

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**



**Н. О. САБАЛАЄВА, Я. Б. ФОРКУН**

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**  
**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів усіх форм навчання  
спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2019**

**Сабалаєва Н. О.** Електротехніка та електропостачання : конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології) / Н. О. Сабалаєва, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 128 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. Н. О. Сабалаєва,  
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент

**Д. В. Тугай**, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 11 від 27 травня 2019 р.*

Конспект лекцій складено з метою допомогти студентам спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології під час підготовки до практичних занять, лабораторних робіт, заліків та виконання студентами заочної форми навчання контрольної роботи.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ЕЛЕКТРИЧНІ І МАГНІТНІ КОЛА.....	6
1.1 Основні поняття електротехніки.....	6
1.2 Закони електротехніки .....	7
1.3 Основні параметри і властивості елементів електричних кіл. Резистивний опір, ємність, індуктивність.....	10
1.4 Джерела напруги і струму та споживачі електричної енергії... ..	10
1.5 Методи розрахунку електричних кіл.....	11
1.5.1 Метод еквівалентних перетворень.....	12
1.5.2 Метод застосування законів Кірхгофа.....	13
1.5.3 Енергетичний баланс в електричних колах постійного струму.....	14
1.6 Синусоїдний струм.....	14
1.6.1 Основні величини, що характеризують синусоїдний струм.....	14
1.6.2 Синусоїдний струм активного опору, індуктивності, ємності.....	15
1.6.3 Тригонометричний метод розрахунку кіл синусоїдного струму.....	18
1.6.4 Потужність в колах синусоїдного струму (активна, реактивна, повна).....	20
1.7 Застосування комплексних чисел для розрахунку електричних кіл.....	21
1.7.1 Форми запису комплексного числа. Дії з комплексними числами.....	22
1.7.2 Символічний метод розрахунку кіл синусоїдного струму. Закони Ома і Кірхгофа в комплексній формі....	23
1.8 Трифазні електричні кола.....	24
2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ .....	30
2.1 Електричні вимірювання та електровимірювальні прилади. Вимірювання електричних величин.....	30
2.2 Вимірювання неелектричних величин електричними методами.....	36
2.3 Вимірювання фізичних величин.....	41
2.3.1 Вимірювання температури .....	41
2.3.2 Вимірювання тиску.....	46

3	ТРАНСФОРМАТОРИ І ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ.....	49
3.1	Трансформатори.....	50
3.2.	Електричні машини постійного струму.....	56
3.3	Асинхронні електричні машини.....	58
3.4	Синхронні електричні машини.....	68
4	ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ.....	73
4.1	Електричні апарати: загальні відомості та класифікація.....	73
4.2	Структурні частини електричних апаратів.....	80
4.3	Контакти електричних апаратів.....	83
4.4	Роз'єднувачі, вимикачі та комбінації із запобіжниками.....	85
5	ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ.....	87
5.1	Принцип роботи напівпровідникових приладів.....	87
5.2	Побудова і принцип роботи випрямлячів.....	94
6	ЕЛЕКТРОПРИВОД.....	101
6.1	Класифікація електроприводів .....	101
6.2	Поняття про динаміку електроприводу.....	103
6.3	Вибір двигуна в системах електроприводу.....	104
6.4	Поняття про автоматичне керування електродвигуном.....	105
7	ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ.....	107
7.1	Базові поняття системи електропостачання .....	108
7.2	Структура мереж електропостачання промислових об'єктів... ..	111
7.3	Типові схеми електропостачання промислового об'єкта .....	113
7.4	Розрахунок електричних мереж.....	116
7.5	Принципи побудови і розрахунку мереж освітлення та електропостачання в окремих приміщеннях.....	124
	СПИСОК ДЖЕРЕЛ.....	128

## ВСТУП

Електротехніка – це сукупність технічних наук, що вивчають отримання, розподіл, перетворення та використання електричної енергії, або, інакше кажучи, електротехнікою називають галузь практичного застосування електромагнітних явищ. Широке використання електротехнічних пристроїв у промисловості робить необхідним приділити увагу вивченню основних засобів їх застосування інженерами не тільки електричних спеціальностей.

Студентам спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології варто вміти використовувати головні досягнення електротехніки для забезпечення в майбутньому в практичних умовах разом із колегами електриками високоєкономічної й продуктивної роботи різноманітних технічних об'єктів. Здобуті під час вивчення курсу «Електротехніка та електропостачання» знання мають допомогти студентам цієї спеціальностей правильно вибирати й експлуатувати електротехнічне обладнання, яке застосовують у нафтогазовій галузі, та використовувати досягнення електрифікації для її подальшого розвитку.

Таким чином, метою вивчення навчальної дисципліни є формування знань з основних понять і законів електротехніки, співвідношення електричних і енергетичних величин, які характеризують стан електричних кіл, знань принципу дії та конструкції таких електротехнічних приладів, як трансформатори, електровимірювальні прилади, електричні машини і апарати, принципу дії напівпровідникових приладів; принципів організації електропостачання для виробничих процесів, пов'язаних із відповідною програмою професійною діяльністю. Основними завданнями вивчення дисципліни є формування у студентів належного рівня знань про електричні і кола та застосуванні цих знань при виконанні інженерних та виробничих завдань. Предметом вивчення дисципліни є основні засади і закони електротехніки, електротехнічні пристрої, призначені для вирішення професійних завдань у галузі, відповідній освітній програмі, а також електричні системи мережі електропостачання, зокрема промислових підприємств.

Цей конспект лекцій призначено для студентів усіх форм навчання спеціальності 185 – Нафтогазова інженерія та технології і складений відповідно до робочої програми дисципліни «Електротехніка та електропостачання». Дисципліна містить два змістових модулі (ЗМ). Перший ЗМ має назву «Електричні і магнітні кола. Електромагнітні пристрої та електричні машини. Основи електроніки, електронні пристрої», а другий – «Електромеханічні властивості електроприводу. Електропостачання та електрообладнання». Перші п'ять розділів конспекту лекцій відносяться до першого ЗМ, останні два – до другого.

# 1 ЕЛЕКТРИЧНІ І МАГНІТНІ КОЛА

## 1.1 Основні поняття електротехніки

Основою всіх електромагнітних явищ є електромагнітне поле та електричний заряд.

*Електромагнітне поле* – особливий вид матерії, яка проявляється силовою дією на електрично заряджені частинки. Таке поле у кожній точці простору поєднує дві його складові – електричне та магнітне поля.

*Електричний заряд ( $q$ )* є джерелом електромагнітного поля, яке пов'язане з матеріальним носієм. Це внутрішній параметр елементарної частинки, який зумовлює її здатність до взаємодій. Вимірюється в кулонах (Кл).

*Електричний струм ( $I$ )* – впорядкований рух заряджених частинок. Сила струму дорівнює відношенню величини електричного заряду, який проходить за малий проміжок часу крізь визначений переріз провідника. Вимірюється в амперах (А).

Потенціальну здатність електричного поля характеризує його *потенціал ( $\phi$ )* – відношення роботи поля, яку воно виконує по переміщенню заряду  $q$  з певної точки в нескінченно віддалену точку, до величини самого заряду. Вимірюється в вольтах (В).

*Електрична напруга ( $U$ )* є різницею потенціалів точок простору і чисельно дорівнює роботі по переміщенню одиничного додатного заряду з точки  $a$  до точки  $b$ . Вимірюється в вольтах (В).

*Електрорушійна сила (ЕРС, позначення –  $E$ )* – величина, яка характеризує дію сторонніх сил у джерелах змінного або постійного струму. Вимірюється в вольтах (В).

*Електричне коло* – це сукупність пристроїв, призначених для передачі, розподілу і взаємного перетворення електромагнітної та інших видів енергії та інформації.

*Електрична схема* – зображення властивостей елементів електричного кола за допомогою умовних позначень на будь-якому носії.

Основними поняттями, що характеризують електричні схеми є *вітка, вузол, контур*.

*Вітка* – ділянка кола, вздовж якої протікає один і той же струм; утворюється вітка кількома послідовно з'єднаними елементами.

*Вузол* – точка на схемі, де з'єднуються три і більше вітки. *Вітки*, приєднані до одних і тих самих вузлів, зветься паралельними.

*Контур* – будь-який замкнутий шлях, що проходить по декількох вітках.

Основними елементами електричного кола є:

- джерела електричної енергії – пристрої, що перетворюють механічну, теплову, хімічну та інші види енергії в електромагнітну (генератор, акумуляторна батарея);
- перетворювачі електромагнітної енергії (трансформатори, перетворювачі частоти);
- пристрої передачі електромагнітної енергії (лінії електропередачі);
- споживачі електромагнітної енергії, що перетворюють електромагнітну енергію на інші види енергії (механічну, теплову, хімічну тощо) [1].

## 1.2 Закони електротехніки

### Закон Ома

В залежності від типу ділянки кола, для якого його застосовують, має такі варіанти формулювання.

Перше формулювання закону Ома для ділянки кола, що не має у своєму складі джерела ЕРС (рис. 1.1, а) – сила струму  $I$  прямопропорційна напрузі  $U$  і оберненопропорційна опору  $R$  ділянки кола:

$$I = \frac{U_{ab}}{R}. \quad (1.1)$$

Друге формулювання закону Ома – для ділянки кола, що має у своєму складі ЕРС (рис. 1.1, б). Для такої ділянки будуть справедливими вирази:

$$\left. \begin{array}{l} U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b \\ \varphi_a = \varphi_c + I \cdot R \\ \varphi_c = \varphi_b - E \end{array} \right\} \Rightarrow \varphi_a - \varphi_b = \varphi_c + I \cdot R - \varphi_c - E. \quad (1.2)$$

З попереднього виразу маємо  $U_{ab} = I \cdot R - E$ , або

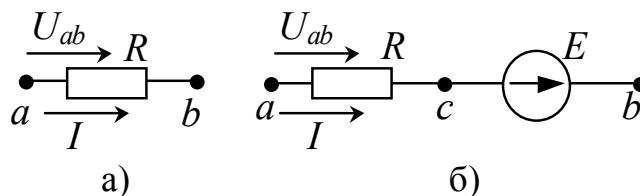


Рисунок 1.1 – Ділянки кола:  
а) – без ЕРС; б) – з ЕРС.

$$I = \frac{U_{ab} + E}{R}. \quad (1.3)$$

Третє формулювання закону Ома для ділянки кола, що має у своєму складі кілька джерел спрямованих у різні сторони та кілька опорів матиме вигляд:

$$I = \frac{U_{ab} \pm E_i}{\sum R_i}. \quad (1.4)$$

Примітка: коли напрями ЕРС  $E_i$  та напруги  $U_{ab}$  співпадають з напрямом струму  $I$  на ділянці  $ab$ , то у чисельнику беремо  $E_i$  та напругу  $U_{ab}$  зі знаками «+», та навпаки [2].

### Перший закон Кірхгофа

Алгебраїчна сума миттєвих значень струмів віток, що сходяться у вузлі електричного кола, дорівнює нулю, тобто

$$\sum_{k=1}^m i_k = 0, \quad (1.5)$$

де  $m$  – кількість віток, що сходяться у даному вузлі.

Або, наприклад, за додатний напрямок струму обираючи напрямок до вузла, маємо для рисунку 1.2 –  $-i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$ .

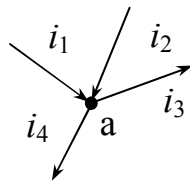


Рисунок 1.2 – Вузол на електричній схемі

### Другий закон Кірхгофа

У замкнутому контурі електричного кола алгебраїчна сума миттєвих значень напруг на всіх його ділянках дорівнює нулю [1], тобто

$$\sum_{k=1}^n u_k = 0, \quad (1.6)$$

де  $n$  – кількість елементів у контурі.

Для контура, який показано на рисунку 1.3, приймаємо напрямок обходу за годинниковою стрілкою і, з урахуванням зроблених позначень напруг і вказаних їхніх додатних напрямків, одержимо:

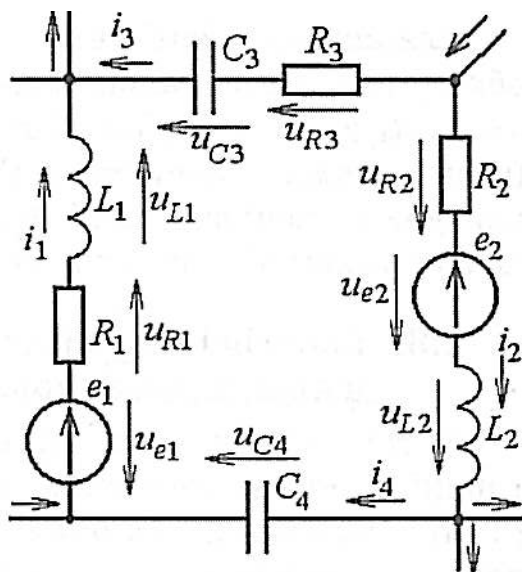


Рисунок 1.3 – Контур на електричній схемі

$$u_{R1} + u_{L1} - u_{C3} - u_{R3} + u_{R2} + u_{e2} + u_{L2} + u_{C4} - u_{e1} = 0 \quad (1.7)$$



Якщо для джерел замінити напруги на *EPC* на підставі  $u_{e1} = e_1; u_{e2} = e_2$  то отримаємо модифіковане рівняння (1.7), тобто у замкненому контурі алгебраїчна сума миттєвих значень спадів напруги на пасивних елементах дорівнює алгебраїчній сумі миттєвих значень *EPC* джерел [2]:

$$u_{R1} + u_{L1} - u_{C3} - u_{R3} + u_{R2} + u_{L2} + u_{C4} = e_1 - e_2. \quad (1.8)$$

У колах постійного струму зберігається те саме, тільки треба брати постійні напруги та постійні *EPC*, наприклад, у загальному випадку:

$$\sum_{k=1}^n U_k = 0 \quad \text{або} \quad \sum_{k=1}^{n_R} R_k I_k = \sum_{k=1}^{n_E} E_k. \quad (1.9)$$

### Закон Джоуля – Ленца

Теплова енергія, що виділяється в провіднику, або в іншому об'єкті, який має резистивні властивості (*R*) (рис. 1.1, а), дорівнює добутку квадрата сили струму *I* (у випадку змінного струму – його діючого значення), опору об'єкта *R* і часу, протягом якого відбувається процес нагрівання [1]:

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

### Закон електромагнітної індукції

*EPC* індукції в замкнутому контурі дорівнює за модулем швидкості зміни магнітного потоку через поверхню, обмежену контуром (рис. 1.4).

Беручи до уваги правило Ленца, *EPC* індукції можна знайти як відношення зміни магнітного потоку до часу, взятому зі знаком мінус. Якщо замість контуру взяти котушку, то при обчисленні необхідно враховувати кількість витків.

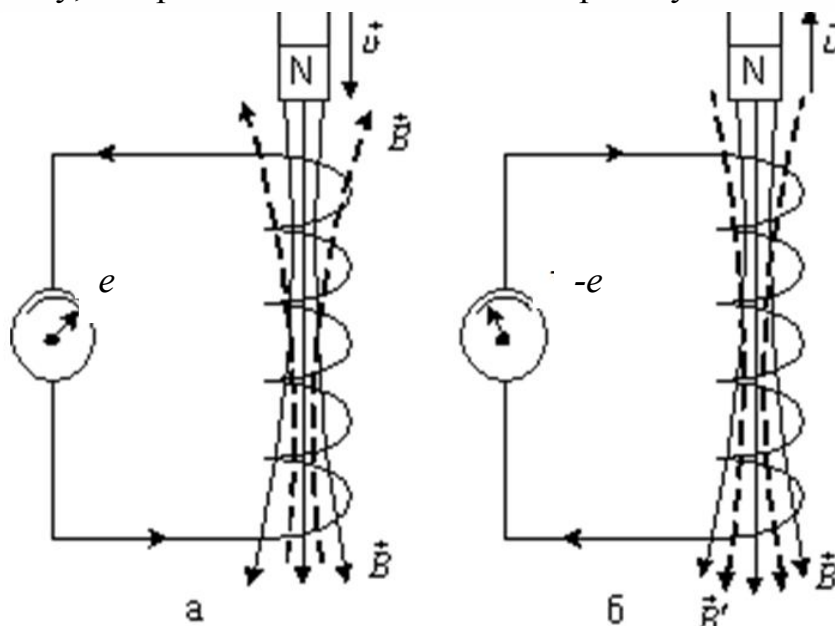


Рисунок 1.4 – Модель котушки із струмом:

а – з додатним напрямком струму;

б – з протилежним напрямком струму

Якщо у послідовно з'єднаних контурах відбувається однакова зміна магнітного потоку, то  $EPC$  індукції в них дорівнює сумі  $EPC$  індукції у кожному з контурів. Тому при зміні магнітного потоку в котушці, яка складається з однакових витків дроту, загальна  $EPC$  індукції більша від  $EPC$  індукції у контурі [1].

### 1.3 Основні параметри і властивості елементів електричних кіл. Резистивний опір, ємність, індуктивність

Споживачі електромагнітної енергії, як частини електричного кола, на електричній схемі зазвичай з метою проведення електротехнічних розрахунків зображують через опір, ємність, індуктивність. Вони на схемах заміщення зображують такі властивості (рис. 1.1):

- резистивний опір – ідеалізований елемент, у якому відбувається перетворення електричної енергії у інший вид енергії (одиниця вимірювання – Ом);
- ємність – ідеалізований елемент, що зображує на схемі заміщення властивість або здібність електротехнічного об'єкта накопичувати енергію електричного поля (одиниця вимірювання – Ф (Фарада));
- індуктивність – ідеалізований елемент, що зображує на схемі заміщення властивість електротехнічного об'єкта накопичувати енергію магнітного поля (одиниця вимірювання – Гн (Генрі))

Треба відзначити:

- резистор – реальний об'єкт, який має резистивні властивості;
- конденсатор – реальний об'єкт, який може бути на схемі заміщення представлений ємністю;
- індуктивність на схемі заміщення деякою мірою замінює котушку індуктивності, але для більш адекватної заміни потрібне послідовне з'єднання з індуктивним елементом резистивного опору, через те що довгий дріт обмотки котушки має резистивний опір.

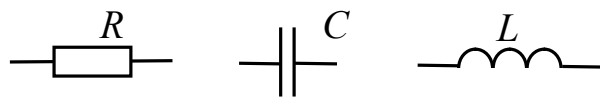


Рисунок 1.5 – Умовні позначення резистивного опору, ємності та індуктивності

### 1.4 Джерела напруги і струму та споживачі електричної енергії

До джерел електромагнітної енергії відносять джерела напруги і джерела струму. Джерела є причиною виникнення струмів і напруг в електричних колах.

Для аналізу кіл використовують поняття ідеалізованих джерел напруги та струму. Під ідеалізованим *джерелом напруги* розуміють таке джерело, напруга

$U$  на затискачах якого не залежить від струму, що протікає через нього і яке характеризують тільки електрорушійною силою. На рисунку 1.6 зображені джерела напруги і їхні вольт-амперні характеристики, тобто залежність напруги джерела від струму, що протікає крізь нього [2].

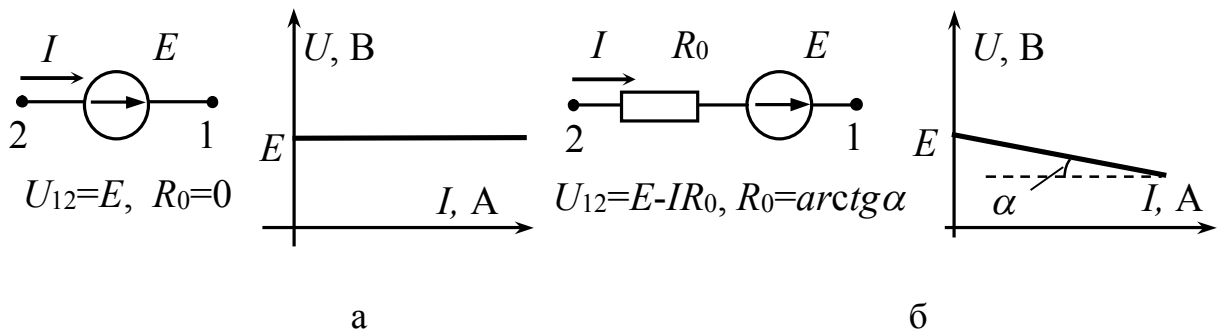


Рисунок 1.6 – Джерела напруги з їхніми ВАХ: а – ідеалізоване; б – неідеалізоване

Якщо джерело напруги неідеалізоване, то воно має внутрішній опір, і тому напруга на затискачах залежить від значення струму, що протікає.

Під ідеалізованим *джерелом струму* розуміють таке джерело енергії, сила струму якого  $j$  не залежить від навантаження, до якого це джерело підімкнене (внутрішній опір такого джерела  $R_0 \rightarrow \infty$ ). Умовне позначення ідеалізованого джерела струму та його ВАХ представлені на рисунку 1.7.

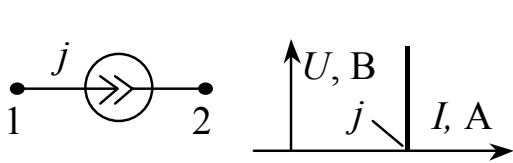


Рисунок 1.7 – Ідеалізоване джерело струму

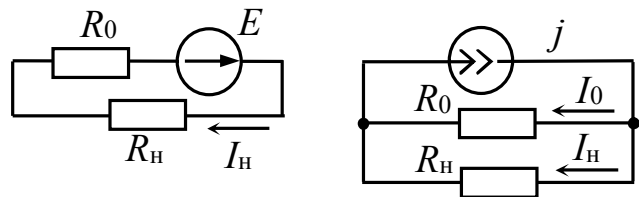


Рисунок 1.8 – Схеми заміщення реальних джерел: а – напруги; б – струму

Фізично виконати ідеалізовані джерела струму та напруги неможливо, тому при розрахунку електричних кіл реальне джерело напруги з ЕРС  $E_0$  та внутрішнім опором  $R_0$ , що з'єднане з навантаженням, може бути представлено двома способами (рис. 1.8,а та рис. 1.8,б).

## 1.5 Методи розрахунку електричних кіл

### Розрахунок електричних кіл постійного струму

Електричні кола постійного струму в чистому вигляді зустрічаються досить нечасто. Проте на їхньому прикладі прийнято вивчати структурні поняття і методи розрахунку електричних кіл узагалі, тому що супутні цьому розрахунку вирази й обчислювальні процедури є значно простішими, ніж для електричних кіл синусоїдного струму.

Розрахунки електричних кіл проводять із використанням електричних схем заміщення. Звичайним завданням розрахунку електричного кола є визначення струмів, напруг та потужностей на ділянках кола. При цьому відомим є елементи, що утворюють коло, їх параметри (напруга джерел енергії, опори елементів та інші), та конфігурація кола (відповідно кількість віток та вузлів у схемі).

На початку розрахунку довільним чином потрібно вказати напрямки струмів у всіх вітках кола (однак, звичайно орієнтуються на вказані напрямки напруги або *ЕРС* джерел).

Додатний напрямок *ЕРС* джерела *E* вибирається від мінусового затискача до плюсового. Додатний напрямок напруги  $U_E$  на ідеальному джерелі *ЕРС* протилежний його напрямку *E*. Якщо з яких-небудь причин у складному електричному колі передбачити напрямок якогось струму не вдається, то напрямком задаються довільно, адже остаточно він визначається знаком струму, отриманим після розрахунку (при від'ємному значенні його напрямку протилежний раніше вибраному).

Співвідношення струмів, напруг і *ЕРС* в електричних колах визначається законом Ома і законами Кірхгофа [2].

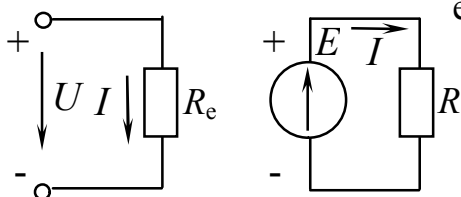
### 1.5.1 Метод еквівалентних перетворень

Розгалужені кола з одним джерелом *ЕРС* доцільно розраховувати методом еквівалентних перетворень, який полягає в заміні ділянок кола еквівалентними опорами для спрощення схеми. У таблиці 1.1 наведено схеми ділянок кола, еквівалентні їм схеми і формули для визначення еквівалентних опорів. Перетворення електричного кола називається еквівалентним, якщо в його частинах, які не змінилися, напруги і струми зберігаються.

У загальному випадку для найбільш часто вживаних з'єднань є таблиця еквівалентних перетворень.

Таким чином, крок за кроком спрощують схему кола і зрештою приводять її до одного еквівалентного опору  $R_e$  по відношенню до затискачів джерела живлення  $U$  або  $E$ .

У такій ситуації струм джерела, який проходить і через еквівалентний елемент з опором  $R_e$ , знаходиться за законом Ома:

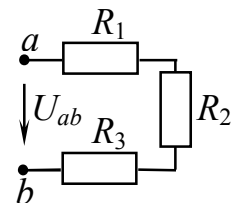
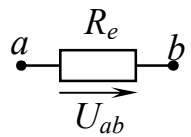
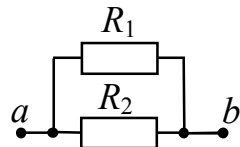
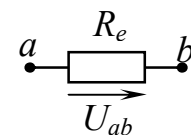
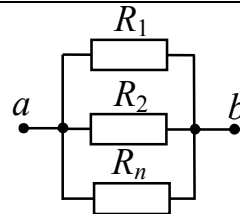
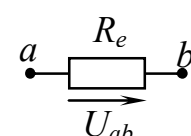
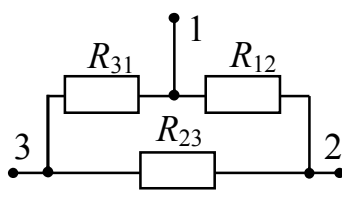
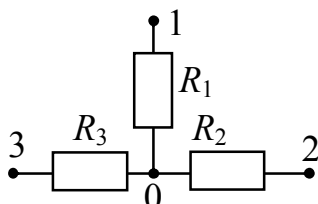
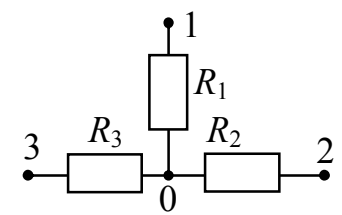
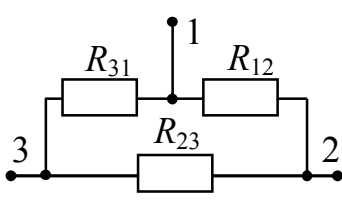


$$I = \frac{U}{R_e} \text{ або } I = \frac{E}{R_e}.$$

Рисунок 1.9 – Схеми простих електричних кіл

Потім проводять зворотний рух по кроках перетворення схеми кола до вихідної. При цьому по черзі розраховують напруги на ділянках кола за вже відомими струмами і розподіл струмів у всіх вітках кола [1].

