обмоток.

Змінюючи напругу первинної обмотки трансформатора, фіксують покази вимірювальних пристроїв, та на їх основі будують *характеристики короткого замикання*, тобто залежності:

$$I_{1k} = f(U_{1k}); \cos \varphi_k = f(U_{1k}); P_k = f(U_{1k}).$$

де  $I_{1k}$  – струм короткого замикання в первинній обмотці трансформатора;

$P_k$  – потужність втрат короткого замикання при номінальних струмах в обмотках;

При  $I_{1k} = I_{1н}$  розраховують *параметри короткого замикання трансформатора*, а саме:

- повний опір короткого замикання

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} ; \quad (5.12)$$

- активну складову опору короткого замикання

$$R_k = \frac{P_k}{I_{1н}^2}; \quad (5.13)$$

– реактивну складову опору короткого замикання

$$X_k = \sqrt{(Z_k^2 - R_k^2)}. \quad (5.14)$$

Напругу короткого замикання  $U_k$  зазвичай виражають у відсотках від номінальної напруги первинної обмотки  $U_{1н}$ :

$$U_k \% = \frac{U_k}{U_{1н}} \cdot 100\% . \quad (5.15)$$

Вона звичайно становить 2...8% від  $U_{1н}$ .

## 5.6. Робота трансформатора під навантаженням.

### Зовнішні характеристики однофазного трансформатора

Лише частина магнітного потоку трансформатора (основний потік  $\Phi$ ), замикається через сердечник та зчеплена з первинною та вторинною обмотками. Потоки розсіювання  $\Phi_{роз1}$  та  $\Phi_{роз2}$  замикаються навколо витків окремо первинної та вторинної обмоток відповідно через повітря та в передачі електроенергії не беруть участі.

В режимі навантаження на первинну обмотку трансформатора подається номінальна первинна напруга, а до вторинної обмотки підключено навантаження  $Z_H$  (рис. 5.3). У вторинній обмотці з'являється струм  $I_2$ , який створює магнітний потік, направлений (згідно правила Ленца) протилежно магнітному потоку, викликаному первинною обмоткою, тобто ослаблює цей потік. Внаслідок цього струм  $I_1$  в первинній обмотці збільшується в той мірі, щоб компенсувати розмагнічувальну дію вторинної обмотки.

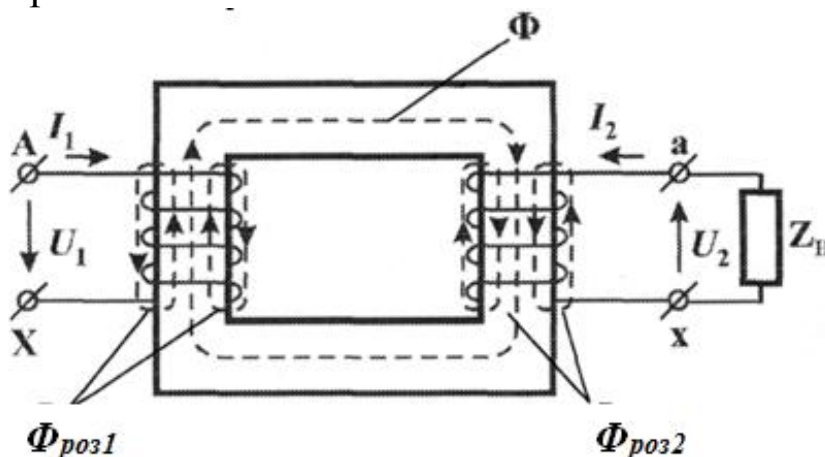


Рис. 5.3. Електромагнітна схема роботи трансформатора під навантаженням

Режим навантаження дає змогу побудувати зовнішні характеристики та визначити ККД ( $\eta$ ) трансформатора.

**Зовнішньою характеристикою трансформатора** називають залежність  $U_2 = f(I_2)$ , отриману при  $U_1 = const$ ,  $f = const$ ,  $\cos \varphi_2 = const$  ( $\varphi_2$  – різниця фаз струму й напруги у вторинній обмотці).

Вигляд зовнішньої характеристики залежить як від роду навантаження, так і від значення коефіцієнта потужності  $\cos \varphi$ .

При **активно-індуктивному навантаженні**, коли  $\varphi_2 > 0$ , загальний індуктивний опір кола «трансформатор – навантаження» більший у порівнянні з чисто активним навантаженням. У результаті цього магнітна система трансформатора розмагнічується, тобто зменшується величина магнітного потоку, отже  $E_2$  і напруга  $U_2$  знижуються. Зовнішня характеристика спадає більш круто, ніж при чисто активному навантаженні. При цьому чим меншим буде коефіцієнт потужності навантаження  $\cos \varphi_2$  (тобто чим більше величина  $X_{\text{Лнавант.}}$ ), тим крутіше спадаючою буде зовнішня характеристика трансформатора.

У випадку **активно-ємнісного навантаження** ( $\varphi_2 < 0$ ) має місце зворотний ефект: чим більше величина ємності конденсаторів, підключених до затискачів вторинної обмотки трансформатора (тобто чим менше величина  $X_{\text{Снавант.}}$ ), тим зовнішня характеристика буде більш пологою, а у випадку чисто ємнісного навантаження зовнішня характеристика буде навіть зростаючою (рис. 5.4).

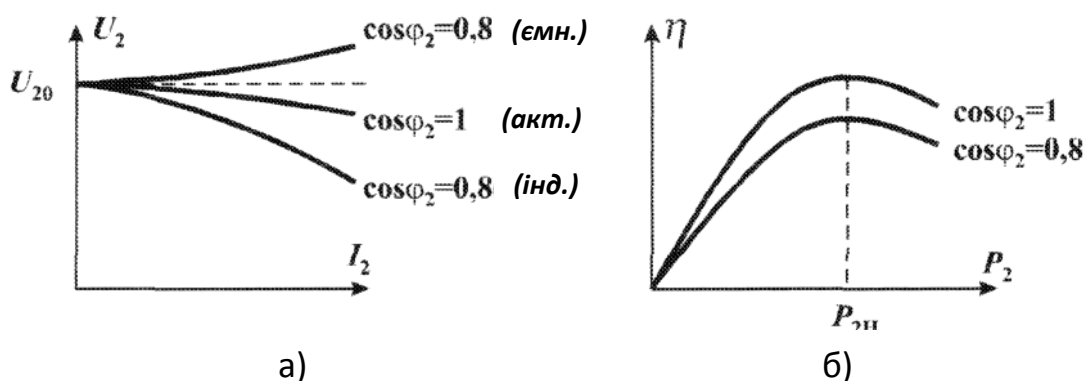


Рис. 5.4. Зовнішні характеристики (а) та графік залежності ККД трансформатора від навантаження (б)

Величина спадання напруги  $\Delta U_{\text{тр}}$  на внутрішньому опорі трансформатора при струмі навантаження  $I_2$  й її коефіцієнті потужності  $\cos \varphi_2$  може бути розрахована приблизно за спрощеною формулою:

$$\Delta U_{\text{тр}} = I_2 (R'_k \cdot \cos \varphi_2 + X'_k \cdot \sin \varphi_2) , \quad (5.16)$$

де  $R'_k = \frac{R_k}{K_{\text{тр}}^2}$  та  $X'_k = \frac{X_k}{K_{\text{тр}}^2}$  – приведені до числа витків вторинної обмотки активний і реактивний опори короткого замикання трансформатора;

$K_{\text{тр}}$  – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Вторинна напруга трансформатора при цьому дорівнює:

$$U_2 = U_{20} - \Delta U_{\text{тр}} , \quad (5.17)$$

де  $U_{20}$  – напруга вторинної обмотки трансформатора при холостому ході (номінальна вторинна напруга).

На практиці часто користуються поняттям так званої **процентної зміни вторинної напруги трансформатора  $\Delta U_2 \%$**  (при номінальному струмі навантаження  $I_{2\text{н}}$ ):

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100\% , \quad (5.18)$$

де  $U_{20}$  – напруга вторинної обмотки трансформатора при  $I_2 = I_{2\text{н}}$ .

Величина  $\Delta U_2 \%$  дає змогу судити, круту або пологі зовнішню характеристику має трансформатор. Звичайно  $\Delta U_2 \% = 3 \dots 5\%$ .

**Коефіцієнт корисної дії (ККД)** трансформатора дуже високий, він досягає значень 0,95...0,995. ККД трансформатора зростає при збільшенні його номінальної потужності. Доведено, що найбільший ККД досягається при приблизній рівності втрат в сталевому сердечнику та втрат в мідних обмотках трансформатора (ці втрати визначаються за дослідями холостого ходу та короткого замикання ті вказуються в паспорті трансформатора).



## 5.7. Конструкції однофазних трансформаторів

Як вже згадувалось в п. 5.2, однією з основних частин трансформатора є *магнітопровід*, виготовлений з листів спеціальної електротехнічної сталі завтовшки 0,35...0,5 мм. За конфігурацією магнітопроводу розрізняють *стержневі* (в таких трансформаторах обмотки «охоплюють» стержні магнітопроводу) та *броньові* трансформатори (в них магнітопровід частково «охоплює», мов би бронює обмотки). Найбільш поширені стержневі трансформатори завдяки тому, що в них зручніше оглядати та ремонтувати обмотки.

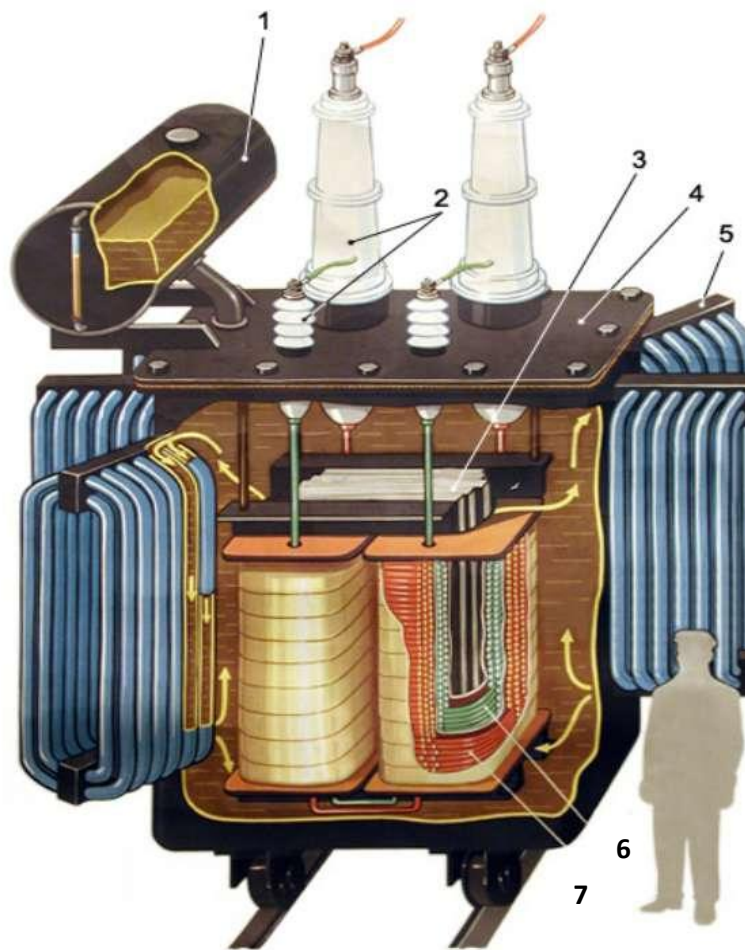


Рис. 5.5. Конструкція однофазного масляного трансформатора  
1 – розширювальний бак для олії; 2 – ізолятори на виведеннях обмоток; 3 – кришка бака трансформатора; 5 – охолоджуючі радіатори; 6 – обмотка нижчої напруги; 7 – обмотка вищої напруги.

*Обмотки трансформаторів* виготовляються з мідного дроту круглого або прямокутного перерізу, витки ізолюють один від одного

лаковим покриттям. На стержень магнітопроводу надягають ізолюючий циліндр з просоченого спеціальним лаком картону, на якому розташовують, як правило, обмотку нижчої напруги (її простіше ізолювати від сталюого стержня, ніж обмотку вищої напруги). На обмотку нижчої напруги надягають другий ізолюючий циліндр, на якому розташовують обмотку вищої напруги. В разі несправностей, які найчастіше трапляються в обмотках саме вищої напруги, ця обмотка буде більш доступна для огляду та ремонту (рис. 5.5).

Сердечник з обмотками занурюють в бак, виготовлений з листової сталі, в який заливають спеціальну трансформаторну олію. Трансформаторна олія добре ізолює витки обмоток один від одного. До того ж, завдяки великій теплопровідності, олія відводить теплоту від обмоток. Поверхня бака робиться ребристою для збільшення поверхні охолодження. Крім масляних трансформаторів з олійним охолодженням існують так звані «сухі» трансформатори, які охолоджуються за рахунок природного контакту з повітрям (рис.5.6). Але такий вид охолодження припустимий лише для трансформаторів малої потужності.

На кришці бака трансформатора розташовуються виведення обмоток, виготовлені з фарфору або скла.

Зустрічаються трансформатори, в яких замість однієї вторинної обмотки є дві або більше. Такі трансформатори називають триобмотковими або багатообмотковими.

Автотрансформатор відрізняється від трансформатора тим, що його обмотка нижчої напруги є частиною обмотки вищої напруги, отже, кола первинної та вторинної обмоток мають не лише магнітний, а й електричний зв'язок (рис. 5.6).

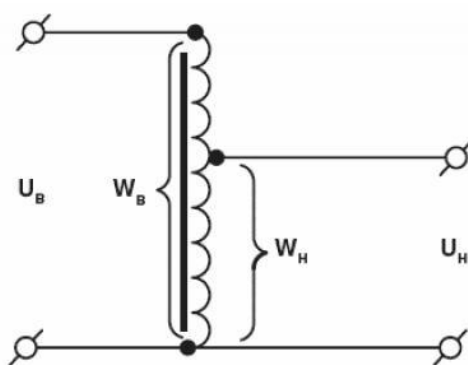


Рис. 5.6. Схема однофазного автотрансформатора

Однофазні автотрансформатори малої потужності використовують в пристроях зв'язку й автоматики, та для плавної зміни напруги в лабораторній практиці.

## 5.8. Трифазні трансформатори

Трансформація електроенергії в трифазних системах може здійснюватися за допомогою трьох однофазних трансформаторів, з'єднаних певним чином (рис. 5.7) – це так званий груповий трансформатор, або за допомогою трифазного тристержневого трансформатора (рис. 5.8), в якому обмотки вищої та нижчої напруги розташовуються на одному стержні.

Трифазні тристержневі трансформатори дешевші та мають менші розміри, ніж групові, тому вони використовуються частіше. Лише при дуже великих потужностях є сенс користуватися трьома однофазними трансформаторами, що пояснюється технологією їх виготовлення та складністю транспортування.

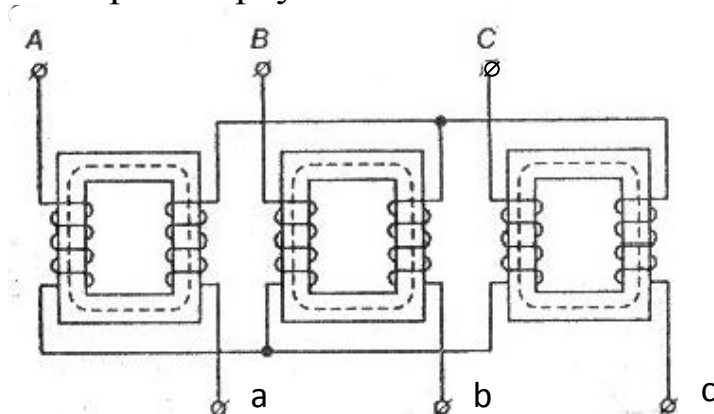


Рис. 5.7. Магнітна схема групового трифазного трансформатора

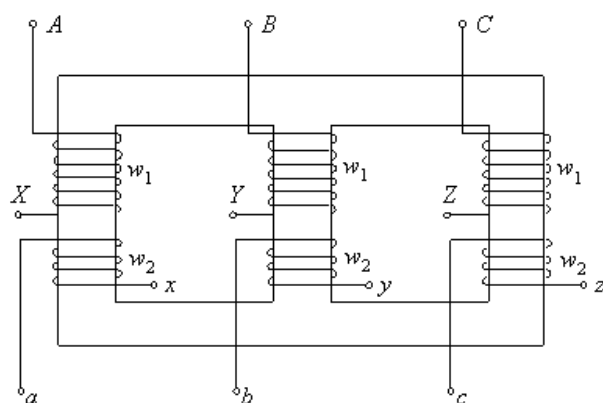


Рис. 5.8. Магнітна схема тристержневого трифазного трансформатора

Трифазні трансформатори, як і однофазні, виготовляються як з олійним охолодженням, так і у «сухому» виконанні (рис. 5.9).



а)



б)

Рис. 5.9. Зовнішній вигляд трифазних трансформаторів  
а) масляного; б) сухого

Трифазні автотрансформатори застосовують для зв'язку енергосистем, рівні напруг яких не дуже відрізняються один від одного. Також їх використовують для здійснення пуску асинхронних та синхронних двигунів.

### 5.9. Схеми та групи з'єднання обмоток трифазного трансформатора

Первинні та вторинні обмотки трифазних трансформаторів (групових та три стержневих) можливо з'єднувати за схемами «зірка» (Y) чи «трикутник»( $\Delta$ ). Якщо при з'єднанні обмоток «зіркою» нейтральна точка виводиться на кожух трансформатора, таке з'єднання позначається знаком  $\Upsilon$ . Схема з'єднання первинної та вторинної обмоток двох обмоткового трансформатора позначаються дробом, в чисельнику якого вказана схема з'єднання первинної обмотки, а в знаменнику – схема з'єднання вторинної обмотки трансформатора, наприклад,  $Y/\Upsilon$ ;  $\Delta/\Delta$ ;  $Y/\Delta$  (рис. 5.10).

З економічної точки зору обмотку вищої напруги вигідніше з'єднувати «зіркою», тому що це дозволяє при меншій фазній напрузі

$U_{\phi}$  отримати більшу лінійну напругу  $U_L = \sqrt{3}U_{\phi}$ . Отже, для отримання напруги  $U_{\phi}$  потрібна менша кількість витків обмотки, та й ізоляція може бути полегшена.

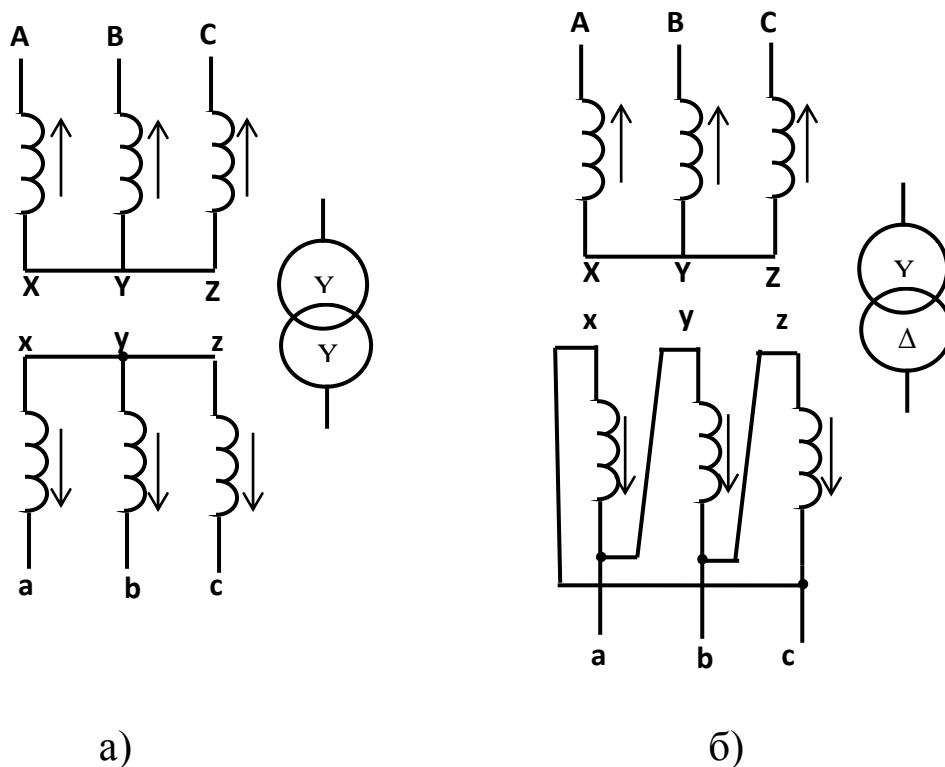


Рис. 5.10. Електричні схеми трифазних трансформаторів та їх позначення при з'єднанні обмоток: а) Y/ Y; б) Y/ Δ.

При використанні трифазних трансформаторів завжди необхідно знати, яким буде зсув фаз між первинною та вторинною лінійними напругами. Цей зсув характеризують так званою *групою з'єднання обмоток*. Група з'єднання залежить від схеми з'єднання, напрямку намотки обмоток, вибору початків та кінців обмоток. Звичайно напрям намотки та позначення виведень обмоток є таким, що фазні первинна та вторинна ЕРС співпадають по фазі. Тоді група з'єднання визначається лише схемою з'єднання обмоток. Група з'єднання позначається числами 0 або 11 та відповідає цифрі годинникового циферблата, на яку «вказує» вектор вторинної ЕРС при умові, що вектор лінійної первинної ЕРС «напрявлений на нуль (12) годин» (рис. 5.11).