Таблиця 1.1 – Еквівалентні перетворення

Тип з'єднання	Схема ділянки кола	Еквівалентна схема ділянки кола	Формули еквівалентних опорів
Послідовне			$R_e = R_{ab} = \sum_{k=1}^n R_k$
Паралельне (два резистивних елемента)			$R_e = R_{ab} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$
Паралельне			$R_e = \frac{1}{\sum_{k=1}^n \frac{1}{R_k}}$
Трикутник			$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$ $R_2 = \frac{R_{23} \cdot R_{12}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$ $R_3 = \frac{R_{13} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$
Зірка			$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}$ $R_{13} = R_1 + R_3 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_2}$ $R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}$

### 1.5.2 Метод застосування законів Кірхгофа

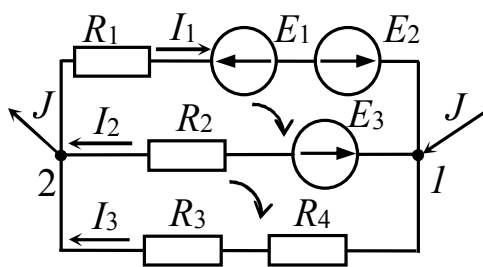


Рисунок 1.10 – Електричне коло

За першим законом Кірхгофа для схеми треба скласти  $(n-1)$  рівнянь, де  $n$  – кількість вузлів у схемі. За другим законом Кірхгофа треба складати  $(m-n+1)$  рівнянь, де  $m$  – кількість віток у схемі з невідомими струмами (якщо вітка містить джерело струму, то струм цієї вітки відомий). Отже, система рівнянь за законами Кірхгофа повинна мати  $m$  рівнянь, скільки і невідомих струмів.

Приклад складання системи рівнянь за законами Кірхгофа для схеми рисунку 1.1:

$$\begin{cases} I_1 - I_2 - I_3 + j = 0 \\ I_1 \cdot R_1 + I_2 \cdot R_2 = E_2 - E_1 - E_3 \\ -I_2 \cdot R_2 + I_3 \cdot (R_3 + R_4) = E_3. \end{cases} \quad (1.11)$$

Далі застосовуючи відомі параметри опорів та *EPC* обчислюють систему, знаходячи її корені – невідомі значення струмів. Після їхнього визначення зазвичай проводять перевірку правильності розрахунків (наприклад, складаючи баланс потужностей).

### 1.5.3 Енергетичний баланс в електричних колах постійного струму

На підставі закону збереження енергії кількість тепла, що виділяється в опорах схеми, повинна дорівнювати енергії, яка постачається за той же самий час джерелами енергії, тобто потужність джерел енергії (напруги і струму) дорівнює потужності, що споживається опорами схеми:

$$\sum_{i=1}^k (\pm E_i \cdot I_i) + \sum_{i=1}^p J_i \cdot U_{ab} = \sum_{i=1}^l I_i^2 \cdot R_i, \quad (1.12)$$

де  $k$  – кількість *EPC* у схемі;

$p$  – кількість джерел струму у схемі;

$l$  – кількість опорів у схемі;

$U_{ab}$  – напруга між умовною точкою  $a$ , куди втікає струм джерела струму  $J_i$ , та умовною точкою  $b$ , звідки струм цього джерела струму витікає.

Правило складання балансу: якщо напрямок джерела *EPC*  $E_i$  і напрямок струму  $I_i$ , що протікає через нього, збігаються, то доданок  $E_i \cdot I_i$  беремо зі знаком +, навпаки – зі знаком -.

Приклад балансу для схеми рисунку 1.10:

$$-E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_1 - E_3 \cdot I_2 + J \cdot U_{12} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot (R_3 + R_4). \quad (1.13)$$

## 1.6 Синусоїдний струм

### 1.6.1 Основні величини, що характеризують синусоїдний струм

Струм, що змінюється за законом синуса, називається *синусоїдним* (рис. 2.1). Миттєве значення такого струму

$$i = I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) = I_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) = I_m \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t + \varphi\right), \quad (1.14)$$

де  $I_m$  – амплітудне, тобто максимальне значення струму, А;

$\varphi$  – початкова фаза зсуву синусоїди відносно нуля координат, радіани;

$T$  – період (час, за який відбувається одне повне коливання), с;

$f$  – частота коливань (кількість коливань за секунду),  $1/c=Гц$ ;

$\omega$  – кутова частота,  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ , рад/с;

$(\omega \cdot t + \varphi)$  – фаза, аргумент синуса, визначає стан коливання [2].

Якщо у синусоїдних величин однієї частоти однакові початкові фази, то такі величини синфазні; якщо різниця фаз між синусоїдними функціями становить  $\pm \pi$ , то ці функції знаходяться у протифазі. Синусоїдні струми відносно низьких частот отримують за допомогою синхронних генераторів, а високої частоти (більш десятків кілогерц) – за допомогою напівпровідникових генераторів.

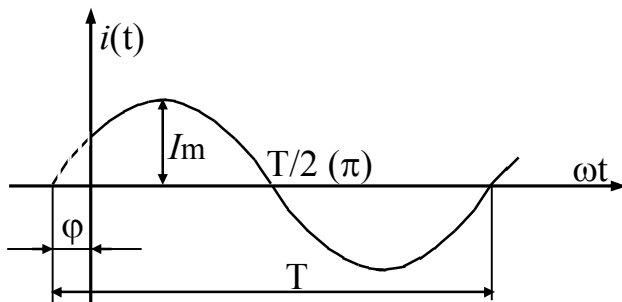


Рисунок 1.11 – Синусоїда струму

На рисунку 1.11 показана крива миттєвого значення струму ( $\varphi > 0$ ).

Синусоїдна величина характеризується такими значеннями: миттєвим, амплітудним, середнім, діючим.

Середнє значення синусоїдної величини – це її середнє значення за половину періоду:

$$I_{cp} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \cdot \sin \omega t \, dt = \frac{2}{\pi} \cdot I_m, \quad I_{cp} \approx 0,638 \cdot I_m. \quad (1.15)$$

Діюче значення синусоїдного струму чисельно дорівнює значенню постійного струму, який за час, що дорівнює періоду  $T$ , викликає виділення такої кількості тепла в провіднику з опором  $R$ , що і синусоїдний струм за той же час  $T$ .

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \cdot \sin \omega t \, dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \, dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 \cdot I_m. \quad (1.16)$$

### 1.6.2 Синусоїдний струм активного опору, індуктивності, ємності

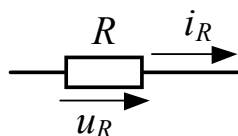


Рисунок 1.12 – Активний опір

#### Синусоїдний струм активного опору

Взагалі активний опір резистора на змінному струмі ( $R_{\sim}$ ) є дещо більшим, ніж активний опір того ж резистора на постійному струмі ( $R_{\_}$ ), унаслідок явищ концентрації струму в поверхневих шарах провідника (поверхневий ефект) і ефекту близькості. Будемо вважати, що  $R_{\sim} = R_{\_}$ .

Розглянемо процес протікання синусоїдного струму через активний опір  $i = I_m \cdot \sin \omega t$ . За законом Ома

$$u_R = i \cdot R = I_m \cdot R \cdot \sin \omega t = U_m \cdot \sin \omega t, \quad (1.17)$$

де  $U_m = I_m \cdot R$  – амплітудне значення напруги на активному опорі. З цього ви-

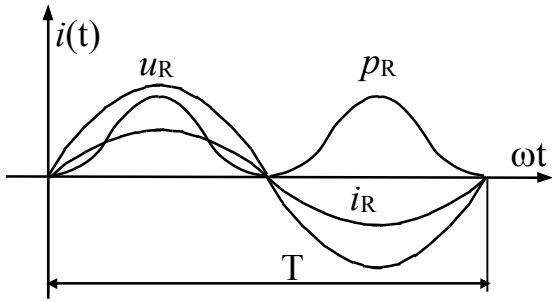


Рисунок 1.13 – Хвильові діаграми

тікає, що струм і напруга на активному опорі співпадають за фазою (різниця фаз між напругою і струмом дорівнює нулю:  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 0$ ) (рис.1.13).

*Миттєва, активна потужність  
активного опору*

Швидкість надходження енергії від джерел характеризується потужністю.

*Миттєва потужність* – добуток миттєвої напруги на ділянці кола на миттєвий струм. Для активного опору:

$$p_R = u_R \cdot i_R = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot (1 - \cos(2 \cdot \omega t)). \quad (1.18)$$

Таким чином, миттєва потужність має постійну складову  $\frac{U_m \cdot I_m}{2}$ , та змінну складову  $\frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega t)$ . Миттєва потужність в активному опорі додатна з частотою в 2 рази більшою за частоти синусоїдного струму [2].

Активна потужність – це середнє значення миттєвої потужності за період:

$$P_R = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} p_R dt = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot 2 \cdot \pi = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = U \cdot I = I^2 \cdot R. \quad (1.19)$$

### *Синусоїдний струм індуктивності*

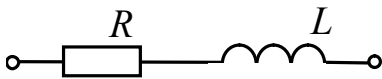


Рисунок 1.14 – Схема заміщення котушки індуктивності

Будь-яка обмотка (катушка) має індуктивність і активний опір. На схемі катушку позначають як показано на рисунку 1.14. Як відомо, *індуктивність* – це елемент схеми заміщення, який дозволяє вра-

хувати при розрахунках явища самоіндукції і накопичування енергії магнітного поля. Розглянемо тільки індуктивність (рис.1.15). Нехай по неї тече синусоїдний струм:  $i = I_m \cdot \sin \omega t$ . У катушці наводиться ЕРС:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -\omega \cdot L \cdot I_m \cos(\omega t) = -\omega \cdot L \cdot I_m \sin(\omega t + 90^\circ). \quad (1.20)$$



Додатний напрямок  $EPC$  співпадає зі струмом, миттєве значення напруги на індуктивності дорівнює:

$$u_L = \varphi_a - \varphi_b = -e_L = L \frac{di}{dt} = \omega \cdot L \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{mL} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (1.21)$$

$$U_{mL} = I_m \cdot \omega \cdot L = I_m \cdot X_L, \quad (1.22)$$

$$X_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L, \quad (1.23)$$

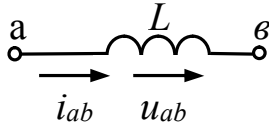


Рисунок 1.15 – Індуктивність

Формули (1.22) і (1.23) – максимальна напруга на індуктивному елементі та індуктивний опір відповідно.

З (1.21) видно, що напруга в індуктивності випереджає струм на  $90^\circ$  (різниця фаз між напругою і струмом дорівнює:  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = 90^\circ$ ), тобто якщо  $u_L = 0$ , то  $i_L = \max$  (рис.1.16).

Миттєва потужність індуктивності:

$$p_L = u_L \cdot i_L = U_{mL} \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega t). \quad (1.24)$$

Миттєва потужність індуктивності може мати додатний знак (індуктивність накопичує енергію, що береться з джерела), і від'ємний (індуктивність віддає енергію до джерело) – рисунок 1.16.

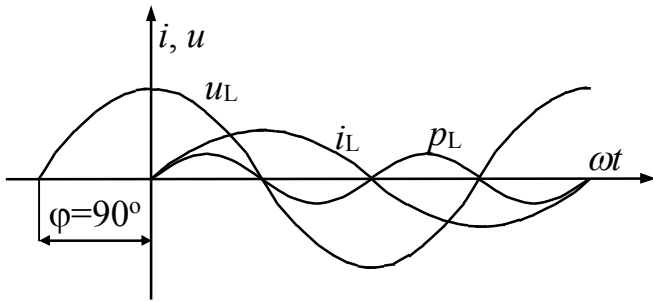


Рисунок 1.16 – Хвильові діаграми

Активна потужність індуктивності – середнє значення миттєвої потужності за період дорівнює нулю:

$$P_L = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} p_L dt = 0. \quad (1.25)$$

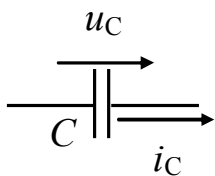


Рисунок 1.17 – Ємність

### Синусоїдний струм ємності

Ємність (рис. 1.17) як елемент схеми заміщення дозволяє врахувати явища заряду конденсатора і накопичування енергії електричного поля. Коли  $u_C = const$ , то

$$i_C = \frac{dq}{dt} = 0. \quad (1.26)$$

Якщо  $u_C = U_m \cdot \sin(\omega t)$ , то  $q = C \cdot u_C = C \cdot U_m \cdot \sin(\omega t)$  і конденсатор періодично перезаряджається, що супроводжується протіканням через нього зарядного струму:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \cdot \frac{du_C}{dt} = \frac{d(C \cdot U_{mC} \cdot \sin(\omega t))}{dt} = \omega \cdot C \cdot U_{mC} \cdot \cos(\omega t) = \\ = \frac{1}{X_C} \cdot U_{mC} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) = U_{mC} \cdot \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (1.27)$$

де  $U_{mC} = I_m \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} = I_m \cdot X_C$  – амплітудне значення напруги на ємності, (1.28)

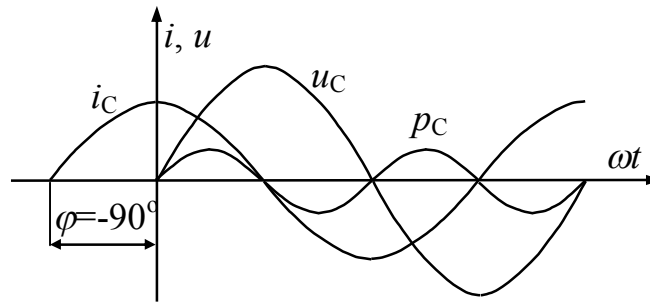


Рисунок 1.18 – Хвильові діаграми

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \text{ – ємнісний опір, Ом.} \quad (1.29)$$

З (1.27) видно, що струм ємності випереджає напругу на ній на  $90^\circ$  (різниця фаз між ними:  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i = -90^\circ$ ). Тобто, якщо  $u_C = 0$ , то  $i_C = \max$  (рис. 1.18).

Миттєва потужність ємності (знакозмінна):

$$p_C = u_C \cdot i_C = U_{mC} \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \cos(\omega t) = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \sin(2 \cdot \omega t). \quad (1.30)$$

Активна потужність ємності:  $P_C = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2 \cdot \pi} p_C dt = 0$  (1.31)

### 1.6.3 Тригонометричний метод розрахунку кіл синусоїдного струму

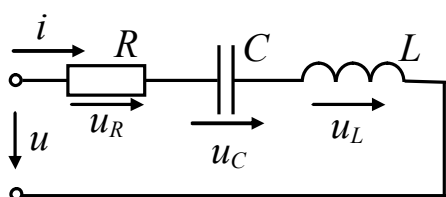


Рисунок.1.19 – Електричне коло

Розглянемо послідовне з'єднання активного опору, ємності, індуктивності (рис.1.19). Нехай до кола прикладена синусоїдна напруга  $u_C = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ . У колі протікає синусоїдний струм –  $i = I_m \cdot \sin \omega t$ .

За другим законом Кірхгофа для миттєвих значень:

$$u = u_R + u_C + u_L. \quad (1.32)$$

З урахуванням раніш розглянутого

$$u = I_m R \sin(\omega t) - I_m X_C \cos(\omega t) + I_m X_L \cos(\omega t), \text{ або} \\ U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = I_m \cdot (R \cdot \sin(\omega t) + \cdot \cos(\omega t) \cdot (X_L - X_C)). \quad (1.33)$$

Позначимо повний реактивний опір кола

$$X = X_L - X_C. \quad (1.34)$$

$$\text{Тоді } R \cdot \sin(\omega t) + X \cdot \cos(\omega t) = \sqrt{R^2 + X^2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) = Z \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.35)$$

$$\text{де } \varphi = \arctg \frac{X}{R} - \text{кут зсуву фаз між напругою } u \text{ і струмом } i; \quad (1.36)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} - \text{модуль повного опора кола.} \quad (1.37)$$

Отже вираз (1.33) можна записати:

$$U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi) = I_m \cdot Z \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (1.38)$$

$$\text{або } U_m = I_m \cdot Z. \quad (1.39)$$

Розглянемо схему рисунку 1.20 – паралельне з'єднання трьох елементів – активного опора, ємності й індуктивності.

На вході кола напруга та струм –  $u_C = U_m \cdot \sin(\omega t)$ ,  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ .

$$\text{Перший закон Кірхгофа: } i = i_R + i_C + i_L. \quad (1.40)$$

З урахуванням раніш розглянутого струми віток:

$$-i_R = U_m \cdot G \cdot \sin(\omega t); \quad (1.41)$$

$$-i_C = U_m \cdot B_C \cdot \cos(\omega t) = U_m \cdot \omega \cdot C \cdot \cos(\omega t); \quad (1.42)$$

$$-i_L = -U_m \cdot B_L \cdot \cos(\omega t), \quad (1.43)$$

$$\text{де } G = \frac{1}{R} - \text{активна провідність,} \quad (1.44)$$

$$B_C = \omega \cdot C - \text{реактивна ємнісна провідність,} \quad (1.45)$$

$$B_L = \frac{1}{\omega \cdot L} - \text{реактивна індуктивна провідність.} \quad (1.46)$$

Тоді вираз (1.40) набуде такого вигляду

$$I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U_m \cdot [G \cdot \sin(\omega t) - (B_L - B_C) \cdot \cos(\omega t)], \text{ або} \quad (1.47)$$

$$I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U_m \cdot \sqrt{G^2 + B^2} \cdot \sin(\omega t - \varphi), \quad (1.48)$$

$$\text{де } \varphi = \arctg \frac{B_L - B_C}{G} = \arctg \frac{B}{G} - \text{кут зсуву фаз між напругою } u \text{ і струмом } i, \quad (1.49)$$

$$B = B_L - B_C - \text{реактивна провідність.} \quad (1.50)$$

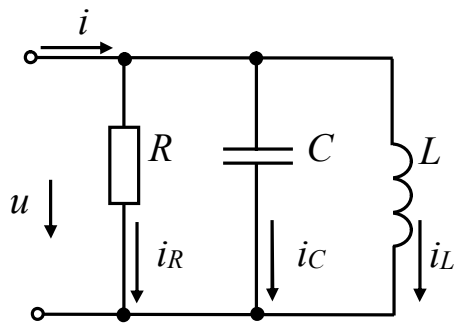


Рисунок 1.20 –  
Електричне коло

Застосуємо позначення:

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} \quad (1.51)$$

повна провідність кола.

Остаточно маємо:

$$I_m = U_m \cdot Y \quad (1.52)$$

Наведені формули є основою для розрахунку найпростіших кіл синусоїдного струму тригонометричним методом.

#### 1.6.4 Потужність в колах синусоїдного струму (активна, реактивна, повна)

Розрізняють повну, активну, реактивну потужності.

Припустимо, до якоїсь складного кола прикладена синусоїдна напруга  $u = U_m \cdot \sin(\omega t)$ , на вході кола тече синусоїдний струм  $i = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ .

Миттєва потужність:

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \cdot \sin(\omega t) \cdot \sin(\omega t - \varphi) = U \cdot I \cdot (\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)). \quad (1.53)$$

Активна потужність – середнє значення  $p$  за період, тобто енергія, що виділяється в одиницю часу у вигляді теплоти на ділянці кола, що містить опір  $R$ :

$$P = \frac{1}{2 \cdot \pi} \int_0^{2\pi} p \, dt = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{U_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos \varphi \cdot 2 \cdot \pi = U \cdot I \cdot \cos \varphi, \quad (1.54)$$

де  $\cos \varphi$  – коефіцієнт потужності.

При розрахунках синусоїдних кіл застосовують поняття *реактивної* потужності:

$$Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi. \quad (1.55)$$

Реактивна потужність додатна при відстаючому струмі ( $R$ - $L$  навантаження,  $\varphi > 0$ ) і від'ємна при випереджаючому струмі ( $R$ - $C$  навантаження,  $\varphi < 0$ ). Тобто індуктивність можна розглядати як споживач реактивної енергії, а ємність – як її генератор.

Оскільки електричні машини й апарати конструюють для роботи на певні значення струмів і напруг, то їх характеризують не активною, що залежить від  $\cos \varphi$ , а *повною* потужністю:

$$S = U \cdot I \quad (1.56)$$

Повна потужність показує ту активну потужність, яку джерело енергії може віддати споживачу, якщо останній працює при  $\cos \varphi = 1$  [3].

## 1.7 Застосування комплексних чисел для розрахунку електричних кіл

Розрахунок електричних кіл суттєво полегшується, якщо зображувати синусоїдні величини векторами, або комплексними числами.

Відповідно до формули Ейлера комплексне число  $e^{j\alpha}$  дорівнює:  $e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$ , і на комплексній площині зображується вектором, що має одиничну довжину та складає з віссю дійсних чисел кут  $\alpha$  (рис. 1.21). Проекція

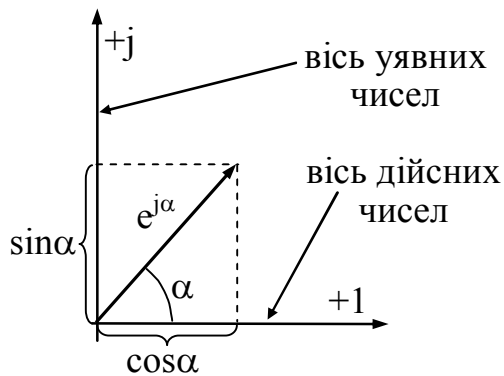


Рисунок 1.21 – Комплексна площина

$e^{j\alpha}$  на вісь дійсних чисел -  $\cos \alpha$ , а на вісь уявних чисел -  $\sin \alpha$ ;  $j = \sqrt{-1}$  - уявна одиниця. Якщо замість числа  $e^{j\alpha}$  розглянути число  $I_m \cdot e^{j\alpha}$ , то відповідно до формули Ейлера  $I_m \cdot e^{j\alpha} = I_m \cdot \cos \alpha + j I_m \cdot \sin \alpha$ , і на комплексній площині воно зображується вектором, що має довжину  $I_m$  і також складає з віссю дійсних чисел кут  $\alpha$ . Кут  $\alpha$  може бути будь-яким.

Припустимо, що  $\alpha = \omega \cdot t + \varphi$ , тоді

$$I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) + j I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi), \quad (1.57)$$

де  $I_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)$  - дійсна частина,

$I_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)$  - коефіцієнт при уявній одиниці  $j$ .

Таким чином, синусоїдний струм  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  можна уявити як проекцію вектора  $I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)}$ , що обертається з кутовою швидкістю  $\omega$ , на вісь уявних чисел. Якщо синусоїдна функція повністю характеризується амплітудою і початковою фазою при відомій частоті, то початкове положення вектора  $I_m \cdot e^{j(\omega t + \varphi)} = I_m \cdot e^{j\varphi} \cdot e^{j(\omega t)}$  повністю визначає синусоїдну функцію  $i = I_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$ , а комплексне число  $\underline{I}_m = I_m \cdot e^{j\varphi}$  зветься комплексною амплітудою струму ( $e^{j\omega t}$  - оператор обертання). Векторне зображення синусоїдних величин для нульового моменту часу дає наочну картину взаємного розташування комплексних амплітуд синусоїдних функцій і дозволяє легко проводити простіші операції.

На комплексній площині від'ємні кути відкладаються проти годинникової стрілки від осі дійсних чисел, від'ємні - за годинниковою стрілкою від осі дійсних чисел.

Приклад розв'язання задачі за допомогою комплексної площини.

Дано: схема на рисунку 1.22,  $i_1 = 10 \cdot \sin(\omega t - 60)$ ,  $i_2 = 5 \cdot \sin(\omega t + 30)$ .

Знайти: струм  $i$ .

За першим законом Кірхгофа для миттєвих значень струму  $i = i_1 + i_2$ .

Будуємо на комплексній площині вектори, що зображують струми  $i_1$ ,  $i_2$ , та складаємо їх для отримання загального струму  $i$ .

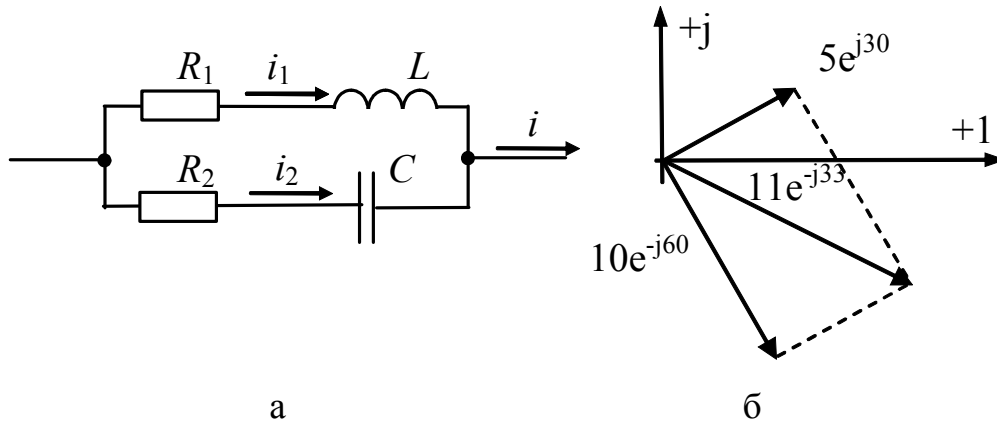


Рисунок 1.22 – Електрична схема (а) і векторна діаграма (б)

### 1.7.1 Форми запису комплексного числа. Дії з комплексними числами

Існують чотири *форми* запису комплексних чисел:

– показова –  $\underline{I}_m = 5 \cdot e^{j \cdot 30^\circ}$ ;

– полярна –  $\underline{I}_m = 5 \cdot \angle 30^\circ$ ;

– алгебраїчна –  $\underline{I}_m = 4,33 + j \cdot 2,5$ , де 4,33 – дійсна частина,  $j2,5$  – уявна;

– тригонометрична –  $\underline{I}_m = 5 \cdot \cos 30^\circ + j \cdot 5 \cdot \sin 30^\circ$ , як перехід від полярної форми ( $\underline{I}_m = 5 \cdot \angle 30^\circ$ ) до алгебраїчної ( $\underline{I}_m = 4,33 + j \cdot 2,5$ ).

Дії над комплексними числами:

– множення виконують у полярній або показовій формі, наприклад:

$$\underline{U}_m = \underline{I}_m \cdot \underline{Z} = 5 \cdot \angle 30^\circ \cdot 15 \cdot \angle -40^\circ = 75 \cdot \angle -10^\circ, \text{ В.}$$

– ділення виконують також у полярній або показовій формі, наприклад:

$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}} = \frac{75 \cdot \angle -10^\circ}{15 \cdot \angle -40^\circ} = 5 \angle 30^\circ, \text{ А}$$

– складання або вирахування виконують в алгебраїчній формі, наприклад:

$$\underline{I}_{m1} = 10 \angle (-60^\circ) = 10 \cdot \cos(-60^\circ) + j \cdot 10 \cdot \sin(-60^\circ) = 5 - j \cdot 8,66,$$

$$\underline{I}_{m2} = 5 \angle 30^\circ = 10 \cdot \cos 30^\circ + j 10 \cdot \sin 30^\circ = 4,33 + j \cdot 2,5,$$

$$\underline{I}_m = \underline{I}_{m1} + \underline{I}_{m2} = 5 - j \cdot 8,66 + 4,33 + j \cdot 2,5 = 9,33 - j \cdot 6,16.$$

Примітка:  $\frac{1}{j} = -j$ ; множення вектора на уявне число  $j$  означає його обертання на  $90^\circ$  проти годинникової стрілки.

### 1.7.2 Символічний метод розрахунку кіл синусоїдного струму.

#### Закони Ома і Кірхгофа в комплексній формі

Суть методу полягає в тому, що роблять перехід від системи інтегрально-диференціальних рівнянь, складених для миттєвих значень струмів і напруг, до системи алгебраїчних рівнянь, що складені відносно комплексних струмів, ЕРС і напруг. Синусоїдна величина зображується комплексним числом (символом), що заміщає її, диференціювання замінюється множенням на  $j\omega$ , а інтегрування - діленням на  $j\omega$ .

Розглянемо просте електричне коло (рис.1.19), до якого прикладена синусоїдна напруга  $u = U_m \cdot \sin(\omega t)$ , і в якому тече синусоїдний струм  $i = I_m \cdot \sin(\omega t - \varphi)$ . Інтегрально-диференціальне рівняння, що характеризує стан кола (другий закон Кірхгофа) -  $u = u_R + u_L + u_C = i \cdot R + L \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \int u_C dt$ . (1.58)

Алгебраїчне рівняння, складене відносно комплексів струму і напруг має вигляд:

$$\underline{U}_m = R \cdot \underline{I}_m + j \cdot \omega \cdot L \cdot \underline{I}_m - j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot \underline{I}_m = \underline{U}_{mR} + \underline{U}_{mL} + \underline{U}_{mC} \quad (1.59)$$

Формула (1.59) – другий закон Кірхгофа в комплексній формі.

Застосуємо позначення

$$X_L = \omega \cdot L, \quad X_C = \frac{1}{\omega \cdot C}, \quad X = X_L - X_C, \quad Z = \sqrt{R^2 + X^2} \quad (1.60)$$

відповідно, індуктивний, ємнісний, реактивний опори, модуль повного опора.

Тоді рівняння (1.59) набуде такого вигляду:

$$\underline{U}_m = \underline{I}_m \cdot \left( R + j \cdot \left( \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right) \right) = \underline{I}_m \cdot (R + j \cdot (X_L - X_C)) = \underline{I}_m \cdot Z \cdot \angle \varphi, \quad (1.61)$$

$$\text{де } \underline{Z} = R + j \cdot (X_L - X_C) = Z \angle \varphi - \text{комплекс повного опора кола;} \quad (1.62)$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} - \text{кут зсуву фаз між струмом і напругою.} \quad (1.63)$$

$$\text{Тоді } \underline{U}_m = \underline{I}_m \cdot \underline{Z} - \text{закон Ома в комплексній формі.} \quad (1.64)$$

Розглянемо коло (рис. 1.20), до якого прикладена синусоїдна напруга  $u = U_m \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  і на вході якого тече синусоїдний струм  $i = I_m \cdot \sin(\omega t)$ . Перший закон Кірхгофа для миттєвих значень струмів в інтегрально-диференціальній формі

$$i = i_R + i_L + i_C = u \cdot G + \frac{1}{L} \cdot \int u \cdot dt + C \frac{du}{dt}, \quad (1.65)$$

де  $i_L = \frac{1}{L} \cdot \int u \cdot dt$ ,  $i_C = C \frac{du}{dt}$ .

Алгебраїчне рівняння, складене відносно комплексів струму і напруг має такий вигляд:

$$\underline{I}_m = \underline{U}_m \cdot G + \frac{\underline{U}_m}{j \cdot \omega \cdot L} + \frac{\underline{U}_m}{-j \cdot \frac{1}{\omega \cdot C}} = \underline{I}_{mR} + \underline{I}_{mL} + \underline{I}_{mC}. \quad (1.66)$$

Рівняння (1.66) – перший закон Кірхгофа в комплексній формі.

### Висновки

- алгебраїчна сума комплексних струмів у вузлі дорівнює нулю  $\sum_{k=1}^n \underline{I}_k = 0$ ;
- алгебраїчна сума комплексних напруг уздовж замкнутого контуру дорівнює алгебраїчній сумі комплексних ЕРС, а саме  $-\sum_{k=1}^n \underline{U}_k = \sum_{k=1}^m \underline{E}_k$ ;
- оскільки в основі усіх розглянутих методів розрахунку кіл постійного струму лежать закони Кірхгофа, то всі вони можуть бути використані для розрахунку кіл синусоїдного струму в комплексній формі.

## 1.8 Трифазні електричні кола

### Загальні відомості

Трифазне електричне коло є окремим випадком багатофазних систем електричних кіл. Багатофазні системи електричних кіл представляють собою сукупність електричних кіл, в яких діють створені загальним джерелом енергії синусоїдні електрорушійні сили (ЕРС) однакової частоти та амплітуди, що відрізняються за фазою одна від одної на кут  $\frac{2 \cdot \pi}{m}$  ( $m$  – кількість фаз). Багатофазні системи бувають дво-, три-, чотири-, шести-, дванадцятифазними, але найбільш поширені в сучасній електроенергетиці – трифазні системи. Це пояснюється



рядом їх переваг в порівнянні як з однофазними, так і з іншими багатофазними електричними колами, а саме:

- економічність виробництва і передачі енергії в порівнянні з однофазними електричними колами;
- можливість простого отримання кругового обертового магнітного поля, необхідного для трифазного асинхронного двигуна;
- можливість отримання в одній установці двох експлуатаційних напруг - фазного та лінійного.

Таким чином, *трифазне електричне коло* – сукупність трифазної симетричної системи *ЕРС*, трифазного навантаження чи навантажень, та з'єднуючих проводів. Миттєві значення трьох синусоїдних *ЕРС* *трифазної симетричної системи* при прямому чергуванні фаз:

$$e_A = E_m \cdot \sin(\omega t); e_B = E_m \cdot \sin(\omega t - 120^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}); e_C = E_m \cdot \sin(\omega t + 120^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}), \quad (1.67)$$

де  $E_m$  – амплітуда фазних *ЕРС*.

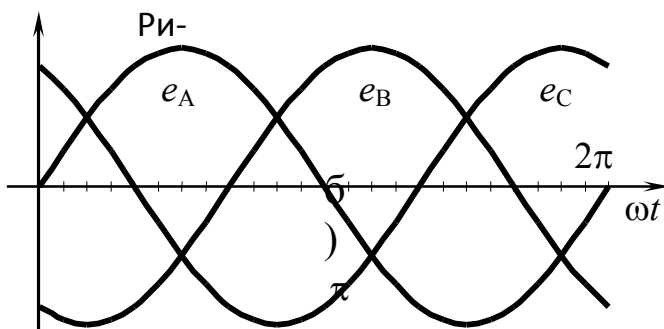


Рисунок 1.23 – Часові діаграми *ЕРС*

Часові діаграми фазних *ЕРС* зображені на рисунку 1.23.

При прямому чергуванні фаз, як бачимо з (1.20), *ЕРС* фази «С» випереджає *ЕРС* фази «А» на кут  $120^\circ$ , а *ЕРС* фази «В» відстає на той же кут від *ЕРС* фази «А».

Кожну з частин багатофазної системи, що характеризується однаковим струмом, прийнято називати *фазою* (друге значення поняття «фаза» в електротехніці – аргумент величини, що змінюється за синусоїдним законом).

Виводам обмоток трифазного генератора надають найменування «початок» і «кінець», початки позначають буквами А, В, С, а кінці – х, у, з.

#### *Основні схеми з'єднання трифазних кіл. Визначення лінійних і фазних величин*

Існують різні способи з'єднання обмоток генератора. З метою економії обмотки трифазного генератора (або трансформатора) з'єднують в «зірку» або «трикутник».

Якщо всі початки або кінці фазних обмоток з'єднані в один вузол (нейтральна точка) – таке з'єднання називають «зіркою» (рис. 1.24, а). Проводи, що з'єднують обмотки генератора з навантаженням, називають лінійними, а провід, що з'єднує нейтральні (нульові) точки генератора і навантаження називають

нейтральним (нульовим). Напругу між початком і кінцем обмотки генератора називають фазною і якщо в трифазній системі є нульовий провід, то фазна напруга – це напруга між початком будь-якої з фаз і нульовим проводом:

$$u_{AO}=e_A, u_{BO}=e_B, u_{CO}=e_C. \quad (1.68)$$

Напруги між будь-якими двома лінійними проводами – це лінійні напруги  $u_{AB}, u_{BC}, u_{CA}$  (рис. 1.24). Лінійні напруги дорівнюють різниці потенціалів між точками А та В, В та С, С та А або, що те ж саме, різниці фазних напруг.

У трифазній симетричній системі фазних ЕРС при з'єднанні обмоток «зіркою» лінійні напруги перевищують фазні в  $\sqrt{3}$  і зсунуті відносно фазних напруг на кут  $30^\circ$ :

$$u_{AB} = E_m \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\omega \cdot t + 30^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}); u_{BC} = E_m \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\omega \cdot t - 90^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ});$$

$$u_{CA} = E_m \cdot \sqrt{3} \cdot \sin(\omega \cdot t + 150^\circ \cdot \frac{\pi}{180^\circ}). \quad (1.69)$$

У комплексній формі

$$\underline{U}_{AB} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{AO} \cdot e^{j30^\circ}; \underline{U}_{BC} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{BO} \cdot e^{j30^\circ}; \underline{U}_{CA} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{CO} \cdot e^{j30^\circ}. \quad (1.70)$$

При з'єднанні обмоток в «трикутник» фазні обмотки генератора з'єднуються між собою послідовно таким чином, що початок однієї фази з'єднується з кінцем іншої фази (рис. 1.24, б). В цьому випадку лінійна напруга дорівнює фазній –  $U_L = U_\phi$ . Якщо до затискачів генератора не під'єднане навантаження, то по обмоткам не протікатиме струм.

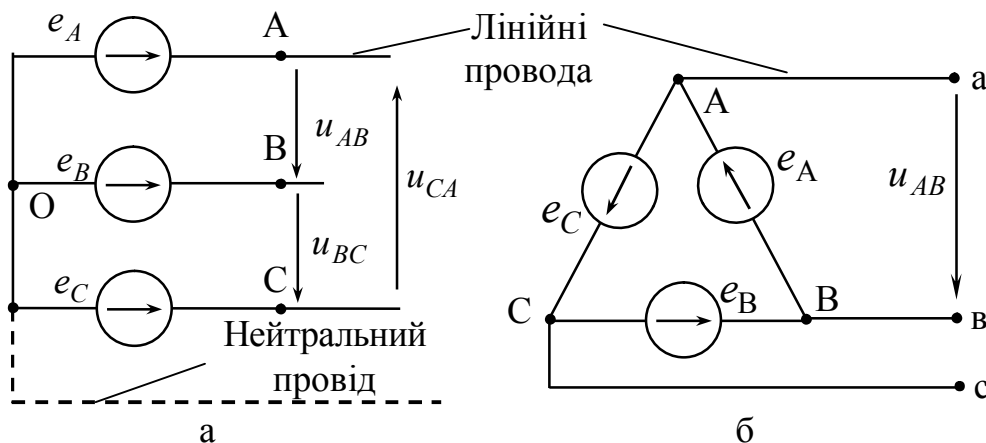


Рисунок 1.24 – Види з'єднань обмотки генератора

Так саме, як і обмотки генератора, три фази навантаження можуть з'єднуватись за схемою «зірка» або «трикутник», тому існують п'ять видів з'єднання трифазного генератора та навантаження:

– «зірка-зірка» з нейтральним проводом ( $Y/Y_0$ ) – схема рисунку 1.25;

- «зірка-зірка» без нейтрального проводу ( $Y/Y$ ) – схема рисунку 1.26;
- «зірка-трикутник» ( $Y/\Delta$ ) – схема рисунку 1.27;
- «трикутник-трикутник» ( $\Delta/\Delta$ );
- «трикутник-зірка» ( $\Delta/Y$ ).

В перших двох та останньому випадках струми, що протікають лінійними проводами (лінійні струми), дорівнюють струмам, що протікають по фазним навантаженням (фазні струми) [2].

#### *Розрахунок трифазних кіл*

Трифазне коло може працювати у двох основних робочих режимах – симетричному ( $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$ ) та несиметричному ( $\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$ ).

Незалежно від режиму для схеми «зірка-зірка» з нейтральним проводом (рис. 1.25) напруги на навантаженнях усіх трьох фаз однакові і дорівнюють фазним  $E_{PC}$ , тобто призначення нейтрального проводу полягає в зрівнюванні потенціалів точок  $O$  та  $O_1$ . При цьому напруга зміщення нейтралі  $\underline{U}_{O_1O} = 0$ , а лінійні струми за законом Ома:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}}; \underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}}; \underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}}. \quad (1.71)$$

Струм у нейтральному проводі за першим законом Кірхгофа дорівнює сумі лінійних струмів:  $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$ . (1.72)

При симетричному режимі  $\underline{I}_N = 0$ , тому що лінійні струми однакові за модулем і зсунуті за фазою на кут  $120^\circ$ .

Для схеми «зірка-зірка» без нейтрального проводу (рис. 1.26) розрахунок симетричного та несиметричного режимів відрізняються.

У симетричному режимі напруга між точками  $O$  та  $O_1$  дорівнює нулю, а лінійні струми однакові за модулем і зсунуті за фазою на кут  $120^\circ$  та також визначаються за формулами (1.71).

У несиметричному режимі фазні струми устанавлюються таким чином, що їх сума дорівнює нулю. Внаслідок цього відбувається викривлення симетрії фазних напруг. При цьому потенціали точок  $O$  та  $O_1$  не дорівнюють один одному і фазні навантаження опиняються під різними напругами, що не є рівними фазним  $E_{PC}$ .

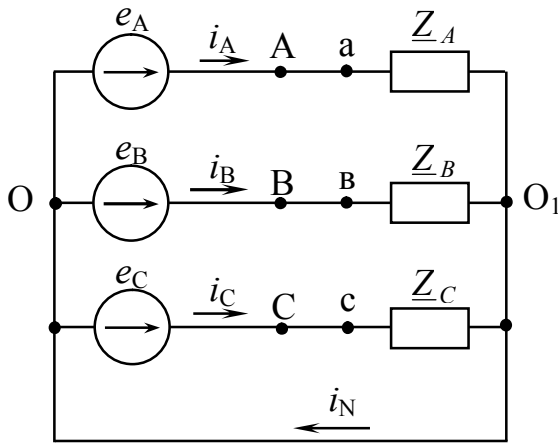


Рисунок 1.25 – Схема  $Y/Y_0$

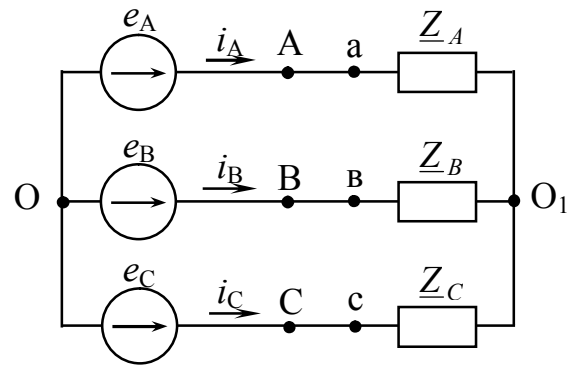


Рисунок 1.26 – Схема  $Y/Y$

Розрахунок струмів здійснюють так:

– визначають напругу зміщення нейтралі

$$\underline{U}_{O_1O} = \frac{\underline{E}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{E}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{E}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}, \quad (1.73)$$

де  $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}$ ,  $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}$ ,  $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}$  – комплексні провідності фаз;

– визначають напруги на фазних навантаженнях

$$\underline{U}_{aO_1} = \underline{E}_A - \underline{U}_{O_1O}; \quad \underline{U}_{bO_1} = \underline{E}_B - \underline{U}_{O_1O}; \quad \underline{U}_{cO_1} = \underline{E}_C - \underline{U}_{O_1O}; \quad (1.74)$$

– визначають фазні струми за формулами

$$\underline{I}_A = \underline{U}_{aO_1} \cdot \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_B = \underline{U}_{bO_1} \cdot \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_C = \underline{U}_{cO_1} \cdot \underline{Y}_C. \quad (1.75)$$

Розглянемо з'єднання обмоток генератора та трифазного навантаження за типом «зірка-трикутник». Схема такого з'єднання зображена на рисунку 1.27. В цьому випадку до кожної фази навантаження прикладена відповідна лінійна напруга. При симетричному режимі роботи ( $\underline{Z}_{av} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_\Phi$ ) фазні струми трикутника  $\underline{I}_{av}$ ,  $\underline{I}_{bc}$ ,  $\underline{I}_{ca}$ , однакові за модулем й визначаються за законом Ома:

$$\underline{I}_{av} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_\Phi}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_\Phi}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_\Phi}, \quad (1.76)$$

де  $\underline{U}_{AB}$ ,  $\underline{U}_{BC}$ ,  $\underline{U}_{CA}$  – лінійні напруги (формули 1.70).

Лінійні струми визначають за першим законом Кірхгофа для вузлів а, в, с:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{av} - \underline{I}_{ca}; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \quad \underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}. \quad (1.77)$$

Треба відзначити, що при симетричному режимі фазні струми в усіх фазах однакові й зсунуті відносно своїх фазних напруг на однаковий кут, що визначається співвідношенням:

$$\varphi = \arctg X_\Phi / R_\Phi, \quad (1.78)$$

де  $X_\phi$  – реактивний опір навантаження;

$R_\phi$  – активний опір навантаження.

Лінійні струми при цьому за модулем будуть рівними між собою, в  $\sqrt{3}$  разів більшими, ніж фазні, а за фазою будуть відставати на кут  $30^\circ$  при прямому чергуванні фаз:

$$\underline{I}_A = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ab} \angle -30^\circ; \underline{I}_B = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{bc} \angle -30^\circ; \underline{I}_C = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ca} \angle -30^\circ. \quad (1.79)$$

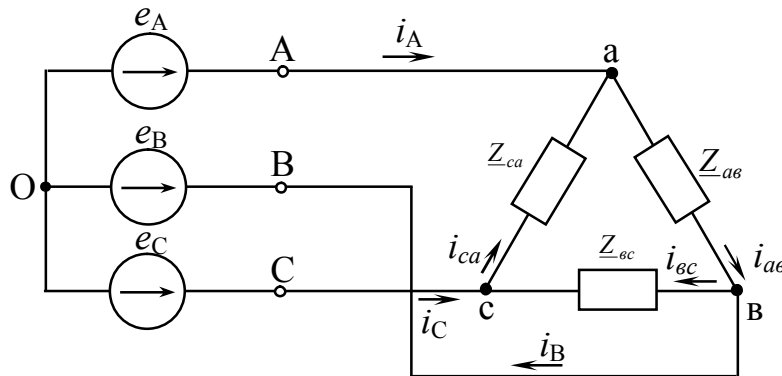


Рисунок 1.27 – Схема  $Y/\Delta$

При несиметричному навантаженні лінійні струми можуть бути більшими чи меншими, ніж фазні струми.

### Потужність трифазного кола

Кожна фаза трифазного навантаження споживає активну, реактивну і повну потужності ( $P_\phi$ ,  $Q_\phi$ ,  $S_\phi$ ): При симетричному навантаженні та з'єднанні фаз навантаження «зіркою» потужності, які споживають три фази навантаження, можна розрахувати, помноживши потужності, які споживає одна фаза, на три:

$$\begin{cases} S = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \\ P = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \cos \varphi \\ Q = 3 \cdot U_\phi \cdot I_\phi \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad \text{або} \quad \begin{cases} S = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \\ P = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \\ Q = \sqrt{3} \cdot U_L \cdot I_L \cdot \sin \varphi \end{cases} \quad (1.80)$$

де  $\varphi$  – кут зсуву між фазною напругою  $U_\phi$  і фазним струмом  $I_\phi$ ;

$I_L$  – лінійний струм, який при з'єднанні фаз навантаження «зіркою» дорівнює фазному.

При несиметричному навантаженні треба окремо розрахувати для кожної фази  $P_\phi$ ,  $Q_\phi$ ,  $S_\phi$  і потім їх скласти [2]:

$$S = S_A + S_B + S_C; P = P_A + P_B + P_C; Q = Q_A + Q_B + Q_C. \quad (1.80)$$

## 2 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРИСТРОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНІ ВИМІРЮВАННЯ

### 2.1 Електричні вимірювання та електровимірювальні прилади.

#### Вимірювання електричних величин

Наука про вимірювання, методи і засоби забезпечення їх єдності й досягнення необхідної точності називається *метрологією*.

Вимірювання – це визначення значень фізичних величин шляхом зіставлення з визначеною мірою цієї величини, що відповідає прийнятій системі одиниць, за допомогою спеціальних технічних засобів електричних вимірів.

В Україні прийнята Міжнародна система одиниць SI. Основними її одиницями є: метр (м), кілограм (кг), секунда (с), ампер (А), кельвін (К), кандела (кд), моль (моль). Крім основних одиниць встановлені похідні одиниці.

Залежно від способу одержання результату вимірювання поділяються на прямі й непрямі. Прямими називають вимірювання, результат яких одержується безпосередньо з дослідних даних (вимірювання струму амперметром, температури термометром, маси на вагах). Непрямими називаються вимірювання, при яких шукана величина безпосередньо не вимірюється, а її значення одержується на підставі відомої залежності між цією величиною й величинами, отриманими в результаті прямих вимірювань. Наприклад, потужність  $P$  у колах постійного струму обчислюють за формулою

$$P = U \cdot I, \quad (2.1)$$

де  $U$  – виміряна вольтметром напруга,

$I$  – виміряний амперметром струм.

Залежно від сукупності прийомів використання принципів і засобів вимірювань всі методи діляться на методи безпосередньої оцінки й методи порівняння.

Під методом безпосередньої оцінки розуміють метод, за яким вимірювана величина визначається безпосередньо з відлікового пристрою вимірювального приладу прямої дії (наприклад, вимірювання струму амперметром). Цей метод простий, але має відносно низьку точність.

Методом порівняння називають метод, за яким вимірювана величина порівнюється з величиною, відтвореною мірою – наприклад, вимір опору шляхом порівняння його зі зразковою котушкою опору. Методи порівняння забезпечують більшу точність, ніж методи безпосередньої оцінки, але це досягається за рахунок ускладнення процесу вимірювання.

#### *Похибки засобів вимірювань*

Результат будь-якого вимірювання завжди буде відрізнятися від дійсного значення вимірюваної величини. Це розходження являє собою похибку вимірю-

вань. В залежності від числового виразу розрізняють абсолютні, відносні й приведені похибки [4].

Абсолютну похибка визначають за формулою:

$$\Delta = X - X_{\partial}, \quad (2.2)$$

де  $X$  – показання приладу або результат вимірювання;

$X_{\partial}$  – дійсне значення вимірюваної величини.

Відносна похибка – це відношення абсолютної похибки вимірювання до дійсного значення вимірюваної величини, виражене у відсотках:

$$\delta = \frac{100 \cdot \Delta}{X_{\partial}} \quad (2.3)$$

Приведена похибка – це виражене у відсотках відношення абсолютної похибки  $\Delta$  до значення величини, що нормується  $X_n$ :

$$\gamma = \frac{100 \cdot \Delta}{X_n}, (\%). \quad (2.3)$$

Для того, щоб визначити діапазон ймовірних похибок вимірювань застосовують методику розрахунку середнє квадратичного відхилення результатів вимірювання. При цьому, чим більше вимірювань величини було зроблено, тим точніше отримано кінцевий результат.

Результат вимірювання величини  $X$  записують у вигляді:

$$X = \bar{X} \pm \Delta X, \quad (2.4)$$

де  $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X}{n} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_i + \dots + X_n}{n}$  – середнє квадратичне результатів спостережень;

$n$  – кількість вимірювань;

$\Delta X = \pm t_{p,n-1} \cdot \sigma_{\bar{X}}$  – шуканий довірчий інтервал, в який із заданою ймовірністю  $p$  попадає дійсне значення вимірюваної величини;

$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$  – середнє квадратичне відхилення результатів вимірювань;

$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$  – середнє квадратичне відхилення результатів окремих спостережень;

мих спостережень;

$t_{p,n-1}$  – коефіцієнт Стюдента, який знаходять з відповідних таблиць залежно від довірчої ймовірності  $p$  і числа ступенів свободи  $(n-1)$ .

Залежно від зміни в часі вимірюваної величини розрізняють статичні та динамічні похибки, а залежно від умов виникнення – основні та додаткові.

Засобами електричних вимірів називають технічні засоби, які використовують при електричних вимірах і які мають нормовані похибки – це міри, електровимірювальні прилади, вимірювальні перетворювачі, електровимірювальні установки, вимірювальні інформаційні системи.

Мірою називають засіб вимірів, призначений для відтворення фізичної величини заданого розміру (вимірювальна котушка опору, конденсатор, гиря).

Електровимірювальними приладами називають засоби електричних вимірювань, призначені для вироблення сигналів вимірювальної інформації, тобто інформації про значення вимірюваної величини, у формі, доступній для безпосереднього сприйняття спостерігачем (наприклад, амперметр, вольтметр, ватметр, фазометр). В загальному випадку електровимірювальний прилад перетворює електромагнітну енергію вхідного сигналу в механічну, електричну, світлову або в інші види енергії, що дозволяють спостерігачеві одержати інформацію про поточне значення вимірюваної величини.

Вимірювальні перетворювачі – технічні засоби з нормованими метрологічними характеристиками, що служать для перетворення вимірюваної величини в іншу величину або вимірювальний сигнал, зручний для обробки, зберігання, подальших перетворень, індикації й передачі, але безпосередньо не сприймається оператором.

Електровимірювальна установка складається з низки засобів вимірювань (мір, вимірювальних приладів, вимірювальних перетворювачів) і допоміжних пристроїв, розташованих в одному місці.

Вимірювальні інформаційні системи – це сукупність засобів вимірювань і допоміжних пристроїв, з'єднаних між собою каналами зв'язку для автоматичного одержання, передачі й обробки вимірювальної інформації від ряду її джерел.







Умовно всі види електровимірювальних приладів можна поділити на три групи: аналогові, електронні й цифрові.

Аналогові електровимірювальні прилади перетворюють вхідну вимірювану електричну величину в кутове переміщення покажчика за допомогою вимірювального механізму, що працює на використанні одного з електромагнітних явищ. Показання таких приладів є неперервною функцією змін вимірюваної величини. Всі аналогові електровимірювальні прилади мають відліковий пристрій, що складається зі шкали, розташованої на циферблаті приладу, і покажчика. В залежності від типу електромагнітного явища, що використовується в вимірювальному механізмі, розрізняють наступні системи електромеханічних



вимірювальних приладів: магнітоелектричну, електромагнітну, електродинамічну, феродинамічну, індукційну, електростатичну. Кожна з цих систем має свої переваги й недоліки, що визначають галузь її використання. В таблиці 2.1 наведена інформація про застосування систем електромеханічних приладів у різних типах цих приладів з урахуванням роду струму [4].

Таблиця 2.1 – Застосування систем електромеханічних приладів

Система приладу	Графічне позначення	Тип струму	В яких приладах застосовується
магнітоелектрична		–	амперметр, вольтметр, омметр
електромагнітна		– ~	амперметр, вольтметр, фазометр, частотомір
електродинамічна		– ~	амперметр, вольтметр, ватметр, фазометр, частотомір
феродинамічна		– ~	амперметр, вольтметр, ватметр
індукційна		~	лічильник електричної енергії
електростатична		– ~	вольтметр

Електронні вимірювальні прилади в складі своєї конструкції містять електронні блоки входних пристроїв, до яких належать підсилювач постійного або змінного струму, і випрямляч, що здійснює перетворення змінного струму на постійний. Перетворений входним пристроєм сигнал надходить на вимірювальний механізм, в якості якого зазвичай використовують механізм магнітоелектричної системи (амперметр, вольтметр, електронно-променеви́й осцилограф).

Цифрові вимірювальні прилади (ЦВП) – це прилади, в яких безперервний входний сигнал перетворюється на дискретний вихідний сигнал, наведений в цифровій формі. Під дискретним сигналом розуміють переривчастий сигнал, в якому інформація міститься не в інтенсивності носія сигналу (значення напруги, струму), а в кількості елементів сигналу (наприклад, кількість імпульсів напруги) та їх взаємному розташуванні в часі та просторі. Систему таких сигналів для подання інформації називають кодом. Процес перетворення аналогової величини в цифрову називається аналогово-цифровим перетворенням, а перетворювач, що здійснює це перетворення – аналогово-цифровим перетворювачем. Інформація про значення вимірюваної електричної величини надходить на графічний екран приладу. За видом вимірюваних величин ЦВП поділяються на вольтметри постійного і змінного струму; омметри, мости постійного і змінного струму; комбіновані

прилади; вимірювачі частоти й інтервалів часу; спеціалізовані ЦВП, призначені для вимірювань температури, маси, швидкостей і т.п.