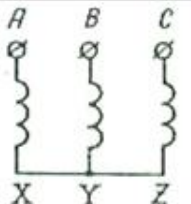
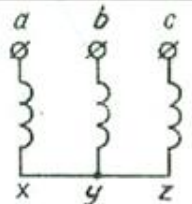
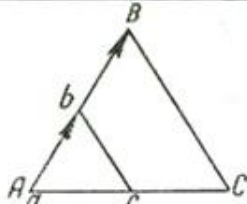
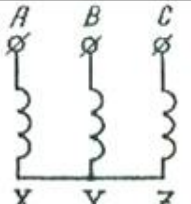
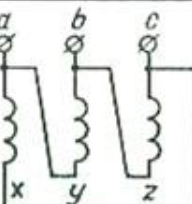
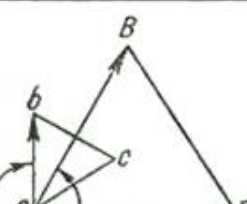
Схеми з'єднання обмоток		Векторні діаграми лінійних ЕРС	Кутовий зсув ЕРС	Групи	Умовні позначення
ВН	НН				
			0°	0	Y/0
			330°	//	Y/Δ-11

Рис. 5.11. Схеми, векторні діаграми та групи з'єднання обмоток трансформаторів

На рис. 5.11 позначка Y/Δ-11 означає, що обмотка вищої напруги з'єднана «зіркою», обмотка нижчої напруги – «трикутником». Число 11 показує, що кутовий зсув між векторами лінійних напруг вищої та нижчої напруг  $11 \times 30^\circ = 330^\circ$ .

### Питання для самоконтролю до розділу 5

1. Для чого потрібні трансформатори?
2. Поясніть принцип роботи трансформатора.
3. Опишіть устрій однофазного трансформатора.
4. Що називають коефіцієнтом трансформації? Як його можна визначити?
5. В чому полягає та для чого здійснюється дослід холостого ходу трансформатора?
6. В чому полягає дослід короткого замикання трансформатора?
7. Які втрати потужності існують в трансформаторі?
8. Як залежить вигляд зовнішньої характеристики трансформатора від типу навантаження та його коефіцієнта потужності?
9. Від чого залежить величина спадання напруги  $\Delta U_{\text{тр}}$  на внутрішньому опорі трансформатора? Запишіть формулу та поясніть її.
10. Що таке процентна зміна вторинної напруги трансформатора?

11. Як розрізняються трансформатори в залежності від конструкції магнітопроводу, від способу охолодження?
12. Які особливості устрою автотрансформаторів?
13. Які види трансформаторів, що використовуються в трифазних системах, ви знаєте?
14. Як можна з'єднати обмотки трифазних трансформаторів?
15. Яку інформацію несе позначення групи з'єднання обмоток трансформатора?

### Приклади розв'язання задач до розділу 5

#### Приклад 1.

Напруга на затисках вторинної обмотки трансформатора дорівнює 380 В, а його первинна обмотка включена в мережу з напругою 10 000 В. Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.

*Розв'язання:* Коефіцієнт трансформації визначається як відношення первинної напруги трансформатора до напруги на затисках його вторинної обмотки:

$$K = \frac{U_1}{U_{20}} = \frac{10000}{380} = 26,3$$

#### Приклад 2.

Розрахуйте число витків вторинної обмотки трансформатора, якщо число витків первинної обмотки 18 000. Первинна обмотка включена до мережі з напругою 6 600 В, а на затисках вторинної обмотки – 230 В.

*Розв'язання:*

Напруги первинної та вторинної обмотки відносяться як відповідні кількості їх витків:

$$\frac{U_1}{U_{20}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

$$\text{Звідси } \omega_2 = \frac{U_{20} \cdot \omega_1}{U_1} = \frac{230 \cdot 18000}{6600} = 627 \text{ (витків).}$$

#### Приклад 3.

Генератор постійного струму виробляє потужність 200 кВт при напрузі 230 В. Вважаючи, що теплові втрати в лінії електропередач довжиною 10 км становлять 10% від виробленої генератором потужності, розрахувати необхідний переріз мідних дротів, що йде до споживача. Питомий опір міді  $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{м}}{\text{мм}^2}$ .

*Розв'язання:*

Визначимо струм в лінії електропередач:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{200 \cdot 10^3}{230} = 870 \text{ А.}$$

Розрахуємо втрати в лінії:

$$\Delta P = \frac{10\%}{100\%} P = \frac{10\%}{100\%} 200 \cdot 10^3 = 20 \cdot 10^3 \text{ Вт.}$$

Ці втрати відбуваються при протіканні струму  $I$  в двох паралельно прокладених дротах, опір кожного з яких  $R$ . Згідно закону Джоуля-Ленца

$$\Delta P = 2I^2 R.$$

Отже, 
$$R = \frac{\Delta P}{2I^2} = \frac{20 \cdot 10^3}{2 \cdot 870^2} = 0,013 \text{ Ом.}$$

З іншого боку, 
$$R = \frac{\rho L}{S};$$

Тоді

$$S = \frac{\rho L}{R} = \frac{0,0175 \cdot 10 \cdot 10^3}{0,013} = 13461 \text{ мм}^2.$$

Не важко підрахувати, що дріт такого поперечного перерізу мав би діаметр 13,4 см. Очевидно, що користуватись дротами такого діаметру для передачі електроенергії неможливо (підрахуйте, яку вагу мав би 1 погонний метр такого дроту, і яку вагу мав би весь дріт довжиною 10 км). Цей приклад наочно доводить **недоцільність передачі енергії на великі відстані на постійній напрузі.**

Уявимо, що таку ж потужність при такий самій напрузі, але змінній, передають на ту ж саму відстань. На електростанції встановимо підвищувальний трансформатор з коефіцієнтом трансформації 1/43,4.

Напруга в лінії електропередач буде тоді

$$U_2 = \frac{U_1}{K} = \frac{230}{1/43,4} = 10000 \text{ В,}$$

а струм в лінії 
$$I = \frac{P}{U} = \frac{200 \cdot 10^3}{10000} = 20 \text{ А.}$$

Тоді

$$R = \frac{\Delta P}{2I^2} = \frac{20 \cdot 10^3}{2 \cdot 20^2} = 25 \text{ Ом,}$$

а переріз дроту

$$S = \frac{\rho L}{R} = \frac{0,0175 \cdot 10 \cdot 10^3}{25} = 7 \text{ мм}^2.$$



Найближчий стандартний переріз становить 10 мм<sup>2</sup>.

Наші розрахунки довели перевагу передачі електроенергії на змінному струмі високої напруги.

*Приклад 4.*

Автотрансформатор включений до мережі 500 В та має обмотку з 1500 витків. До вторинного кола трансформатора, яка має 1200 витків, підключений активний опір 100 Ом. Розрахувати, який струм споживає трансформатор з мережі, якщо його ККД дорівнює 95%.

*Розв'язання:*

Визначимо вторинну напругу трансформатора з формули:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}.$$

$$U_2 = \frac{U_1 \omega_2}{\omega_1} = \frac{500 \cdot 1200}{1500} = 400 \text{ В.}$$

Вторинний струм буде

$$I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{400}{100} = 4 \text{ А.}$$

Потужність вторинного кола  $P_2 = I_2 \cdot U_2 = 4 \cdot 400 = 1600 \text{ Вт.}$

Потужність первинного кола  $P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{1600}{0,95} = 1685 \text{ Вт.}$

Струм первинного кола  $I_1 = \frac{P_1}{U_1} = \frac{1685}{500} = 3,37 \text{ А.}$

*Приклад 5.*

Трифазний трансформатор з  $S_{\text{ном}} = 100 \text{ кВА}$  включений за схемою  $Y/\Delta$ . Номінальні лінійні напруги на вході та виході трансформатора  $U_{1 \text{ ном}} = 3 \text{ кВ}$ ;  $U_{2 \text{ ном}} = 0,4 \text{ кВ}$ . Визначити коефіцієнт трансформації та номінальні струми первинної та вторинної обмоток.

*Розв'язання:*

Визначимо фазну напругу первинної обмотки, яка з'єднана «зіркою»:

$$U_{1 \phi} = \frac{U_{1 \text{ ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{3,0}{1,73} = 1,73 \text{ кВ.}$$

Фазна напруга вторинної обмотки дорівнює її лінійній напрузі, бо вона з'єднана «трикутником»:  $U_{2 \phi} = U_{2 \text{ л}}$ .

Коефіцієнт трансформації

$$K = \frac{U_{1 \phi}}{U_{2 \phi}} = \frac{1,73}{0,4} = 4,32.$$

Номинальний фазний струм первинної обмотки:

$$I_{1\phi} = I_{1л} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 3,0} = 19,3 \text{ А.}$$

Номинальний фазний струм вторинної обмотки:

$$I_{2\phi} = \frac{I_{2н}}{\sqrt{3}} = \frac{S_{\text{НОМ}}}{3 \cdot U_{2\text{НОМ}}} = \frac{100}{3 \cdot 0,4} = 83,3 \text{ А.}$$

### Задачі для самостійного розв'язання до розділу 5

1. Первинна обмотка однофазного трансформатора має 900 витків, вторинна – 50 витків. Трансформатор підключений до мережі 220 В. Визначити коефіцієнт трансформації та напругу вторинної обмотки.

*Відповідь:*  $K = 18$ ;  $U_2 = 12,2 \text{ В}$ .

2. Якою повинна бути кількість витків вторинної обмотки однофазного трансформатора, якщо потрібно отримати напругу на ній 36 В при тому, що трансформатор підключено до мережі напругою 660 В, а кількість витків первинної обмотки 807?

*Відповідь:*  $\omega_2 = 44$ .

3. Однофазний двох обмотковий трансформатор має номінальну повну потужність  $S = 100 \text{ кВА}$ . Номінальні напруги первинної та вторинної обмоток дорівнюють відповідно:  $U_1 = 6000 \text{ В}$ ,  $U_2 = 400 \text{ В}$ . На один виток обмоток трансформатора припадає напруга  $U_{\text{ВИТ}} = 5 \text{ В}$ . Визначити кількість витків обмоток трансформатора, коефіцієнт трансформації, номінальні струми обмоток та поперечні перерізи обмоток, якщо щільність струму в цих дротах  $4,0 \text{ А/мм}^2$ .

*Відповідь:*  $\omega_1 = 1200$ ;  $\omega_2 = 80$ ;  $I_1 = 16,7 \text{ А}$ ;  $I_2 = 250 \text{ А}$ ;  $q_1 = 4,17 \text{ мм}^2$ ;  $q_2 = 62,5 \text{ мм}^2$ .

4. Для визначення втрат в сталевому сердечнику котушки її включили спочатку в мережу постійного струму, в результаті чого визначили опір  $1,75 \text{ Ом}$ . Після цього котушку підключили до змінної напруги. При цьому вольтметр показав  $120 \text{ В}$ , ватметр –  $70 \text{ Вт}$ , амперметр –  $2 \text{ А}$ . Розрахувати втрати потужності в міді дротів котушки, втрати в сталевому сердечнику та коефіцієнт потужності котушки.

*Відповідь:*  $P_{\text{М}} = 7 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{СТ}} = 63 \text{ Вт}$ ;  $\cos \varphi = 0,292$ .

5. Однофазний трансформатор має такі номінальні параметри: повна потужність  $S_{\text{НОМ}} = 2,2 \text{ кВА}$ ; напруги первинної та вторинної

обмоток дорівнюють відповідно  $U_{1\text{ ном}} = 220 \text{ В}$  ;  $U_{2\text{ ном}} = 55 \text{ В}$  . Напряга короткого замикання  $U_k \% = 5\%$ . Визначити коефіцієнт трансформації, номінальні струми в обмотках та діюче значення напруги короткого замикання.

*Відповідь:*  $K = 4$ ;  $I_{1\text{ ном}} = 10 \text{ А}$ ;  $I_{2\text{ ном}} = 40 \text{ А}$ ;  $U_k = 11 \text{ В}$ .

6. Трифазний знижувальний трансформатор з номінальною потужністю  $S_{\text{ ном}} = 20 \text{ кВА}$  та номінальними лінійними напругами  $U_{1\text{ ном}} = 6000 \text{ В}$  ;  $U_{2\text{ ном}} = 400 \text{ В}$  при частоті 50 Гц має втрати холостого ходу  $P_0 = 180 \text{ Вт}$  ; втрати короткого замикання  $P_k = 600 \text{ Вт}$  та напругу короткого замикання  $U_k \% = 5,5\%$ . З'єднання обмоток трансформатора виконано за схемою  $Y/Y$ . Визначити коефіцієнт трансформації трансформатора, номінальні фазні напруги трансформатора  $U_{1\text{ ф}}$  ;  $U_{2\text{ ф}}$ ; номінальні струми обмоток  $I_{1\text{ ном}}$  ;  $I_{2\text{ ном}}$  ; повний опір короткого замикання трансформатора.

*Відповідь:*  $K = 15$  ;  $U_{1\text{ ф ном}} = 3470 \text{ В}$ ;  $U_{2\text{ ф ном}} = 230 \text{ В}$ ;

$I_{1\text{ ном}} = 1,93 \text{ А}$ ;  $I_{2\text{ ном}} = 29 \text{ А}$ ;  $Z_k = 99 \text{ Ом}$ .

7. Трифазний трансформатор працює на освітлювальній мережі з навантаженням 45 кВт. Вторинна напруга 220 В, первинна 6000 В. Визначити первинний та вторинний струми трансформатора, якщо він з'єднаний за схемою  $Y/Y$ , а його ККД = 0,9.

*Відповідь:*  $I_1 = 4,8 \text{ А}$ ;  $I_2 = 118 \text{ А}$ .

8. Якими будуть коефіцієнти трансформації лінійних напруг трифазного трансформатора при групах з'єднань  $Y/Y$ ;  $Y/\Delta$ ;  $\Delta/Y$ , якщо відношення кількості витків, які припадають на одну фазу,  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = 2$ ?

*Відповідь:* 2; 1,16; 3,46.

9. Три однакові однофазні трансформатори зєднані в групу. Їх вторинні обмотки утворюють «зірку» з лінійною напругою 380 В. До даної групи трансформаторів підключене симетричне навантаження за схемою «трикутник». Активний опір кожної фази навантаження дорівнює 31,6 Ом, а індуктивний опір 24,5 Ом. Визначити фазні та лінійні струми вторинної обмотки трансформатора.

*Відповідь:* :  $I_{\text{ ф}} = 9,5 \text{ А}$ ;  $I_{\text{ л}} = 16,4 \text{ А}$ .

## РОЗДІЛ 6 ЕЛЕКТРИЧНІ ДВИГУНИ

### 6.1. Поняття про електродвигун

Електродвигун – це пристрій, який перетворює електричну енергію в механічну.

В процесі перетворення електричної енергії в механічну завжди присутні втрати цієї енергії. Вони обумовлені виділенням тепла при проходженні струму провідниками, перемагнічуванням сердечників при роботі двигунів, а також існуванням тертя в підшипниках двигуна та опором повітря при обертанні двигуна. Отже, коефіцієнт корисної дії (ККД), тобто відношення механічної потужності на валу двигуна до споживаної ним з електромережі електричної потужності, завжди менший 100%. Але у порівнянні з тепловими та іншими видами машин електричні двигуни відрізняються достатньо високим рівнем ККД. В найбільш потужних електродвигунах ККД сягає 98–99,5%, а в електродвигунах малої потужності (близько 10 Вт) ККД приймає значення 20–40%. Такі високі значення ККД в інших видах машин не досягнуто.

Електродвигуни дуже широко розповсюджені завдяки таким перевагам, як:

- високі енергетичні показники;
- зручність подання та віддачі енергії;
- можливість створення електродвигунів великого діапазону потужностей та швидкостей обертання;
- зручність обслуговування та легкість використання.

Корисна потужність, яка передбачена для електричної машини, має назву **номінальної**. Інші величини, які характеризують роботу електродвигуна саме при цій потужності, також називаються номінальними. Основні характеристики двигуна: номінальний струм  $I$ , напруга  $U$ , частота обертання  $n$ , ККД  $\eta$  та інші величини (наприклад, для машини, яка використовує змінний струм, існують номінальна частота змінного струму  $f$  та коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$ ).

Основні номінальні величини зазначені в паспортній таблиці, що прикріплена до електродвигуна.

Електродвигуни здатні працювати від постійного та змінного струмів. Промисловість опанувала випуск великого розмаїття

електродвигунів – від мініатюрних, які використовують, наприклад, в дитячих іграшках, до середніх (використовуються в побутовій техніці) та великих і дуже великих (їх використовують для приводу виробничих механізмів).

## 6.2. Класифікація двигунів

Усі електродвигуни можливо розділити на три групи (рис. 6.1):

- двигуни постійного струму;
- двигуни змінного струму;
- універсальні (колекторні) двигуни.

Кожний тип двигунів має як переваги, так і певні недоліки. Розглянемо різні типи двигунів у порівнянні з точки зору складності конструкції, можливостей регулювання частоти обертання та зручності використання при певних умовах.

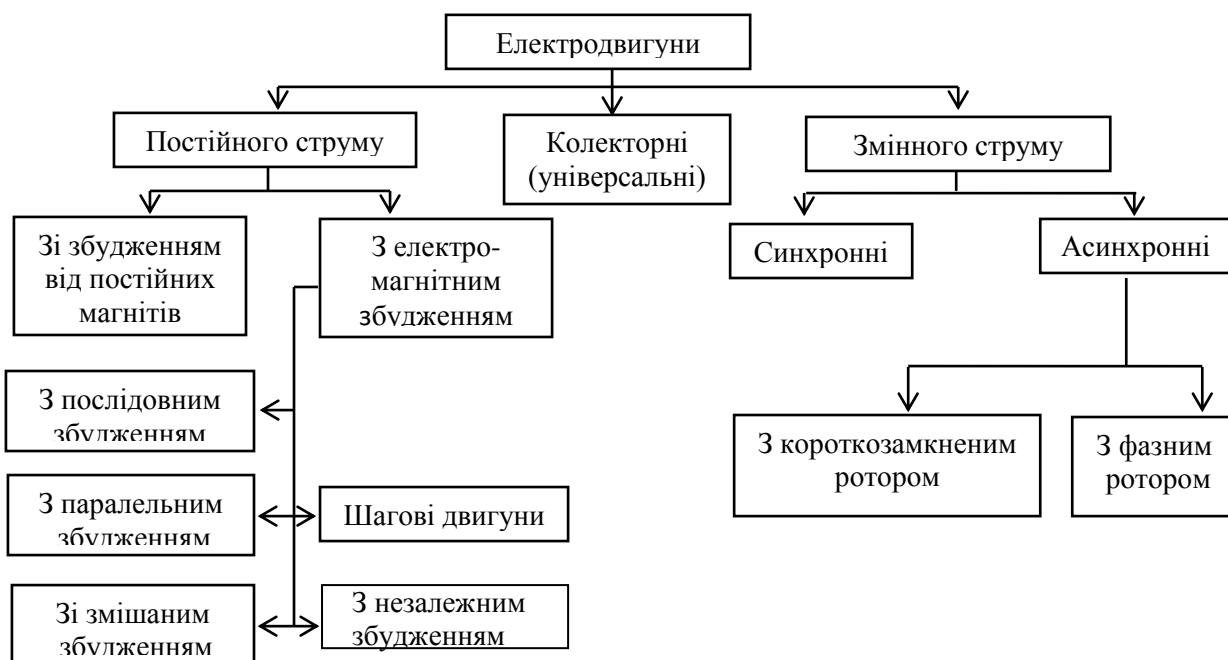


Рис. 6.1. Класифікація електродвигунів

Будь-який двигун складається з нерухомої частини – **статора**, та рухомої частини – **ротора**.

Конструкція **двигунів змінного струму** більш проста, отже, і працювати з ними значно легше. Однак регулювати частоту обертання таких двигунів практично неможливо. Це обмежує область їх використання тими пристроями, в яких немає необхідності регулювати частоту, наприклад, в насосних агрегатах, компресорах, електропилах, бетонозмішувачах тощо.

У **двигунів постійного струму** є безперечна перевага перед двигунами змінного струму – можливість регулювання частоти обертання. Тому й використовують їх в промислових установках, де існує точне обмеження частоти обертання, а також в електротранспорті, де суттєво необхідною є можливість плавного регулювання частоти обертання ротора двигуна.

В побутових електроприладах – холодильниках, пиломкоках, соковижималках та інших – використовуються **універсальні колекторні двигуни**, розраховані на роботу як від змінного струму частотою 50 Гц (напругою 127 та 220 В), так і від постійного струму (напругою 110 та 220 В).

Колекторні двигуни мають невелику потужність – до 600 Вт, максимальна частота обертання таких двигунів – до 8000 обертів за хвилину. Частота обертання в них регулюється зміною величини напруги, що підводиться до їх обмоток: якщо двигун малопотужний, то зміну напруги здійснюють підключенням реостату (змінного опору), для більш потужних двигунів використовують трансформатор.

Перевагою колекторних двигунів є насамперед їх універсальність. До недоліків слід віднести:

- неможливість роботи на малих навантаженнях, тобто «вхолосту» (двигун в такому режимі швидко перегрівається);
- низький ККД при роботі на змінному струмі;
- виникнення радіоперешкод при роботі двигуна.

Двигуни постійного струму діляться на двигуни з послідовним збудженням, двигуни з паралельним збудженням, двигуни зі змішаним збудженням і так звані **шагові двигуни**, у яких відбувається поворот ротора на певний кут, після чого двигун зупиняється, а після паузи знов ротор повертається на той самий кут.

Двигуни змінного струму діляться на асинхронні та синхронні двигуни. **Синхронні двигуни** здебільше використовуються для приводу механізмів великої потужності (більше 250 – 300 кВт) з тривалим циклом роботи (наприклад, двигуни насосів водопровідних та каналізаційних станцій).

Асинхронні двигуни розділяються на короткозамкнені двигуни та двигуни з фазним ротором.

Крім того, існує ділення двигунів змінного струму на одно-, двох- та трифазні двигуни.

### 6.3. Двигун постійного струму та принцип його дії

Двигун постійного струму – це електродвигун, живлення якого здійснюється постійним струмом.