### *Характеристики електровимірювальних приладів*

Загальними характеристиками електровимірювальних приладів є їх похибки, варіація показників, чутливість до вимірюваної величини, споживана потужність, час встановлення показників і надійність.

Похибка електровимірювального приладу обумовлена класом точності цього приладу. Клас точності – це узагальнена характеристика приладу, обумовлена межами допустимих основних і додаткових похибок. Клас точності може бути наведений у вигляді одного числа або дробу.

Варіація показників приладу – це найбільша різниця показників приладу при вимірюванні одного й того ж самого значення вимірюваної величини. Вона визначається при повільному наближенні стрілки до певної позначки шкали приладу спочатку від початкової, до кінцевої позначки шкали ( $\uparrow X$ ), а потім в зворотному напрямку ( $\downarrow X$ ):

$$B = \frac{|\uparrow X - \downarrow X|}{X_H} \cdot 100\%, \quad (2.5)$$

де  $X_H$  – верхня границя вимірювання приладу (нормуюче значення).

Варіація показників характеризує ступінь стійкості показників приладу за однакових умов вимірювання однієї й тієї ж величини.

Чутливістю електровимірювального приладу до вимірюваної величини  $x$  називається похідна від переміщення покажчика  $a$  по вимірюваній величині  $x$ :

$$S = \frac{da}{dx} = F(x). \quad (2.6)$$

Переміщення покажчика  $a$ , що виражене в поділках або міліметрах шкали, для великої групи приладів визначається кутом відхилення рухомої частини  $a$  вимірювального механізму, залежить від типу відлікового пристрою та його характеристик [5].

Величина, зворотна чутливості, називається ціною поділки приладу. Вона дорівнює кількості одиниць вимірюваної величини, що міститься в одній поділці шкали:

$$C = \frac{1}{S} = \frac{X_H}{N}, \quad (2.7)$$

де  $N$  – кількість поділок в шкалі.

$X_H$  – нормуюче значення, дорівнює кінцевому значенню діапазону вимірювань.

## Вимірювання електричних величин

Як було зазначено раніш, за допомогою електровимірювальних приладів різних систем безпосередньо вимірюють такі електричні величини, як електричний струм, напругу, потужність, кут зсуву фаз. Окрім цього, при дослідженнях електричних кіл необхідно визначати їх параметри, а саме активний опір  $R$ , ємність  $C$ , кут діелектричних втрат  $\operatorname{tg}\delta$ , індуктивність  $L$ , взаємна індуктивність  $M$ , добротність котушки  $Q$ . Параметри кола  $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $M$  не залежать від частоти, інші параметри – функції частоти.

Вимірювання параметрів може бути виконане різними методами і приладами. Вибір того або іншого з них визначається конкретними умовами завдання, тобто очікуваним значенням вимірюваної величини, необхідною точністю, наявною в розпорядженні апаратурою. Для точних вимірювань (похибка 1–1,5%) використовують мости, потенціометри, цифрові прилади, для більш грубих вимірювань – електромеханічні прилади. При цьому використовують або омметри, фарадметри – прилади, градуйовані в одиницях вимірюваної величини (прямі методи вимірювань), або декілька приладів, за показниками яких розраховують вимірювану величину (непрямі методи вимірювань).

У якості прикладу непрямого вимірювання опору розглянемо метод порівняння при послідовному з'єднанні вимірюваного  $R_x$  і зразкового  $R_0$  опорів, заснований на їх порівнянні. При установці перемикача «К» у положення «1» (рис. 2.1) вимірюють напругу  $U_0$ . Струм у колі:

$$I_x = \frac{U_0}{R_0}. \quad (2.8)$$

При установці «К» у положення «3» вимірюють напругу  $U_x$ , тоді вимірюваний опір:

$$R_x = \frac{U_x}{I_x} = \frac{U_x}{U_0} \cdot R_0. \quad (2.9)$$

Цей метод застосовують для вимірювань середніх і великих опорів [4].

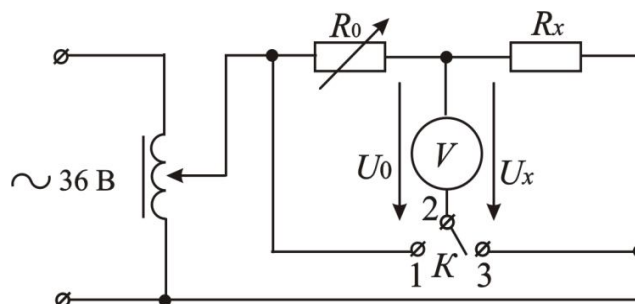


Рисунок 2.1 – Схеми для непрямих вимірювань опорів методом порівняння при послідовному з'єднанні

## 2.2 Вимірювання неелектричних величин електричними методами

### *Неелектричні величини*

Розрізняють наступні типи неелектричних величин:

- величини, що характеризують простір та час (геометричні розміри, час, параметри руху);
- механічні величини (маса та сила, тиск, моменти сили, механічні напруження);
- теплові величини, які характеризують тепловий стан тіл (температура, кількість теплоти, теплопровідність);
- світлотехнічні та енергетичні характеристики світла;
- акустичні величини, що характеризують різні сторони хвильового руху в різних середовищах (звуковий тиск, гучність звуку, акустичний шум);
- величини фізичної хімії, що характеризують фізично-хімічні властивості речовин (хімічний склад, густина розчину, молярна концентрація);
- величини, що характеризують іонізуюче випромінювання.

### *Загальні відомості про вимірювальні перетворювачі*

Вимірювання неелектричних величин електричними вимірювальними засобами стає можливим унаслідок попереднього перетворення досліджуваних неелектричних величин у функціонально зв'язані з ними електричні величини за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів. Таким чином, у процесі вимірювання неелектричної величини бере участь первинний вимірювальний перетворювач неелектричної величини в електричну, вторинний електричний вимірювальний прилад, а також допоміжні пристрої (пристрої спряження – лінії зв'язку, вимірювальні підсилювачі, пристрої корекції похибок).

За фізичними закономірностями, покладеними в основу принципу дії, вимірювальні перетворювачі можуть бути поділені на такі групи:

- механічні пружинні перетворювачі, в основу принципу дії яких покладені залежності між вхідними механічними зусиллями і викликаними ними переміщеннями чи механічними напруженнями в матеріалі чутливого елемента;
- резистивні перетворювачі, носієм вимірювальної інформації у яких є електричний опір;
- ємнісні перетворювачі, в основу принципу дії яких покладена залежність ємності конденсатора від відстані між його електродами, площі їх перекриття та діелектричної проникності середовища між електродами;
- п'єзоелектричні перетворювачі, принцип дії яких заснований на використанні явища поляризації п'єзоелектрика унаслідок дії на нього механічних зусиль;

– індуктивні перетворювачі, в яких використовується залежність повного електричного опору намагнічувальної обмотки від значення комплексного магнітного опору магнітного кола перетворювача;

– трансформаторні перетворювачі, принцип дії яких ґрунтується на використанні залежності магнітного потоку і відповідно наведеної у вторинній обмотці *ЕРС* від значення комплексного магнітного опору магнітопроводу, який, як і в індуктивних перетворювачах, залежить від зміни повітряного проміжку чи магнітних властивостей феромагнетику, спричинених його механічною деформацією.

– індукційні перетворювачі, принцип дії яких ґрунтується на використанні явища електромагнітної індукції;

– гальваноманітні перетворювачі, принцип дії яких базується на використанні гальваноманітних ефектів Гаусса або Холла (суть ефекту Гаусса полягає у зміні електричного опору провідника чи напівпровідника при проходженні через нього електричного струму та одночасної дії на нього магнітного поля, а ефект Холла – в появі за названих умов поперечної різниці потенціалів або *ЕРС* Холла, основними різновидами гальваноманітних перетворювачів є відповідно магніторезистивні перетворювачі Холла);

– теплові перетворювачі, в основу принципу роботи яких покладені фізичні ефекти, що визначаються тепловими процесами;

– електрохімічні перетворювачі, принцип дії яких заснований на залежності електропровідності електролітичної комірки від складу, концентрації, температури чи інших параметрів досліджуваного розчину (електрохімічні резистивні перетворювачі), залежності електродних потенціалів від активності водневих іонів (гальванічні перетворювачі рН-метрів);

– оптичні перетворювачі, в основу принципу дії яких покладена залежність параметрів оптичного випромінювання від значення вимірюваної величини;

– перетворювачі іонізаційного випромінювання, принцип дії яких ґрунтується на перетворенні інтенсивності іонізаційного або рентгенівського випромінювання.

### *Спряження первинних перетворювачів з електричними засобами вимірювань*

Складовими елементами комплексних засобів вимірювань є вимірювальні перетворювачі, пристрої порівняння, пристрої спряження (масштабуючі, лінеаризуючі, уніфікуючі перетворювачі).

Як вимірювальні перетворювачі, так і пристрої спряження, що входять до складного засобу вимірювань, мають свої метрологічні, конструктивні, експлуатаційні й інші технічні характеристики. Завдання спряження цих елементів поля-

гає у вироблені єдиних вимог до цих елементів, виконання яких забезпечує їх сумісність. Передусім повинна забезпечуватись інформаційна сумісність, тобто така властивість засобів, що спрягаються, яка забезпечує узгодженість їх вхідних і вихідних сигналів, їх робочих діапазонів. Це досягається уніфікацією сигналів первинних перетворювачів або застосуванням допоміжних узгоджувальних пристроїв поміж перетворювачем та вимірювальним електричним приладом.

Забезпечення метрологічної сумісності полягає в методологічній сумісності аналізу, нормування, синтезу, ідентифікації та прогнозування похибок засобів, що спрягаються, тобто повинна бути єдина математична модель похибок засобів вимірювань, єдиний спосіб нормування та подання характеристик.

Засоби вимірювань, які спрягаються між собою, повинні також задовольняти вимогам енергетичної, конструктивної та експлуатаційної сумісності.

Первинні перетворювачі, зокрема перетворювачі неелектричних величин в електричні, мають, звичайно, нелінійну функцію перетворення. Тому при їх спрженні з електричними вимірювальними приладами виникає необхідність лінеаризації функції перетворення, тобто одержання лінійної залежності вихідного сигналу засобу вимірювань від значення вхідної вимірюваної величини. Досягти лінійності функції перетворення первинного перетворювача можна конструкторсько-технологічними прийомами, зокрема використанням спеціальних матеріалів, застосуванням відповідної технології виготовлення або відповідного конструктивного виконання елементів перетворювача. Але частіше вдаються до інших способів лінеаризації, наприклад, побудови нерівномірних шкал в аналогових приладах [6].

#### *Класифікація неелектричних величин, що вимірюються*

При проведенні значної кількості технологічних процесів доводиться вимірювати численні неелектричні величини та параметри, зокрема:

- величини, що характеризують простір та час (геометричні розміри, час, параметри руху);
- механічні величини (маса, сила, її момент, тиск, механічні напруження);
- теплові величини (температура, кількість теплота, теплопровідність);
- світлотехнічні та енергетичні характеристики світла (сила світла, світловий потік, яскравість, потужність випромінювання);
- акустичні величини (величини, що характеризують хвильовий рух у пружних середовищах – звуковий тиск гучність звуку, акустичний шум);
- величини, що характеризують фізико-хімічні властивості речовин: хімічний склад, густину розчину, масову чи молярну концентрацію;
- величини, що характеризують іонізуюче випромінювання.

## *Методики вимірювання неелектричних величин*

Методики вимірювання неелектричних величин поділяються на контактні та безконтактні. При контактних вимірюваннях первинний перетворювач безпосередньо контактує з досліджуваним об'єктом. При цьому може спостерігатися зворотна дія вимірювального перетворювача на параметри досліджуваного об'єкта, що призводить до зростання похибок вимірювання. При безконтактних вимірюваннях первинний перетворювач безпосередньо не контактує з досліджуваним об'єктом і не впливає на його параметри. Однак у цьому випадку на результат вимірювання значного впливу завдає середовище, що їх розділяє.

Основні переваги електричного способу вимірювання неелектричних величин такі:

- можливість вимірювання кількох неелектричних величин за допомогою одного електричного вимірювального засобу (при використанні відповідних вимірювальних перетворювачів та комутатора);
- простота автоматизації вимірювання внаслідок того, що в електричних колах можна виконувати логічні та цифрові операції;
- можливість забезпечення високої чутливості, необхідної точності та швидкодії;
- дистанційність – можливість вимірювання параметрів досліджуваних об'єктів на будь-якій від них відстані завдяки можливості передачі електричних сигналів лініями зв'язку чи через випромінювання електромагнітних хвиль [4].

### *Приклади застосування вимірювальних перетворювачів*

Механічні пружні перетворювачі, які широко застосовуються як первинні перетворювачі – елементи динамометрів, манометрів, віброметрів та акселерометрів. Вхідними величинами цих перетворювачів є сила, тиск, обертовий момент, а вихідною – переміщення (лінійне або обертове) чи деформація.

В якості пружних елементів порівняно великих сил (понад 10 кН) застосовуються суцільні стержні. Порожнисті стержні дозволяють підвищити чутливість перетворювачів, однак межі їх перетворень є не нижчі ніж 0,5 кН. Недоліком таких перетворювачів є малі вихідні переміщення.

Принцип дії резистивних перетворювачів механічних величин ґрунтується на зміні їхнього електричного опору залежно від переміщення під дією механічних сил повзунка реостата в реостатних перетворювачах, або внаслідок тензоефекту в тензорезистивних перетворювачах Розглянемо детальніше принцип його дії.

Конструкція тензорезистора показана на рисунку 2.2, а. На тонкий папір або плівку 1 наклеюється тензочутливий провідник діаметром близька 0,025 мм. До кінців провідника приєднуються вивідні провідники 3. Зверху наносять шар лаку 4. Такий тензорезистор, прикріплений до деталі 5, переймає деформації її поверхневого шару. Тензорезистори на основі фольги (фольгові) являють собою травлену фольгу товщиною 0,005-0,025 мм з виводами 7 (рис. 2.2, б). Застосовуються також плівкові й напівпровідникові тензорезистори. Найкращі експлуатаційні характеристики мають фольгові тензорезистори, що мають малу поперечну чутливість і високу температурну стабільність. Напівпровідникові тензорезистори при дуже високій тензочутливості мають нелінійну характеристику перетворення і високу температурну чутливість, що значно впливає на точність інтерпретації результатів вимірювання при зміні температури зовнішнього середовища [5].

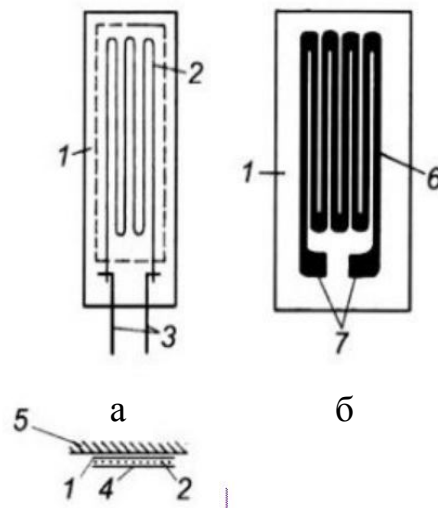


Рисунок 2.2 – Конструкція тензорезистивного датчика

При деформації досліджуваної конструкції, до якої жорстко прикріплено тензорезистор, відбувається відносна зміна довжини, питомого опору та площі поперечного перерізу провідника 2, в результаті чого спостерігається зміна його електричного опору, зумовлена змінами довжини та перерізу:

$$\Delta R = R_1 - R_2 = \rho \left( \frac{l_1}{S_1} - \frac{l_2}{S_2} \right), \quad (2.10)$$

де  $R_1 = \rho \frac{l_1}{S_1}$  – початковий опір;

$R_2 = \rho \frac{l_2}{S_2}$  – опір після деформації;



$\rho$  – питомий опір дроту тензорезистора (визначається родом речовини, з якого виготовлений дріт),  $l_1$ ,  $l_2$  – довжина дроту до та після деформації,  $S_1$ ,  $S_2$  – площа перерізу дроту тензорезистора до та після деформації.

Основною характеристикою тензорезистора є коефіцієнт тензочутливості який є паспортною величиною для відповідного типу тензорезистора.

Теплові вимірювальні перетворювачі поділяють на терморезистивні та термоелектричні.

Принцип дії терморезистивних перетворювачів ґрунтується на залежності електричного опору провідників чи напівпровідників від температури. На практиці широко застосовують терморезистори, виготовлені з платинового та мідного дроту, рідше з нікелю та вольфраму. Платинові терморезистори використовуються для вимірювання температури в межах від  $-260$  до  $+1100$  °С, а мідні від  $-200$  до  $+2005$  °С.

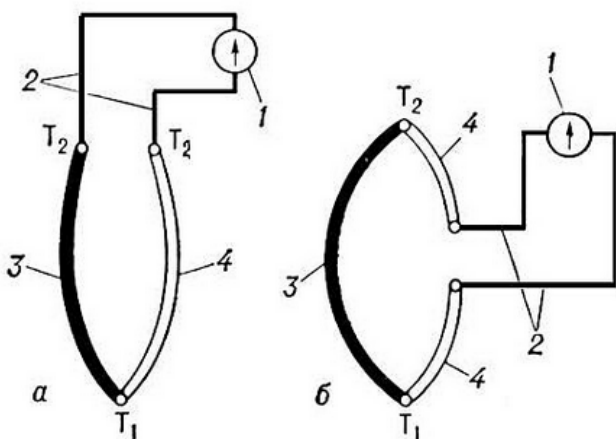


Рисунок 2.3 – Термопара (а) і спосіб увімкнення вимірювального приладу (мілівольтметра) в коло термопари (б)

Принцип дії термоелектричного перетворювача (термопари) ґрунтується на явищі термоелектричного ефекту, який полягає у виникненні термоелектрорушійної сили (термо-ЕРС). Головними елементами термопари є два провідника з різних матеріалів, які мають з'єднання на одному з кінців термопари. До двох інших кінців приєднуються компенсаційні або подовжуючі провідники, за допомогою яких термо-ЕРС з'єднується з вимірювальним пристроєм.

На схемі термопари зображені на рисунку 2.3, а: вимірювальний прилад 1 підключений з'єднувальними провідниками 2 до кінців термоелектродів 3 и 4; у другому варіанті схеми на рисунку 2.3, б він підімкнений до розриву одного з термоелектродів;  $T_1$ ,  $T_2$ , позначені на рисунку — значення температури відповідно більш та менш нагрітого контактів термопари.

## 2.3 Вимірювання фізичних величин

### 2.3.1 Вимірювання температури

За допомогою термоелектричного перетворення можна проводити вимірювання ступеню нагрітості тіла, коли важливою є точність визначення темпе-

ратури, швидкість її вимірювання або температура визначається в таких обставинах, де немає можливості застосовувати традиційні термометри (вимірювання дуже високих або низьких температур, або фізична недоступність застосування класичних термометрів). У таких випадках застосовується термометрія за допомогою терморезистивних перетворювачів.

Вимірювати температуру величину, яка характеризує ступінь нагрятості тіла, можливо лише непрямим шляхом, ґрунтуючись на залежності від температури таких фізичних властивостей тіл, які можливо безпосередньо виміряти. Ці властивості тіл називаються термометричними. До них належать: довжина, об'єм, термо-ЕРС, електричний опір тощо. В свою чергу речовини, які характеризуються термометричними властивостями, називаються також термометричними. Технічні засоби для вимірювання температури мають назву термометри.

Для створення термометра необхідно мати температурну шкалу.

Термометри різних типів розрізняються зокрема межами вимірювання, що звичайно визначає сфери і можливості їхнього застосування. Межі вимірювання температур для найбільш вживаних типів термометрів такі:

- термоелектричні термометри: від  $200^{\circ}\text{C}$  до  $2200^{\circ}\text{C}$ ;
- терморезистивні термометри на основі металевих терморезистивних перетворювачів: від  $-260^{\circ}\text{C}$  до  $1100^{\circ}\text{C}$ ;
- терморезистивні термометри на основі напівпровідникових терморезистивних перетворювачів: від  $-240^{\circ}\text{C}$  до  $300^{\circ}\text{C}$ ;
- манометричні термометри (газові і рідинні) від  $-150^{\circ}\text{C}$  до  $600^{\circ}\text{C}$ .

Розглянемо вимірювальні кола з терморезистивними перетворювачами температури [6].

Найбільш розповсюдженими для вимірювання температури (звичай у межах від  $-260$  до  $1100^{\circ}\text{C}$ ) на промисловості є платинові терморезистивні перетворювачі температури, так звані термометри опору (ТО). Їхніми позитивними якостями є висока точність і часова стабільність, недоліком – нелінійність функції перетворення, особливо в діапазоні низьких температур (від  $-260$  до  $0^{\circ}\text{C}$ ), в якому суттєво падає чутливість.

При високих температурах (понад  $1000^{\circ}\text{C}$ ) на стабільність ТО впливає випаровування платини, яка входить до їхнього складу, що обмежує їхнє застосування. ТО з міді, нікелю та інших металів мають меншу часову стабільність, що зумовлює їх нижчий клас точності.

При вимірюванні низьких і середніх температур використовуються ТО з високим номінальним опором (від  $100$  до  $500\ \text{Ом}$ ), а при вимірюванні високих температур – низькоомні ТО.

Вмикання ТО у вимірювальне коло з допомогою з'єднувальних провідників впливає на точність вимірювання. Існують дво-, три- та чотирипровідні схеми увімкнення ТО у вимірювальне коло.

Для зменшення похибок, що виникають через невідповідність опору з'єднувальних провідників їхньому градууювальному значенню, використовують термоперетворювачі з трьома і чотирма відводами і відповідне їх увімкнення у мостове або компенсаційне коло. Потрібно також враховувати можливість додаткових похибок, які виникають від нагрівання ТО вимірювальним струмом. Для цього необхідно, щоб вимірювальний струм був таким, щоб викликана ним зміна опору не перевищувала 0,1%.

У практиці технологічних вимірювань температури з використанням терморезистивних перетворювачів широкого застосування набули зокрема, мостові кола (зрівноважені і незрівноважені мости). Зрівноважені мости поділяються на неавтоматичні та автоматичні. В них використовується нульовий метод вимірювання

За допомогою неавтоматичних мостів проводять градуювання термоперетворювачів опору і вимірюють температуру. Двопровідну схему зрівноваженого неавтоматичного мосту наведено на рисунку 2.4.

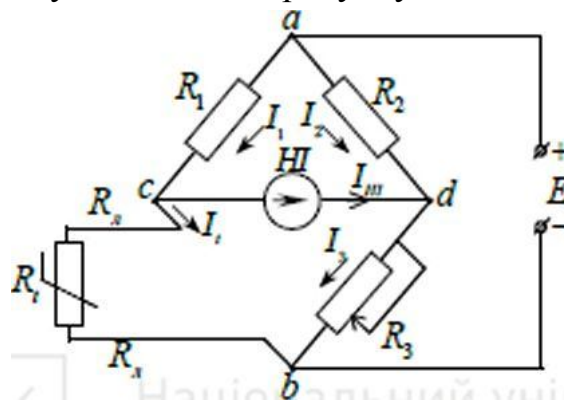


Рисунок 2.4 – Двопровідна схема зрівноваженого неавтоматичного мосту:  $R_1$  і  $R_2$  – постійні резистори;  $R_3$  – змінний резистор;  $R_t$  – вимірюваний опір;  $R_l$  – опір з'єднувальних провідників

До діагоналі живлення  $ab$  мосту увімкнено джерело струму, а у вимірювальну діагональ  $cd$  відповідно нуль-індикатор (НІ), зокрема нуль-гальванометр. Між точками підключення, різнойменних діагоналей знаходяться плечі моста, які складаються з постійних резисторів  $R_1$  і  $R_2$  та змінного резистора  $R_3$ , а в плече  $cb$  увімкнено вимірювальний опір і два з'єднувальних провідника опором  $R_l$ .

Початковому опоріві  $R_t$  у вимірювальній діагоналі  $cd$  відповідає сигнал  $U_{cd} = 0$ , а, значить, і вихідний струм  $I_{HI} = 0$ . Із збільшенням температури в об'єкті вимірювання збільшується опір  $R_t$ , падіння напруги у діагоналі  $cd$  і пропорційно зростає струм  $I_{HI}$ .

## Цифрові термометри

Задачі контролю температури з точки зору збору і аналізу даних про об'єкт найбільш ефективно можна вирішувати за допомогою електронних приладів. Для них характерний широкий діапазон вимірювання температури, максимально швидке отримання інформації в зручному для сприйняття вигляді, можливість інтегрування з будь-яким типом електронних систем.

В загальному випадку цифровий термометр складається з теплового чутливого елемента (наприклад, терморезистора); аналого-цифрового перетворювача (АЦП), призначеного для перетворення аналогового сигналу від терморезистора в цифровий сигнал; дисплея; засобів вводу-виводу сигналів для взаємодії з іншими пристроями; елемента живлення. Структурну схему цифрового термометра наведено на рисунку 2.5.

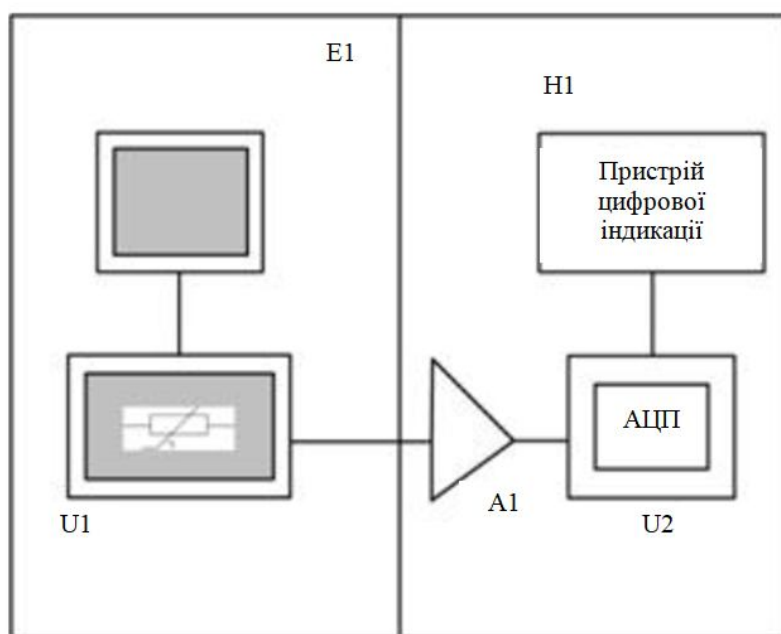


Рисунок 2.5 – Структурна схема цифрового термометра з терморезистивним перетворювачем

В таких термометрах зміна температури об'єкта, в якому розміщено терморезистор, викликає зміну його опору, який в блоці *E1* перетворюється у відповідну зміну напруги. Перетворювач *U1* живиться від стабілізатора струму. Вихідний сигнал блока *E1* підсилюється підсилювачем *A1* і надходить до аналого-цифрового перетворювача (АЦП) *U2*, на виході якого знаходиться цифровий блок індикації *H1*, який призначений для наочного представлення температури контрольованого об'єкта.