У найпростішому варіанті електродвигуна електричний струм приводить до дії низку електромагнітів, які розташовані на роторі в магнітному полі постійного магніту. Магнітні сили, що діють між постійним магнітом та електромагнітами, викликають обертання ротора. Для з'ясування принципу дії двигуна розглянемо провідник зі струмом, який знаходиться в полі постійного магніту (рис. 6.2).

Згідно до правила лівої руки, якщо розташувати ліву руку таким чином, щоб силові лінії магнітного поля входили в долоню, а чотири пальця показували напрям струму, то відігнутий на  $90^\circ$  великий палець вкаже напрям сили, що діє на провідник в магнітному полі.

Якщо ж помістити між полюсами постійного магніту рамку зі струмом, то виникає обертальний момент, який досягає максимального значення тоді, коли рамка розташована вертикально (рис. 6.3), та буде рівним нулю, коли рамка розташується горизонтально (рис. 6.4), тому що в цьому випадку плече сил дорівнює нулю (вони діють вздовж однієї прямої).

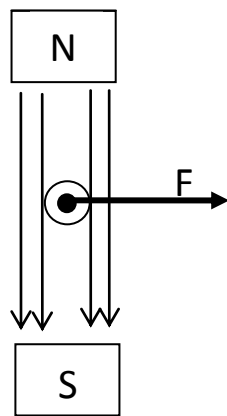


Рис.6.2. Взаємодія провідника зі струмом з магнітним полем

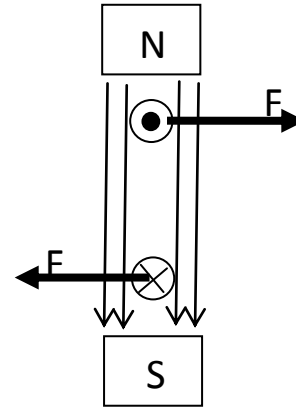


Рис.6.3. Взаємодія рамки зі струмом з магнітним полем

Чим більшою є сила струму, що тече через рамку, тим більший обертальний момент виникає на валу. Якщо рамка повернеться на  $180^\circ$ , напрям обертального моменту зміниться на протилежний. Тому, якщо ми хочемо отримати обертання рамки в один бік, необхідно подавати струм на неї тоді, коли вона знаходиться в положенні, зображенім на рис. 6.3.

Для збільшення обертового моменту використовують не одну рамку, а велику кількість витків дроту (катушку), але при цьому все одно обертання буде здійснюватися ривками.

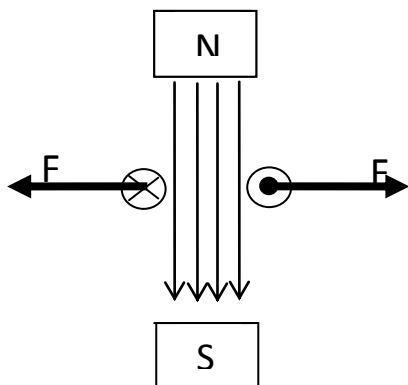


Рис. 6.4. «Мертве» положення рамки зі струмом в магнітному полі

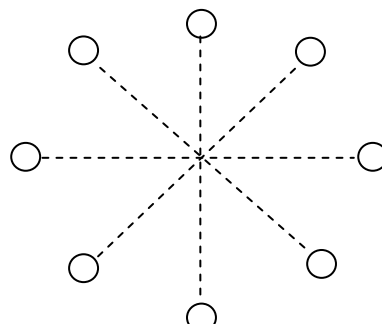


Рис. 6.5. Розташування обмоток двигуна

Щоб отримати рівномірне обертання використовують кілька обмоток, розташованих під певними кутами одна до одної (рис. 6.5). Струм на них подається за допомогою контактних **кілець**, з яких складається **колектор**, та струмозійомних **щіток**. Магнітні поля обмоток додаються.

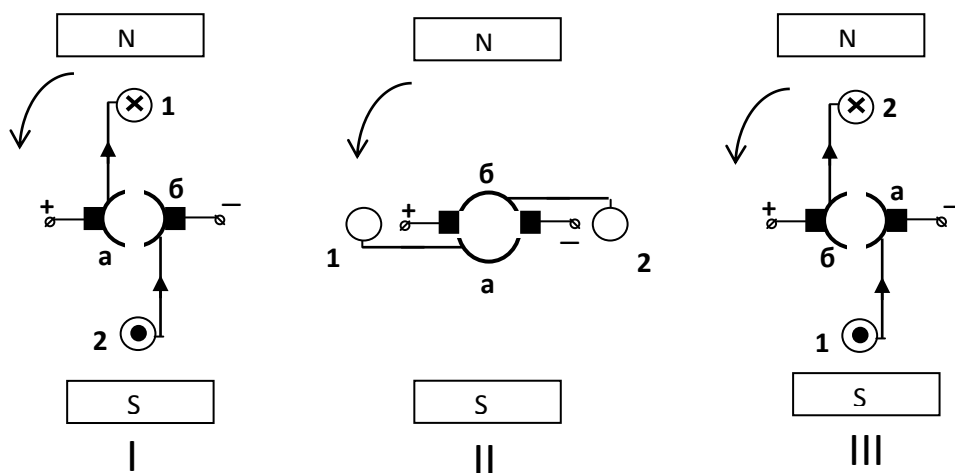


Рис. 6.6. Колектор двигуна постійного струму

На рис. 6.6 показано роботу **колектора** ДПС в трьох положеннях. Кінці витка провідника припаяні до колекторних пластин, які мають форму напівкілець, до яких притиснути щітки. Застосовуючи «правило лівої руки» визначимо, що виток зі струмом в магнітному полі почне обертатися проти годинникової стрілки (положення I). В положенні II колекторні пластини не торкаються щіток, тому струму



у витку не буде. Це нейтральне положення виток пройде за інерцією. В положенні III сторона витка 1 опинилась під другим полюсом, напрям струму змінився. За «правилом лівої руки» напрям обертання витка залишиться таким самим.

### 6.3.1. Конструкція двигуна постійного струму (ДПС)

У двигунів постійного струму нерухому частину – статор – називають **індуктором**, а рухому частину, тобто ротор – **якорем**.

На статорі ДПС розташовані, залежно від конструкції, або постійні магніти (у мікродвигунів), або електромагніти з обмотками збудження, тобто котушками, які наводять магнітний потік збудження (рис.6.7).

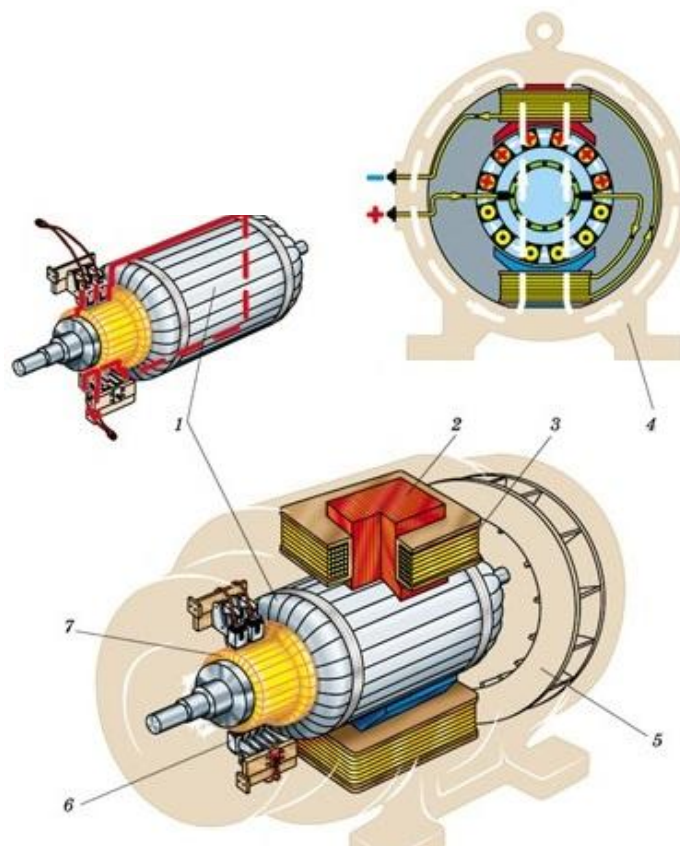


Рис. 6.7. Конструкція двигуна постійного струму:  
1– якір; 2– сердечник полюса; 3– обмотка полюса; 4– статор;  
5– вентилятор; 6– щітки; 7– колектор

**Індуктор** (статор) являє собою порожнистий циліндр, на внутрішній поверхні якого знаходиться парна кількість основних полюсів – електромагнітів постійного струму з магнітопроводом з листової сталі, на яких знаходиться обмотка збудження. В найпростішому випадку статор має два полюси, тобто один магніт з однією парою

полюсів. Але частіше ДПС мають дві пари полюсів (буває, що й більше). Полярність полюсів чергується.

Крім основних полюсів на статорі (індукторі) можуть встановлюватися додаткові полюси, які дають змогу запустити двигун з стану, коли обмотка знаходиться в «мертвому» положенні (рис. 6.4). Всередині обмоток статора є сталевий сердечник, який необхідний для підсилення магнітного поля.

Рухома частина ДПС, **якір**, це сталевий сердечник, який являє собою циліндр з пакетів електротехнічної сталі з пазами на зовнішній поверхні (рис. 6.8). В пазах розташовані обмотки, які зорієнтовані під різними кутами до вісі якорю. Виведення обмоток припаяні до **колекторних пластин**, через які за допомогою **щіток** в необхідні моменти часу подається живлення на обмотки. Полярність окремих груп щіток чергується. Змінювати струм в обмотках якоря можливо за допомогою реостата – змінного опору.

Всередині якоря знаходиться вал двигуна, який спирається на підшипники.

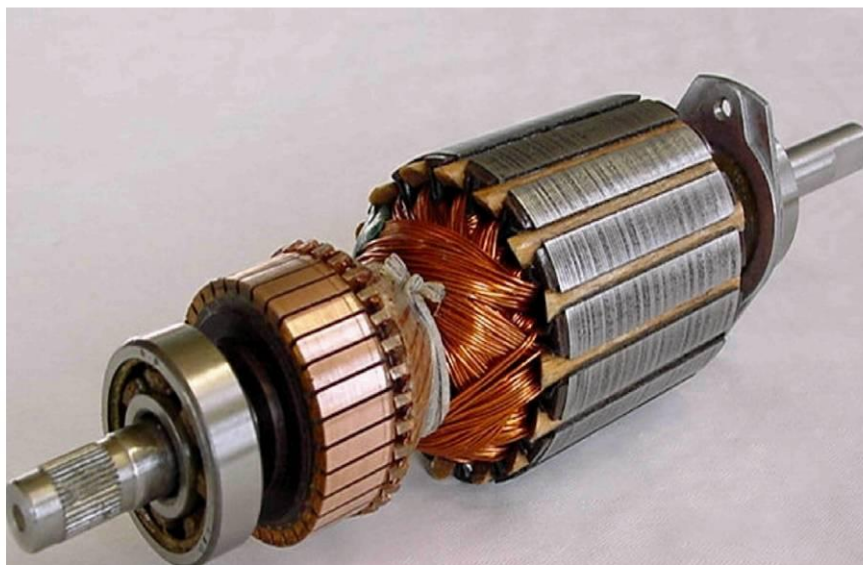


Рис. 6.8. Ротор (якір) двигуна постійного струму.

### 6.3.2. Різновиди двигунів постійного струму

Розрізняють кілька видів двигунів постійного струму за способом збудження обмотки якоря (рис. 6.1): двигуни з паралельним збудженням, двигуни з послідовним збудженням, двигуни зі змішаним збудженням та двигуни з незалежним збудженням.

Принципові електричні схеми двигунів з різними способами збудження обмотки якоря представлено на рис. 6.9.

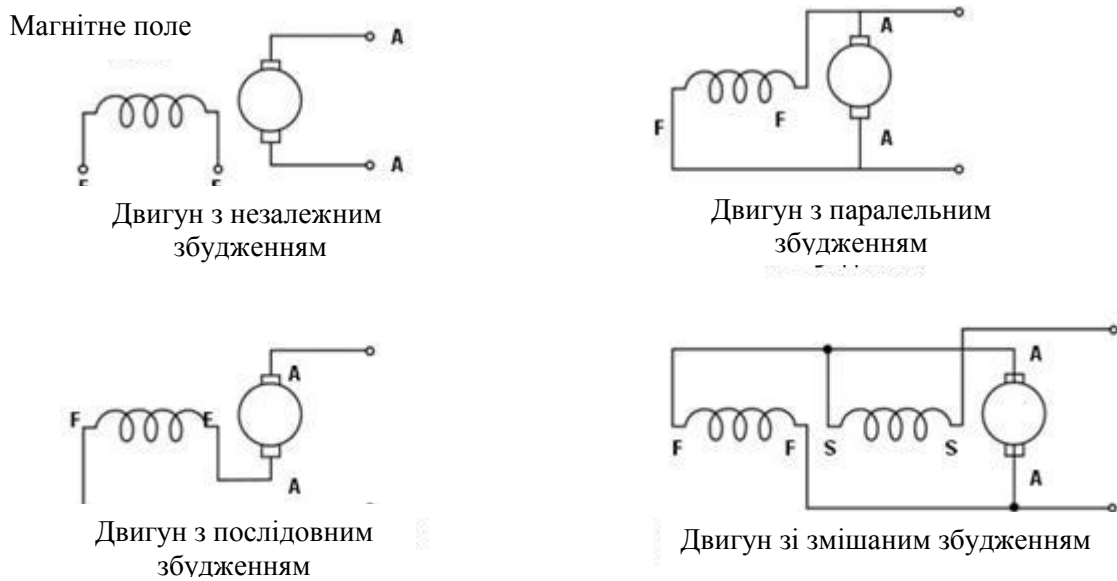


Рис. 6.9. Принципові електричні схеми двигунів постійного струму

В двигунах постійного струму з **незалежним збудженням** обмотка збудження підключена до незалежного джерела живлення. В коло обмотки збудження включають регульовальний реостат, а в коло якірної обмотки – пусковий реостат. Характерною особливістю цього виду двигуна в порівнянні з двигуном з паралельним збудженням є незалежність струму збудження від струму якоря.

У двигунів постійного струму з **послідовним збудженням** обмотки збудження та якоря з'єднані послідовно, отже, струм обох обмоток є однаковим. Обертальний момент двигуна  $M$  пропорційний квадрату струму якоря, завдяки чому під час пуску двигун швидко долає інерцію навантаження на його валу. З формули для частоти обертання

$$n = \frac{U_{дж} - I_{я} \cdot R_{я}}{C_e \Phi} \quad (6.1)$$

видно, що при зменшенні навантаження на валу, оскільки при цьому зменшуються струм якоря  $I_{я}$  та магнітний потік  $\Phi$ , швидкість обертання двигуна різко зростає і може досягти значення, яке є небезпечним для механічної міцності двигуна. Тому для ДПС з послідовним збудженням є неприпустимою робота «вхолосту» або з дуже малим

навантаженням. Двигуни цього типу неможна з'єднувати з механізмом за допомогою пасу, тому що його обрив призведе до розвантаження та «розносу» двигуна.

Регулювати частоту обертання ДПС з послідовним збудженням можливо за рахунок зміни напруги, що живить двигун, або змінюючи магнітний потік полюсів. Для регулювання другим способом встановлюють паралельно обмотці збудження регулювальний реостат, або розбивають обмотку збудження на кілька секцій та змінюють магнітний потік двигуна, з'єднуючи ці секції паралельно або послідовно.

ДПС з послідовним збудженням використовуються для приводу двигунів електровозів, потягів метрополітену, трамваїв, електричних підйомних кранів.

**У ДПС з паралельним збудженням** обмотка збудження підключена до мережі паралельно якірній обмотці, отже при постійних значеннях опору кола збудження та напруги мережі магнітний потік двигуна  $\Phi$  буде незмінним. Характерною особливістю ДПС з паралельним збудженням є практична незалежність швидкості обертання від навантаження на валу. Регулювання швидкості обертання здійснюється за допомогою регулювального реостата, який включається в коло обмотки збудження.

ДПС з паралельним збудженням застосовуються в мережах постійного струму для приводу верстатів, різноманітних механізмів, прокатних станів, електропідйомників, які вимагають постійної швидкості обертання або можливості регулювання швидкості в широкому діапазоні.

**ДПС зі змішаним збудженням** завдяки наявності двох обмоток на полюсах двигуна (одна з них включена паралельно якірній обмотці, а друга – послідовно до неї) дозволяють використовувати переваги двигунів послідовного та паралельного збудження. Цими перевагами є незалежність швидкості обертання від навантаження та великий обертальний момент під час пуску двигуна. Регулювання швидкості обертання двигуна зі змішаним збудженням виконується за допомогою регулювального реостата, який включається в коло паралельної обмотки двигуна.

### **6.3.3. Рівняння роботи електродвигуна**

Магнітне поле двигуна є результатом взаємодії полів, створених обмотками збудження та обмотками якоря. Проте в режимах роботи з

малими навантаженнями (зокрема, у режимі холостого ходу, тобто без навантаження) поле обмотки якоря незначне. Тому з достатньою точністю можна вважати, що результуючий магнітний потік дорівнює потоку обмотки збудження.

Обертаючий момент, який існує на валу двигуна, є пропорційним до струму якоря  $I_{\text{я}}$  та магнітного потоку  $\Phi$ :

$$M_{\text{дв}} = C_{\text{м}} \cdot \Phi \cdot I_{\text{я}} , \quad (6.2)$$

де  $C_{\text{м}}$  – конструктивний коефіцієнт.

В обмотці якоря, який обертається з частотою  $n$  (об/хв), індукується ЕРС:

$$\varepsilon_{\text{я}} = C_{\text{е}} \cdot n \cdot \Phi \quad (6.3)$$

де  $C_{\text{е}}$  – коефіцієнт, що визначається конструкцією двигуна.

У відповідності до другого закону Кірхгофа рівняння рівноваги напруг в колі якірної обмотки двигуна має вигляд:

$$U_{\text{дж}} = \varepsilon_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R'_{\text{я}} , \quad (6.4)$$

де  $U_{\text{дж}}$  – напруга живлячої мережі;

$R'_{\text{я}}$  – загальний опір кола якоря. Він містить в собі опір обмотки якоря, опори пускового та регулювального реостатів.

#### 6.3.4. Пуск двигуна постійного струму з паралельним збудженням

Якщо пуск двигуна здійснювати при відсутності в колі якоря додаткових опорів (рис. 6.9), в якірній обмотці буде протікати дуже великий струм.

Дійсно, з (6.3) та (6.4), прийнявши, що в момент пуску  $R'_{\text{я}} = R_{\text{я}}$  та  $n = 0$ , отримаємо:

$$I_{\text{я пуск}} = \frac{U_{\text{дж}}}{R_{\text{я}}} \quad (6.5)$$

В зв'язку з тим, що опір якірних обмоток дуже малий (одиниці Ом, а в двигунах великої потужності навіть і долі Ом),  $I_{\text{я пуск}}$  виявиться у 10 – 20 разів більшим за номінальний. Такий режим роботи може призвести до значних пошкоджень двигуна (вигорання колектора, розпаювання та перегорання дротів обмотки якоря) та псування джерела живлення.

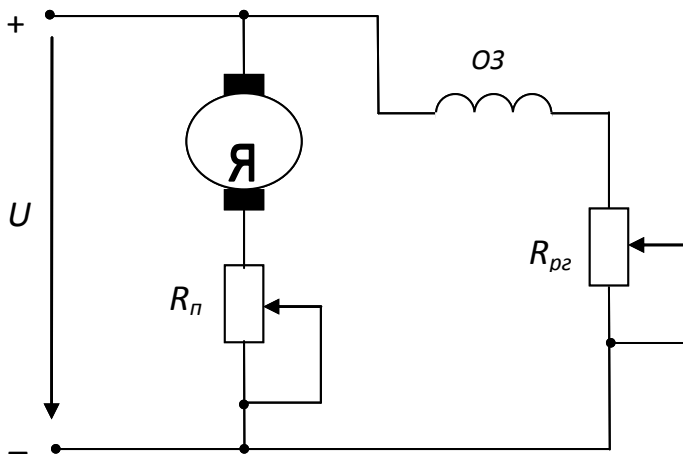


Рис. 6.10. Схема ДПС з паралельним збудженням із пусковим та регулювальним реостатами

Для обмеження струму обмоток якоря під час пуску двигуна в його коло вмикають пусковий реостат  $R_{\text{п}}$  (рис. 6.10).

При цьому загальний опір якоря

$$R'_{\text{я}} = R_{\text{я}} + R_{\text{п}}, \quad (6.6)$$

і відповідно

$$I_{\text{я пуск}} = \frac{U_{\text{дж}}}{R_{\text{я}} + R_{\text{п}}}. \quad (6.7)$$

Опір пускового реостата  $R_{\text{п}}$  обирають таким, щоб пусковий струм не перевищував номінальний більше, ніж у 2,5 рази:

$$I_{\text{я пуск}} \leq 2,5 I_{\text{я ном}}.$$

У виробничих умовах пуск здійснюють звичайно у 2 – 3 ступені, послідовно зменшуючи величину  $R_{\text{п}}$  по мірі розгону двигуна. По закінченні пуску реостат  $R_{\text{п}}$  має бути виведений повністю ( $R_{\text{п}} = 0$ ), тому що він не розрахований на тривалу роботу.

Якщо в колі обмотки збудження встановлений регулювальний реостат  $R_{\text{рз}}$  (рис. 6.10), то під час пуску двигуна він має бути виведений ( $R_{\text{рз}} = 0$ ). Це обумовлено тим, що наявність додаткового опору в колі обмотки збудження (ОЗ) зменшує струм збудження  $I_{\text{з}}$ . Це призводить до зменшення магнітного потоку та, як наслідок, до зниження обертового моменту  $M$  (див. формулу 6.2). В результаті пусковий обертовий момент може виявитися недостатнім для розвороту якоря.