## Деякі аспекти нових напрямів термометрії

Термошумовий метод вимірювань температури ґрунтується на рівнянні Найквіста, яке встановлює зв'язок між напругою теплових шумів, що виникають в резисторі, і його термодинамічною температурою  $T$

$$W_C(\omega) = \frac{1}{\pi} kTR, \quad (2.11)$$

де  $W_C(\omega)$  – енергетичний спектр теплової ЕРС середнє квадратичне значення шумової напруги;

$k$  – стала Больцмана, що дорівнює  $1,38 \times 10^{-23}$  Дж/К;

$R$  – опір резистора;  $\omega$  – смуга частот, за якої виконуються вимірювання.

Термошумовий метод можна використовувати для вимірювань температури в межах від 0,001 К до 2000–2500 К. Як вимірювальні перетворювачі застосовують резистори з платини, манганіну, константану, вольфраму, графіту, а також недротяні резистори.

Складність реалізації термошумового методу полягає в низькому рівні корисного сигналу, який становить частки або одиниці мікрвольт. Основними чинниками, що обмежують точність термошумового методу, є залежність опору резистора від температури, власні шуми вимірювального каналу та завади в лінії.

Термочастотний метод вимірювань температури заснований на використанні залежності від температури частоти власних коливань різного роду резонаторів, параметрів ланок з терморезисторами, швидкості розповсюдження звукових та ультразвукових коливань.

З термочастотних, найпоширенішими є методи, засновані на застосуванні резонаторних сенсорів, які є автогенераторами або генераторами з вимушеними коливаннями, частота яких налаштовується в резонанс з частотою власних коливань резонатора, що змінюється з температурою.

*Тепловізори.* Теплобачення – це напрям в технічних вимірюваннях, що вивчає фізичні основи, методи та прилади, які забезпечують можливість спостереження слабо нагрітих об'єктів. Такі прилади називаються тепловізорами (термографами). Тепловізори відносяться до оптикоелектронних приладів пасивного типу, що працюють в інфрачервоному діапазоні спектру вимірювання.

Принцип дії тепловізорів ґрунтується на перетворенні інфрачервоного випромінювання в електричний сигнал, який піддається підсиленню і автоматичній обробці, та перетворенню у видиме зображення теплового поля об'єкта (термограма) для його візуальної і кількісної оцінки. Принципова схема тепловізора наведена на рисунку 2.6.

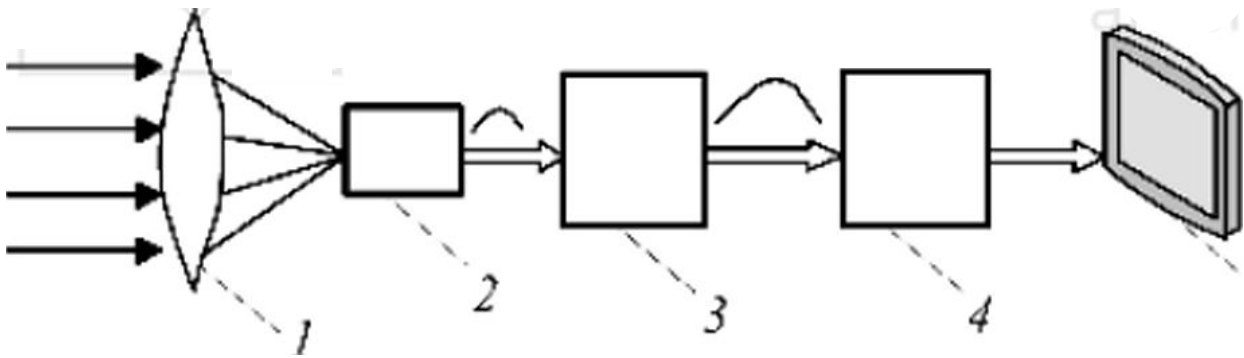


Рисунок 2.6 – Принципова схема тепловізора: 1 – лінза; 2 – фотоприймач; 3 – електричний підсилювач; 4 – мікропроцесор; 5 – блок відображення інформації

Інфрачервоне випромінювання концентрується системою спеціальних лінз 1 і потрапляє на фотоприймач 2, який вибірково чутливий до певної довжини хвилі інфрачервоного спектру. Потрапляючи на нього, випромінювання призводить до зміни електричних властивостей фотоприймача, реєструється і підсилюється електронним підсилювачем 3. Отриманий сигнал піддається цифровій обробці в мікропроцесорному блоці 4. Це значення передається на блок відображення інформації 5, що представляє собою екран рідкокристалічного дисплею. Блок відображення інформації має кольорову палітру, в якій кожному значенню сигналу присвоюється певний колір. Після цього на екрані монітора з'являється точка, колір якої відповідає чисельному значенню інфрачервоного випромінювання, яке потрапило на фотоприймач. Скануюча система (дзеркала або напівпровідникова матриця) проводить послідовний обхід усіх точок у межах поля зору приладу, в результаті чого виходить видима картина інфрачервоного випромінювання об'єкта. Чутливість детектора до теплового випромінювання тим вище, чим нижче його власна температура, тому його поміщають у спеціальний термостатичний холодильний пристрій. Один із способів охолодження здійснюється за допомогою елементів Пельтьє (напівпровідники, що дають перепад температур при пропусканні через них струму).

### 2.3.2 Вимірювання тиску

#### *Електричні манометри та вакуумметри*

Дія даних приладів ґрунтується на прямому чи непрямому перетворенні тиску в електричний параметр, який має з ним функціональний зв'язок.

Ці прилади застосовуються головним чином в лабораторній практиці для проведення відповідних досліджень.

#### *Манометри електричного опору*

Дія приладу ґрунтується на зміні електричного опору провідника (одношарова котушка діаметром 8 мм намотана, наприклад, манганіновим дротом,

діаметром 0,05 мм, електричний опір якої становить 180–200 Ом) під дією зовнішнього надлишкового тиску.

Для вимірювання опору можна застосувати будь-який вимірювач електричних опорів, наприклад, електричний зрівноважений міст. Іншим чутливим елементом манометра електричного опору є комбінований перетворювач з мембраною (рис. 2.7) та тензорезисторним перетворювачем.

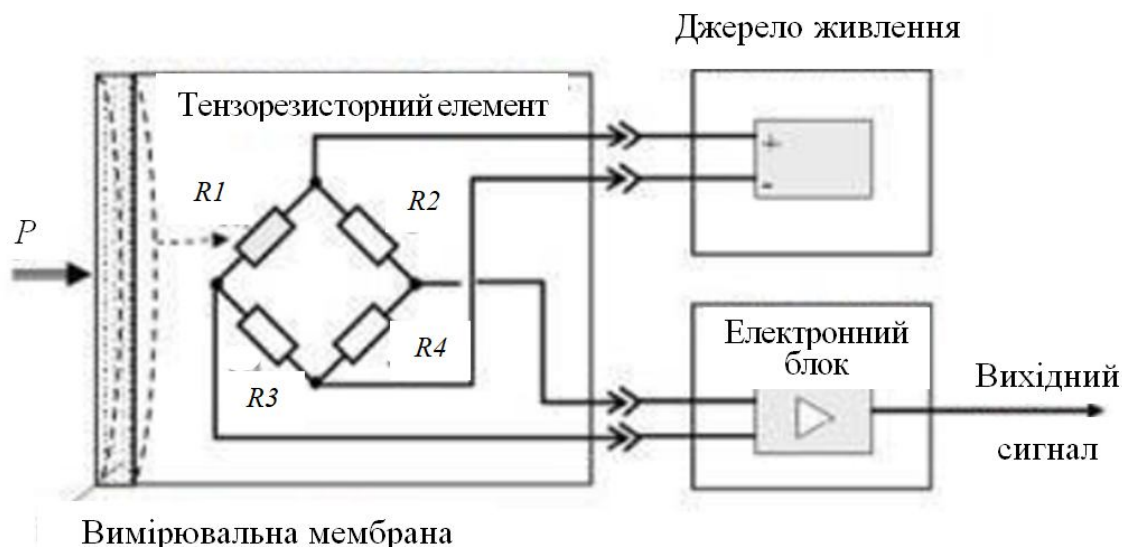


Рисунок 2.7 – Вимірювальна схема тензорезистивного манометра

В манометрі, показаному на рисунку 2.7, деформація вимірювальної мембрани під дією зовнішнього тиску  $P$  призводить до деформації тензорезисторного перетворювача  $R1$ , який увімкнено в одне з плечей вимірювального мосту. В інші плечі увімкнено постійні резистори  $R2$ ,  $R3$  та  $R4$ . В результаті цього відбувається розбаланс вимірювального мосту, який перетворюється електронним блоком в уніфікований вихідний електричний сигнал, що надсилається до вторинного вимірювального приладу манометра.

До переваг тензорезистивних перетворювачів належить лінійність характеристики залежності опору тензорезистора від тиску від та незначна інерційність, до недоліків слід віднести малу чутливість і залежність від температури.

### Ємнісні манометри

Схема вимірювального перетворювача тиску, оснащена мембраною та ємнісним перетворювачем, наведена на рисунку 2.8.

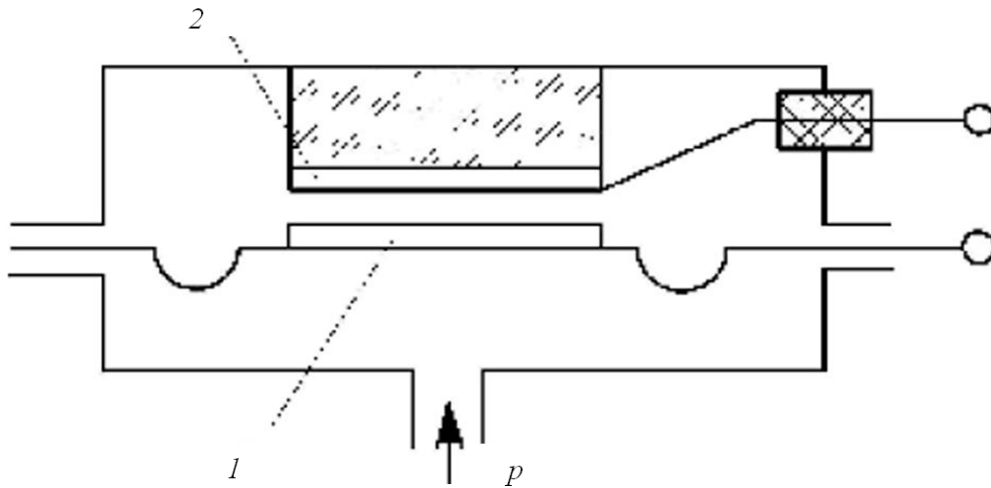


Рисунок 2.8 – Ємнісний вимірювальний перетворювач тиску

Тиск  $P$  сприймається металевою мембраною 1, яка є рухомих електродом ємнісного перетворюючого елемента. Нерухомий електрод 2 ізолюється від корпусу з допомогою ізоляторів. Залежність ємності  $C$  перетворювального елемента від переміщення  $l$  визначається з

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{l} \quad (2.12)$$

де  $\varepsilon_0$  та  $\varepsilon$  – електрична постійна та відносна діелектрична проникність (величина, що залежать від матеріалу діелектрика між металевими мембранами, в даному випадку це повітряний зазор);

$S$  – площа поверхні металевої мембрани;

$l$  – проміжок між металевими мембранами ємнісного датчика (у даному випадку дорівнює переміщенню мембран відносно одна до іншої).

Для перетворення  $C = f(l)$  в сигнал вимірюваної інформації звичайно використовують вимірювальні мости змінного струму (високочастотні) або резонансні  $LC$ -контури.

Ємнісні манометри застосовують для вимірювання тиску до 120 МПа. Товщина мембрани дорівнює 0,05–1 мм. Основна похибка вимірювання становить  $\pm(0,2-5,0)\%$ .



### 3 ТРАНСФОРМАТОРИ. ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

#### Загальні відомості

Трансформатори і електричні машини належать до пристроїв, у яких здійснюється перетворення енергії: у трансформаторах – електричної енергії одного класу напруги (струму) на інший клас напруги (струму), а в електричних машинах – механічної енергії на електричну або електричної на механічну.

Електричні машини, в свою чергу поділяють на:

- генератори, що перетворюють механічну енергію на електричну;
- електродвигуни, що перетворюють електричну енергію на механічну.

Для розуміння принципу дії електричних машин необхідне знання закону електромагнітної індукції (закон Фарадея) і закону електромагнітної взаємодії (закон Біо-Савара-Лапласа).

Відповідно до закону електромагнітної індукції наведення  $E_{PC}$  у контурі можливе при обертанні контуру в нерухомому магнітному полі (машини постійного струму), при нерухомому контурі й обертовому магнітному полі (синхронні машини), при обертанні одночасно магнітного поля і контуру (асинхронні машини), при нерухомих у просторі магнітному полі та контуру, але при змінному за величиною магнітному полі в часі (трансформатори).

Принцип дії генератора полягає в тому, що при пересуванні перпендикулярно до магнітних ліній провідника у магнітному полі з індукцією  $B$  (Тл), у ньому за законом електромагнітної індукції виникає  $E_{PC}$ :

$$e = B \cdot l \cdot V, \quad (3.1)$$

де  $V$  – швидкість пересування провідника (м/с);

$l$  – довжина провідника (м).

Якщо замкнути кінці провідника через опір або проводом, то під впливом  $E_{PC}$  по ньому потече струм  $I$ . Напрямки  $E_{PC}$  і струму збігаються. Струм  $I$  взаємодіє з магнітним потоком, в якому він перебуває, та створює силу, що виштовхує провідник з магнітного поля. Ця сила відповідно до закону електромагнітної взаємодії (закон Біо-Саварра-Лапласа) дорівнює:

$$F = B \cdot I \cdot l. \quad (3.2)$$

Сила взаємодії проявляється як реакція на зовнішню силу, прикладену до провідника, вона дорівнює і протилежна останній.

Таким чином, принцип дії електричного двигуна полягає в тому, що при проходженні струму по провіднику, що перебуває в магнітному полі, на нього впливає сила  $F$ , під дією якої він і буде рухатися.

### 3.1 Трансформатори

#### *Загальні відомості про трансформатори*

Трансформатор – це електротехнічний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги на змінний струм іншої напруги тієї ж частоти. Трансформатор складається із сталевго осердя і обмоток. Осердя зібране з тонких листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного з метою зниження втрат потужності на гістерезис і вихрові струми.

Перетворення напруги в трансформаторах здійснюється змінним магнітним потоком індуктивно зв'язаних між собою обмоток. Обмотка, що підключається до джерела електричної енергії, називається первинною, а обмотка, до якої підключене навантаження, – вторинною. Параметри трансформатора, що належать до первинної обмотки (число витків, напруга, струм і т.д.), називають первинними і в їхніх літерних позначеннях використовують індекс 1. Відповідно, параметри вторинної обмотки називають вторинними й записують з індексом 2.

Якщо через трансформатор необхідно здійснити живлення двох і більше навантажень з різною напругою живлення, то виконують кілька вторинних обмоток.

За призначенням трансформатори поділяють на:

- силові, що бувають однофазними і трифазними, а також такими, що підвищують і такими, що знижують напругу;
- спеціального призначення (зварювальні, вимірювальні, погоджувальні).

За способом охолодження трансформатори діляться на сухі й масляні, обмотки яких занурені у заповнений маслом сталевий бак.

На щитку трансформатора вказують його номінальні параметри, тобто, первинну й вторинну напругу, номінальну повну потужність, струм при номінальній повній потужності, частоту, число фаз, схему з'єднання обмоток, режим роботи (тривалий або короткочасний), спосіб охолодження [7].

#### *Принцип дії однофазного трансформатора*

На осерді однофазного трансформатора (рис. 3.1) розташовані дві обмотки, виконані з ізольованого проводу. До первинної обмотки підводять напругу живлення  $\underline{U}_1$ , а напругу вторинної обмотки  $\underline{U}_2$  підводять до споживача електричної енергії  $\underline{Z}_H$ .

Змінний струм  $\underline{I}_1$ , проходячи по витках  $w_1$  первинної обмотки трансформатора, створює в осерді магнітопроводу змінний у часі за синусоїдним законом магнітний потік  $\Phi = \Phi_m \cdot \sin \omega t$ . Цей потік пронизує витки обмоток трансформатора, в яких відповідно до закону електромагнітної індукції наводяться ЕРС:

$$e = w \cdot \frac{d\Phi}{dt}. \quad (3.3)$$

де  $w$  – число витків обмотки трансформатора.

Під дією ЕРС  $e_2$  у вторинному колі трансформатора, замкнутому на навантаження, протікає струм  $I_2$ .

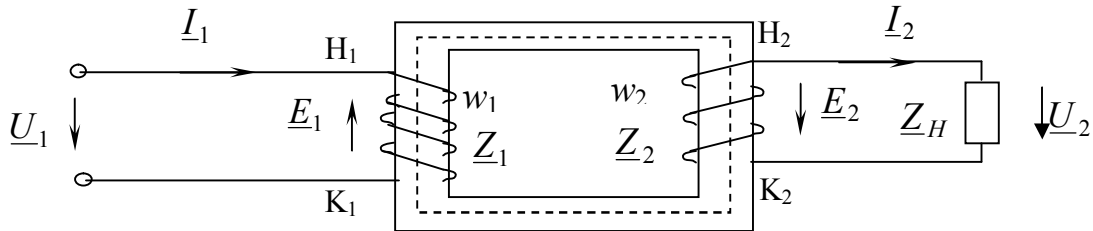


Рисунок 3.1 – Схема однофазного трансформатора

Відношення ЕРС первинної обмотки трансформатора до ЕРС його вторинної обмотки дорівнює відношенню числа витків відповідних обмоток і називається коефіцієнтом трансформації трансформатора:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.4)$$

Якщо  $E_1 < E_2$ , то трансформатор є підвищувальним, а при  $E_1 > E_2$ , він є понижувальним.

Залежно від величини опору навантаження розрізняють три режими роботи трансформатора (схема заміщення – рисунок 3.2):

- холостий хід, коли  $Z_H = \infty$ ;
- режим навантаження, коли  $0 < Z_H < \infty$ ;
- режим короткого замикання, коли  $Z_H = 0$ .

У режимі холостого ходу вторинна обмотка трансформатора розімкнута (споживач електроенергії відключений). Струм первинної обмотки при цьому є струмом холостого ходу  $i_0$ :

$$i_0 = I_{m0} \cdot \sin(\omega t + \alpha). \quad (3.5)$$

Кут магнітних втрат  $\alpha$ , що входить у рівняння (кут зсуву за фазою між струмом і магнітним потоком трансформатора), обумовлений втратами потужності в магнітопроводі. Значення кута  $\alpha$  для сучасних електротехнічних сталей звичайно невелике і становить від  $4^\circ$  до  $6^\circ$ .

Напруга, яку підводять режимі холостого ходу до трансформатора, відповідно до другого закону Кірхгофа може бути представлена як сума падінь напруги в первинному колі:

$$\underline{U}_1 = \underline{E}_1 + \underline{I}_0 \cdot R_1 + j \cdot \underline{I}_0 \cdot X_1, \quad (3.6)$$

де  $R_1$  – активний опір первинної обмотки;

$X_1$  – індуктивний опір первинної обмотки;

$E_1$  – ЕРС, що наводиться в первинній обмотці магнітним потоком  $\Phi$ .

$$\text{Миттєве значення ЕРС } E_1: e_1 = w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \cdot \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}). \quad (3.7)$$

Виходячи з рівняння електричної рівноваги (3.6), можна побудувати векторну діаграму трансформатора для режиму холостого ходу (рис. 3.3).

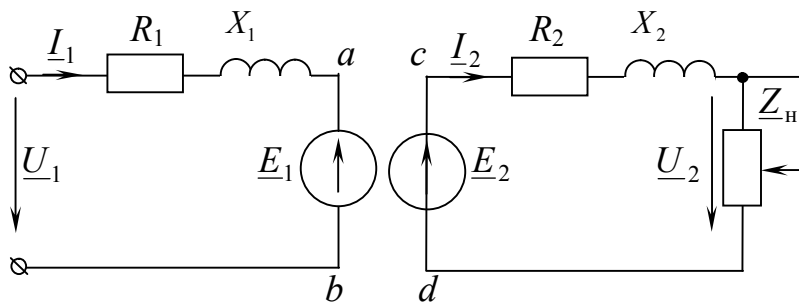


Рисунок 3.2 – Схема заміщення трансформатора

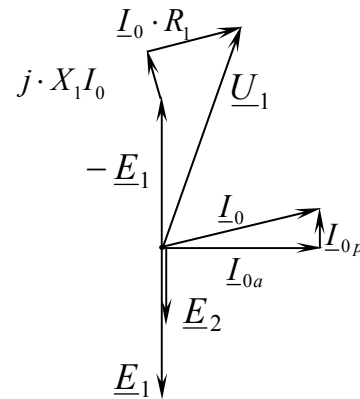


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма режиму холостого ходу

Внаслідок перемагнічування магнітопроводу в ньому виникають втрати потужності, які називають втратами режиму холостого ходу. Потужність  $P_0$ , споживана з мережі в цьому режимі, витрачається в основному на покриття втрат у магнітопроводі, тому що втрати в обмотці  $I_0^2 \cdot R_1$  малі. Струм режиму холостого ходу  $I_0$  містить активну й реактивну складові, тобто

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}. \quad (3.8)$$

Режим короткого замикання для силового трансформатора є аварійним. Однак деякі спеціальні трансформатори розраховують для роботи в режимі близькому до короткого замикання. Це – зварювальні трансформатори, вимірювальні трансформатори струму.

При роботі трансформатора в режимі навантаження ( $Z_H \neq 0$ ) у вторинному колі під впливом  $E_2$  з'являється струм  $I_2$ . Основний магнітний потік  $\Phi_0$  створюється спільною дією магніторушійної сили первинної й вторинної обмоток. Результуюча магніторушійна сила  $F_p$  дорівнює їхній геометричній сумі.

$$\underline{F}_p = \underline{I}_1 \cdot w_1 + \underline{I}_2 \cdot w_2 = \underline{I}_0 \cdot w_1. \quad (3.9)$$

З урахуванням активного опору обмоток рівняння електричного стану первинного й вторинного кіл мають вигляд за другим законом Кірхгофа [7]:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_1), \quad (3.10)$$

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot X_2). \quad (3.11)$$

*Схеми заміщення трансформатора.*

Для дослідження режимів роботи трансформаторів магнітний зв'язок між первинною й вторинною обмотками замінюють електричним зв'язком. З'єднання перемичками  $a-c$  і  $b-d$  на схемі рисунку 3.2 можливе, якщо  $\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{cd}$ , що виконується при

$$\underline{E}'_2 = -\underline{E}_1 = \underline{E}_2 \cdot \frac{w_1}{w_2}. \quad (3.12)$$

де  $\underline{E}'_2$  – приведена ЕРС.

Еквівалентність енергетичних співвідношень у трансформаторі і його схема заміщення не будуть порушені, якщо повна потужність  $S_2 = S'_2$  ( $E_2 \cdot I_2 = E'_2 \cdot I'_2$ ), активна потужність  $P_2 = P'_2$  ( $I_2^2 \cdot R_2 = I'^2_2 \cdot R'_2$ ), реактивна потужність  $Q_2 = Q'_2$  ( $I_2^2 \cdot X_2 = I'^2_2 \cdot X'_2$ ), а також потужність у навантаженні  $S_H = S'_H$  ( $U_2 \cdot I_2 = U'_2 \cdot I'_2$ ) залишаться незмінними. З останніх співвідношень одержуємо значення параметрів схеми заміщення, які називають приведеними (до числа витків  $w_1$ ):

$$I'_2 = I_2 \cdot \frac{1}{k}; \quad R'_2 = R_2 \cdot k^2; \quad X'_2 = X_2 \cdot k^2; \quad U'_2 = U_2 \cdot k; \quad Z'_2 = Z_2 \cdot k^2. \quad (3.13)$$

Таким чином, схема трансформатора (рис. 3.1) може бути подана у вигляді Т-подібної еквівалентної схеми заміщення, що показана на рисунку 3.4. Повна система рівнянь електричного і магнітного стану трансформатора з урахуванням приведення вторинної обмотки до первинної за числом витків і  $\underline{U} = \underline{E}'_2 = -\underline{E}_1$  має вигляд:

$$\begin{cases} \underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \\ \underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - \underline{I}'_2 \cdot \underline{Z}'_2 \\ \underline{I}_1 = \underline{I}_0 - \underline{I}'_2 \end{cases} \quad (3.14)$$

Ці рівняння описують електромагнітні процеси у двоконтурній схемі. Еквівалентні схеми заміщення трансформатора використовують для аналізу й розрахунків режимів його роботи, тому їх ще називають розрахунковими схемами заміщення трансформатора.

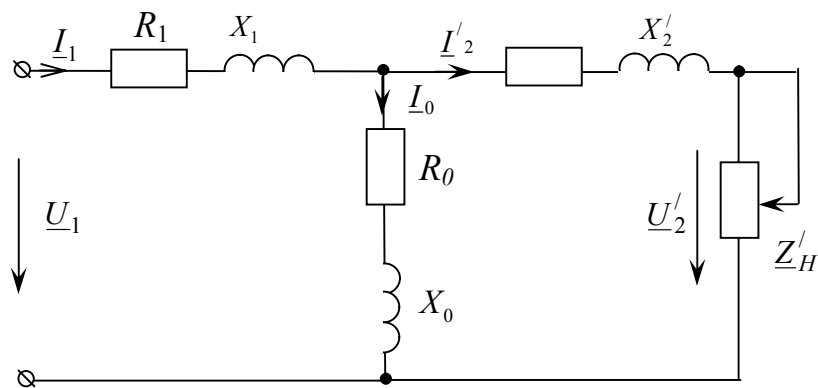


Рисунок 3.4 – Т-подібна схема заміщення однофазного трансформатора

### Паспортні дані й зовнішня характеристика трансформатора

У процесі перетворення напруги в трансформаторі виникають викликані нагріванням втрати електричної енергії в обмотках і магнітопроводі. Тривалий перегрів обмоток може викликати старіння і руйнування ізоляції, тому для забезпечення тривалої роботи силового трансформатора завод-виробник задає показники, що називають паспортними даними:

- повна потужність  $S_H$ ;
- коефіцієнт трансформації  $k$ ;
- напруги  $U_{1H}$  і  $U_{2H}$ ;
- напруга короткого замикання  $U_{кз}$ ;
- струми  $I_{1H}$ ,  $I_{2H}$  і струм режиму холостого ходу  $I_0$ ;
- частота  $f_H$ ;
- втрати в сталі магнітопроводу і в обмотках та ін.

У процесі тривалої експлуатації властивості ізоляції погіршуються, зростають втрати енергії. Тому періодично перевіряють основні дані трансформатора, які характеризують втрати енергії в обмотках, ізоляції і сталі магнітопроводу. Для цього проводять два досліді: дослід режиму холостого ходу і дослід короткого замикання, на підставі яких визначають параметри схем заміщення [7].

### Зовнішня характеристика трансформатора

Робочі властивості трансформатора характеризують залежністю напруги на навантаженні  $U_2$  і ККД  $\eta$  від струму  $I_2$ . Залежність  $U_2 = f(I_2)$  при різному за характером навантаженні (активному, реактивному, ємнісному) називають зовнішньою характеристикою трансформатора. Зовнішня характеристика трансформатора  $U_2 = f(I_2)$  і залежність  $\eta = f(I_2)$  можуть бути отримані дослідним шляхом або розраховані за еквівалентною схемою заміщення.

Вигляд залежності  $U_2 = f(I_2)$  визначається характером навантаження. Так,

при ємнісному навантаженні ( $\cos \varphi < 0$ ) із зростанням струму  $I_2$  напруга  $U_2$  підвищується, а при індуктивному ( $\cos \varphi > 0$ ) та активному ( $\cos \varphi < 1$ ) – падає (рис. 3.5).

Коефіцієнт корисної дії трансформатора  $\eta$  дорівнює відношенню корисної активної потужності  $P_2$  до всієї активної потужності, що надходить з мережі:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_E + \Delta P_M}, \quad (3.15)$$

де  $\Delta P_M$  – втрати потужності в сталі магнітопроводу (магнітні втрати);

$\Delta P_E$  – втрати потужності в міді обмоток (електричні втрати).

Корисна потужність трансформатора виражається залежністю

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 = \beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2, \quad (3.16)$$

де  $S_H$  – повна потужність трансформатора, ВА;

$\beta = I_2 / I_{2H}$  – коефіцієнт навантаження.

$$I_2' = I_2 \cdot \frac{1}{k}; \quad R_2' = R_2 \cdot k^2; \quad X_2' = X_2 \cdot k^2; \quad U_2' = U_2 \cdot k; \quad Z_2' = Z_2 \cdot k^2. \quad (3.17)$$

Втрати в сталі  $\Delta P_M$  не залежать від навантаження і дорівнюють втратам режиму холостого ходу. Втрати в обмотках  $\Delta P_E$  пропорційні квадрату струму і дорівнюють втратам короткого замикання:

$$\Delta P_E = I_2^2 \cdot R_K = \beta \cdot I_H^2 \cdot R_K = \beta^2 \cdot \Delta P_{EH}, \quad (3.18)$$

де  $R_K$  – активний опір обмотки.

Після підстановки вираз для ККД матиме вигляд:

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2}{\beta \cdot S_H \cdot \cos \varphi_2 + \Delta P_M + \beta^2 \cdot \Delta P_{EH}}. \quad (3.19)$$

Залежності,  $\Delta P_C$  і  $\eta$  від коефіцієнта навантаження  $\beta$  представлені на рисунку 3.6. Залежність  $\eta(\beta)$  має максимум. За допомогою підбору параметрів обмоток і магнітопроводу для силових трансформаторів вибирають  $\eta_{\max}$  при  $\beta = 0,6 \div 0,7$ .

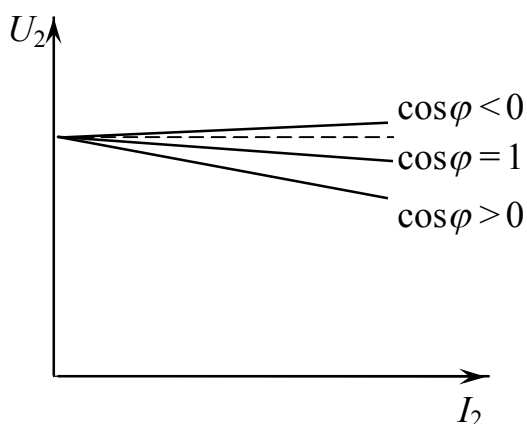


Рисунок 3.5 – Залежність  $U_2(I_2)$  при різному характері навантаження

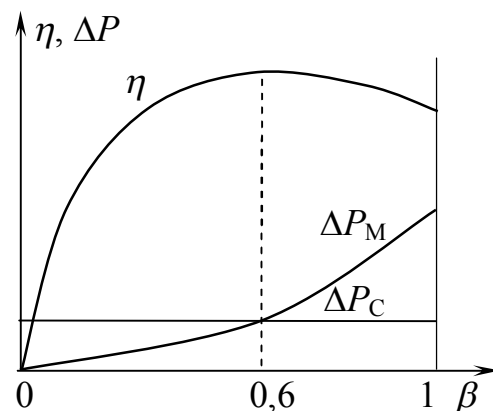


Рисунок 3.6 – Залежності  $\Delta P_C$  і  $\eta$  від коефіцієнта навантаження  $\beta$

### 3.2 Електричні машини постійного струму

Необхідність використання машин постійного струму (МПС), як генераторів, так і двигунів, в електротягових і піднімальних пристроях, в електроприводі з широким діапазоном регулювання швидкості обумовлена рядом їхніх особливостей. У будівництві машини постійного струму використовують в електрозварювальних установках, в електроприводі баштових кранів та ін.

#### *Будова машини постійного струму*

Конструктивно генератор і електродвигун постійного струму виконуються однаково і складаються з двох основних частин: нерухомого електромагніта – індуктора, що створює основне магнітне поле машини, і обертового якоря.

Нерухомий індуктор (рис. 3.7) складається із сталеві литої станини 1, головних полюсів 2 і додаткових полюсів 3. На головних полюсах розміщують обмотки збудження, до яких підводять постійний струм, що створює в магнітному колі машини основне магнітне поле (полюс – повітряний зазор – якір – повітряний зазор – полюс – станина – полюс).

Головні полюси набирають з лакованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм для зменшення втрат від вихрових струмів, що виникають через пульсацію магнітного поля при обертанні якоря. Додаткові полюси виконують звичайно з кованої сталі, а їхню обмотку збудження включають послідовно з обмоткою якоря. Додаткове магнітне поле, створюване ними, служить для поліпшення комутації.

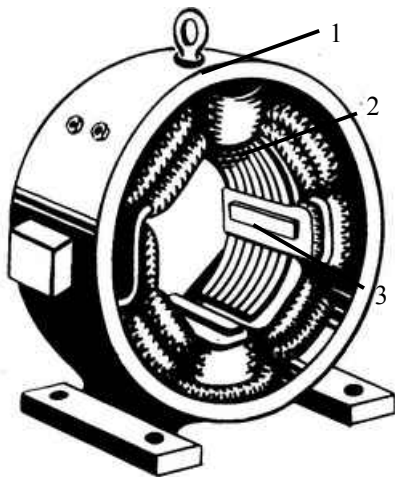


Рисунок 3.7 – Індуктор машини постійного струму

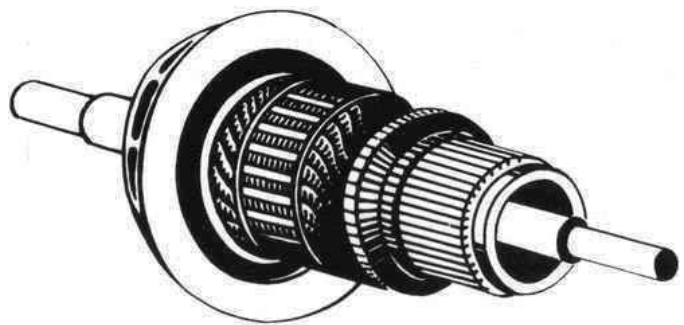


Рисунок 3.8 – Якір машини постійного струму

Обертова частина машини постійного струму – якір з обмотками і колектором (рис. 3.8). Осердя якоря набирають з пластин електротехнічної сталі. На зовнішній поверхні якоря є пази, у які укладають замкнуту обмотку. Обмотку якоря виконують з мідного ізолюваного проводу у вигляді секцій. Секції обмотки укладають в пази у два шари (двошарова обмотка), ізолюють і закріплюють



в пазах дерев'яними клинами, а частини обмотки, що виходять по торцях якоря з пазів, кріплять сталевими дротовими бандажами, щоб запобігти вириванню обмотки з пазів при обертанні якоря. Секції обмотки з'єднують між собою і з колекторними пластинами й утворюють замкнуту обмотку з певним числом паралельних гілок [7].

Колектор, до якого приєднують обмотку якоря, складається з окремих мідних пластин 1, ізолюваних одна від одної і від вала прокладками з міканіту 2 (ізоляційний матеріал на основі слюди). Колектор призначений для випрямлення змінного струму якоря для зовнішнього кола у генераторів; у двигунів - для зміни напрямку струму в провідниках обмотки якоря при його обертанні. З однієї сторони до пластин колектора припаюють секції обмотки якоря. По колектору ковзають нерухомі щітки, які закріплюють у спеціальних щіткотримачах.

### *Принцип дії генератора постійного струму*

У генераторі постійного струму відбувається перетворення механічної енергії, що підводиться від первинного двигуна, на електричну, яка знімається з обмотки якоря за допомогою колектора й щіток. До щіток генератора приєднуються споживачі електричної енергії.

Дія генератора основана на явищі електромагнітної індукції. ЕРС обмотки якоря  $E$  машини постійного струму визначається конструкцією машини, швидкістю обертання якоря і величиною магнітного потоку, створюваного системою збудження:

$$E = \frac{N}{a} \cdot \frac{p}{60} \cdot \Phi \cdot n = C_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (3.20)$$

де  $C_e = \frac{N}{a} \cdot \frac{p}{60}$  – конструктивна постійна машини, що залежить від типу обмотки якоря і числа пар полюсів;

$N$  – загальне число провідників якоря;

$a$  – число пар паралельних гілок обмотки якоря;

$p$  – число пар полюсів;

$n$  – швидкість обертання, об/хв;

$\Phi$  – магнітний потік пари полюсів машини, Вб.

Основне рівняння генератора:

$$U = E - I_a \cdot R_a, \quad (3.21)$$

де  $R_a$  – сумарний опір кола якоря,

$I_a$  – струм якоря,

$U$  – напруга на затискачах обмотки якоря.

Основне рівняння двигуна:

$$U = E + I_a \cdot R_a. \quad (3.22)$$

### Схеми включення обмоток збудження

Залежно від схеми включення розрізняють МПС з незалежним, паралельним, послідовним і змішаним збудженням. У машинах з незалежним збудженням (рис. 3.9, а) обмотка збудження живиться від стороннього джерела електричного струму, безпосередньо не зв'язаного з якірними колами машини. У МПС паралельного збудження обмотка збудження з'єднана паралельно з колом якоря (рис. 3.9, б). При необхідності обмотку збудження цієї машини можна включити і за схемою з незалежним збудженням. У машинах послідовного збудження обмотка збудження з'єднана послідовно з колом якоря (рис. 3.9, в). Її виконують проводами великого перерізу з малою кількістю витків і малим опором. На головних полюсах машин змішаного збудження (рис. 3.9, г) розташовано по дві котушки, одна з яких з'єднана з колом якоря послідовно, а друга – паралельно.

У МПС невеликої потужності (десятки – сотні ват) магнітне поле збудження створюється постійними магнітами.

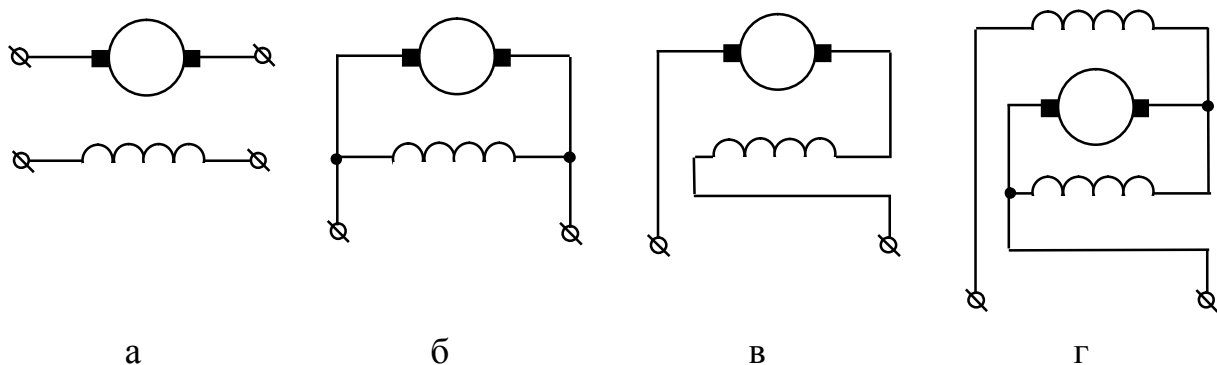


Рисунок 3.9 – Схеми включення обмоток збудження машин:  
 а – з незалежним збудженням; б – паралельного збудження;  
 в – послідовного збудження; г – змішаного збудження.

### 3.3 Асинхронні електричні машини

Асинхронні машини переважно застосовують як двигуни. За оцінками експертів із загальної кількості електричних двигунів, що перебувають в експлуатації, на асинхронні двигуни (АД) припадає 90–95%. Простота, висока надійність у роботі, малі габаритні розміри і низька вартість трифазних асинхронних двигунів (АД) потужністю більше 0,5 кВт обумовили їхнє широке застосування в електроприводах металорізальних верстатів, підйомно-транспортних механізмів, ковальсько-пресових машин, насосів, вентиляторів, компресорів та ін.

Асинхронні двигуни потужністю до 0,5 кВт виконують однофазними і

двофазними. Їх застосовують у системах автоматики, в побутових приладах, в електрифікованому інструменті та ін.

### *Будова асинхронної машини.*

Асинхронна машина, як і будь-яка електрична машина, може працювати в режимі двигуна і режимі генератора.

На рисунку 3.10 показана будова АД. Його основними конструктивними елементами є нерухомий статор і обертовий ротор. Статор складається із станини 1, що є одночасно корпусом двигуна, і закріплених у ній магнітопроводу 2 і обмотки 3. Магнітопровід статора, який є основною частиною магнітного кола машини, виконаний з шихтованої електротехнічної сталі. На його внутрішній циліндричній поверхні є пази, в які укладають провідники обмотки статора. До станини кріплять два бічних щити 4 з наскрізними центральними отворами для підшипників вала ротора. Ротор АД 5 складається з пакета магнітопроводу і обмотки. Насаджений на вал 8 пакет магнітопроводу має форму циліндра, на зовнішній поверхні якого виконані пази, де розміщується обмотка.

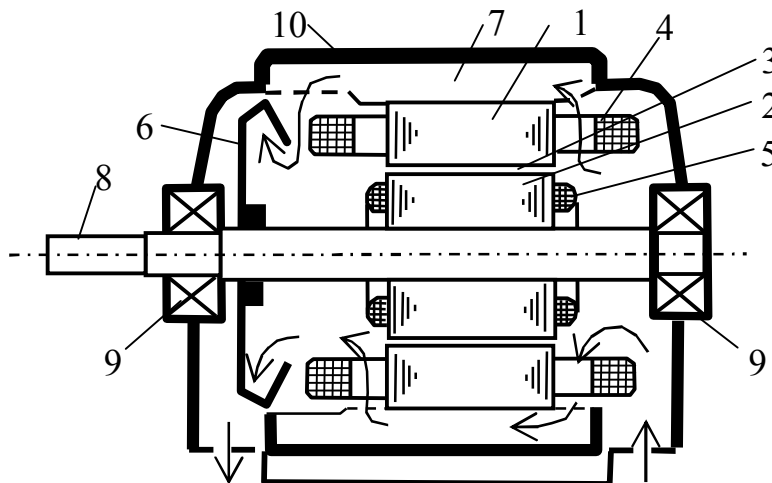


Рисунок 3.10 – Будова асинхронного двигуна:

- 1 – осердя статора; 2 – осердя ротора; 3 – повітряний зазор; 4 – обмотка статора; 5 – обмотка ротора; 6 – вентилятор; 7 – вентиляційні канали (стрілками показаний напрямок руху повітря, що охолоджує, по каналах); 8 – вал; 9 – підшипники; 10 – станина

Залежно від типу обмотки ротор АД може бути короткозамкненим або фазним. У пази короткозамкнених роторів вкладені мідні стрижні, що з'єднуються з торців короткозамкненими кільцями. Така обмотка має вигляд «білячої клітки» (рис. 3.11, а).

У пази фазного ротора укладають провідники секцій трифазної обмотки, що з'єднуються в «зірку» (рис. 3.11,б). Вільні виводи фаз обмотки ротора приєднують

до трьох (за числом фаз) ізольованих одне від одного контактних кілець. На кільця накладені закріплені в щіткотримачах щітки, за допомогою яких обмотки ротора з'єднується з регулювальним або пусковим реостатом.

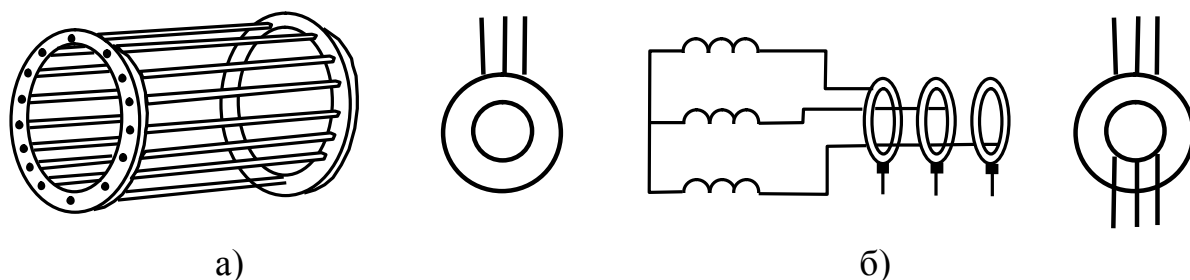


Рисунок 3.11 – Обмотки ротора АД з їх умовними позначеннями  
а) – короткозамкнена; б) – з фазним ротором.

### Принцип роботи асинхронної машини

Принцип роботи заснований на використанні обертового магнітного поля. При підключенні до мережі трифазної обмотки статора створюється обертове магнітне поле, кутова швидкість якого визначається частотою мережі  $f$  і числом пар полюсів обмотки  $p$ :

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{p}, \text{ рад/с.} \quad (3.23)$$

Перетинаючи провідники обмотки статора і ротора, це поле відповідно до закону електромагнітної індукції наводить в обмотках *ЕРС*. При замкнутій обмотці ротора в її колі протікає струм, взаємодія якого з результируючим магнітним полем створює електромагнітний момент на валу асинхронної машини. Якщо цей момент перевищує момент опору на валу двигуна, вал починає обертатися і обертає робочий механізм. Кутову швидкість магнітного поля  $\omega_1$  називають синхронною. Звичайно кутова швидкість ротора  $\omega_2$  не дорівнює кутовій швидкості магнітного поля  $\omega_1$ . Звідси і назва двигуна асинхронний, тобто несинхронний.

Робота асинхронної машини характеризується ковзанням  $s$ , що являє собою відносну різницю кутових швидкостей поля  $\omega_1$  і ротора  $\omega_2$ :

$$s = \frac{\omega_1 - \omega_2}{\omega_1}. \quad (3.24)$$

Значення і знак ковзання залежать від кутової швидкості ротора відносно магнітного поля і визначають режим роботи асинхронної машини. Так, у ідеальному режимі холостого ходу ротор і магнітне поле обертаються з однаковою частотою в одному напрямку, тобто ротор нерухомий відносно обертового магнітного поля, і ковзання  $s$  дорівнює нулю. *ЕРС* в обмотці ротора не індукуються, струм ротора й електромагнітний момент машини дорівнюють нулю. При

пуску АД в перший момент часу ротор нерухомий:  $\omega_2 = 0, s = 1$ . Таким чином, ковзання в режимі двигуна змінюється від  $s = 1$  в початковий момент пуску до  $s = 0$  у ідеальному режимі холостого ходу.

При обертанні ротора із швидкістю  $\omega_2 > \omega_1$  у напрямку обертання магнітного поля ковзання стає від'ємним. Машина переходить у генераторний режим і розвиває гальмовий момент. При обертанні ротора в напрямку, протилежному напрямку обертання магнітного поля ( $s > 1$ ), асинхронна машина переходить у режим противключення і також розвиває гальмовий момент. Таким чином, залежно від ковзання розрізняють:

- режими двигуна ( $s$  змінюється від 0 до 1);
- генераторний ( $s$  змінюється від « $-\infty$ » до 0) ;
- противключення ( $s$  змінюється від 1 до « $+\infty$ »).

Режими генераторний і противключення використовують для гальмування асинхронних двигунів [7].

У сучасних АД, залежно від їхнього типу, при номінальному навантаженні значення ковзання  $s_{ном}$  знаходиться в діапазоні від 0,015 до 0,08.

#### *ЕРС статора і ротора*

Обертове магнітне поле в кожній з обмоток статора і ротора індуктує змінну ЕРС. ЕРС окремих секцій обмотки мають різні фази і їх необхідно складати як вектори. Тому загальна ЕРС фазної обмотки менша за арифметичну суму ЕРС окремих секцій. Для врахування цієї обставини до формули ЕРС вводять обмоточний коефіцієнт  $k$ . Таким чином, ЕРС фазної обмотки статора:

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi, \quad (3.25)$$

де  $f_1$  – частота струму статора;

$w_1$  – число витків фазної обмотки;

$k_1$  – обмотковий коефіцієнт статора (значення  $k_1$  лежить в діапазоні від 0,9 до 0,95);

$\Phi$  – магнітний потік обертового поля.

Аналогічною формулою визначають ЕРС фази ротора:

$$E_2 = 4,44 \cdot f_2 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi, \quad (3.26)$$

де  $f_2$  – частота струму ротора;

$w_2$  – число витків фази ротора;

$k_2$  – обмотковий коефіцієнт ротора.

У випадку короткозамкненого ротора  $k_2 = 1$ .

Магнітне поле, обертаючись у просторі з синхронною швидкістю  $n_1$  (об/хв), відносно обертового ротора, має швидкість

$$n_s = n_1 - n_2, \quad (3.27)$$

де  $n_2$  – швидкість ротора.

За кожний оберт поля відносно ротора фаза його  $EPC$  змінюється на  $360 \cdot p$  електричних градусів, що відповідає  $p$  повним періодам  $EPC$ . Частота  $EPC$  ротора при цьому стає рівною

$$f_2 = \frac{n_s \cdot p}{60} = f_2 \cdot s. \quad (3.28)$$

Тобто частота  $EPC$  ротора, а отже, і величина  $EPC$   $E_2$  пропорційні ковзанню. Найбільшою частота  $EPC$  ротора буде в початковий момент пуску, коли  $s=1$ . При цьому вона дорівнює частоті живильної мережі  $f_1$ . З розгоном двигуна убуває ковзання і зменшується частота струму ротора. У робочому режимі двигуна, що живиться струмом з частотою  $f_1 = 50$  Гц, частота струму ротора становить від 1 до 2 Гц. Якщо  $s=1$ , тоді  $f_2 = f_1$  та  $EPC$  нерухомого ротора має вигляд:

$$E_{2H} = 4,44 \cdot f_1 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi. \quad (3.29)$$

Підставивши  $E_{2H}$  у формулу (3.26), одержимо  $EPC$  обертового ротора:

$$E_2 = E_{2H} \cdot s. \quad (3.30)$$

Таким чином,  $EPC$   $E_2$ , як і її частота, з розгоном ротора зменшується. Відношення  $EPC$  статора  $E_1$  (3.25) до  $EPC$  нерухомого ротора  $E_{2H}$  (3.29) називають коефіцієнтом трансформації  $EPC$  асинхронного двигуна

$$k_e = \frac{E_1}{E_{2H}} = \frac{w_1 \cdot k_1}{w_2 \cdot k_2}. \quad (3.31)$$

$EPC$  статора і ротора  $E_1$  і  $E_2$  створюються головним обертовим потоком, який замикається через повітряний зазор між статором і ротором. Крім головного потоку, кожна з обмоток створює потік, що зчіплюється лише з нею самою. Цей потік називається потоком розсіювання. Він замикається через пази, а також навколо лобових частин обмоток. З огляду на, те що потоки розсіювання проходять в основному по повітрю, можна вважати їх пропорційними струмам в обмотках. Потоки розсіювання індуктують в обмотках статора і ротора  $EPC$  розсіювання  $\underline{E}_{p1}$  і  $\underline{E}_{p2}$ . Ці  $EPC$  можуть бути враховані як індуктивні падіння напруги в обмотках:

$$\underline{E}_{p1} = -j \cdot \underline{I}_1 \cdot X_1 = -j \cdot I_1 \cdot \omega_1 \cdot L_1; \quad (3.32)$$

$$\underline{E}_{p2} = -j \cdot \underline{I}_2 \cdot X_2 = -j \cdot \underline{I}_2 \cdot \omega_2 \cdot L_2, \quad (3.33)$$

де  $\underline{I}_1$  і  $\underline{I}_2$  – струми статора і ротора;

$X_1$  і  $X_2$  – індуктивні опори статорної і роторної обмоток;

$L_1$  і  $L_2$  – індуктивності розсіювання статора і ротора.

Оскільки ми виходимо з пропорційної залежності між потоками розсіювання і струмами, що їх створюють, то індуктивності розсіювання  $L_1$  і  $L_2$  є величинами постійними. Вони залежать від конструктивних особливостей обмоток, форми пазів статора й ротора. Оскільки частота ротора не залишається постійною, а залежить від ковзання, залежним від ковзання виявляється і індуктивний опір ротора

$$X_2 = \omega_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_2 \cdot L_2 = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2 \cdot s, \quad \text{або} \quad X_2 = X_{2H} \cdot s, \quad (3.34)$$

де  $X_{2H} = 2\pi \cdot f_1 \cdot L_2$  – індуктивний опір обмотки нерухомого ротора (при  $s = 1$ ).

#### *Рівняння електричної рівноваги статора і ротора*

*ЕРС* кожної фазної обмотки статора врівноважуються прикладеною напругою мережі  $U_1$ . Крім того, за рахунок напруги мережі покривається падіння напруги ( $I_1 \cdot R_1$ ) в активному опорі обмотки статора  $R_1$ , створюване струмом статора  $I_1$ . Рівняння електричної рівноваги статора має вигляд:

$$\underline{U}_1 + \underline{E}_1 + \underline{E}_{p1} - \underline{I}_1 \cdot R_1 = 0 \quad \text{або} \quad \underline{U}_1 = -\underline{E}_1 - \underline{E}_{p1} + \underline{I}_1 \cdot R_1. \quad (3.35)$$

$E_1$  за фазою відстає від обертового потоку на чверть періоду або на кут  $90^\circ$ . *ЕРС* розсіювання  $E_{p1}$  відстає на кут  $90^\circ$  від струму  $I_1$ . Активне падіння напруги  $I_1 \cdot R_1$  збігається із струмом за фазою. Оскільки  $E_{p1} = I_1 \cdot X_1$ , то

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot R_1 + j \cdot \underline{I}_1 \cdot X_1 \quad \text{або} \quad (3.36)$$

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1, \quad (3.37)$$

де  $\underline{Z}_1 = R_1 + j \cdot X_1$  – комплекс повного опору фази статора.

У комплексній формі рівняння електричної рівноваги статора має вигляд:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot (R_1 + j \cdot X_1) = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 \quad (3.38)$$

Оскільки опір фазних обмоток статора  $\underline{Z}_1$  звичайно невеликий, можна знехтувати падінням напруги  $\underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1$ , тоді

$$\underline{U}_1 \approx \underline{E}_1 \cong \underline{\Phi}. \quad (3.39)$$

Отже, при постійній нарузі мережі обертовий магнітний потік практично постійний і не залежить від навантаження. Це є дійсним для невеликих значень струмів статора.

Обертовий магнітний потік індуктує у фазах ротора ЕРС  $E_2$ , що викликає струм  $I_2$ . Струм ротора створює потік розсіювання, ЕРС розсіювання має вигляд  $\underline{E}_{p2} = -j \cdot \underline{I}_2 \cdot X_2$  і падіння напруги в активному опорі ротора  $\underline{I}_2 \cdot R_2$ .

Таким чином, рівняння електричної рівноваги ротора:

$$\underline{E}_2 + \underline{E}_{p2} = \underline{I}_2 \cdot R_2 \quad \text{або} \quad (3.40)$$

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 \cdot R_2 + j \cdot \underline{I}_2 \cdot X_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2, \quad (3.41)$$

де  $\underline{Z}_2 = R_2 + j \cdot X_2$  – комплекс повного опору фази ротора.