### 6.3.5. Регулювання частоти обертання

Розв'язуючи сумісно (6.4) та (6.5), отримаємо формулу для обчислення частоти обертання якоря (6.1), яка вже наводилася в п. 6.3.2:

$$n = \frac{U_{\text{дж}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}}{C_e \Phi}$$

Аналізуючи це співвідношення зазначимо, що впливати на частоту обертання якоря можливо в три способи:

- змінюючи напругу джерела живлення  $U_{дж}$ ;
- змінюючи напругу  $U_{я}$ , що подається на обмотку якоря;
- змінюючи струм  $I_3$  обмотки збудження.

За допомогою зміни напруги джерела живлення  $U_{дж}$  можливо як збільшувати, так і зменшувати частоту обертання. Зазвичай цей спосіб використовують для зменшення частоти обертання відносно номінальної.

Другий спосіб пояснюють наступні розміркування. Представимо в (6.1) повний опір кола якоря  $R'_я$  у вигляді

$$R'_я = R_я + R_{дод},$$

де  $R_я$  – власний опір обмоток якоря;

$R_{дод}$  – додатковий опір в колі якоря.

Тоді замість (6.1) будемо мати:

$$n = \frac{(U_{дж} - I_я \cdot R_{дод}) - I_я \cdot R_я}{C_e \Phi} = \frac{U_я - I_я \cdot R_я}{C_e \Phi}, \quad (6.8)$$

де  $U_я = U_{дж} - I_я \cdot R_{дод}$  – напруга на якірній обмотці двигуна.

Таким чином, змінюючи величину опору  $R_{дод}$  в колі обмотки збудження ОЗ, можливо змінювати напругу  $U_я$ , а отже, й частоту обертання якоря. Як випливає з (6.8), введення  $R_{дод}$  в коло якоря дозволяє здійснювати регулювання частоти обертання якоря тільки в бік зменшення відносно номінальної частоти обертання.

Вводячи в коло обмотки збудження ОЗ регулювальний реостат  $R_{рг}$ , отримаємо можливість змінювати струм збудження  $I_3$ , а через це впливати на магнітний потік  $\Phi$  та, у підсумку, на частоту обертання якоря. З співвідношення (6.8) випливає, що таким чином можливо змінювати частоту обертання тільки в бік збільшення відносно номінальної частоти (тому що з умов нагрівання двигуна струм збудження можливо тільки зменшувати відносно номінального значення струму).

Комбінуючи перелічені способи, можливо плавно регулювати частоту обертання якоря двигуна як уверх, так і униз від номінального значення. Ця властивість є основною і беззаперечною перевагою двигунів постійного струму. Завдяки можливості плавного пуску та такої ж зупинки ДПС, ці двигуни знайшли широке використання в електротранспорті.

## 6.4. Асинхронні двигуни

Асинхронний електродвигун є основним видом електродвигунів, що випускаються електротехнічною промисловістю. Завдяки своїй простоті, надійності, відносній дешевизні він отримав переважне розповсюдження у порівнянні з іншими видами електроприводів та знаходить застосування у всіх галузях народного господарства. В теперішній час асинхронні двигуни, особливо з короткозамкненим ротором, є найбільш розповсюджені. Їхня частка в загальній номенклатурі електродвигунів складає 90%.

### 6.4.1. Конструкція та принцип дії асинхронного двигуна

Асинхронний двигун складається з двох головних частин: нерухомого статора та ротора, що обертається. Ротори бувають двох видів: короткозамкнені та з фазною обмоткою. Приблизно 95% двигунів випускається з короткозамкненим ротором, отже, розглянемо цей вид двигунів детальніше.

Короткозамкнений ротор (або ротор «біляча клітка») являє собою циліндр, який набрано з листів електротехнічної сталі. На зовнішній поверхні ротора виштампувані пази, які заливаються розплавленим алюмінієм, внаслідок чого утворюються подовжні стержні, що проводять електричний струм (рис. 6.11). З обох боків (торців) ротора розташовуються алюмінієві кільця, які замикають ці стержні. Такий тип ротора отримав назву «біляча клітка». Описана конструкція ротора робить його практично не схильним до зіпсування.

Статор асинхронного двигуна також являє собою циліндр, набраний з листів електротехнічної сталі. На внутрішній поверхні циліндра виштампувані пази, в яких розташовуються обмотки з ізольованого мідного дроту. Вісі обмоток зсунуті у просторі одна відносно одної на кут  $120^\circ$ . Початки обмоток маркуються символами  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , кінці позначаються  $C_4$ ,  $C_5$ ,  $C_6$  (рис 6.12, а).

При підключенні обмоток статора до трифазної електричної мережі в них виникають струми, діючі значення яких рівні між собою, а початкові фази зсунуті одна відносно одної на кут  $120^\circ$ , так як обмотки являють собою трифазне симетричне навантаження (рис. 6.12, б).



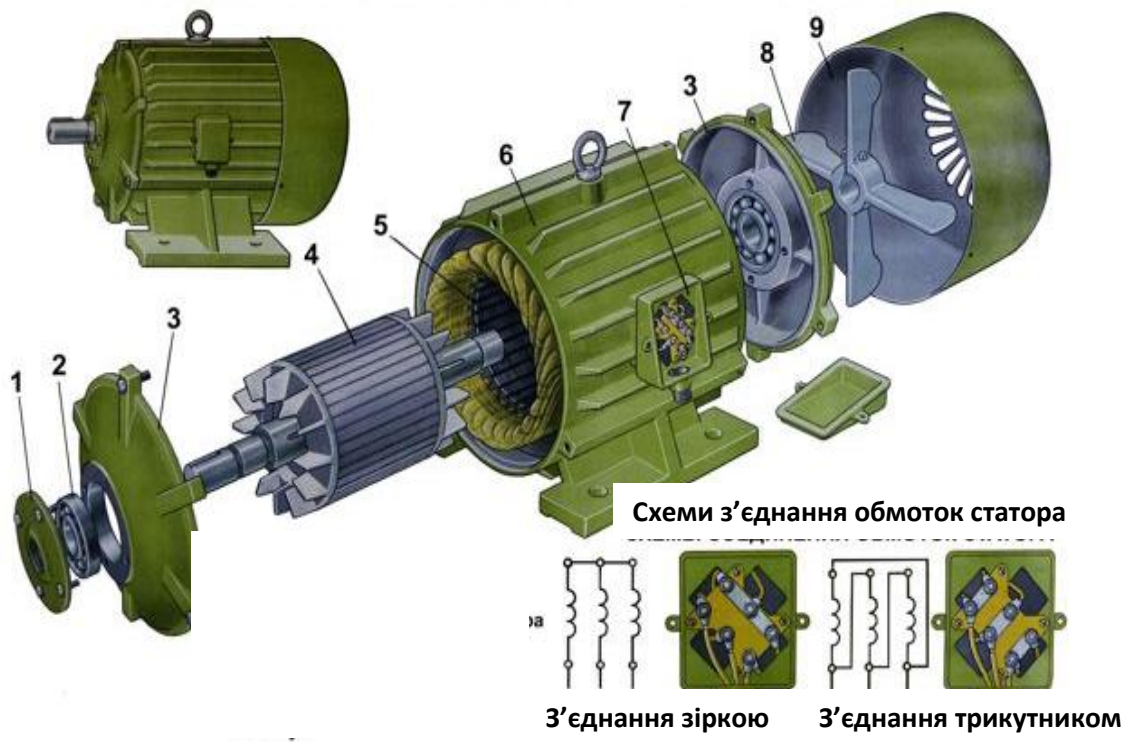


Рис. 6.11. Конструкція асинхронного двигуна: 1 – кришка підшипника; 2 – підшипник; 3 – підшипниковий щит; 4 – ротор з крильцями вентилятора; 5 – статор з обмотками; 6 – станина; 7 – коробка затисків; 8 – вентилятор; 9 – кожух.

Можливо довести, що якщо три обмотки, вісі яких зсунуті одна відносно одної на кут  $120^\circ$ , живити системою струмів, зсунутих один відносно одного по фазі, то магнітне поле, яке утвориться при цьому, буде таким, що обертається. Розглянемо спрощено процес утворення магнітного поля, що обертається.

Нехай три обмотки на рис. 6.12, а) живляться системою струмів, що зображена на рис. 6.12, б), причому струм  $i_1$  тече обмоткою  $C_1 - C_4$ , струм  $i_2$  тече обмоткою  $C_2 - C_5$ , струм  $i_3$  тече обмоткою  $C_3 - C_6$ . За додатний напрям струмів приймемо напрям від кінця до початку обмоток. Зобразимо умовно провідники обмоток, що лежать в пазах статора, так, як це показано на рис. 6.13, а), б), в); позначимо напрями струмів в різні моменти часу та визначимо напрям магнітного поля.

Напрям векторів магнітної індукції визначається за правилом правоходового гвинта: під час руху правоходового гвинта в напрямку струму магнітна силова лінія, що охоплює цей струм, направлена в бік обертання голівки гвинта.

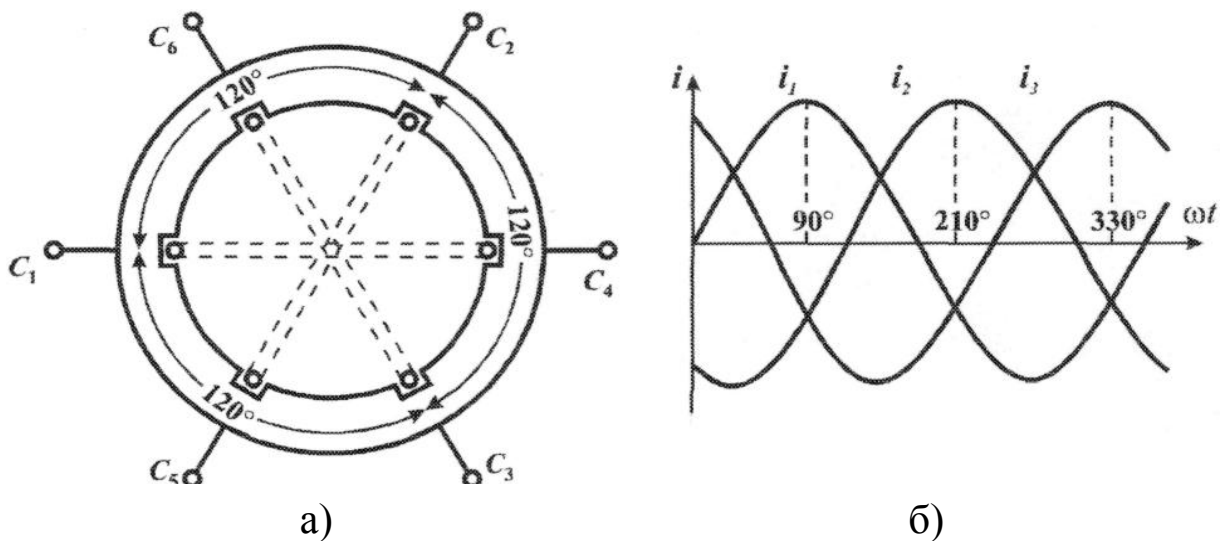


Рис. 6.12. Статор асинхронного двигуна (а) та струми, що живлять його обмотки (б)

В момент часу  $\omega t = 90^\circ$  струм  $i_1$  має додатне значення, а струми  $i_2, i_3$  мають від'ємні значення (рис. 6.12, б). Для цього моменту часу позначаємо на рис. 6.12 напрями струмів в провідниках: додатний струм тече від кінця  $C_4$  до початку  $C_1$  (напряма «від нас» позначений хрестиком, напрям «до нас» – крапкою); від'ємно спрямовані струми течуть від початку фази до її кінця, тобто в кінцях фаз  $C_5$  та  $C_6$  струм тече «до нас», а в початках фаз  $C_2$  та  $C_3$  – відповідно «від нас». Утворені цими струмами магнітні поля показані у вигляді магнітних силових ліній. Сумарний вектор магнітної індукції  $\vec{B}$  спрямований вертикально вгору.

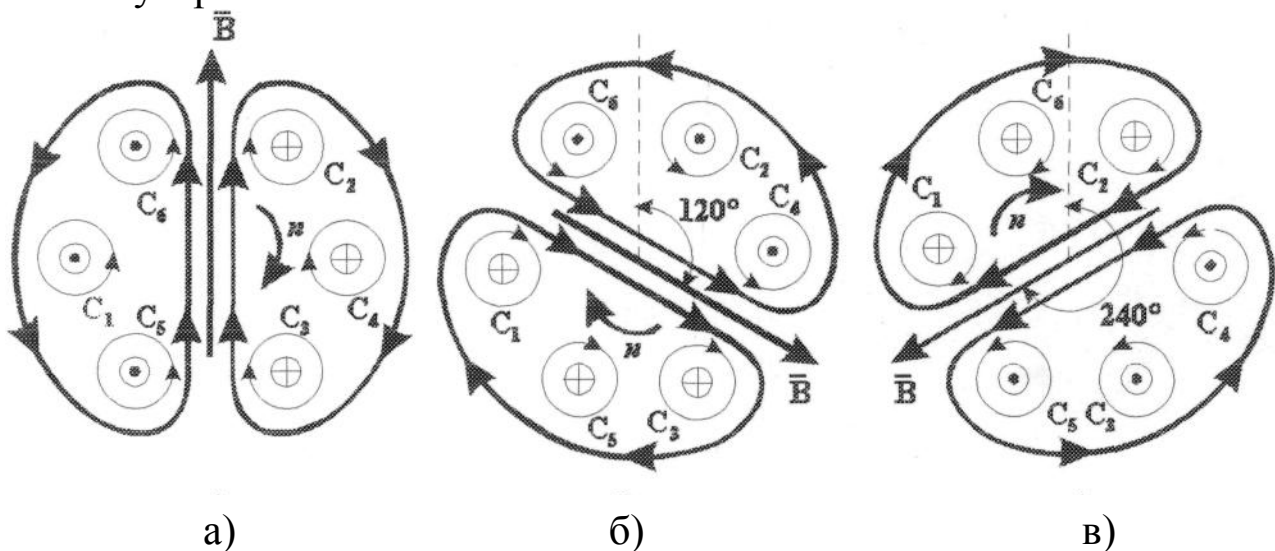


Рис. 6.13. Утворення магнітного поля, що обертається

Для моменту часу  $\omega t = 210^\circ$  відзначаємо за рис. 6.12, б), що  $i_2 > 0, i_1 < 0, i_3 < 0$ . Це дає можливість розставити напрями струмів

в обмотках так, як вказано на рис. 6.13. Побудувавши магнітні силові лінії, можна побачити, що вектор магнітної індукції  $B$  повернувся в просторі на кут  $120^\circ$ .

Для моменту часу  $\omega t = 330^\circ$  відзначаємо за рис. 6.12, б), що  $i_1 < 0, i_2 < 0, i_3 > 0$ . Побудова картини магнітного поля (рис. 6.13, в) дає можливість встановити, що вектор магнітної індукції  $B$  повернувся в просторі на кут  $240^\circ$ .

Продовжуючи аналогічні розміркування, можливо переконатися, що за час, що дорівнює одному періоду змінення струму, вектор магнітної індукції  $B$  повернеться в просторі на кут  $360^\circ$ , тобто магнітне поле буде таким, що обертається. Неважко показати, що частота обертання магнітного поля визначається виразом

$$n_0 = \frac{60f}{p}, \quad (6.9)$$

де  $f$  – частота струму трифазної мережі, Гц;

$p$  – число пар полюсів двигуна.

Метод утворення магнітного поля, що обертається, вперше був розроблений видатним російським інженером М.О. Доливо-Добровольським наприкінці 19-го сторіччя.

Якщо помістити всередину статора ротор, магнітні силові лінії, що обертаються, будуть перетинати стержні роторної обмотки. У відповідності до закону електромагнітної індукції в стержнях утворюються ЕРС, а оскільки стержні з торців замкнуті кільцями, то під дією ЕРС в стержнях з'являться струми. Відомо, що на струм в магнітному полі діє сила. Ця сила буде спрямована в бік обертання поля. Під впливом сил, які діють на стержні зі струмом, ротор почне обертатись.

По мірі збільшення числа обертів ротора  $n$  зменшується швидкість перетину магнітними силовими лініями стержнем роторної обмотки. При цьому зменшуються роторні ЕРС та, відповідно, й струми. Коли  $n = n_0$ , перетин магнітних силових ліній стержнем ротору припиниться, струм ротора стане рівним нулю, зникне обертальний момент.

Під дією сил тертя ротор почне зменшувати оберти, знов з'явиться перетин магнітними силовими лініями стержнем ротору, і так далі. Зрозуміло, що обертання ротору можливо тільки зі швидкістю, яка дещо менша швидкості обертання магнітного поля, тобто завжди виконується умова

$$n < n_0$$

Величина, що характеризує відставання частоти обертання ротора  $n$  від частоти обертання магнітного поля статора  $n_0$  називається **ковзанням**:

$$S = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (6.10)$$

#### 6.4.2. Коефіцієнт корисної дії (ККД), коефіцієнт потужності та механічні характеристики асинхронного двигуна. Номінальний струм двигуна

Під час роботи асинхронний двигун перетворює електричну енергію, отриману з мережі, в механічну енергію, яку він віддає навантаженню. Це перетворення не може відбуватися без втрат. При протіканні струмів по обмоткам статора та ротора в останніх виникають втрати, які зветься мідними (або електричними). При проходженні магнітного потоку крізь залізо магнітопроводу виникають так звані сталеві втрати (або магнітні втрати). Нарешті, при обертанні ротора виникають механічні втрати, які викликані тертям у підшипниках, тертям ротора з повітрям, втратами на вентиляцію. Сумарні втрати позначаються як  $\Sigma P$ . **Коефіцієнт корисної дії (ККД)** двигуна визначається формулою

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1}, \quad (6.10)$$

де  $P_1$  – потужність, яку споживає двигун з електромережі;

$P_2$  – потужність, яку двигун розвиває на валу;

$\Sigma P$  – сумарні втрати енергії в двигуні.

**Коефіцієнт потужності** двигуна визначають за формулою

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{3U_\phi I_\phi}, \quad (6.11)$$

де  $U_\phi$  та  $I_\phi$  – фазна напруга та фазний струм двигуна.

Залежності коефіцієнта корисної дії та  $\cos \varphi$  від корисної потужності називаються **робочими характеристиками** асинхронного двигуна. Розрахунок та дослід доводять, що ККД та  $\cos \varphi$  зростають зі збільшенням корисного навантаження на валу двигуна, досягають

максимуму при навантаженнях, близьких до номінальних, а при подальшому збільшенні знижуються. Звідси висновок – асинхронний двигун недоцільно використовувати при малих навантаженнях, бо його енергетичні показники (ККД та  $\cos \varphi$ ) при цьому малі.

Залежність обертового моменту  $M$  на валу двигуна від ковзання  $S$  називається **механічною характеристикою** двигуна. В процесі пуску при збільшенні числа обертів (тобто при зменшенні ковзання від 1 при пуску до деякої критичної величини  $S_{кр}$ ) обертовий момент збільшується, а при подальшому зростанні числа обертів впритул до  $n_0$  (тобто при зменшенні ковзання від  $S_{кр}$  до 0) обертовий момент знижується до нуля. Типова для асинхронного двигуна механічна характеристика показана на рис. 6.14.

На поданій кривій можливо виділити характерні точки. В момент пуску при  $n = 0$  та  $S = 1$  двигун розвиває пусковий момент  $M_{п}$ . Пусковий момент завжди має бути більшим за момент спротиву на валу двигуна, інакше двигун не зможе зрушити з місця. Величина відношення пускового моменту до номінального обертового моменту  $\frac{M_{п}}{M_{н}}$  називається **кратністю пускового моменту**. Вона зазвичай позначається на фірмовій табличці двигуна та в каталогах. Для двигунів загальнопромислового виконання кратність пускового моменту становить  $1,2 \div 1,6$ .

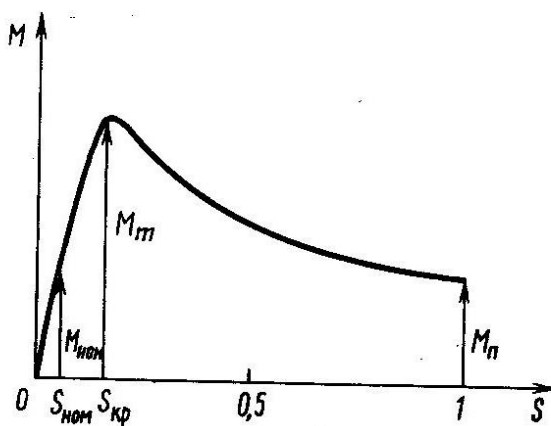


Рис. 6.14. Механічна характеристика асинхронного двигуна

Обертовий момент, який розвиває двигун при критичному ковзанні, позначається  $M_{кр}$  та називається критичним або максимальним моментом. З рис. 6.14 видно, що це найбільший момент, який

розвиває двигун в процесі розгону. До тих пір, поки момент спротиву на валу двигуна, що утворюється приводним механізмом, не перевищує максимального моменту, ще можлива нормальна робота двигуна, хоча б короткочасна. Якщо ж гальмівний момент на валу стане більше максимального, двигун примушений «скинути обороти до нуля». Це аварійний режим, що отримав назву «перекидання двигуна».

Відношення величини максимального моменту  $M_{кр}$  до номінального  $M_H$

$$k = \frac{M_{кр}}{M_H} \quad (6.12)$$

називається кратністю максимального моменту та для більшості двигунів загальнопромислового виконання становить  $2,5 \div 3,0$ . Величина  $\frac{M_{кр}}{M_H}$  зазвичай теж наводиться на фірмовій табличці двигуна та в каталогах. Кратність максимального моменту називають ще переважувальною здатністю двигуна.

Діапазон ( $0 \div S_K$ ) відповідає робочій ділянці механічної характеристики. На цій ділянці збільшення навантаження на валу призводить до зниження числа обертів та, як наслідок, до збільшення обертового моменту, таким чином, рівновага гальмівного та обертового моментів відновлюється. На робочій ділянці можлива стійка робота двигуна, на ній же знаходиться точка номінального моменту, тобто такого обертового моменту, який двигун спроможний розвивати тривалий час, не перегріваючись при цьому.

Діапазон ( $S_K \div 1$ ) відповідає нестійкому режиму роботи двигуна. На цій ділянці при збільшенні навантаження обертовий момент зменшується, що призводить до «перекидання», тобто зупинки двигуна.

Номінальний струм двигуна розраховують за формулою

$$I_H = \frac{P_{2H}}{\sqrt{3}U_L \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H}; \quad (6.13)$$

де  $P_{2H}$  – номінальна потужність двигуна;

$U_L$  – лінійна напруга трифазної мережі;

$\cos \varphi_H$  – номінальний коефіцієнт потужності двигуна;

$\eta_H$  – номінальний ККД двигуна.

### 6.4.3. Пуск асинхронного двигуна

Внаслідок того, що під час пуску асинхронного двигуна частота обертів  $n = 0$  та  $S = 1$ , пусковий струм виявляється у 5–7 разів більшим за номінальний. Таке збільшення струму може привести до зниження напруги джерела електроенергії, а також погано впливає на стан ізоляції обмоток двигуна, бо вони можуть нагрітися до температури, яка більше допустимої. Тому під час пуску двигуна необхідно знижувати пусковий струм.

Для двигунів з **фазним ротором** використовують пуск за допомогою пускового реостата. Трифазний пусковий реостат, з'єднаний за схемою «зірка», включають послідовно з обмоткою ротора. При цьому опір кола ротора збільшується, а пусковий струм знижується. По мірі зростання числа обертів опір пускового реостата поступово зменшують до нуля.

Асинхронні двигуни з фазним ротором складніше за конструкцією та дорожчі за двигуни з короткозамкненим ротором. Але вони здатні під час пуску розвивати максимальний момент, тому їх використовують в установках з важкими умовами пуску (підйомні крани, лебідки, ліфти).

Для асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором застосовують пуск при зниженій напрузі. Такий спосіб можливо використовувати лише при відсутності навантаження на валу двигуна.

Якщо в нормальному режимі роботи обмотки статора двигуна з'єднані «трикутником», для пуску їх з'єднують «зіркою». Внаслідок цього пусковий струм зменшується в три рази. Після розгону двигуна обмотку статора переключають на «трикутник».

### 6.4.4. Однофазний асинхронний двигун

Однофазні асинхронні двигуни на статорі мають, на відміну від трифазних двигунів, однофазну обмотку. Ротор однофазного асинхронного двигуна має короткозамкнену обмотку. Однофазний змінний струм статора не може створити магнітне поле, що обертається. Тому такі двигуни не мають пускового оберտального моменту. Для утворення оберտального моменту на статорі двигуна розміщують другу, так звану пускову обмотку, під кутом  $90^\circ$  до робочої. Послідовно до пускової обмотки включають конденсатор (рис. 6.15).

Пускова обмотка включається тільки під час пуску двигуна. Наявність другої обмотки призводить до виникнення магнітного поля,

що обертається, та пускового моменту. Двигун починає обертання та розганяється. Після розгону двигуна пускову обмотку вимикають. Але існують так звані **конденсаторні однофазні двигуни**, в яких обмотка з конденсатором включена постійно. В такому разі для отримання найбільшого пускового моменту паралельно з робочим конденсатором включають пусковий конденсатор, який відключають після завершення пуску.

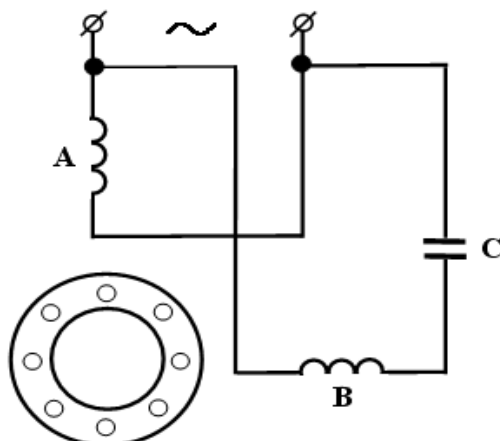


Рис. 6.15. Електрична схема однофазного асинхронного двигуна: А – робоча обмотка; В – пускова обмотка

Перевагою однофазного асинхронного двигуна є те, що він не потребує наявності джерела трифазної напруги. До недоліків такого двигуна можна віднести відсутність пускового моменту, низький коефіцієнт потужності та низький ККД, нерегульованість частоти обертання. Однофазні двигуни з пусковою обмоткою випускають на потужність до 600 Вт.

### 6.5. Синхронні двигуни

Синхронні машини є оборотними, тобто можуть працювати як в режимі генератора змінного струму, так і в режимі двигуна. Всі електричні генератори, які працюють на теплових та гідроелектростанціях, є синхронними машинами. В якості двигунів синхронні машини використовують для приводу механізмів великої потужності при вимогах постійної частоти обертання (наприклад, для приводу основних насосів водопровідних та каналізаційних насосних станцій).

Статор синхронної машини, як і у інших машин змінного струму, складається з сердечника, набраного з листів електротехнічної сталі, в пазах якого укладається обмотка змінного струму, та станини – чавунного або зварного з листової сталі кожуху (рис.6.16).



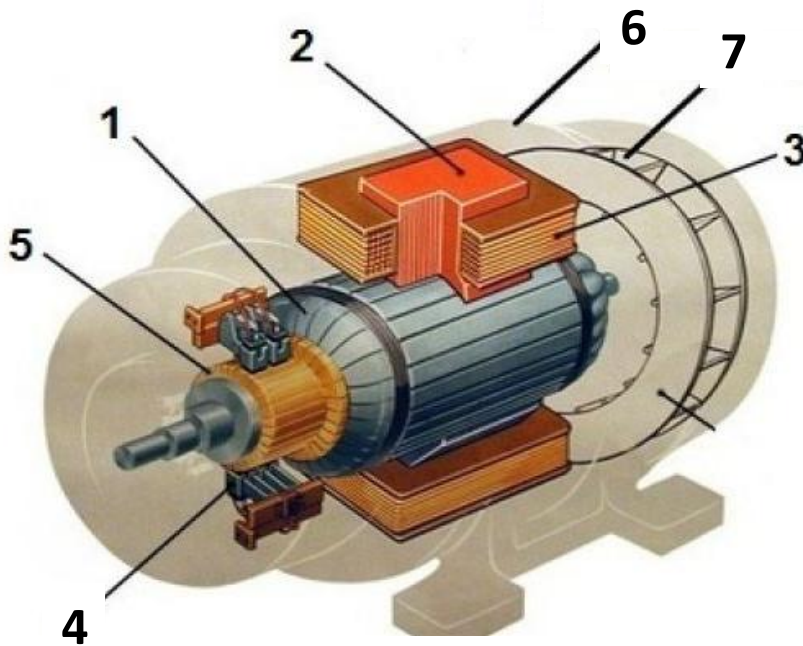


Рис. 6.16. Конструкція синхронного двигуна: 1–якір; 2–сердечник полюса; 3–обмотка полюса; 4–щітки; 5–колектор; 6–корпус; 7–вентилятор.

В зв'язку з тим, що синхронні машини працюють при високих напругах, якості ізоляції обмоток приділяється особлива увага.

Ротор синхронного двигуна по суті є електромагнітом (іноді – постійним магнітом), число полюсів якого співпадає з кількістю полюсів магнітного поля, яке утворюється статором при пропусканні через його обмотки змінного струму. Кутова швидкість, з якою обертається ротор (а він є індуктором в синхронному двигуні), не залежить від моменту, що прикладений до валу двигуна, і залишається постійною. Це забезпечується взаємодією полюсів ротора та статора.

Збудження ротора здійснюється постійним струмом від стороннього джерела енергії. В цьому полягає основна відмінність синхронної машини від асинхронної, де ротор не підключається до джерела живлення взагалі. Ротори синхронних машин за конструкцією поділяються на явнополюсні та неявнополюсні.

Синхронний двигун не має пускового моменту, отже, для його пуску потрібно розігнати ротор до частоти обертання, яка близька до частоти обертання магнітного поля, створеного обмотками статора. Для цього двигуну надають спеціальну короткозамкнену пускову обмотку, яка подібна до обмотки асинхронного двигуна, яку називають «біляча клітка», але вона займає лише частину кола ротора.

Іноді здійснюють пуск синхронного двигуна за допомогою окремого розгінного двигуна. Це можна робити лише при холостому ході синхронного двигуна.

Враховуючи, що пуск синхронних двигунів значно складніший за пуск асинхронних двигунів, до того ж вони складніші за конструкцією та вимагають існування одразу двох джерел живлення (змінного та постійного струмів), ще й регулювання частоти їх обертання можливо тільки за рахунок зміни частоти живлячої напруги, використання цих двигунів економічно виправдовується лише при великих потужностях (більше 150 - 200 кВт).

Слід зазначити, що синхронні двигуни при збільшенні струму збудження ротора здатні виробляти реактивну потужність, яка потрібна для роботи асинхронних двигунів та трансформаторів, та віддавати її в мережу. В цьому випадку синхронні двигуни працюють з випереджаючим  $\cos \varphi$  і подібні конденсатору, який включають паралельно індуктивному приймачеві для підвищення коефіцієнта потужності. Синхронний двигун, що застосовують для таких цілей, називають синхронним компенсатором.

### **Питання для самоконтролю до розділу 6**

1. Що таке електродвигун та чим пояснюється широке використання електродвигунів?
2. Як розрізняють електродвигуни за використанням роду струму?
3. Де переважно використовуються двигуни постійного струму?
4. Опишіть принцип дії двигунів постійного струму.
5. Які розрізняються двигуни постійного струму за способом збудження?
6. Опишіть конструкцію двигуна постійного струму.
7. Яким чином можливо регулювати частоту обертання якоря двигуна постійного струму?
8. В чому перевага трифазних асинхронних двигунів перед іншими видами електродвигунів?
9. Яким чином утворюється магнітне поле, що обертається, в асинхронному двигуні?
10. Чому асинхронний двигун називають саме так?

11. Як визначити частоту обертання магнітного поля двигуна, знаючи частоту змінного струму та кількість пар полюсів двигуна?
12. Що таке ковзання асинхронного двигуна?
13. Що таке коефіцієнт корисної дії електродвигуна?
14. Що називають механічною характеристикою двигуна?
15. Чим відрізняються конструкції асинхронні двигунів з фазним ротором та з короткозамкненим ротором?
16. Як здійснюють пуск двигуна з фазним ротором для зменшення пускового струму?
17. Як здійснюють пуск двигуна з короткозамкненим ротором для зменшення пускового струму?
18. Як здійснити реверс асинхронного трифазного двигуна?
19. В чому полягає принцип дії однофазного конденсаторного двигуна?
20. Опишіть принцип дії та устрій синхронного двигуна.
21. Які є переваги та недоліки синхронних двигунів та яка їх область використання в техніці?

### **Приклади розв'язання задач до розділу 6**

#### *Приклад 1.*

Визначити ковзання для шестиполісного асинхронного двигуна, якщо його ротор робить 960 обертів за хвилину. Частота змінного струму 50 Гц.

*Розв'язання:* Частота обертання магнітного поля двигуна визначається формулою

$$n_0 = \frac{60f}{p},$$

де  $f$  – частота струму трифазної мережі, Гц;

$p$  – число пар полюсів двигуна.

Оскільки двигун має 6 полюсів, то кількість пар полюсів  $p=3$ .

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.}$$

$$\text{Ковзання двигуна: } S = \frac{n_0 - n}{n_0} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0,04.$$

### Приклад 2.

Двигун постійного струму з паралельним збудженням має такі дані в номінальному режимі: напруга  $U_{1\text{ ном}} = 440$  В; струм якоря  $I_{\text{я ном}} = 200$  А. Опір кола якоря складає  $R_{\text{я ном}} = 0,015$  Ом.

Визначити опір регулювального реостата  $R_p$ , який треба увімкнути в коло якоря для обмеження пускового струму якоря до  $I_{\text{я пуск}} = 2,2I_{\text{я ном}}$ , якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу  $U_{1\text{ ном}}$ .

*Розв'язання:* Опір регулювального реостата при  $U_{1\text{ ном}}$  визначається з формули для струму якоря

$$I_{\text{я пуск}} = \frac{U_{1\text{ ном}}}{R_{\text{я ном}} + R_p} = 2,2I_{\text{я ном}}.$$

Після перетворення отримаємо:

$$R_p = \frac{U_{1\text{ ном}}}{2,2I_{\text{я ном}}} - R_{\text{я}} = \frac{440}{2,2 \cdot 200} - 0,015 = 0,85 \text{ Ом}.$$

### Приклад 3.

Основні технічні дані двигуна постійного струму з паралельним збудженням: номінальна потужність  $P_{2\text{ ном}} = 4,5$  кВт, номінальна напруга  $U_{\text{ ном}} = 220$  В, номінальна частота обертання  $n_{\text{ ном}} = 1000$  об/хв, номінальний коефіцієнт корисної дії  $\eta_{\text{ ном}} = 0,795$ , внутрішній опір кола якоря  $R_{\text{я}} = 0,715$  Ом, внутрішній опір кола збудження у номінальному режимі  $R_{\text{зб}} = 108$  Ом.

При номінальному режимі роботи двигуна визначити: потужність  $P_{1\text{ ном}}$  та струм  $I_{\text{ ном}}$ , які двигун споживає з мережі; струм якоря  $I_{\text{я ном}}$  і струм збудження  $I_{\text{зб ном}}$ .

*Розв'язання:* При номінальному режимі роботи двигуна визначаємо: номінальний струм, який двигун споживає з мережі,

$$I_{\text{ ном}} = \frac{P_{1\text{ ном}}}{U_{\text{ ном}}} = \frac{P_{\text{ ном}}}{\eta_{\text{ ном}} \cdot U_{\text{ ном}}} = \frac{4,5 \cdot 10^3}{0,795 \cdot 220} = 25,73 \text{ А},$$

$$\text{де } P_{1\text{ ном}} = \frac{P_{\text{ ном}}}{\eta_{\text{ ном}}} = \frac{4,5}{0,795} = 5,66 \text{ кВт} - \text{електрична потужність,}$$

яку двигун споживає з джерела;

номінальний струм збудження

$$I_{зб\ ном} = \frac{U_{зб\ ном}}{R_{зб\ ном}} = \frac{220}{108} = 2,04\text{ А};$$

номінальний струм якоря

$$I_{я\ ном} = I_{ном} - I_{зб\ ном} = 25,73 - 2,04 = 23,69\text{ А}.$$

*Приклад 4.*

Трифазний асинхронний двигун має такі дані: номінальна на-  
пруга  $U_{ном} = 220/380\text{ В}$  (фазна/лінійна) при частоті  $f_1 = 50\text{ Гц}$ ;

номінальне ковзання  $S_H = 0,05$ ; число пар полюсів  $p = 6$ ;

Схема з'єднання обмоток статора – зірка. Вибрати лінійну на-  
пругу живильної мережі  $U_c$  і визначити синхронну частоту обертання  
поля статора  $n_1$ .

*Розв'язання:* При з'єднанні обмоток статора зіркою  $U_L = \sqrt{3}U_\phi$ ,  
де  $U_L$  і  $U_\phi$  – відповідно лінійна та фазна напруги обмотки статора.  
Тому лінійна напруга мережі  $U_c = U_L = 380\text{ В}$ .

Синхронна частота обертання поля статора

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{6 \cdot 6} = 500 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$$

*Приклад 5.*

Трифазний асинхронний двигун має такі дані у номінальному  
режимі: потужність на валу  $P_{2H} = 22\text{ кВт}$ ; напруга  $U_{ном} = 220/380$   
(фазна/лінійна), ККД=0,9; коефіцієнт потужності  $\cos \varphi_H = 0,88$ . Кра-  
тність пускового струму  $\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}=5,5$ . Схема з'єднання обмоток статора –  
трикутник .Вибрати лінійну напругу живильної мережі  $U_c$  і визначи-  
ти номінальні та пускові струми обмотки статора (фазні та лінійні).

*Розв'язання.* При з'єднанні обмотки статора трикутником, тому  
лінійна напруга мережі  $U_c = U_L = U_\phi = 220\text{ В}$  ;

номінальні лінійний та фазний струми обмотки статора двигуна:

$$I_{ЛН} = \frac{P_{2H}}{\sqrt{3}U_c \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,9} = 72,9\text{ А},$$

$$I_{\text{фн}} = \frac{I_{\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{72,9}{\sqrt{3}} = 41,7 \text{ А.}$$

Пускові лінійний та фазний струми обмотки статора двигуна

$$I_{\text{л пуск}} = 5,5I_{\text{лн}} = 5,5 \cdot 72,9 = 401 \text{ А,}$$

$$I_{\text{ф пуск}} = 5,5I_{\text{фн}} = 5,5 \cdot 41,7 = 229 \text{ А.}$$

### Задачі для самостійного розв'язання для розділу 6

1. Двигун постійного струму з паралельним збудженням має такі дані в номінальному режимі: напруга  $U_{1 \text{ ном}} = 110 \text{ В}$ ; струм якоря  $I_{\text{я ном}} = 80 \text{ А}$ . Опір кола якоря складає  $R_{\text{я ном}} = 0,018 \text{ Ом}$ .

Визначити опір регулювального реостата  $R_p$ , який треба увімкнути в коло якоря для обмеження пускового струму якоря до  $I_{\text{я пуск}} = 2,1 I_{\text{я ном}}$ , якщо двигун вмикається при пуску на номінальну напругу  $U_{1 \text{ ном}}$ .

*Відповідь:*  $R_p = 0,62 \text{ Ом}$ .

2. Визначити номінальний опір якоря двигуна постійного струму, якщо при опорі пускового реостату  $0,8 \text{ Ом}$  його пусковий струм не перевищує номінальний струм якоря в більше, ніж в  $2,5$  рази. Номінальна напруга двигуна  $200 \text{ В}$ , номінальний струм якоря –  $100 \text{ А}$ .

*Відповідь:*  $R_{\text{я}} = 0,016 \text{ Ом}$ .

3. Визначити, якою буде частота обертання асинхронного трифазного двигуна, якщо він має  $6$  полюсів та ковзання  $S = 0,06$ . Частота змінного струму  $50 \text{ Гц}$ .

*Відповідь:*  $n = 940 \text{ об/хв}$ .

4. На статорі трифазного асинхронного двигуна розташовані  $9$  котушок. Визначити швидкість обертання двигуна, якщо ковзання дорівнює  $0,04$ , а частота струму в мережі  $50 \text{ Гц}$ .

*Відповідь:*  $n = 960 \frac{\text{об}}{\text{хв}}$ .

5. Визначити коефіцієнт потужності асинхронного трифазного двигуна, обмотки статора якого з'єднані «зіркою», якщо відомо, що він споживає з мережі активну потужність 25 кВт, розвиває на валу потужність 21,75 кВт. Двигун підключений до мережі 380 В, його номінальний лінійний струм 54 А.

*Відповідь:*  $\cos \varphi_n = 0,809$ .

6. Двигун з послідовним збудженням працює при напрузі на за- тисках 110 В та струмі 10 А. Якір двигуна обертається зі швидкістю 1700 об/хв. та розвиває на шківу силу тяги  $F = 5,2$  кГ. Діаметр шківа  $D = 16$  см, опір обмотки збудження  $R_{зб} = 2$  Ом. Визначити ЕРС якоря, потужність, що віддає якір, корисну потужність, що двигун розвиває на валу, ККД.

*Відповідь:*  $E_a = 90$  В;  $P_a = 900$  Вт;  $P_2 = 730$  Вт;  $\eta = 0,663$ .

7. Розрахувати, яким буде лінійний струм трифазного асинхронного двигуна з задачі 5, якщо переключити обмотки статора з «зірки» на «трикутник»?

*Відповідь:*  $I_{л} = 162$  А.

## РОЗДІЛ 7

### ОСНОВИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Важливість надійного та економічного електропостачання промислових об'єктів важко переоцінити. Ефективна та безперебійна робота промислових підприємств, в тому числі, звичайно, машинобудівних заводів, в значній мірі залежить від правильного обрання надійного джерела електрозабезпечення з урахуванням необхідності мати резервні джерела електроенергії, грамотної побудови схеми електромереж підприємства, доцільного обрання електрообладнання різного призначення – від трансформаторних підстанцій, компенсуючих установок, приводних двигунів, приладів електроосвітлення до заземлюючих пристроїв та пристроїв захисту електромереж – запобіжників та автоматичних вимикачів.

#### **7.1. Джерела та схеми електропостачання підприємств**

Електропостачання промислових підприємств може бути здійснене від трансформаторних підстанцій високовольтних мереж енергетичних систем, електростанцій різних відомств, а також власних електростанцій. З мінімальними витратами коштів здійснюють електропостачання від районних високовольтних мереж. Якщо поблизу немає районних високовольтних мереж, то питання про будівництво власної електростанції або прокладання відгалуження від районної високовольтної мережі вирішується шляхом економічного розрахунку.

Із практики організації електропостачання промислових підприємств випливає, що оптимальні співвідношення між переданою потужністю й відстанню передачі електроенергії від районних високовольтних мереж орієнтовно становлять:

до 2000 кВт при напрузі 6 кВ – відстань 5—10 км,

до 3000 кВт при напрузі 10 кВ – відстань 8—15 км.

Від споживчих трансформаторних підстанцій (ТП) з напругою на нижчій стороні 0,4/0,23 кВ електроенергію доцільно передавати в радіусі до 350 – 400 м.