У комплексному запису:

$$\underline{E}_2 = \underline{I}_2 \cdot (R_2 + j \cdot X_2) = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 \quad (3.42)$$

Цьому рівнянню відповідає векторна діаграма ротора, зображена на рисунку 3.12. З рівняння напруг струм ротора дорівнює за модулем:

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}}. \quad (3.43)$$

Величини  $E_2$  і  $X_2$  залежать від ковзання. Взевши до уваги що  $E_2 = E_{2H} \cdot s$  і  $X_2 = X_{2H} \cdot s$ , отримуємо

$$I_2 = \frac{E_{2H} \cdot s}{\sqrt{R_2^2 + X_{2H}^2 \cdot s^2}} = \frac{E_{2H}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{s}\right)^2 + X_{2H}^2}}. \quad (3.44)$$

У цій формулі залежною від навантаження змінною величиною є ковзання  $s$ . Формула показує, що струм ротора буде максимальним при максимальному ковзанні, тобто в початковий момент пуску двигуна, коли  $s = 1$ . Із зменшенням ковзання струм ротора знижується.

Як правило,  $R_2 < X_{2H}$ , тому складова  $\frac{R_2}{s}$  під коренем у знаменнику формули (3.42) впливає на величину струму лише при малих ковзаннях.

Фаза струму відносно ЕРС  $\underline{E}_2$  також залежить від ковзання:

$$\operatorname{tg} \psi_2 = \frac{X_2}{R_2} = \frac{X_{2H} \cdot s}{R_2}. \quad (3.45)$$

При малому ковзанні кут  $\psi_2$  невеликий. На підставі (3.42) електричне коло ротора можна зобразити схемою, що складається з активного  $\frac{R_2}{s}$  і індуктивного  $X_{2H}$  (замість реальних  $R_2$  і  $X_2$ ) опорів, до якої прикладена напруга  $\underline{U}$ , рівна ЕРС нерухомого ротора  $\underline{E}_{2H}$  (рис. 3.13, а). Векторна діаграма такої схеми ротора показана на рисунку 3.13, б.



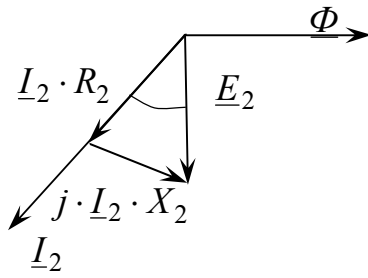
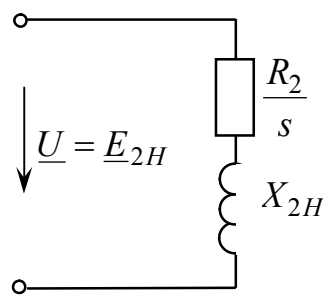
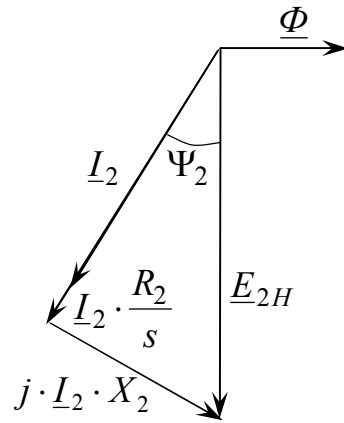


Рисунок 3.12 – Векторна діаграма за рівнянням (3.42)



а)



б)

Рисунок 3.13 – Схема ротора (а) і векторна діаграма (б) при малих ковзаннях

### Втрати і ККД асинхронного двигуна

У АД електрична енергія перетворюється на механічну. В процесі такого перетворення частина її витрачається в самому двигуні. Потужність  $P_1$ , споживана обмоткою статора від мережі, витрачається на втрати в статорі та в роторі.

Втрати в статорі складаються з потужності втрат в осерді статора на гістерезис і вихрові струми (втрати в сталі статора)  $P_c$  і потужності електричних втрат в обмотці статора на її нагрівання струмом  $P_{E.C}$ :

$$P_{E.C} = m_1 \cdot I_1^2 \cdot R_1, \quad (3.46)$$

де  $m_1$  – число фаз статора;

$I_1$  – струм статора;

$R_1$  – активний опір фази статора.

Якщо від потужності  $P_1$  відняти втрати в статорі, то отримаємо потужність, яка називається електромагнітною потужністю двигуна  $P_{E.M}$ . Це потужність обертового поля. Деяка її частина є електричними втратами в роторі –  $P_{E.P}$ :

$$P_{E.P} = m_2 \cdot I_2^2 \cdot R_2, \quad (3.47)$$

де  $I_2$  – струм ротора;

$R_2$  – активний опір фази ротора;

$m_2$  – число фаз ротора.

Втратами в сталі ротора внаслідок малої частоти струму ротора можна зневажити. Частина електромагнітної потужності, що залишилася, перетворюється на механічну  $P_2'$ . Якщо від неї відняти потужність механічних втрат  $P_M$ , обумовле-

них тертям у підшипниках і об повітря, і потужність додаткових втрат  $P_{\text{д}}$ , пов'язаних з пульсаціями магнітного потоку в зубцевій зоні магнітопроводу і з полями розсіювання, то одержимо механічну потужність на валу  $P_2$ . Тоді ККД двигуна:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1}, \quad (3.48)$$

де  $\Delta P$  – сумарні втрати у двигуні.

Деякі з втрат (наприклад, втрати в сталі) практично не залежать від навантаження; інші (наприклад, електричні в обмотках статора й ротора) – пов'язані з навантаженням. В цілому із зростанням навантаження зростають і втрати, а отже, і нагрівання двигуна. Гранична механічна потужність на валу, яку двигун може розвивати довгостроково (необмежено довго), не перегріваючись понад припустиму температуру, називається номінальною потужністю двигуна і вказується у паспорті. ККД двигуна при номінальному навантаженні значною мірою залежить від номінальної потужності двигуна. Чим більша потужність двигуна, тим менші відносні втрати в ньому й більший ККД. Для великих асинхронних двигунів номінальний ККД досить високий і становить від 0,9 до 0,97, в той час як для двигунів малих потужностей (близько 1 кВт) він дорівнює лише  $0,7 \div 0,8$ . Крім того, за інших рівних умов, номінальний ККД вищий у двигуна з більшою синхронною швидкістю [7].

Електромагнітна потужність двигуна  $P_{EM}$  може бути записана як добуток моменту електромагнітних сил  $M$  і кутової швидкості поля  $\omega_1$ :

$$P_{EM} = M \cdot \omega_1 = M \cdot \frac{2\pi \cdot n_1}{60}. \quad (3.49)$$

У свою чергу, механічна потужність ротора  $P_2'$  дорівнює добутку моменту і кутової швидкості ротора  $\omega_2$ :

$$P_2' = M \cdot \omega_2 = M \cdot \frac{2\pi \cdot n_2}{60}. \quad (3.50)$$

Електромагнітна потужність ротора:

$$P_{E.P} = P_{EM} - M \cdot \frac{2\pi}{60} (n_1 - n_2) = M \cdot \frac{2\pi \cdot n_1}{60} \cdot \frac{n_1 - n_2}{n_1} = M \cdot \omega_1 \cdot s = P_{EM} \cdot s. \quad (3.51)$$

При пуску двигуна, коли  $s = 1$ , електромагнітна потужність  $P_{EM}$  дорівнює потужності втрат у роторі  $P_{E.P}$ . З розгоном двигуна втрати в роторі зменшуються. Таким чином, ковзання  $s$  є мірою втрат у роторі.

У нормальному режимі роботи двигуна мале значення ковзання  $s$  (порядку декількох відсотків) є важливою умовою його економічності.

## Пуск асинхронних двигунів

Під пуском розуміють подачу змінної напруги на затискачі АД і його наступний розгін до швидкості, обумовленої частотою напруги живлення й моментом опору на валу.

У початковий момент пуску ротор АД нерухомий і в його обмотці індуктується  $E_{PC}$  максимальної величини, частота якої дорівнює частоті живлячої напруги. Ковзання ротора в цей момент часу  $s = 1$ , і струм ротора досягає найбільшого значення. Споживаний двигуном струм при  $s = 1$  називається пусковим струмом  $I_{\Pi}$ . Кратність пускового струму  $k_{\Pi}$  відносно номінального струму  $I_{H}$  значна і становить від 5 до 7.

Залежно від типу двигуна, його потужності, опору навантаження виконавчого механізму використовують різні способи пуску АД.

### Пуск АД з короткозамкненим ротором

Пуск АД шляхом безпосереднього підключення до мережі змінного струму без обмеження струмів називають прямим пуском. Втрати в обмотках АД пропорційні квадрату струму, тому тривалість прямого пуску обмежують, щоб уникнути перегріву обмоток і виходу з ладу двигуна.

Прямий пуск застосовують для двигунів з короткозамкненим ротором, які використовують для приводу механізмів з невеликим моментом інерції і час розгону яких до сталої швидкості порівняно невеликий. Схема прямого пуску АД

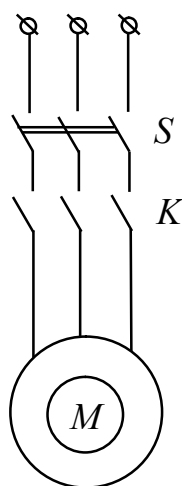


Рисунок 3.14 – Схема прямого пуску АД

(рис. 3.14) досить проста, що сприяло її широкому поширенню. Для прямого пуску необхідно, щоб обертовий момент АД перевищував момент опору механізму. Пуск двигунів механізмів з великим моментом інерції здійснюється або подачею зниженої напруги на АД, або введенням до кола статора струмообмежуючих опорів. При пуску за схемою з струмообмежуючими опорами (рис. 3.15) спочатку включається контактор  $K$  і розгін двигуна здійснюється з ввімкненими в коло обмотки статора активними (рис. 3.15,а) або реактивними (рис. 3.15,б) опорами. Потім з витримкою часу включається контактор  $K_1$  і

своїми контактами шунтує опори, що обмежують струм в колі обмотки статора. Пуск за схемою 3.15,б називається реакторним. Пуск асинхронних двигунів з фазним ротором оснований на можливості введення додаткових опорів у коло ротора, а, отже, на обмеженні струму ротора в період пуску.

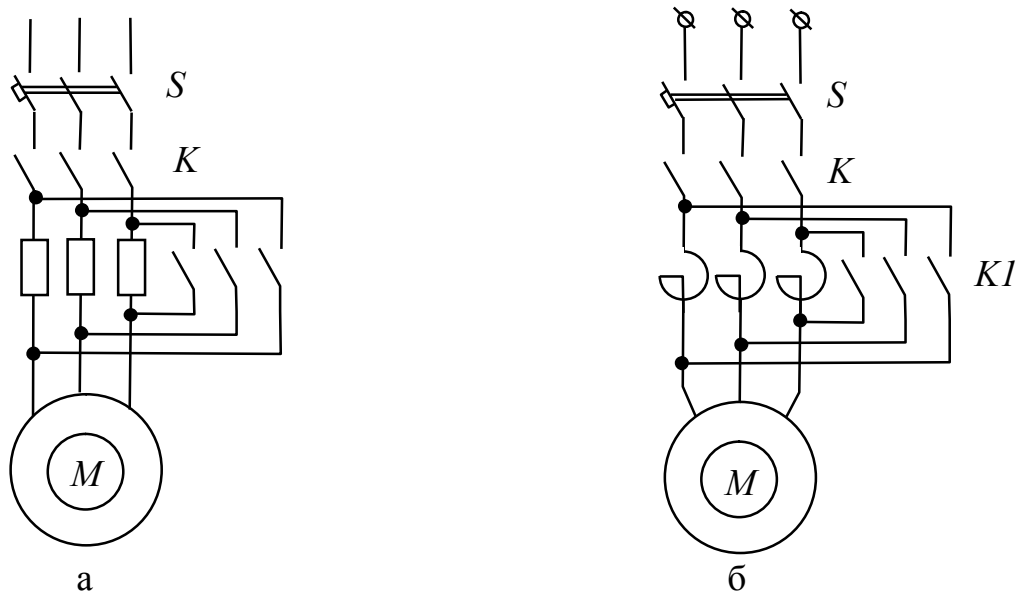


Рисунок 3.15 – Схема пуску асинхронного двигуна: а – з активними опорами в колі статора; б – з реактивними опорами в колі статора

### 3.4 Синхронні електричні машини

Синхронні машини (СМ) застосовують як генератори на електричних станціях і як двигуни змінного струму в нерегульованому електроприводі промислових установок (насосів, компресорів, повітродувок, млинів різного призначення, прокатних станів, дизель-генераторних установок та ін.). Основна позитивна якість синхронних двигунів полягає в можливості працювати з високим коефіцієнтом потужності, що приводить до поширеного їхнього застосування.

Швидкість синхронного двигуна при роботі в сталому режимі із зростанням навантаження на валу до певного значення, що не перевищує максимальний момент  $M_{\max}$ , залишається строго постійною і дорівнює синхронній частоті обертання:

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (3.52)$$

де  $p$  – кількість пар полюсів машини.

#### *Будова синхронних машин*

Синхронні машини, як і інші електричні машини, можуть використовуватися як генератор і як двигун. За будовою СМ мають багато загального з асинхронними. Статор СМ не відрізняється від статора асинхронної – таке ж зібране з листової сталі осердя, той же принцип виконання і з'єднання його обмотки. Ротор СМ являє собою електромагніт постійного струму. Його обмотка живиться від стороннього джерела. Вона називається обмоткою збудження. З'єднання обмотки ротора з джерелом постійного струму здійснюється за допомогою двох контактних

кілець на валу і нерухомих щіток. Як джерело постійного струму для живлення обмотки збудження ротора використовують генератор постійного струму, який монтується на одному валу з ротором. Такий генератор називають збудником. Потужність, необхідна для живлення обмотки збудження, невелика і становить близько від 0,3 до 0,5 процентів від номінальної потужності СМ. Для великих СМ встановлюють ще резервний збудник. Можливе також живлення обмотки збудження від мережі змінного струму, підключеної до статора через випрямлячі.

Застосовують два типи ротора синхронних машин – ротор неявнополюсний, або з неявно вираженими полюсами, і ротор з явно вираженими полюсами, або явнополюсний. У першому випадку осердя ротора являє собою масивне циліндричне тіло з сталі (бочка ротора) з поздовжніми пазами, в які розміщують обмотку збудження (рис. 3.16). Пази й обмотка збудження розміщуються так, щоб одержати синусоїдальний розподіл індукції в зазорі між осердями ротора і статора. Такий ротор застосовують при числі пар полюсів  $p \leq 2$ .

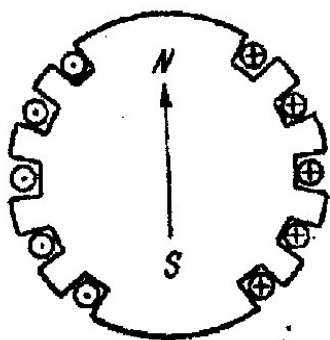


Рисунок 3.16 – Ротор неявнополюсної СМ (поперечний переріз)

Явнополюсний ротор складається з масивного сталевго колеса, насадженого на вал. На зовнішній поверхні колеса кріпляться виготовлені з листової сталі осердя полюсів (рис. 3.17). Для малих машин і при не занадто великому числі полюсів замість колеса на вал встановлюють сталеву втулку, до якої кріпляться полюси. Обмотка збудження у вигляді котушок розміщується на осердях полюсів. Для одержання синусоїдального розподілу індукції зазор між поверхнею полюсного наконечника і внутрішньою поверхнею статора робиться нерівномірним за рахунок особливої форми полюсних наконечників. Синусоїдальний розподіл індукції в зазорі необхідний для одержання синусоїдальної ЕРС в обмотках статора.

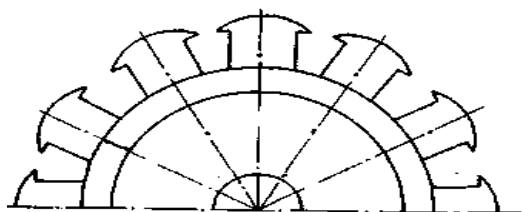


Рисунок 3.17 – Ротор явнополюсної СМ (поперечний переріз)

Таким чином, синхронна машина, як і асинхронна, складається з магнітопроводу, обмоток і механічних частин. Магнітопровід містить осердя полюсів, обід ротора, або просте тіло неявнополюсного ротора, осердя статора і зазор між ротором і статором. Обмотка змінного струму СМ розміщується в пазах осердя статора. Для трифазних машин – це три фазні обмотки, зсувні у просторі на 120 електричних градусів. Ротор несе на собі обмотку збудження, що живиться постійним

струмом. Механічні частини включають литий або зварений корпус, вал, підшипникові щити або стояки та інші деталі, необхідні для монтажу і зборки машини. У машин з неявнополюсним ротором вал звичайно відковують заодно з осердям ротора. Ротор синхронної машини як джерело магнітного поля називають індуктором. Частину машини, в обмотці якої при роботі індуктується *ЕРС*, прийнято називати якорем. У СМ звичайної конструкції якорем є статор.

### *Синхронний генератор*

У синхронному генераторі (СГ) відбувається перетворення механічної енергії на електричну. Ротор генератора з постійним магнітним полем приводиться в обертання первинним двигуном (паровою або гідравлічною турбіною, дизелем та ін.). Внаслідок електромагнітної індукції в обмотках статора (якоря) індуктуються змінні *ЕРС*. Оскільки в статорі трифазного генератора розміщуються три однакові, симетрично зсунуті у просторі на 120 електричних градусів обмотки, їхні *ЕРС* також однакові за своїми амплітудними значеннями і також симетрично зсунуті за фазою на 120 електричних градусів. Частота *ЕРС* якоря визначається швидкістю обертання і числом пар полюсів ротора (3.52). Частота струму стандартизована і повинна бути постійною. З виразу (3.52) видно, що для одержання заданої частоти змінного струму необхідно забезпечити постійну швидкість обертання  $\omega_0$ , тобто таку, що не залежить від навантаження. З цією метою первинні двигуни на електричних станціях обладнують автоматичним регулюванням швидкості [7].

Необхідна для заданої частоти швидкість обертання ротора тим менша, чим більше число пар полюсів  $p$ . Тому генератори, що працюють від тихохідних первинних двигунів, роблять багатопольсними.

За родом первинного двигуна розрізняють два типи синхронних генераторів – турбогенератори і гідрогенератори. Перші встановлюють на теплових електричних станціях, вони працюють від парових турбін, другі застосовуються на гідроелектростанціях. Потужності сучасних турбо і гідрогенераторів часто досягають кількох сотень (500 і більше) тисяч кіловат.

Для парових турбін на теплових електростанціях характерна висока швидкість обертання (звичайно 3000 об/хв). Турбогенератор стандартної частоти  $f = 50$  Гц, який працює з такою швидкістю, повинен мати число пар полюсів  $p = 1$  або  $p = 2$ , тобто його ротор повинен бути двополюсним або чотириполюсним. Крім того, при великій швидкості обертання дуже істотним є забезпечення механічної міцності ротора. Тому турбогенератори виготовляють з неявнополюсним ротором. Вони характеризуються порівняно невеликими радіальними і значними осьовими розмірами.

Гідрогенератори звичайно мають невеликі швидкості обертання. Щоб одержати змінний струм стандартної частоти  $f = 50$  Гц, гідрогенератори виконують на велику кількість пар полюсів ( $p \geq 3$ ). Гідрогенератори виконують явнополюсними.

При холостому ході генератора струм якоря дорівнює нулю і магнітне поле створюється тільки обмоткою збудження ротора. За рахунок розподілу обмоток статора і ротора неявнополюсної машини, а також за рахунок додання особливої форми полюсним наконечникам явнополюсного ротора домагаються того, що зміна потокозчеплення обмоток якоря при обертанні ротора є практично синусоїдальною. Це необхідно для одержання синусоїдальної  $EPC$  у якорі. Така форма кривої  $EPC$  є вимогою стандарту до генераторів змінного струму. В цьому випадку діюче значення  $EPC$  в обмотках якоря визначається з формули, аналогічної для обмоток асинхронної машини (3.30), тобто:

$$E_0 = 4,44 \cdot f \cdot w \cdot k \cdot \Phi_0, \quad (3.53)$$

де  $E_0$  –  $EPC$  фазної обмотки якоря;

$f$  – частота  $EPC$  якоря;

$w$  – число витків фазної обмотки;

$k$  – обмоточний коефіцієнт обмотки якоря;

$\Phi_0$  – потік ротора, що проникає до осердя статора.

При постійній частоті  $f$  на величину  $EPC$  якоря можна впливати потоком  $\Phi_0$ , що створюється струмом збудження ротора  $I_{зб}$ . Залежність  $EPC$  якоря від струму збудження при номінальній швидкості обертання і відсутності навантаження якоря ( $I = 0$ ) називається характеристикою холостого ходу. Звичайний її вигляд представлений на рисунку 3.18. Оскільки  $E_0 = \Phi_0$ , то  $E_0 = f(I_{зб})$  визначається властивостями магнітного кола машини і в іншому масштабі повторює криву  $\Phi_0 = f(I_{зб})$ .

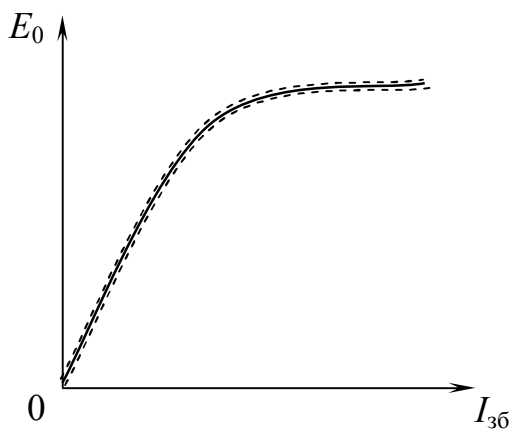


Рисунок 3.18 – Характеристика холостого ходу СГ

Характеристика холостого ходу може бути побудована за даними розрахунку магнітного кола або на підставі досліду холостого ходу, який проводять при номінальній швидкості і відключеному навантаженні. Напряга на якорі вимірюється при поступовому зростанні струму збудження з нуля, а потім при його зменшенні. Внаслідок гістерезису ці напруги можуть не збігатися. Для побудови характеристики прий-

мають середні значення.

### Зовнішня характеристика синхронного генератора

Зовнішньою характеристикою генератора називається залежність напруги від струму навантаження  $U = f(I)$  при  $n = const$ ,  $I_{зб} = const$ ,  $\cos\varphi = const$ . Найбільший інтерес представляє зовнішня характеристика  $U = f(I)$  при номінальній швидкості,  $\cos\varphi$  і струмі збудження в діапазоні струмів навантаження від  $I = 0$  до  $I = I_{ном}$ .

Струм збудження при номінальному навантаженні, тобто при  $U_H$ ,  $I_H$ ,  $\cos\varphi_H$ , називається номінальним струмом збудження.

Генератори розраховують для роботи з номінальним коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi = 0,8 \div 0,9$  для змішаного активно-індуктивного навантаження. Зовнішня характеристика для цього випадка має вид кривої 1 (рис. 3.19), яка при зменшенні навантаження від  $I_H$  до холостого ходу досить швидко зростає. Відносна зміна (підвищення) напруги при цьому може досягати декількох десятків відсотків. Під відносною зміною напруги розуміють виражене у відсотках до номінального підвищення напруги при переході від режиму номінального навантаження до холостого ходу. Воно дорівнює

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_H}{U_H} \cdot 100\% . \quad (3.52)$$

Оскільки  $\cos\varphi$  навантаження може відрізнятись від номінального, то це, у свою чергу, відбивається на зовнішній характеристиці генератора. На рис. 3.19

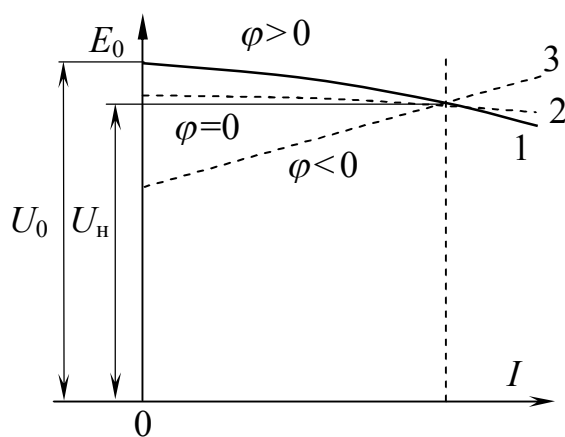


Рисунок 3.19 – Зовнішні характеристики синхронного генератора

крива 2 зображує зовнішню характеристику при активному навантаженні ( $\varphi = 0$ ), крива 3 при активно-ємнісному навантаженні ( $\varphi < 0$ ). Зовнішню характеристику можна побудувати за допомогою векторних діаграм або за даними досліду.

Для підтримки напруги генератора постійною при зміні навантаження за величиною і характером регулюють струм збудження ротора.



## 4 ЕЛЕКТРИЧНІ АПАРАТИ

### 4.1 Електричні апарати: загальні відомості та класифікація

#### *Загальні відомості*

На усіх етапах виробництва, перетворення, транспортування та споживання електричної енергії електричні апарати займають чільне місце. Слід зазначити, що структура ринку електричних апаратів постійно змінюється: з часом деякі види апаратів відходять у минуле, натомість інші апарати виходять на нові рівні розвитку, знаходячи для себе нові застосування. Крім того, успіхи у розвитку електротехніки та суміжних галузей сприяють появі нових принципів побудови і нових видів апаратів. Так, наприклад, суттєві успіхи у розвитку напівпровідникової техніки сприяли освоєнню масового виробництва й широкому застосуванню відносно дешевих напівпровідникових приладів, на базі яких були створені компактні й надійні перетворювачі – випрямлячі (rectifier) та інвертори (inverter). Ці пристрої на сьогодні повністю витіснили такі перетворювачі, як електромашинні, електромеханічні та ртутні.

Електромеханічні апарати майже повністю витіснені напівпровідниковою та мікропроцесорною технікою з такої сфери як автоматичне керування. Але у такій дуже важливій галузі як енергетика, позиції електромеханічних комутаційних апаратів, внаслідок їх деяких унікальних властивостей, не похитнулися й навіть укріпилися і не існує скільки-небудь обґрунтованих прогнозів зменшення зацікавленості споживачів електромеханічних комутаційних апаратів у цих апаратах в енергетичній сфері. Не знижаються і темпи зростання ринку електромеханічних апаратів кіл керування, деякі властивості яких не дозволяють аналогічним за призначенням напівпровідниковим пристроям конкурувати з ними.

Словосполучення «electrical apparatus» у світі вживається у більш широкому розумінні, але у вітчизняній технічній літературі протягом десятиліть зберігалася традиція відносити до електричних апаратів саме електротехнічні пристрої комутації, керування й захисту.

Таким чином, електричний апарат - це електротехнічний пристрій, який використовується для:

- розподілення електричної енергії між споживачами (комутаційні апарати, призначені для вмикання, вимикання та перемикавання в розподільних мережах та інших електричних колах);
- керування, переважно, електродвигунами, вбудованими у різні технологічні процеси (електричні апарати керування);
- захист людей, тварин, майна й довкілля від згубної дії електричної енергії (електричні апарати захисту);

– виконання функцій керування, сигналізації, блокування тощо в допоміжних колах комутаційної апаратури, апаратури керування, а також в колах керування електротехнічного обладнання (апарати кіл керування, не плутати з апаратами керування, які призначені для здійснення комутацій у головних колах).

Кінцевою дією будь-якого електричного апарата є вмикання або вимикання струму в електричному колі за допомогою комутаційного елемента, яким може бути контакт, що замикається або розмикається, або напівпровідниковий пристрій, що змінює свій опір під дією зовнішнього впливу.