Власні стаціонарні електростанції споруджуються на тривалий період дії в тих випадках, коли будівництво починається в місцях, де немає районних високовольтних мереж енергосистем і відсутні розташовані поблизу електростанції інших відомств. Власні стаціонарні електростанції можуть бути паротурбінні, із двигунами внутрішнього



згоряння або локомотивні. Електропостачання від таких станцій менш надійне, а собівартість електроенергії більш висока, ніж в енергосистемах.

В умовах будівництва часто застосують пересувні електростанції невеликих потужностей 1 – 14 кВА з бензиновими двигунами внутрішнього згоряння, до 350 кВА – з дизельними двигунами.

Питома витрата палива для електростанцій з бензиновими двигунами становить близько 430 г/кВт·год, а з дизельними двигунами 380 г/кВт·год.

Існують дві основні схеми електропостачання підприємств – магістральна та радіальна. При магістральній схемі живлення об'єктів електропостачання від трансформаторної підстанції здійснюється однією магістральною лінією, від якої відходять лінії на об'єкти. Така схема не дуже надійна, бо пошкодження магістралі призводить до знеструмлення низки об'єктів. Радіальна схема електропостачання в цьому сенсі є більш надійною, тому що при цій схемі кожен об'єкт отримує електроенергію по окремому кабелю від КТП. Але така схема призводить до збільшення затрат на прокладку електромереж підприємства.

## **7.2. Розрахунок повної електричної потужності навантажень**

Від величини електричних навантажень підприємства залежить вибір усіх елементів системи електропостачання: потужності живильних і розподільних мереж; міських трансформаторних підстанцій, а також підстанцій, які безпосередньо належать до підприємства; пристроїв комутації й захисту; перерізів проводів і кабелів живильних ліній; і т.д. Тому правильне визначення електричних навантажень є вирішальним чинником при проектуванні й експлуатації електромереж підприємства.

Під розрахунковими електричними навантаженнями будемо розуміти такі характеристики, як потужності, струми, коефіцієнти потужності тощо, які передбачають найбільший тепловий вплив на елементи електропостачання, але без перевищення припустимих значень. Існують різні методи розрахунку електричних навантажень. Застосування того або іншого методу визначається припустимою похибкою розрахунків і наявністю вихідних даних.

Одним з найбільш простих методів є так званий **метод коефіцієнту попиту**, тобто розрахунок за номінальною потужністю

електричних приймачів й коефіцієнтів попиту ( $K_{\text{п}}$ ). Для визначення розрахункових навантажень по цьому методу необхідно знати номінальні характеристики приймачів (виробництва, цеху й т.п.) і коефіцієнт попиту даної групи електроприймачів (ЕП). Коефіцієнт попиту не є паспортною характеристикою ЕП. Він характеризує ступінь зайнятості електроприймача у виробничому процесі і є результатом статистичних узагальнень роботи однотипних підприємств даної галузі.

Розрахунок навантажень підприємства за даним методом проводиться в наступній послідовності.

Усе електроустаткування кожної ділянки (цеху) підприємства розбивають на групи однорідних приймачів. Виписують для кожної групи  $k_{\text{п}}$  і паспортні характеристики: активну потужність  $P_{\text{ном}}$  (або повну потужність  $S_{\text{ном}}$ ), коефіцієнт потужності  $\cos\varphi_{\text{ном}}$ , коефіцієнт корисної дії  $\eta_{\text{ном}}$ , тривалість вмикання  $TB\%$ .

Обчислюють:

– установлену активну потужність  $i$ -ої групи однорідних приймачів ( $N_i$  – кількість одиниць устаткування в групі) за формулою

$$P_{\text{уст } i} = P_{\text{ном } i} \cdot N_i, \quad (7.1)$$

або

$$P_{\text{уст } i} = S_{\text{ном } i} \cdot \cos\varphi_i \cdot N_i; \quad (7.1a)$$

– наведену до тривалого режиму роботи активну потужність, споживану даною групою з мережі

$$P_{\text{пр } i} = \frac{P_{\text{уст } i}}{\eta_i} \sqrt{TB_i}; \quad (7.2)$$

– розрахункову активну потужність групи

$$P_{\text{р } i} = P_{\text{пр } i} \cdot k_{\text{п } i}; \quad (7.3)$$

– розрахункову реактивну потужність групи

$$Q_{\text{р } i} = P_{\text{р } i} \cdot \operatorname{tg}\varphi_i; \quad (7.4)$$

– розрахункові активну й реактивну потужності кожної ділянки

(цеху) 
$$P_{\text{р } m} = \sum_i P_{\text{р } im}; \quad Q_{\text{р } m} = \sum_i Q_{\text{р } im}; \quad (7.5)$$

(підсумовування по всіх групах однорідних приймачів ділянки  $m$ );

– розрахункову активну й реактивну потужності підприємства в цілому

$$P_{\text{р}} = \sum_m P_{\text{р } m}; \quad Q_{\text{р}} = \sum_m Q_{\text{р } m}; \quad (7.6)$$

шляхом підбиття суми по всіх ділянках підприємства.

Співвідношення (7.2) – (7.6) необхідно доповнити формулами, що визначають повну потужність  $S$ , яку споживає ділянка або цех:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad (7.7)$$

середньовиважений коефіцієнт потужності ділянки (цеху)

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}, \quad (7.8)$$

та фазний струм  $I$ , який живить цей об'єкт електропостачання:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (7.9)$$

де  $U$  – напруга, яка живить об'єкт електропостачання.

### **7.3. Компенсація реактивної потужності.**

#### **Повна споживана потужність**

Електричне навантаження ділянок або цехів машинобудівних підприємств (до речі, як і багатьох інших підприємств), має активно-індуктивний характер. Це пояснюється тим, що до обладнання цих цехів входять трансформатори, верстати, обладнані двигунами, які мають обмотки. Тому розрахований за формулою (7.8) середньовиважений коефіцієнт потужності об'єкту зазвичай значно менший того значення, якого вимагають Правил Улаштування Електроустановок (ПУЕ), а саме 0,92...0,95. Тому важливим є вживання заходів щодо підвищення  $\cos \varphi$  до належних значень.

Підвищення коефіцієнта потужності до необхідного значення здійснюється шляхом підключення так званих компенсуючих пристроїв (КП), що генерують реактивну потужність. Величина розрахункової реактивної потужності компенсуючих пристроїв котельні визначається за формулою:

$$Q_k = \alpha \cdot P_p (tg \varphi - tg \varphi_{вст}) \quad (7.10)$$

де  $\varphi$  і  $\varphi_{вст}$  – кути зсуву по фазі між струмом і напругою на шинах розподільчого пристрою ділянки (цеху) до та після компенсації відповідно;

$\alpha = 0,9$  – коефіцієнт, що враховує можливість підвищення коефіцієнта потужності за допомогою інших організаційно-технічних

заходів (вибір трансформаторів без зайвого резерву потужності, вибір двигунів до насосів і механізмів відповідно до потрібної потужності, якісне технічне обслуговування обладнання та інше).

В якості компенсуючих пристроїв застосовуються конденсаторні установки типу КУ з косинусними конденсаторами марки КС. За наявності двох роздільно працюючих і порівну завантажених систем шин 0,38 кВ слід встановити два КП, розрахункова реактивна потужність кожного з яких дорівнює:

$$Q_{\text{к}}' = 0,5Q_{\text{к}} \quad (7.11)$$

Промисловість випускає трифазні як низьковольтні (на напругу 0,38 кВ), так і високовольтні (на напругу 6 кВ та 10 кВ) конденсаторні установки. Останні, зокрема, використовуються у випадку використання високовольтних асинхронних електродвигунів для приводу, наприклад, основних насосів водопостачальних та каналізаційних насосних станцій.

Характеристики деяких компенсуючих конденсаторних установок представлені в табл. В1 додатку В.

Значення необхідної реактивної потужності рідко точно співпадає з паспортною потужністю тих конденсаторних установок, що випускаються електротехнічною промисловістю. В цьому випадку слід обрати з каталогу установку, паспортна реактивна потужність більша за розрахункову. При експлуатації слід використовувати лише необхідну частину ємності компенсуючого пристрою (здійснюється симетричне відключення в трьох фазах КП необхідного числа конденсаторів). Ємність конденсаторів, яка підлягає відключенню в цьому випадку, в кожній фазі дорівнює:

$$C = \frac{(Q_{\text{к пасп}} - Q_{\text{к}}')}{3 \cdot 2\pi \cdot f \cdot U_{\text{роб}}^2}, \text{ мкФ}, \quad (7.12)$$

де  $f = 50$  Гц;  $U_{\text{роб}} = 0,38$  кВ.

Застосування конденсаторних пристроїв, що компенсують реактивну потужність, дають можливість:

- зменшити навантаження на трансформатори, тим самим збільшивши термін використання;
- зменшити навантаження на дроти та кабелі, використовувати дроти та кабелі меншого перерізу;
- поліпшити якість електроенергії за рахунок зменшення викривлення форми напруги;

- зменшити навантаження на комутаційну апаратуру за рахунок зниження сили струмів в мережах;
- уникнути штрафів за зниження якості електроенергії знизеним коефіцієнтом потужності;
- знизити витрати на електроенергію.

Після вибору конденсаторного пристрою можливо розрахувати повну споживану потужність

$$S_{\text{спож}} = \sqrt{P_p^2 + Q_{\text{спож}}^2}, \quad (7.13)$$

де  $Q_{\text{спож}} = Q_p - Q_k$  – споживана від міської (районної) електромережі реактивна потужність;

$P_p$  та  $Q_p$  – розрахункові активна та реактивна потужності цеху (ділянки);

$Q_k$  – розрахункова потужність конденсаторної установки (чи двох установок, якщо встановлені дві).

За повною споживаною потужністю вибирають необхідну комплектну трансформаторну підстанцію (КТП), потужність трансформаторів якої має бути не менше  $S_{\text{спож}}$ .

#### 7.4. Розрахунок фазних струмів

Фазний струм високовольтної лінії з напругою  $U_1$  на вході КТП цеху:

$$I = \frac{S_{\text{спож}}}{\sqrt{3} \cdot U_1}, \quad (7.14)$$

де  $U_1$  – напруга лінії живлення цеху.

Значення  $S_{\text{спож}}$  було визначено формулою (7.13).

Фазний струм однієї трифазної конденсаторної установки:

$$I_{\text{кп}} = \frac{Q_k}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{роб}}}, \quad (7.15)$$

де  $U_{\text{роб}} = 0,38 \text{ кВ (380 В)}$  – робоча напруга (лінійна) електромережі цеху.

Фазний струм кожної  $k$ -тої групи електроприймачів ділянки або цеху на трифазному струмі розраховується за формулою:

$$I_k = \frac{S_{p(k)}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{роб}}}, \quad (7.16)$$

де  $S_{p(k)}$  – повна розрахункова потужність  $k$ -тої групи електроприймачів;

$U_{\text{роб}}$  – робоча напруга групи електроприймачів.

Розрахункові струми окремих електроприймачів визначаються за формулою:

$$I = \frac{P_{\text{ном}i}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{роб}} \cdot \eta_i \cdot \cos \varphi_i}, \quad (7.17)$$

де  $P_{\text{ном}i}$  – номінальна активна потужність окремого приймача;

$\eta_i$  – ККД окремого приймача;

$\cos \varphi_i$  – коефіцієнт потужності окремого приймача;

$U_{\text{роб}}$  – робоча напруга приймача.

### **7.5. Принципи вибору силових щитів об'єктів електропостачання**

Силові щити призначені для розподілу електроенергії між групами однорідних електроприймачів або між окремими приймачами. Електротехнічна промисловість випускає великий асортимент розподільчих силових щитів, серед яких є щити, призначені за своєю конструкцією для зовнішнього установлення, та щити для установлення всередині приміщення, тобто внутрішнього установлення. При виборі щитів слід керуватися наступними міркуваннями. По-перше, вхідний струм щита має бути не меншим, ніж розрахунковий струм об'єкта, на вході в який цей щит встановлюється. По-друге, кількість ліній, що відходять від щита, та струми, на які вони розраховані, мають відповідати кількості та робочим струмам груп однорідних електроприймачів чи окремих приймачів.

Приклади силових щитів наведено в таблицях В2, В3 додатку В.

### **7.6. Загальні принципи вибору кабелів та дротів**

Електричні розподільчі мережі машинобудівних підприємств прокладаються всередині приміщень та призначені для забезпечення електроенергією усіх електроприймачів. Електромережі машинобудівних підприємств виконуються чотиридротовими кабелями або дротами, розраховані вони найчастіше на напругу 380 В.

Розрахунку перерізів кабелів та дротів обов'язково має передувати вибір типів цих кабелів та дротів та визначення способів їх прокладання у відповідності з вимогами ПУЕ (Правил Улаштування Електроустановок) [12].

Переріз кабелю або дроту визначається за величиною тривало допустимого струму, що тече через нього, тобто за умовою допустимого нагрівання. Для цього існують спеціальні таблиці, в яких до певних значень розрахункового струмового навантаження ставиться у відповідність площа перерізу жили кабелю або дроту. У довідковій літературі містяться таблиці для визначення поперечного перерізу кабелів та дротів різних марок, виготовлених як з алюмінію, так і з міді. При визначенні поперечного перерізу має значення як саме прокладені дроти або кабелі – відкритим способом, або в трубі, з одного чи кількох паралельно прокладених жил виконана лінія електромережі.

Діючи описаним чином, визначають перерізи основних (фазних) жил відповідно до розрахованих струмів. Перерізи нульового дроту (жили) мають бути не менше 50% від перерізів дротів фаз. В освітлювальних мережах при перерізах лінійних алюмінієвих дротів до 25 мм<sup>2</sup> переріз нульового дроту беруть таким самим, як і лінійного.

Приклади таблиці для вибору перерізу дротів та кабелів наведені в таблицях В4, В5, В: додатку В.

Після вибору перерізу жили кабелю чи дроту обов'язково виконується перевірка вибраного перерізу на втрату напруги в лінії. Втратою напруги в лінії називають алгебраїчну різницю напруг на початку та в кінці цієї лінії. Ця втрата, згідно до вимог ПУЕ, не повинна перевищувати 5% (для ліній, що живлять силове навантаження), а інколи 2,5% від робочої напруги мережі (для ліній, що живлять освітлювачі внутрішнього освітлення або прожектори).

Для розрахунку величини втрати напруги в лінії користуються формулами:

– для трифазної лінії:

$$\Delta U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot I \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos \varphi + X_{\text{л}} \cdot \sin \varphi), \quad (7.18)$$

– для однофазної лінії:

$$\Delta U_{\text{л}} = 2 \cdot I \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos \varphi + X_{\text{л}} \cdot \sin \varphi), \quad (7.19)$$

В формулах (7.18) та (7.19):  $I$  – струм лінії;

$\varphi$  – фазовий кут приймача;

$R_{\text{л}}$  та  $X_{\text{л}}$  – активний та реактивний опори дроту (жили) лінії;

$$R_{\text{л}} = R_0 \cdot \ell, \text{ Ом} \quad (7.20)$$

$$X_{\text{л}} = X_0 \cdot \ell, \text{ Ом} \quad (7.21)$$

де  $\ell$  - довжина лінії в км;

$R_0$  та  $X_0$  (Ом·км) – питомі активний та реактивний опори дроту (жили) лінії.

Значення  $R_0$  та  $X_0$  наведені в таблиці 7 додатку В в залежності від поперечного перерізу дротів (жил).

Якщо після розрахунку за формулами (7.18) та (7.19) втрата напруги  $\Delta U_{\text{л}}$  виявиться меншою за допустиму (5% чи 2,5%  $U_{\text{ном}}$ ), переріз жил кабелів чи дротів вважається вибраним; якщо ж втрата напруги перевищує допустиме значення – доводиться збільшити величину перерізу. Це призведе до зменшення питомих опорів  $R_0$  та  $X_0$  та, відповідно, до зменшення величини втрати напруги.

## 7.7. Визначення пікових навантажень та вибір пристроїв захисту електромереж підприємства

### 7.7.1. Пікові навантаження

Пікове навантаження – короткочасне максимальне навантаження тривалістю, як правило, 1...2 с. Найчастіше – це різкі збільшення струмів, що виникають при вмиканні електродвигунів.

У лінії, що живить одиночний електродвигун, піковий струм дорівнює пусковому струму двигуна й визначається за паспортною характеристикою – кратністю пускового струму  $\frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}$ :

$$I_{\text{пік од}} = I_{\text{пуск}} = I_{\text{ном}} \cdot \left( \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}} \right). \quad (7.22)$$

При відсутності паспортних даних приймають:

– для трифазних асинхронних ЕД з короткозамкненим ротором

$$I_{\text{пуск од}} = 7I_{\text{ном}}, \quad (7.23)$$

– для асинхронних електродвигунів з фазним ротором

$$I_{\text{пуск од}} = 2,5I_{\text{ном}}, \quad (7.24)$$

– для зварювальних трансформаторів

$$I_{\text{пуск од}} = 3I_{\text{ном}}. \quad (7.25)$$

Для групи ЕП загального призначення значення пікового струму, що виникає при пуску одного або декількох приймачів одночасно визначається співвідношенням

$$I_{\text{пік гр}} = I_{\text{пуск}}' + I_{\text{розр}}', \quad (7.26)$$



де  $I_{\text{пуск}}'$  – пусковий струм одного або групи електроприймачів, що включаються одночасно, при пуску яких утворюється короткочасний пік струму;

$I_{\text{розрах}}'$  – розрахунковий струм лінії до моменту пуску розглянутого приймача або групи приймачів (див. п.7.4).

Піковий струм групи двигунів, що включаються одночасно, можна визначити, як суму пускових струмів цих двигунів.

### 7.7.2. Вибір запобіжників та автоматичних вимикачів

Захист електрообладнання та електромережі підприємства від струмів короткого замикання та перевантажень здійснюють за допомогою плавких запобіжників або установочних автоматичних вимикачів миттєвого спрацювання. В чотиридротових мережах запобіжники встановлюються на усіх фазних дротах.

**При виборі запобіжників** слід керуватися наступними міркуваннями:

а) якщо навантаження не має піків (наприклад, освітлювання, термонагрівачі, двигуни з реостатним пуском):

$$I_{\text{вст}} \geq I_{\text{роб}} , \quad (7.27)$$

де  $I_{\text{вст}}$  – номінальний струм плавкої вставки запобіжника ;

$I_{\text{роб}}$  – розрахунковий фазний струм лінії.

б) якщо навантаження має піки (наприклад, асинхронні двигуни):

$$I_{\text{вст}} \geq \frac{I_{\text{роб}}}{2,5} , \quad (7.28)$$

Крім того, для випадків а) та б) повинно виконуватись співвідношення:

$$I_{\text{вст}} \leq I_{\text{доп}} , \quad (7.29)$$

де  $I_{\text{доп}}$  – тривало допустимий струм для вибраного перерізу жили кабелю або дроту лінії, що захищається.

**При виборі автоматичних вимикачів** враховують наступне:

а) якщо навантаження не має піків:

$$I_{\text{авт}} \geq I_{\text{роб}} , \quad (7.30)$$

де  $I_{\text{авт}}$  – номінальний струм розчіплювача автомату;

$I_{\text{роб}}$  – робочий струм лінії, який розраховується за формулами, наведеними в п. 7.4.

б) якщо навантаження має піки :

$$I_{\text{авт}} \geq \frac{I_{\text{роб}}}{K_{\text{п авт}}}, \quad (7.31)$$

де  $K_{\text{п авт}}$  – коефіцієнт короткочасного перенавантаження автоматичного вимикача;

$K_{\text{п авт}} = 4 \dots 6$  – для вимикачів з комбінованим розчіплювачем (що має тепловий та електромагнітний елементи);

$K_{\text{п авт}} = 0,65 \dots 0,8$  – для вимикачів тільки з електромагнітним розчіплювачем.

Як і при захисті запобіжниками, слід перевірити вибрані перерізи жил кабелів на відповідність струмам захисних пристроїв:

– при захисті лінії автоматичним вимикачем з комбінованим розчіплювачем має виконуватися співвідношення:

$$I_{\text{вст}} \leq I_{\text{доп}}, \quad (7.32)$$

– при захисті лінії автоматичним вимикачем з електромагнітним розчіплювачем має виконуватися співвідношення:

$$I_{\text{вст}} \leq 4,5 I_{\text{доп}}. \quad (7.33)$$

Якщо співвідношення (7.29), (7.32), (7.33) не виконуються, раніше вибрані перерізи дротів або жил кабелів потрібно збільшити. При цьому не потрібний перерахунок втрат напруги для дроту нового поперечного перерізу, так як при більшому перерізі втрати напруги будуть ще менші за попередньо розраховані за формулами (7.18) та (7.19).

Приклади таблиць для вибору запобіжників та автоматичних вимикачів наведені в таблицях В8, В9, В10 додатку В.

## **7.8. Розрахункові навантаження освітлювальних установок**

Основна частка освітлювальних навантажень належить підрозділам (цехам) підприємства.

Розрахунок навантажень освітлювальних електроустановок проводиться за номінальною потужністю й коефіцієнтом попиту:

– активна потужність навантаження

$$P_{\text{осв}} = k_{\text{п}} P_{\text{ном}}, \quad (7.34)$$

– реактивна потужність навантаження

$$Q_{\text{р осв}} = P_{\text{р осв}} \cdot \text{tg}\varphi. \quad (7.35)$$

Номінальна потужність освітлювального навантаження визначається, виходячи з питомої потужності на одиницю площі:

$$P_{\text{ном}} = P_{\text{пит}} \cdot S_{\text{цех}}, \quad (7.36)$$

де  $P_{\text{пит}}$  – питома потужність освітлювального навантаження на одиницю площі цеху, Вт/м<sup>2</sup> (довідкова величина);

$S_{\text{цех}}$  – площа цеху, м<sup>2</sup>.

Питома потужність освітлювального навантаження залежить від норми освітленості на робочому місці, від типу джерел світла, висоти підвісу освітлювачів та й інших факторів.

## 7.9. Заземлення

Для забезпечення електробезпеки та захисту електрообладнання в електроустановках в обов'язковому порядку застосовується заземлення, яке здійснюється за допомогою спеціальних заземлюючих пристроїв.

У чотиридротових мережах з напругою до 1000 В з глухозаземленою нейтраллю, до яких належать і електромережі машинобудівних підприємств, для досягнення електробезпеки і захисту електрообладнання використовується так зване занулення.

### 7.9.1. Занулення

Зануленням називається навмисне електричне з'єднання з нульовим захисним провідником металевих неструмоведучих частин (корпусів, кожухів тощо), які можуть опинитися під напругою. Нульовий захисний провідник – це провідник, що з'єднує частини, що занулюються, з глухозаземленою нейтраллю трансформатору.

Занулення в мережах з глухозаземленою нейтраллю перетворює замикання будь-якої фази на корпус у однофазне коротке замикання, в результаті чого спрацьовує максимальний струмовий захист та селективно відключає пошкоджену ділянку мережі. За рахунок цього зменшується тривалість замикання на корпус та, як наслідок, суттєво знижується вірогідність поразки людини електричним струмом.

Для забезпечення величини струму однофазного короткого замикання на землю, яка викликає спрацювання захисних пристроїв (запобіжників, автоматичних вимикачів) перерізи нульового (нейтрального) дроту та нульових захисних провідників мають бути не менш 50% перерізів фазних дротів. Ця умова вже була підкреслена при виборі кабелів електромережі підприємства.

Нульовий дріт повинен мати надійні з'єднання. Тому приєднання нульового дроту до корпусу обладнання, яке захищають,

виконується за допомогою зварювання або болтового з'єднання.

Занулення однофазних споживачів, наприклад, освітлювачів, має здійснюватись спеціальним провідником (або жилою кабелю), який не може одночасно слугувати дротом для робочого струму.

### 7.9.2. Робоче заземлення

Заземлюючий пристрій (ЗП) виконуються виносним та розташовується у безпосередній близькості від трансформаторної підстанції, від якої живиться електроенергією підприємство.

ЗП робочого заземлення монтують з заземлювачів – сталевих провідників, які розташовують вертикально в землі на відстані 2,5...3 м, та сталевих смуг з перерізом не менш 40 мм<sup>2</sup> (завтовшки 4 мм), що зв'язують заземлювачі в загальний заземлюючий контур. Цей контур з'єднується з нейтраллю трансформатору спеціальним заземлюючим провідником – сталевією смугою перерізом 40 мм<sup>2</sup> завтовшки 4 мм або сталевією катанкою діаметром не менш 10 мм.

В якості заземлювачів використовують кутову сталь розмірами не менш 50x50x4 мм довжиною 2...3 м, сталеві стержні (прутки) діаметром не менш 10 мм довжиною близько 4 м, труби з товщиною стінки не менш 3,5 мм та зовнішнім діаметром 57, 76, 89 мм.

Заземлювачі забивають вертикально в землю у попередньо викопаній траншеї, глибина якої  $H_0 = 0,6...0,7$  м. Смуга, що зв'язує заземлювачі в спільний контур, укладається на дно траншеї та приварюється до заземлювачів.

Заземлювачі можуть бути розташовані в ряд при їх відносно невеликій кількості (до 20 шт.) – рис. 7.1, а); з'єднуватися в замкнутий прямокутний контур різними способами – рис.7.1, б).

Кожен ЗП повинен забезпечувати певну величину так званого опору розтіканню струму  $R_3$ , тобто опору, який спричиняє електричному струму в землі ділянка ґрунту від заземлювача до точок з нульовим потенціалом. Так, Правилами Улаштування Електроустановок (ПУЕ) приписані наступні значення  $R_3$  :

– для електроустановок напругою до 1000 В та приєднаній потужності споживачів 100 та більше кВА

$$R_3 \leq 4 \text{ Ом}; \quad (7.37)$$

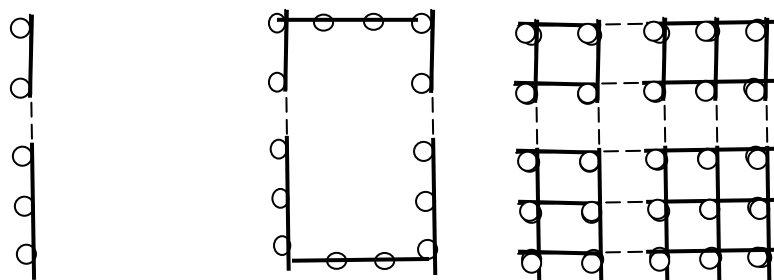
– для електроустановок напругою більше та менше 1000 В одночасно:

$$R_3 \leq \frac{125}{I_3}, \text{ Ом} \quad (7.38)$$

де  $I_3$  – розрахунковий струм однофазного замикання на землю, який дорівнює:

$$I_3 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_\phi (35 \ell_K + \ell_B)}{350}, \text{ А} \quad (7.39)$$

де  $\ell_K$  та  $\ell_B$  - довжини високовольтних кабельних та повітряних ліній, підключених з боку ВН до міської (районної) трансформаторної підстанції, від якої організовано електропостачання підприємства.



а)

б)

Рис. 7.1 Схеми розташування вертикальних заземлювачів:  
а) в ряд; б) в замкнутих контурах

Але слід зауважити, що у будь-якому випадку отримана по (7.38) величина  $R_3$  має бути не більшою, чим  $R_3$  для напруги 1000 В, тобто  $R_3=4$  Ом.

### 7.9.3. Послідовність розрахунку заземлення

Розрахунок заземлення виконується у наступній послідовності:

1. У відповідності з (7.37) – (7.39) визначається необхідна величина  $R_3$ .

2. Визначається розрахунковий питомий опір ґрунту  $\rho$  з врахуванням кліматичного коефіцієнта  $\psi$  за формулою:

$$\rho = \rho_{\text{попер.}} \cdot \psi, \text{ Ом}\cdot\text{м} . \quad (7.40)$$

Значення питомого опору ґрунту  $\rho_{\text{попер.}}$  та значення кліматичного коефіцієнту  $\psi$  беруться з довідкових таблиць в залежності від типу ґрунту та його вологості.

Таблиця 7.1

Приблизні значення  $\rho_{\text{попер.}}$  та  $\psi$  ґрунтів

Ґрунт	Попереднє значення питомого опору $\tau \rho_{\text{попер.}}$ Ом·м	Значення кліматичного коефіцієнту $\psi$		
		При великій вологості ґрунту	При середній вологості ґрунту	При сухому ґрунті
Глина	40	2,4	1,36	1,2
Суглинок	100	2,0	1,5	1,4
Пісок	700	2,4	1,56	1,2
Супісок	300	1,5	1,3	1,2
Чорнозем	20	2,3	1,32	1,2

3. Вибирається тип вертикальних заземлювачів, їх розміри (п.7.8.2).

4. Визначається попереднє число  $N_{\text{попер.}}$  вертикальних заземлювачів та вирішується питання їх розташування на плані в ряд або замкнений контур з врахуванням відстані між ними.

5. Розраховують опір розтіканню струму одиночного вертикального заземлювача:

$$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{2\pi\ell_3} \left( \ln \frac{2\ell_3}{d_3} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+\ell_3}{5H-\ell_3} \right). \quad (7.41)$$

В формулі (7.41) усі розміри виражаються в метрах та відповідають рис. 7.2. Вираз (7.41) є справедливим для трубчастих та стрижневих заземлювачів. Якщо в якості заземлювачів використовуються відрізки кутової сталі, в формулі треба враховувати еквівалентний діаметр кутової сталі:

$$d_{\text{з.е.}} = 0,95b_3, \quad (7.42)$$

де  $b_3$  – ширина полки рівнобічного кутової сталі (м).

6. Визначається сумарний опір розтіканню струму усіх паралельно з'єднаних відносно землі вертикальних заземлювачів без врахування сталевих смуги, що зв'язує їх:

$$R_{\text{в.з.}} = \frac{R_{\text{од}}}{N_{\text{попер.}} \eta_3}, \quad (7.43)$$

де  $\eta_3$  – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів, які взаємно впливають один на одного. Значення  $\eta_3$  вибирається з довідкових таблиць у відповідності до  $N_{\text{попер.}}$ , їх розташування та розмірів.

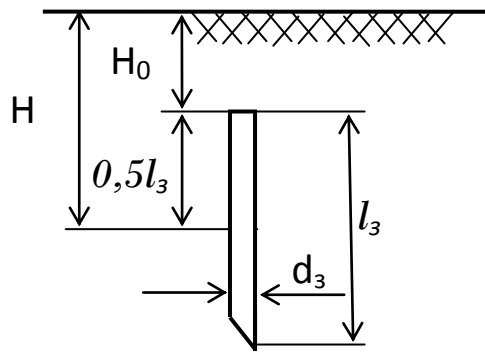


Рис.7.2. Схема розташування вертикального заземлювача в ґрунті

7. Знаходиться загальна довжина  $L_{\text{см}}$  сталевий смуги, яка зв'язує усі заземлювачі. Зручніше за все це зробити за допомогою плану контура заземлення. Довжина смуги, що зв'язує, при встановленні вертикальних заземлювачів в ряд визначається з співвідношення:

$$L_{\text{см}} = \ell(N_{\text{попер.}} - 1), \quad (7.44)$$

де  $\ell$  – відстань між заземлювачами.

8. Розраховується опір розтіканню струму  $R_{\text{см}}$  смуги, що зв'язує усі вертикальні заземлювачі як одиночного горизонтального, заглибленого у ґрунт на глибину  $H_0 = 0,6 \dots 0,7$  м заземлювача (рис. 7.3):

$$R_{\text{см}} = \frac{\rho}{2\pi L_{\text{см}}} \ln \frac{2L_{\text{см}}^2}{H_0 \cdot b_{\text{см}}}, \quad (7.45)$$

де  $b_{\text{см}} = 40$  мм = 0,04 м – ширина смуги.

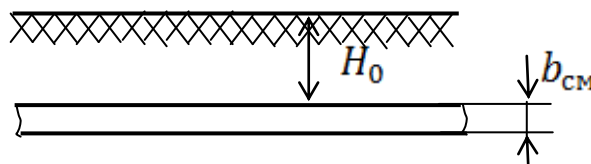


Рис. 7.3. Розташування смуги, що зв'язує вертикальні заземлювачі, в ґрунті

9. За даними довідкових таблиць для прийнятого розташування та кількості  $N_{\text{попер.}}$  визначається коефіцієнт використання  $\eta_{\text{см}}$  смуги,

що зв'язує заземлювачі, який враховує вплив вертикальних заземлювачів на її опір  $R_{\text{см}}$ . Далі знаходять фактичний опір розтіканню струму смуги, що зв'язує заземлювачі:

$$R_{\text{см}}' = \frac{R_{\text{см}}}{\eta_{\text{см}}}, \quad (7.46)$$

10. Розраховується повний опір розтіканню струму усього заземлюючого контуру, в якому вертикальні заземлювачі та смуга, яка їх зв'язує, з'єднані по відношенню до землі паралельно:

$$R_3' = \frac{R_{\text{в.з.}} \cdot R_{\text{см}}}{R_{\text{в.з.}} + R_{\text{см}}}, \quad (7.47)$$

11. Порівнюється потрібна величина  $R_3$  з розрахованою  $R_3'$ . Має виконуватися умова:

$$0,9R_3 \leq R_3' \leq R_3. \quad (7.48)$$

У разі виконання цієї умови приймається кінцева кількість вертикальних заземлювачів

$$N_3 = N_{\text{попер.}}$$

Якщо ж виявиться, що  $R_3' > R_3$ , слід збільшити кількість вертикальних заземлювачів  $N_{\text{попер.}}$  та повторити увесь розрахунок, починаючи з п.5.

Якщо в результаті розрахунку  $R_3' < 0,9R_3$ , слід зменшити  $N_{\text{попер.}}$  та повторити розрахунок, починаючи з п.5, тому що надмірне збільшення  $N_3$  недоцільно з економічної точки зору.

Необхідно зазначити, що на практиці після монтажу розрахованого заземлюючого пристрою слід обов'язково виміряти фактичну величину  $R_3$ , яка ні в якому разі не повинна перевищувати величину, що встановлена ПУЕ.



## Питання для самоконтролю до розділу 7

1. Чому передавати електроенергію на великі відстані вигідніше при високій напрузі?
2. На які відстані доцільно передавати електроенергію при напрузі 0,4 кВ?
3. Якими джерелами, крім районних та міських мереж, можуть користуватись підприємства?
4. Які існують схеми електропостачання підприємств? Яка з них надійніша? Яка дешевша?
5. Який метод розрахунку повної сумарної електричної потужності ви знаєте?
6. Що враховує коефіцієнт попиту?
7. Яким чином на підприємствах досягають значень коефіцієнту потужності, встановлених ПУЕ?
8. В якому випадку засоби з підвищення коефіцієнту потужності не є обов'язковими?
9. Як треба діяти, якщо номінальна реактивна потужність наявної конденсаторної установки більша за розрахункову реактивну потужність, яка підлягає компенсації?
10. Як розраховують фазні струми об'єктів електропостачання (наведіть формули)?
11. За якими критеріями обирають комплектну трансформаторну підстанцію для підприємства? Які існують конструктивні виконання КТП?
12. Як розраховують потужність силового трансформатора для електропостачання промислового об'єкта?
13. Як обрати пересувну електростанцію?
14. Для чого розраховують координати центру навантажень будівельного майданчика?
15. За яким принципом вибирають розподільчі щити об'єктів електропостачання?
16. Які фактори треба брати до уваги при виборі способів прокладання кабелів та дротів?
17. Як обирають поперечний переріз дроту (кабелю)?
18. В чому полягає перевірка кабелів та дротів на втрату напруги?
19. Які втрати напруги є припустимими для електродвигунів? Для освітлювачів?

20. Які основні принципи обирання автоматичних вимикачів та запобіжників для захисту електромереж?
21. Що таке пусковий струм двигуна?
22. Як розраховують піковий струм групи однорідних приймачів електроенергії?
23. З якою метою облаштовують заземлення електромереж?
24. Що називають зануленням?
25. Яка конструкція заземлюючого пристрою?
26. Які існують схеми розташування вертикальних заземлювачів в пристрої?
27. Від чого залежить опір одиночного заземлювача?
28. Яким повинно бути значення опору заземлюючого пристрою?
29. Якщо після розрахунку виявилось, що опір заземлюючого пристрою занадто великий, як слід змінити його конструкцію?

### Приклади розв'язання задач до розділу 7

*Приклад 1.* Після розрахунку потужності, яку споживає промисловий об'єкт, виявилось, що він споживає активну потужність 246 кВт, а коефіцієнт потужності об'єкту становить 0,782. Розрахувати та підібрати компенсуючий пристрій, який би дав можливість підвищити коефіцієнт потужності до 0,94. Робоча напруга 380 В, частота змінного струму 50 Гц. Чи потрібно відключити частину ємності конденсаторів установки? Розрахувати цю ємність, якщо потрібно.

*Розв'язання.* Зауважимо, що  $\cos \varphi = 0,782$  відповідає  $\operatorname{tg} \varphi = 0,797$ , а  $\cos \varphi = 0,94$  відповідає  $\operatorname{tg} \varphi = 0,363$ .

Реактивна потужність, яку треба компенсувати, за формулою (7.10):

$$Q_{\text{к}} = \alpha \cdot P_{\text{р}} (\operatorname{tg} \varphi - \operatorname{tg} \varphi_{\text{вст}}) = 0,9 \cdot 246 (0,797 - 0,363) = 96,1 \text{ кВАр.}$$

З табл. В1 додатку В обираємо трифазну установку з найближчою більшою за розрахункову реактивною потужністю УКН0,38-150УЗ, паспортна реактивна потужність якої 150 кВАр. Оскільки вона більша за розрахункову, частину ємності конденсаторів потрібно відключити. Цю ємність розрахуємо за формулою (7.12):

$$C = \frac{(Q_{\text{к пасп}} - Q_{\text{к}}')}{3 \cdot 2\pi \cdot f \cdot U_{\text{роб}}^2} = \frac{(150 - 96,1) \cdot 10^9}{3 \cdot 2\pi \cdot 50 \cdot 380^2} = 396 \text{ мкФ.}$$

*Приклад 2.* Розрахувати фазний струм промислового об'єкту, якщо відому, що він споживає активну потужність 600кВт;  $\cos \varphi=0,92$ ; напруга, яка підведена до об'єкту, 6 кВ. Підібрати кабель марки ААШв при прокладці його у землі.

*Розв'язання.* Знаючи активну потужність та коефіцієнт потужності, визначимо повну потужність, яку споживає об'єкт, з формули (7.8):

$$S = \frac{P}{\cos \varphi} = \frac{600}{0,92} = 652,2 \text{ кВА.}$$

З формули (7. 14) визначимо струм об'єкту:

$$I = \frac{652,2}{\sqrt{3} \cdot 6} = 62,8 \text{ А.}$$

За таблицею В4 додатку В визначаємо, що потрібно використати кабель з поперечним перерізом  $10 \text{ мм}^2$ , у якого тривало допустимий струм більший за розрахований струм об'єкту і дорівнює 65 А. Запишемо марку кабелю: ААШв-6-3х10. Число 6 означає напругу 6 кВ, число 3 – кількість жил кабелю, число 10 – поперечний переріз жили кабелю в  $\text{мм}^2$ .

*Приклад 3.* Розрахувати втрати напруги в однофазній лінії з алюмінію, якщо її переріз  $16 \text{ мм}^2$ , довжина лінії 175 м, сила струму в лінії 25 А,  $\cos \varphi = 0,87$ .

*Розв'язання.* Перерізу  $16 \text{ мм}^2$  алюмінієвого дроту відповідають, за таблицею В7 додатку В такі значення активного та реактивного опорів:

$$R_0 = 2,21 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}; X_0 = 0,067 \frac{\text{Ом}}{\text{км}}.$$

З формули (7.19):

$$\Delta U_{\text{л}} = 2 \cdot I \cdot (R_{\text{л}} \cdot \cos \varphi + X_{\text{л}} \cdot \sin \varphi) = 2 \cdot I \cdot \ell (R_0 \cdot \cos \varphi + X_0 \cdot \sin \varphi) = 2 \cdot 25 \cdot 0,175 (2,21 \cdot 0,87 + 0,067 \cdot 0,493) = 17,1 \text{ В.}$$

Така втрата напруги менша за допустиму для електродвигунів – 19 В.

*Приклад 4.* Підібрати запобіжник типу ПН для кабелю живлення цеху, якщо його робочий струм становить 156 А, тривало допустимий струм кабелю АНРГ з алюмінієвими жилами 170 А, робочий струм двигуна найбільш потужного верстату 25,7 А. Кабель прокладено у повітрі.

*Розв'язання.* Визначимо пусковий струм двигуна найбільш потужного верстату:

$$I_{\text{пуск од}} = 7I_{\text{ном}} = 7 \cdot 25,7 = 179,9 \text{ А.}$$

Тоді піковий струм цеху  $I_{\text{пik гр}} = 179,9 + 156 = 335,9 \text{ А.}$

Оскільки навантаження цеху має піки струму за рахунок пускових струмів двигунів, струм вставки запобіжника розрахуємо за формулою (7.28):

$$I_{\text{вст}} \geq \frac{I_{\text{пik гр}}}{2,5} \geq \frac{335,9}{2,5} = 134,4 \text{ А.}$$

Одночасно струм вставки повинен бути не меншим робочого струму цеху, тобто не менше 156 А. Цим вимогам з таблиці В8 додатку В відповідає запобіжник ПН2-250/200 з номінальним струмом 200 А. Але цей струм перевищує тривало допустимий струм існуючого кабелю 170 А, що не припустимо. Отже, за умовами вибору запобіжника доведеться замінити існуючий кабель на кабель з більшим перерізом жил, у якого тривало допустимий струм буде не меншим за номінальний струм вставки обраного запобіжника. Таким вимогам відповідає кабель АНРГ-3х120 з перерізом жил 120 мм<sup>2</sup> та тривало допустимим струмом 200 А.

*Приклад 5.* Розрахувати опір одиночного заземлювача, якщо він зроблений кутової сталі 50х50х4 мм, довжиною 3 м. Питомий опір ґрунту, в якому розташовано заземлювач, становить 40 Ом · м, а глибина траншеї, в дно якої забивають заземлювач, дорівнює 0,6 м.

*Розв'язання.* Визначимо опір одиночного заземлювача за формулою (7.41):

$$R_{\text{од}} = \frac{\rho}{2\pi\ell_3} \left( \ln \frac{2\ell_3}{d_{\text{з.е.}}} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H + \ell_3}{5H - \ell_3} \right) =$$

$$= \frac{40}{2\pi \cdot 3} \left( \ln \frac{2 \cdot 3}{0,95 \cdot 0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,1 + 3}{5 \cdot 2,1 - 3} \right) = 10,7 \text{ Ом.}$$

Під час розрахунку використаний еквівалентний діаметр кутової сталі  $d_{з.е.} = 0,95b_3$ , де  $b_3$  – розмір полочки кутка (50 мм-0,05 м);

$$H = H_0 + 0,5\ell_3 = 0,6 + 0,5 \cdot 3 = 2,1 \text{ м.}$$

### **Задачі для самостійного розв’язання до розділу 7**

1. Розрахована активна потужність будівельного майданчика становить 236 кВт, реактивна потужність – 185 кВАр. Розрахувати середньовиважений коефіцієнт потужності будівельного майданчика.

*Відповідь:* 0,787.

2. Розрахувати реактивну потужність компенсуючої установки для умов задачі 1, якщо потрібно досягти  $\cos \varphi = 0,92$ . Оберіть з таблицею В1 додатку В потрібну установку.

*Відповідь:* 76 кВАр.

3. Для умов задачі 2 розрахуйте, яку ємність конденсаторів (мкФ) потрібно вимкнути в кожній фазі вибраної конденсаторної установки, щоб коефіцієнт потужності дорівнював 0,92. Робочу напругу вважати 380 В, частоту змінного струму – 50 Гц.

4. Підібрати переріз робочої жили кабелю марки ААШп, якщо його робочий струм дорівнює 225 А а) при прокладці кабелю в землі; б) при прокладці кабелю в повітрі.

*Відповідь:* а) 95 мм<sup>2</sup>; б) 150 мм<sup>2</sup>.

5. Розрахувати втрати напруги в однофазній лінії при нарузі 220 В, якщо довжина лінії 260 м, поперечний переріз дроту, зробленого з алюмінію, 6 мм<sup>2</sup>, якщо лінією тече струм 4,2 А до освітлювального навантаження. Чи не перебільшать ці втрати допустимих?

*Відповідь:* 11,5 В.

6. Який переріз дроту треба обрати, щоб втрати напруги в лінії з умов задачі 5, не перевищували допустимі?

*Відповідь:* 16 мм<sup>2</sup>.

7. Визначити, який максимальний струм можливо на протязі тривалого часу пропускати однофазною лінією з алюмінієвих дротів для живлення прожекторів при напрузі 220 В, якщо поперечний переріз дроту  $10 \text{ мм}^2$ , довжина лінії 240 м, щоб втрати напруги не перевищували допустимих.

*Відповідь:*  $I = 3,65 \text{ А}$ .

8. Розрахувати втрати напруги в трифазній лінії, якою тече струм 149 А, якщо довжина лінії 77 м, а коефіцієнт потужності об'єкта, який живить лінія, становить 0,779. Жили кабелю зроблені з алюмінію.

*Відповідь:* 5,4 В.

9. Підібрати запобіжник типу ПР (таблиця В9 додатку В) для освітлювальної мережі, якщо її струм становить 12 А.

*Відповідь:* ПР-2/15.

10. Підібрати запобіжник типу ПН (таблиця В8 додатку В) для бетонорозчинного вузла, якщо його робочий струм становить 186 А, тривало допустимий струм кабелю 200 А, робочий струм найбільш потужного бетонозмішувача 23,1 А.

*Відповідь:* ПН2-250/200.

11. Розрахувати піковий струм групи розчинозмішувачів, якщо відомо, що робочий струм групи 56 А, а струм одного розчино змішувача 25,7 А.

*Відповідь:* 236 А В.

12. За умовами задачі 11 підібрати автоматичний вимикач з комбінованим розчіплювачем (таблиця В10 додатку В), якщо тривало допустимий струм кабелю 60 А.

*Відповідь:* А3114,  $I_{\text{ном}} = 60 \text{ А}$ .

13. Розрахувати опір одиночного заземлювача, якщо він зроблений з сталевого прутка діаметром 15 мм, довжиною 4 м. Питомий опір ґрунту, в якому розташовано заземлювач, становить  $54,4 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ , а глибина траншеї, в дно якої забивають заземлювач, 0,7 м.

*Відповідь:* 14,8 Ом.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров К. К. Электротехнические чертежи и схемы / К. К. Александров, Е. Г. Кузьмина. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.: илл.
2. Балашов Ф.К. Методические указания к расчетно-графическому заданию и контрольной работе на тему «Расчет электроснабжения и электрооборудования строительной площадки» / Балашов Ф. К., Белоус И. М., Дойков Д. Н. – Одесса : ОГАСА, 1992. – 69 с.
3. Белоус І. М. Конспект лекцій з електропостачання та електрообладнання у будівництві / І. М. Белоус, Т. Г. Тігарєва – Одеса : ОДАБА, 2010. – 70 с.
4. Борисов Ю. М. Электротехника / Борисов Ю. М., Липатов Д. Н., Зорин Ю. Н. – М. : Энергоиздат, 1985. – 552 с.
3. Евдокимов Ф. Е. Теоретические основы электротехники / Евдокимов Ф. Е. – М. : Высшая школа, 1971. – 488 с.: илл.
4. Иванов И. И. Электротехника / И. И. Иванов, В.С. Равдоник –М. : Высшая школа, 1984. – 375 с.
5. Иванов А. А. Справочник по электротехнике / Иванов А. А. –К.: Высшая школа, 1973. – 224 с.
6. Іванов А. О., Електротехніка – теорія та практика : навч. посібн. [для вузів за заг. ред. Монтік П. М., Ч.1]/ А. О. Іванов, П. М. Монтік. – Одеса: Автограф, 2002. – 242 с.
7. Касаткин А. С. Электротехника: [учебник для вузов] / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М. : Издательский центр «Академия», 2008. – 544 с.
8. Кузнецов М. И. Основы электротехники / [под ред. Страхова С. В.]. – М. : Высшая школа, 1964. – 560 с.: илл.
9. Міліх В.І. Електротехніка та електромеханіка: [навч. посіб.] / В. І. Міліх. –К. : Каравела, 2005. – 376 с.

10. Общая электротехника : [учебник для машиностроит., горных, металлургич. и теплоэнергетич. Специальностей вузов] / [Анвельт М. Ю., Данильченко В. П., Зайдель Х. Э. и др.] : под ред. В. С. Пантюшина. – М. : Высшая школа, 1970. – 568 с., илл.
11. Попов В. С. Общая электротехника с основами электроники / В. С. Попов, С. А. Николаев. – М. : Энергия, 1972. – 504с.
12. Правила улаштування електроустановок : – Офіц. вид. – Харків : [б. в.] : Міністерство енергетики та вугільної промисловості України, 2014. – 793 с. – (Нормативний документ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України).
13. Сборник задач по теоретическим основам электротехники / [под ред. Л. А. Бессонова]. – М. : Высшая школа, 1980. –543 с.
14. Сборник задач по электротехнике и основам электроники : [учеб. пособ. для вузов] / [Анвельт М. Ю., Герасимов В. Г., Данильченко В. П. и др.] ; под ред. В. С. Пантюшина. – [3-е изд., перераб и доп.]– М. : Высшая школа, 1979. – 253 с., илл.
15. Тігарєва Т.Г. Конспект лекцій з дисципліни «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка», ч. I для студентів ОДАБА денної та заочної форм навчання напряму підготовки 6.050503 «Машинобудування», що навчаються на базі ОКР «Молодший спеціаліст», ч. I / Тігарєва Т. Г. – Одеса : ОДАБА, 2015. – 100 с.
16. Тігарєва Т. Г. Методичні вказівки до розв'язання задач з дисциплін «Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка», «Електротехніка у будівництві», «Електротехніка» «Кола змінного струму» / Тігарєва Т. Г. – Одеса : ОДАБА, 2015. – 86 с.
17. Электротехника: [учебник для неэлектротехнич. спец. вузов] / [Зайдель Х. Э., Коген-Дален В. В. и др.] : под ред. В. Г. Герасимова. – [3-е изд.] – М. : Высшая школа, 1985. – 480 с.



## ДОДАТОК А

Таблиця А1

### Одиниці виміру основних електротехнічних величин

Фізична величина і її позначення		Назви одиниць виміру	Позначення одиниць виміру	Примітки та співвідношення між основними та похідними одиницями виміру
Електричний струм, $I, i(t)$		Ампер міліампер	А мА(mA)	$i$ - змінне значення, $I$ - постійне значення $1\text{mA} = 10^{-3}\text{A}$
Напруга, $U, u(t)$		Вольт мілівольт кіловольт	В (V) мВ(mV) кВ(kV)	$u$ - змінне значення, $U$ - постійне значення $1\text{mV} = 10^{-3}\text{V}$ $1\text{kV} = 10^3\text{V}$
Опір	активний, $R$	Ом	Ом, кОм	$1\text{кОм} = 10^3\text{Ом}$
	реактивний, $X$			
	повний, $Z$			
Потужність	активна, $P$	Ват	Вт (кВт)	$1\text{кВт} = 10^3\text{Вт}$
	реактивна, $Q$	Вольт-Ампер реактивний	ВАр (кВАр)	$1\text{кВАр} = 10^3\text{ВАр}$
	повна, $S$	Вольт-Ампер	ВА (кВА)	$1\text{кВА} = 10^3\text{ВА}$
Електрична енергія, $E$		Ват-година	Вт-ч (W-h) кВт-ч	$1\text{кВт-ч} = 10^3\text{Вт-ч}$
Частота електричного струму, $f$		Герц	Гц (Hz), кГц(kHz)	$1\text{кГц} = 10^3\text{Гц}$
Електроємність, $C$		Фарада мікрофарада	Ф (F) мкф ( $\mu\text{F}$ )	$1\text{мкФ} = 10^{-6}\text{Ф}$
Індуктивність, $L$		Генрі, мілігенри	Гн (H), мГн (m)	$1\text{мГн} = 10^{-3}\text{Гн}$
Різниця фаз, $\varphi$		Кутовий градус, радіан	$^\circ$ рад	$360^\circ = 2\pi\text{рад}$

## ДОДАТОК Б

Таблиця Б1

Умовні позначення та графічні зображення електровимірювальних приладів

Вимірювана величина	Умовне позначення	Назва приладу	Графічне зображення
Сила струму	A	Амперметр	Ⓐ
	mA	Міліамперметр	ⓂⒶ
	μA	Мікроамперметр	ⓂⒶ
Напруга	V	Вольтметр	Ⓥ
	kV	Кіловольтметр	ⓀⓋ
Електричний опір	Ω	Омметр	Ⓡ
	MΩ	Мегометр	ⓂⓇ
Потужність	W	Ватметр	Ⓦ
Електроенергія	E	Лічильник електроенергії	ⓀⓌh
Частота	f	Частотомір	Ⓜz
Зсув фаз	φ	Фазометр	Ⓠ

## Умовні позначення параметрів електровимірювальних приладів

Умовне позначення	Зміст позначення	Умовне позначення	Зміст позначення
—	Постійний струм		Затискач, сполучений з корпусом
~	Змінний струм		Затискач, сполучений із землею
⌚	Струм постійний або змінний		Магнітоелектрична система приладу
≃	Трифазний струм		Електромагнітна система приладу
 2 кВ а)	Ізоляція вимірювальної системи випробувана напругою: а) старе позначення; б) нове		Електродинамічна система приладу
 2 б)			
 ↑ а)	Робоче положення приладу вертикальне: а) старе позначення; б) нове		Індукційна система приладу
 ⊥ б)			
 → а)	Робоче положення приладу горизонтальне: а) старе позначення; б) нове	А	Для закритих приміщень, що опалюються
 ⊏ б)			

## ДОДАТОК В

Таблиця В1

Конденсаторні установки типу КУ на напругу 380 В

Тип установки	Номинальна потужність, $Q_{к.ном}$ , кВАр	Маса, кг
ККУ 0,38-1	80	350
ККУ 0,38-III	160	716
ККУ 0,38-У	280	1071
УКЛН 0,38-150-50УЗ	150	335
УКЛН 0,38-300-50УЗ	300	575
УКН 0,38-75УЗ	75	175
УКН 0,38-150УЗ	150	175

Таблиця В2

Шафи розподільчі силові типу ШРС1, трифазні, на 380 В,  
для зовнішнього установалення

Тип шафи	Тип та номінальний струм рубильника, А	Кількість ліній, що відходять та номінальні струми запобіжників, А	Електрична однолінійна схема
ШРС1-50	250	5×60	
ШРС1-51	250	5×100	
ШРС1-52	250	2×60 + 3×100	
ШРС1-53	400	8×60	
ШРС1-54	400	6×100	
ШРС1-55	400	4×60 + 4×100	
ШРС1-58	400	2×60 + 4×100 + 2×250	

Таблиця В3

Шафи розподільчі силові типу СПМ-75, трифазні, на 380 В,  
для внутрішнього установалення

Тип шафи	Тип та номінальний струм рубильника, А	Кількість ліній, що відходять та номінальні струми запобіжників, А			Електрична однолінійна схема
		60	100	250	
СПМ75-1	РС-2; 250	5	-	-	
СПМ75-2	РС-2; 250	-	5	-	
СПМ75-3	РС-2; 250	2	3	-	
СПМ75-4	РС-4; 400	8	-	-	
СПМ75-5	РС-4; 400	-	8	-	
СПМ75-6	РС-4; 400	4	4	-	
СПМ75-9	РС-4; 400	2	4	2	

Таблиця В4

Допустимі тривалі струмові навантаження для три- та чотирижильних кабелів з алюмінієвими жилами (А)

Переріз робочої жили, мм <sup>2</sup>	Кабелі АНРГ, АВРГ		Кабелі ААШв, ААШп	
	Прокладка в повітрі	Прокладка в землі	Прокладка в повітрі	Прокладка в землі
2,5	19	29	-	-
4	27	38	27	38
6	32	46	35	46
10	42	70	45	65
16	60	90	68	90
25	75	115	75	115
35	90	140	95	135
50	110	175	110	165
70	140	210	140	200
95	170	255	165	240
120	200	295	200	270
150	235	335	230	305
185	270	385	260	345

Таблиця В5

Допустимі тривалі струмові навантаження для неізольованих алюмінієвих та сталєво-алюмінієвих дротів, прокладених поза приміщеннями

Марка дроту	Струмове навантаження на дріт, А	Марка дроту	Струмове навантаження на дріт, А
А-16	105	АС-10	80
А-25	135	АС-16	105
А-35	170	АС-25	130
А-50	215	АС-35	175
А-70	265	АС-50	210
А-95	320	АС-70	265
А-120	375	АС-95	330
А-150	440	АС-120	380

Таблиця В6

Допустимі тривалі струмові навантаження для дротів з гумовою та полівінілхлоридною ізоляцією з алюмінієвими жилами, (А)

Пере- різ дроту, мм <sup>2</sup>	Струмове навантаження на дріт, А					
	Прокладені відкрито	Прокладені в одній трубі				
		Два одно- жильних	Три одножи- льних	Чотири од- ножильних	Один дво- жильний	Один трижиль- ний
2,5	24	20	19	19	19	16
4	32	28	28	23	25	21
6	39	36	32	30	31	26
10	60	50	47	39	42	38
16	75	60	60	55	60	55
25	105	85	80	70	75	65
35	130	100	95	85	95	75
50	165	140	130	120	125	105
70	210	175	165	140	150	135
95	255	215	200	175	190	165
120	295	245	220	200	230	190

Таблиця В7

Активні та індуктивні питомі опори кабелів  
з мідними та алюмінієвими жилами

Переріз дроту, мм <sup>2</sup>	Опір, Ом/Км		
	Активний, R <sub>0</sub>		Реактивний, X <sub>0</sub>
	Мідь	Алюміній	
6	2,97	5,25	0,09
10	1,78	3,14	0,073
16	1,25	2,21	0,067
25	0,8	1,41	0,066
35	0,57	1,01	0,064
50	0,4	0,71	0,062
70	0,29	0,42	0,061
95	0,21	0,41	0,06
120	0,17	0,30	0,06
150	0,13	0,23	0,06
185	0,09	0,2	0,06

Примітка: при перерізі, меншому за 6 мм<sup>2</sup>:  $R_{0x} = R_{0[6]} \frac{6}{S_x}$  (Ом/км),

де  $R_{0[6]}$  – активний опір жили кабелю при  $S = 6$  мм<sup>2</sup>;

$S_x$  – переріз робочої жили кабелю.

Таблиця В8

## Основні дані запобіжників ПН2

Тип	Номинальний струм, А		Приклад запису
	Патрону запобіжника	Плавкої вставки	
ПН2-100	100	30; 40; 50; 60; 80; 100	ПН2-100/60
ПН2-250	250	80; 100; 120; 150; 200; 250	ПН2-250/200
ПН2-400	400	200; 250; 300; 350; 400	ПН2-400/400
ПН2-600	600	300; 400; 500; 600	ПН2-600/400

Таблиця В9

## Основні дані запобіжників ПР-2

Номинальний струм патрону, А	Струм плавких вставок, А	Приклад запису
15	6; 10; 15	ПР-2/10
60	15; 20; 25; 35; 45; 60	ПР-2/60
100	60; 80; 100	ПР-2/80
200	100; 125; 160; 200	ПР-2/125

Таблиця В10

## Основні дані автоматичних триполюсних (трифазних) вимикачів серії А3100

Тип вимикача	Розчіплювач			
	Комбінований		Електромагнітний	
	Номинальний струм, А	Уставка на струм миттєвого спрацювання, А	Номинальний струм, А	Уставка на струм миттєвого спрацювання, А
А3114	15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 100	10 I <sub>НОМ</sub>	15; 20; 25; 40; 60; 100 40 60 100	10 I <sub>КОМ</sub> 300 500 800
А3124	15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 100	7 I <sub>НОМ</sub>	100	7 I <sub>КОМ</sub>
А3134	120 150 200	7 I <sub>НОМ</sub>	200	7 I <sub>КОМ</sub>
А3144	250 300 400 500 600	7 I <sub>НОМ</sub>	600	7 I <sub>КОМ</sub>

## Предметний покажчик

### А

Абсолютна похибка 92  
Автотрансформатор 121  
Активний елемент 34  
Ампер 11  
Амперметр 92  
Амплитудне значення 27  
Асинхронний двигун 132,143

### Б

Біляча клітка 143

### В

Ват 12  
Ватметр 92  
Векторна діаграма 31  
Вольт 11  
Вольтметр 92  
Вибір компенсуючого пристрою 162  
Вибір поперечного перерізу дроту 165  
Вузол електричного кола 12

### Г

Генератор змінного струму 27  
Генрі 38  
Герц 28

### Д

Двигун постійного струму 132, 134, 137  
Діюче значення струму 30  
– – напруги 30  
Джерело електричної енергії 9

Джоуль 46

Діелектрик 36

Додатковий опір 100

Доліво-Добровольський 146

Дослід короткого замкнення трансформатора 116  
– холостого ходу –114

### Е

Електричне коло змінного струму 26

– – нерозгалужене 48

– – розгалужене 51

– – трифазне 67

– – – тридротове 71

– – – чотиридротове 69

Електрорушійна сила (ЕРС) 27

Електровимірювальні пристрої 90

– – індукційні 96

– – магнітоелектричні 94

– – термоелектричні 97

– – електродинамічні 95

– – електромагнітні 94

– – випрямні 97

Енергія магнітного поля 44

Енергія електричного поля 45

### Є

Ємність 36

Ємнісний елемент 36

– опір 36

### З

Заземлення 170

Закон баланса потужності 13



– Джоуля-Ленца 14,110  
– Кірхгофа перший 13  
– – – для змінного струму 33,53  
– – другий 13  
– – – для змінного струму 33,50  
– Ома 11,34  
Занулення 170  
Змішане з'єднання 16  
З'єднання «зірка» 17,68  
– трикутник 17,73

## І

Індуктивність 38  
Індуктивний опір 38  
Індуктивний елемент ідеальний 38  
– – реальний 40  
Індуктор 136

## К

Класи точності 92,93  
Ковзання 147  
Колектор 135  
Комплексна форма подання електротехнічних величин 32  
Конденсатор 36  
Компенсація реактивної потужності 56,162  
Компенсуючий пристрій 162  
Коефіцієнт корисної дії (ККД) 119,131,147  
Коефіцієнт потужності ( $\cos \varphi$ ) 47,103  
Коротке замкнення 78

## Л

Лінія 9

Лінійна напруга 68,73  
Лінійний струм 68,73

## М

Магнітна індукція 145  
Магнітне поле 144  
Миттєві значення змінного струму та напруги 27,28  
Міст Уїтстона 17  
Межа вимірювання 91  
Метод компенсації реактивної потужності 56

## Н

Навантаження симетричне 70  
– несиметричне 70  
– активно-індуктивне 50  
– активно-ємнісне 50  
Напруга постійна 12  
– змінна сінусоїдальна 27  
– – трифазна 67  
Нейтральний (нульовий) дріт 67  
Несиметричний приймач 70  
Номінальні величини електрообладнання 131,149

## О

Обмотка збудження ротора 136  
– – статора 136  
– трансформатора 120  
– – первинна 120  
– – вторинна 120  
Ом 11  
Омметр 90, 105  
Опір 11, 103,105

## П

Падіння напруги 11  
Паралельне з'єднання 15  
Перетворення «трикутник–зірка» 17  
Період 28  
Показання приладу 91  
Послідовне з'єднання 14  
Потужність 12,41  
– активна 43,101  
– повна 46  
– реактивна 44,46,102  
Правило правоходового гвинта 144  
– лівої руки 134,135  
Провідність електрична 11  
Пусковий реостат 141

## Р

Реактивні елементи 33  
Регулювання частоти обертання 141  
Резистивний елемент 34  
Резонанс напруг 50  
– струмів 54  
Реостат пусковий 141  
– регулювальний 142  
Різниця потенціалів 11  
Різниця фаз 29  
Ротор 132,136

## С

Симетричний електроприймач 69  
Синусоїдальна змінна величина 27  
Синхронний двигун 133, 151

Статор 132, 136

Струм

– постійний 12  
– змінний 27

## Т

Трансформатор 110  
– напруги 98  
– струму 98  
Тридротова система 71  
Трикутник напруг 47  
– опорів 47  
– потужностей 47  
Трифазна система 67,146  
Трифазний двигун 146

## Ф

Фаза 27  
– початкова 27  
Фазна напруга 68,73  
Фазний струм 68,73  
Фазометр 92,103  
Фарада 36

## Х

Характеристика холостого ходу 115  
Холостий ход трансформатора 114

## Ц

Циклічна частота 27  
Ціна поділки 91

## Ч

Частота 28  
Частотомір 92  
Чотиридротова система 69

Чотириплечий міст 17  
Чутливість приладу 91

### **Ш**

Шунт 99

### **Щ**

Щит розподільчий 165  
Щітки колекторні 135

### **Я**

Якір 137