Комутація електричних кіл контактами (рис. 2.21,а) в електромеханічних апаратах здійснюється їх замиканням (зближенням й визначеним натисканням) та розмиканням (віддаленням на визначену відстань). Пристрої, позначення яких зображено на рисунку 4.1,б ... 4.1,є, застосовуються у напівпровідникових апаратах [8].

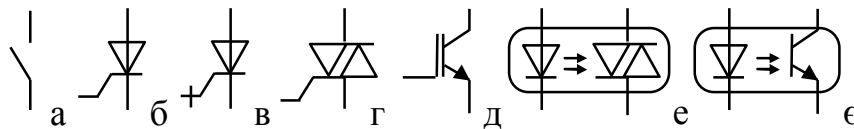


Рисунок 4.1 – Комутаційні елементи електричних апаратів:

а – контакт; б – одноопераційний тиристор; в – двоопераційний тиристор;  
г – симістор; д – інтегрований біполярний транзистор з ізольованим затвором (IGBT транзистор); е – оптосимістор; є – оптотранзистор

### *Класифікація електричних апаратів*

Класифікацію електричних апаратів роблять за їх призначенням, за родом струму, при якому вони мають працювати, за номінативною напругою, за типом комутаційного елемента.

Класифікація електричних апаратів за їх призначенням:

- комутаційні апарати, що здійснюють комутацію електричних кіл при розподіленні електричної енергії;
- апарати керування, що здійснюють керування технологічними об'єктами та застосовуються при автоматизації виробничих процесів;
- апарати захисту, що забезпечують захист людей від шкідливої дії електричної енергії;
- обмежувальні апарати, що забезпечують обмеження надструмів та перенапруг у мережах;
- апарати контролю, що здійснюють моніторинг параметрів технологічних процесів та сигналізують про їх стан.

Така класифікація є досить умовною, оскільки багато апаратів мають ознаки, що відносять їх до різних груп. Наприклад, вимикачі-роз'єднувачі, комбіновані із запобіжниками, можуть бути віднесені і до комутаційних апаратів, і до апаратів керування, і до апаратів захисту. А якщо у цьому апараті застосована вставка так званого струмообмежувального запобіжника, то цей апарат можна віднести й до класу обмежувальних апаратів.

Класифікація електричних апаратів за родом струму, при якому вони мають працювати:

- апарати, що працюють винятково у колах змінного струму;
- апарати, що працюють винятково у колах постійного струму;
- апарати, що можуть працювати у колах постійного і змінного струму.

Класифікація електричних апаратів за номінативною напругою (значення номінальної напруги апарата встановлює виробник, причому вона повинна відповідати значенню номінальної напруги мережі, у якій має працювати апарат з урахуванням визначених виробником умов):

- апарати низької напруги, тобто апарати з номінативною напругою до 1000 В змінного струму або до 1500 В постійного струму;
- апарати середньої напруги, тобто апарати з номінативною напругою від 1000 В до 35 кВ змінного струму (у деяких країнах – до 52 кВ) або від 1,5 кВ до 5 кВ постійного струму;
- апарати високої напруги, тобто апарати з номінативною напругою вище верхньої границі середніх напруг, причому апарати високої напруги – це переважно апарати змінного струму.

Апарати низької, середньої та високої напруги суттєво відрізняються за номенклатурою, конструкцією й умовами роботи, тому, хоча будь-який апарат може мати декілька номінативів (рейтингів) напруги, усі ці значення для даного апарата ніколи не виходять за межі одного діапазону.

За типом комутаційного елемента апарати поділяють на класи:

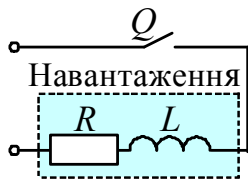
- електромеханічні електричні апарати, тобто апарати, що замикають та розмикають електричні кола за допомогою контактів ;
- напівпровідникові електричні апарати, тобто апарати, що замикають та розмикають електричні кола за допомогою напівпровідникового ключа;
- гібридні електричні апарати, тобто апарати, що комутують електричні кола за допомогою контактів і напівпровідникового ключа, що шунтує їх для запобігання виникнення електричної дуги при їх розмиканні.

Електромеханічні комутаційні апарати замикають та розмикають електричні кола за допомогою контактів, причому будь-який з цих апаратів може бути

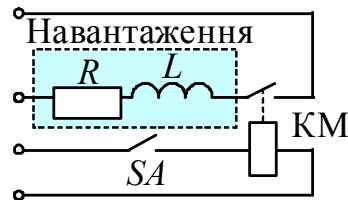
визначений відповідно до середовища, де його контакти розмикаються та замикаються: наприклад повітряний, елегазовий, вакуумний тощо.

Розрізняють електромеханічні апарати з ручним та не ручним керуванням (рис. 4.2). На рисунку 4.2 позначено:

–  $R, L$  – відповідно резистивна та індуктивна складові навантаження;



а



б

Рисунок 4.2 – Схеми підключення до навантажень електромеханічних комутаційних апаратів з ручним керуванням (а) та не ручним електромагнітним керуванням (б)

–  $Q$  – силовий комутаційний апарат з ручним керуванням;

–  $KM$  – контактор (силовий комутаційний апарат з електромагнітним керуванням);

–  $SA$  – контакт керування стороннього апарата [8].

В апаратах з ручним керуванням замикання та розмикання контактів здійснюється за рахунок м'язової енергії оператора, а апарати з не ручним керуванням можуть бути визначені відповідно до способу, яким забезпечується сила, необхідна для замикання та розмикання контактів, наприклад електромагнітні, електропневматичні тощо. Головними перевагами електромеханічних комутаційних апаратів є можливість забезпечення так званої функції роз'єднання та незначне падіння напруги на замкнених контактах при проходженні через них робочого струму (від 10 до 20 мВ при струмах 1000 А та більше; до 60÷80 мВ при менших значеннях струму). Наявність функції роз'єднання забезпечує можливість безпечного проведення робіт у навантаженні при розімкненому стані апарата.

Головними недоліками електромеханічних комутаційних апаратів є наявність рухомих частин (зниження надійності) та виникнення при розмиканні контактів електричної дуги, яка зношує контакти, скорочує ресурс роботи апарата та призводить до небажаних ефектів – теплового, світлового та звукового.

Напівпровідникові комутаційні апарати призначені для вмикання струму в електричних колах за допомогою керування провідністю напівпровідника. В напівпровідникових апаратах постійного струму для комутації електричних кіл зазвичай застосовують транзистори (IGBT транзистори) або двоопераційні тиристори, а в апаратах змінного струму – тиристори різних типів та симістори.

Схеми підключення до навантажень найпростіших напівпровідникових комутаційних апаратів постійного та змінного струму зображені на рисунках 4.3 та 4.4. На рисунку 4.3 позначено:

- $R, L$  – відповідно опір та індуктивність навантаження;
- $VT$  – силовий транзистор у головному колі;
- $R_1, R_2$  – резистори у колі керування;
- $VD1, VD2$  – допоміжні діоди;
- $SA$  – сторонній апарат керування.

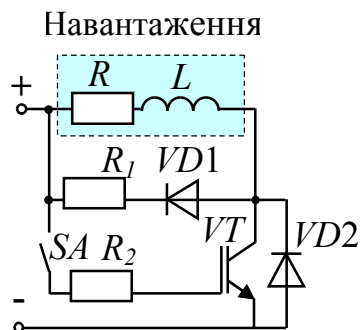


Рисунок 4.3 – Схема підключення напівпровідникового комутаційного апарата постійного струму до навантаження

Напівпровідниковий апарат постійного струму (рис. 4.3) забезпечує комутації струму у навантаженні з опором  $R$  та індуктивністю  $L$  завдяки силовому транзистору  $VT$ , керування яким здійснюється допоміжним контактом стороннього апарата  $SA$ , який працює у колі керування даного апарата.

При розімкненому контакті  $SA$  транзистор  $VT$  знаходиться у закритому стані, струм через навантаження не тече. При замиканні контакту апарата  $SA$  на затвор транзистора надходить додатний потенціал, завдяки чому транзистор  $VT$  відкривається і через навантаження починає текти струм. Розмикання вказаного контакту сприяє запиранню транзистора  $VT$  і перериванню струму у навантаженні. Оскільки процес запирання транзистора є дуже коротким (порядку 1 мкс), за відсутності у схемі гілки  $VD1 - R_1$  магнітна енергія, що нагромаджується в індуктивності  $L$  навантаження перед моментом переривання струму, призведе до виникнення перенапруг, які викличуть пробій ізоляції і створять струмопровідні шляхи, де накопичена в індуктивності енергія перетвориться на теплову. При цьому вийдуть з ладу і навантаження, і джерело живлення, і силовий транзистор, захист якого додатково здійснює діод  $VD2$ .

За наявності гілки  $VD1 - R_1$  у момент запирання транзистора  $VT$  діод  $VD1$  відкривається і утворюється замкнений контур  $R - L - VD1 - R_1$ , струм у якому від початкового значення  $i_0 = \frac{U}{R}$  ( $U$  – напруга живлення) поступово зменшиться до нуля за експоненціальним законом зі сталою часу  $\tau = \frac{L}{(R + R_1)}$ . У момент запирання транзистора  $VT$  миттєве значення напруги на навантаженні  $u$  буде залежати від співвідношення опорів  $R$  та  $R_1$ , а саме  $u = \frac{U \cdot R_1}{R}$ . Інакше кажучи, якщо  $R_1 > R$ , то у момент комутації на навантаженні може виникнути перенапруга певного рівня. Збільшення опору резистора  $R_1$  призводить до пришвидшення процесу розмикання струму (зменшується стала часу  $\tau$ ), але збільшува-

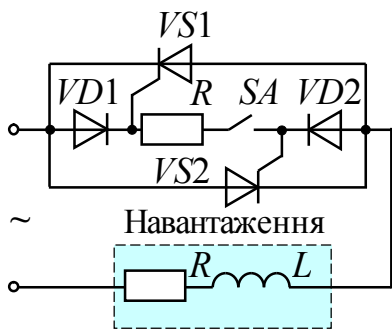


Рисунок 4.4 – Схема підключення напівпровідникового комутаційного апарата змінного струму

ти значення опору  $R_1$  можна лише до рівня, при якому перенапряга у момент комутації не перевищить допустимого значення для ізоляції навантаження та допустимих значень для напівпровідникових приладів.

Напівпровідниковий апарат змінного струму (рис. 4.4) забезпечує комутації струму у навантаженні з опором  $R$  та індуктивністю  $L$  завдяки силовим тиристорам  $VS1$  та  $VS2$ , керування провідністю яких здійснюється допоміжним контактом стороннього апарата  $SA$ . У вихідному

положенні (при розімкненому контакті  $SA$ ) обидва тиристора  $VS1$  та  $VS2$  знаходяться у закритому стані, отже струм через навантаження не тече. При замиканні контакту  $SA$  (у залежності від полярності напруги джерела живлення у той момент) виникне струм в колі керування одного з тиристорів.

Висока швидкодія напівпровідникових комутаційних апаратів змінного струму є їх безумовною перевагою. Іншими перевагами цих апаратів є відсутність будь-яких рухомих частин, відсутність проблеми механічної зносостійкості, відсутність електричної дуги при комутації електричних кіл і створюваних дугою ефектів – теплового, світлового та звукового.

Поряд із зазначеними перевагами, напівпровідникові комутаційні апарати мають й суттєві недоліки:

- відсутність функції роз'єднання;
- велике падіння напруги на комутаційному елементі;
- великі габарити і вартість;
- низька перевантажувальна здатність;
- чутливість до температури середовища;
- чутливість до перенапруг;
- схильність до процесу старіння;
- створення радіоперешкод.

Функція роз'єднання в напівпровідникових комутаційних апаратах не може бути забезпечена, оскільки напівпровідникові прилади не гарантують відсутності струмів витоку та не витримують імпульсних перенапруг високого рівня.

Пряме падіння напруги у напівпровідниковому комутаційному елементі є набагато більшим аніж у контактному елементі і становить від 1 В до 3 В. Отже, при струмі 100 А та падінні напруги 2 В потужність втрат енергії у цьому комутаційному елементі становитиме близько 200 Вт, та коефіцієнт корисної дії

зменшиться до 99,09 %. Таке збільшення втрат (у 50 разів більше, ніж у контактному елементі) має не тільки економічні наслідки, а й може призвести до неприпустимого нагрівання апарата.

Гібридні комутаційні апарати – це апарати, у головних колах яких застосовуються як контактні елементи, так і напівпровідникові прилади. У ввімкненому стані струм головного кола тече переважно через контактні елементи, а при вимиканні струм перетікає у паралельні контактам гілки головного кола, де розташовані напівпровідникові комутаційні пристрої, які й здійснюють відмикання струму. Таким чином, гібридні апарати поєднують переваги електромеханічних та напівпровідникових апаратів – малі втрати енергії у робочому стані, а також високу швидкодію та практичну відсутність електричного зносу контактів.

Вперше принцип гібридної комутації був застосований в конструкціях контакторів змінного струму КТ6433, розроблених у ВНДІЕлектроапарат (Харків) на початку 70-х років минулого століття. Невдовзі були розроблені й гібридні контактори постійного струму, які призначені для роботи в безперервних виробничих циклах металургійних підприємств з частотою до 1200 циклів вмикання-вимикання на годину.

На рисунку 4.5 наведена принципова електрична схема головного кола полюсу гібридного контактора змінного струму та зовнішній вигляд контактора КТ6433, у якому реалізована ця схема [8].

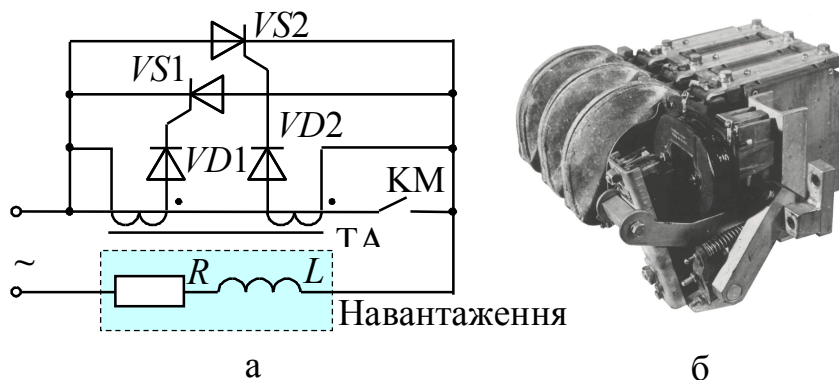


Рисунок 4.5 – Принципова електрична схема головного кола полюсу гібридного контактора змінного струму (а) та зовнішній вигляд контактора КТ 6433 (б)

Хоча тиристори  $VS1$  та  $VS2$  підключені паралельно головному контакту контактора КМ, а на електроди керування цих тиристорів приходять по черзі струмові імпульси від вторинних обмоток трансформатора струму ТА через діоди  $VD1$  та  $VD2$ , при замкнених контактах струм через ці тиристори не тече, оскільки падіння напруги на контактні (а відтак і на тиристорах) є набагато меншим за пороговий струм відпирання тиристора. Таким чином, при замкнених

головних контактах струм у навантаженні з опором  $R$  та індуктивністю  $L$  тече від джерела живлення з напругою  $U$  лише через замкнені контакти. Отже, у цьому режимі падіння напруги на комутаційному елементі гібридного контактора є таким самим, як і у електромеханічного контактора – від 50 до 100 мВ, тому гібридний контактор, як і електромеханічний контактор, не потребує пристроїв для охолодження комутаційних елементів (радіаторів, вентиляторів).

При розмиканні головного контакту на ньому виникає коротка електрична дуга, напруга якої становить від 12 В до 15 В, тому відкривається один з тиристорів –  $VS1$  або  $VS2$ . Оскільки опір тиристора у відкритому стані є набагато меншим за опір дуги, струм головного кола перетікає у тиристор і дуга на контактах згасає – тривалість часу горіння дуги має порядок мікросекунди. Після згасання дуги переривається струм й у первинній обмотці трансформатора ТА (вона увімкнена послідовно з головними контактами) і як наслідок – в колах керування тиристорів. За умови відсутності імпульсів керування, тиристор, у який перетік струм головного кола, закриється, а другий тиристор не відкриється. Таким чином, час переривання струму у навантаженні не перевищує половини періоду коливань напруги джерела (при частоті 50 Гц – не перевищує 10 мілісекунд). Оскільки дуга на контактах горить впродовж дуже короткого проміжку часу, електричний знос контактів гібридних контакторів практично відсутній і електрична зносостійкість наближається до механічної.

Недоліком контакторів, побудованих за даною схемою, є відсутність у них функції роз'єднання, оскільки напівпровідникові прилади – тиристори шунтують міжконтактний проміжок. Тому послідовно з головним колом контактора обов'язково має бути встановлений апарат захисту від коротких замикань (short-circuit protective device, SCPD) – автоматичний відмикач, запобіжник або вимикач, комбінований із запобіжником. Цей апарат повинен забезпечувати функцію роз'єднання у послідовному колі контактор – SCPD.

З появою на ринку потужних силових високовольтних IGBT транзисторів та двоопераційних IGCT тиристорів з'явилися дослідницькі роботи, присвячені розробці гібридних комутаторів – аналогів швидкодіючих відмикачів постійного струму для захисту мереж живлення електротранспорту.

#### **4.2 Структурні частини електричних апаратів**

До складу комутаційного апарата крім головного кола, тобто сукупності струмопровідних частин, що входять до кола, яке апарат має замикати та розмика-



ти за своїм основним призначенням, можуть входити також коло керування, допоміжні кола, полюс та порт.

Колом керування комутаційного апарата називають сукупність його струмопровідних частин (крім головного кола), що входять до кола, яке має застосовуватися для забезпечення апаратом виконання операцій замикання та/або розмикання у головному колі апарата. Допоміжним колом комутаційного апарата називають сукупність його струмопровідних частин, призначених для застосування у будь-яких колах, крім головного кола та кола керування.

Схема на рисунку 4.6 ілюструє поняття головного кола, кола керування та допоміжного кола електричного апарата. На рисунку 4.6 показано електричний апарат 1 з контактами 2, 3, 4 та 5, комутація яких здійснюється електромагнітним актуатором (пристрій, який створює визначений рух при збудженні електричним сигналом) 6 за допомогою контакту 7. Призначенням апарата є вмикання та вимкання контактами 2 та 3 навантаження 8. Контакт 4 призначений для виконання допоміжних функцій (вмикає сигнальну лампу 9), а контакт 5 здійснює комутації в колі керування.

Отже, частини апарата, які є частинами електричного кола навантаження, а саме контакти 2 та 3 з відповідними терміналами (на схемі показані у вигляді кружків) та провідники, що з'єднують контакти з терміналами, складають головне коло апарата (виділені червоним кольором).

Частини апарата, які входять до електричного кола керування 11 цього апарата, а саме котушка 6, а також контакт 5 з відповідними терміналами та провідниками складають коло керування апарата (виділені зеленим кольором).

Частини апарата, які входять до допоміжного електричного кола 12, а саме контакт 4 з відповідними терміналами та провідниками, складають допоміжне коло апарата (виділені синім кольором).

Полюс комутаційного апарата – це його частина, яка пов'язана тільки з однією електрично незалежною віткою головного кола та не містить частин, призначених для спільного монтажу та оперування всіма полюсами разом. До складу полюсу входять його термінали (вхідний та вихідний), головні контакти, жорсткі та гнучкі струмопровідні деталі, які з'єднують контакти з терміналами, а також усі струмопровідні та ізоляційні елементи, що відносяться до відповідної гілки головного кола.

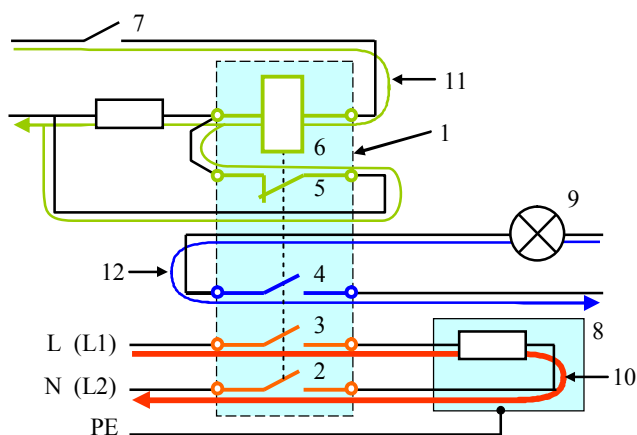


Рисунок 4.6 – Головне коло (10), коло керування (11) та допоміжне коло (12) електричного апарата

На рисунку 4.7 зображено апарати з різною кількістю полюсів – двополюсний вимикач-роз'єднувач (рис. 4.7,а), триполюсний запобіжник-вимикач-роз'єднувач (рис. 4.7,б) та блок з трьох однополюсних запобіжників-вимикачів-роз'єднувачів (рис. 4.7,в). Вхідні термінали усіх полюсів апарата утворюють вхідний порт, а вихідні термінали усіх полюсів апарата утворюють вихідний порт. До вхідних терміналів приєднуються провідники, з'єднані з джерелом живлення, а до вихідних терміналів – провідники, з'єднані з відповідними терміналами навантаження. У деяких апаратах вхідний та вихідний порти можна міняти місцями, для деяких апаратів це неможливо.

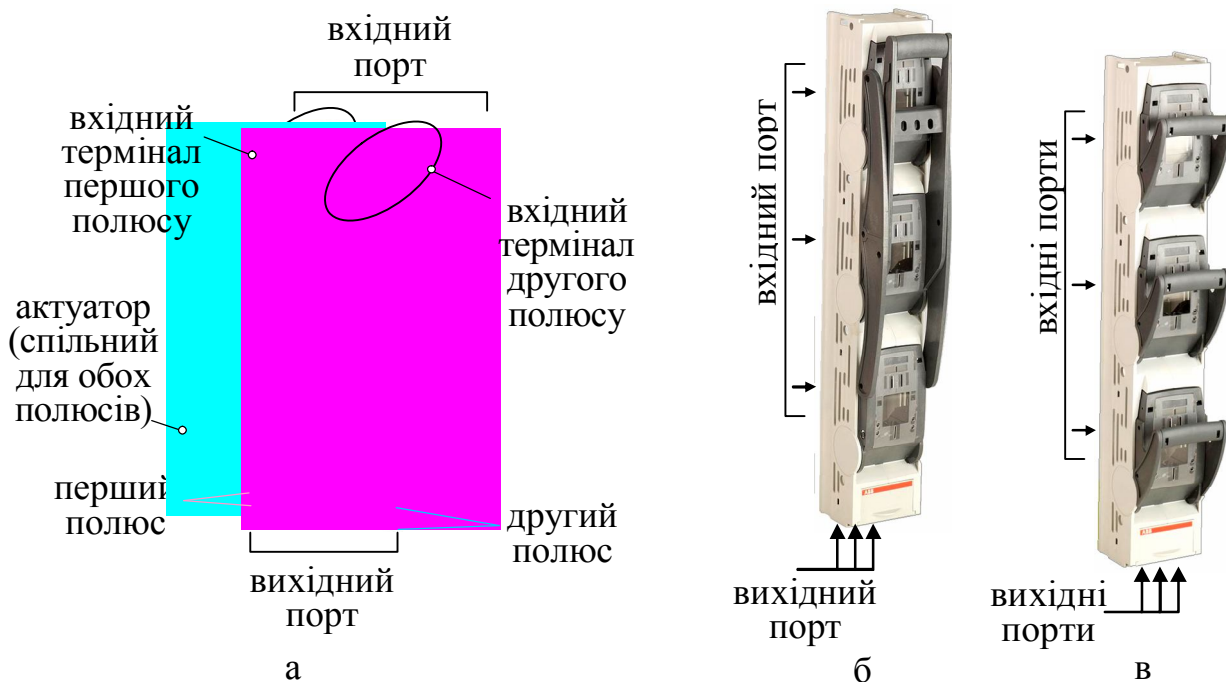


Рисунок 4.7 – Комутаційні апарати з різною кількістю полюсів:  
 а – двополюсний апарат; б – триполюсний апарат;  
 в – блок з трьох однополюсних апаратів

Про можливість або неможливість зміни місць портів має свідчити маркування терміналів. На рисунку 4.7,а верхні термінали мають цифрове позначення «1» та «3», а нижні термінали – «2» та «4». Це означає, що джерело живлення має бути підключено до верхніх, а навантаження – до нижніх терміналів [8].

### 4.3 Контакти електричних апаратів

Поняття контакту комутаційного апарата в Міжнародному електротехнічному словнику (IEV) визначається як сукупність струмопровідних частин, призначених для встановлення безперервності електричного кола, коли вони (ці частини) стикаються, та які впродовж свого відносного переміщення під час спрацьовування розмикають або замикають коло, або, у випадку шарнірних та ковзних контактів, підтримують безперервність кола. Ілюстрація до цього визначення наведена на рисунку 4.8.

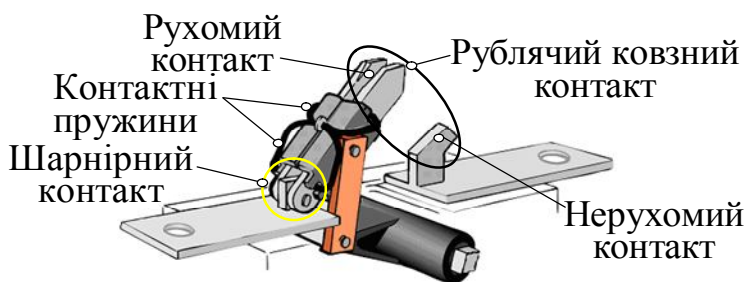


Рисунок 4.8 – Контакти електричного апарата: рублячий ковзний та шарнірний

Рублячий ковзний контакт забезпечує замикання та розмикання кола та підтримує його безперервність у замкненому стані завдяки верхній контактній пружині, а шарнірний контакт завдяки нижній контактній пружині забезпечує підтримку безперервності кола.

Дане поняття поширюють й на ті апарати, які не мають комутаційних елементів (запобіжники, обмежувачі імпульсних виплесків, вимірювальні трансформатори тощо), якщо врахувати, що безперервність електричних кіл підтримують також струмопровідні частини апаратів, які призначені для їх приєднання до зовнішніх кіл, тобто струмопровідні частини терміналів. Саме цьому в англійській науково-технічній літературі не застосовуються звичні для нас терміни «контактний апарат» (contact switching device) або «безконтактний апарат» (contactless switching device), а вживаються терміни, які показують, у який спосіб забезпечується комутація електричних кіл – «механічний комутаційний апарат» (mechanical switching device) та «напівпровідниковий комутаційний апарат» (semiconductor switching device).

Контакт апарата, який здійснює комутації головного кола та призначений у замкненому положенні проводити його струм, називають головним контактом.

Контакт керування або допоміжний контакт, який є замкненим, коли голов-

ні контакти комутаційного апарата є замкненими, та розімкненим, коли вони розімкнені, називають а-контактом або замикальним контактом (a-contact; make contact). Контакт керування або допоміжний контакт, який є розімкненим, коли головні контакти комутаційного апарата є замкненими, та замкненим, коли головні контакти розімкнені, називають b-контактом або розмикальним контактом (b-contact; break contact). Контакт 4 на рис. 4.6 є а-контактом, контакт 5 – b-контактом.

В апаратах низької напруги з робочими струмами понад 1000 А (багатоамперні апарати) та у деяких різновидах апаратів середньої та високої напруги (у тому числі із меншими робочими струмами) крім головних контактів, призначених проводити робочі струми у замкненому стані, у головних колах застосовують додаткові дугогасні контакти ДК (рис. 4.9), на яких встановлюється електрична дуга при розмиканні електричного кола.

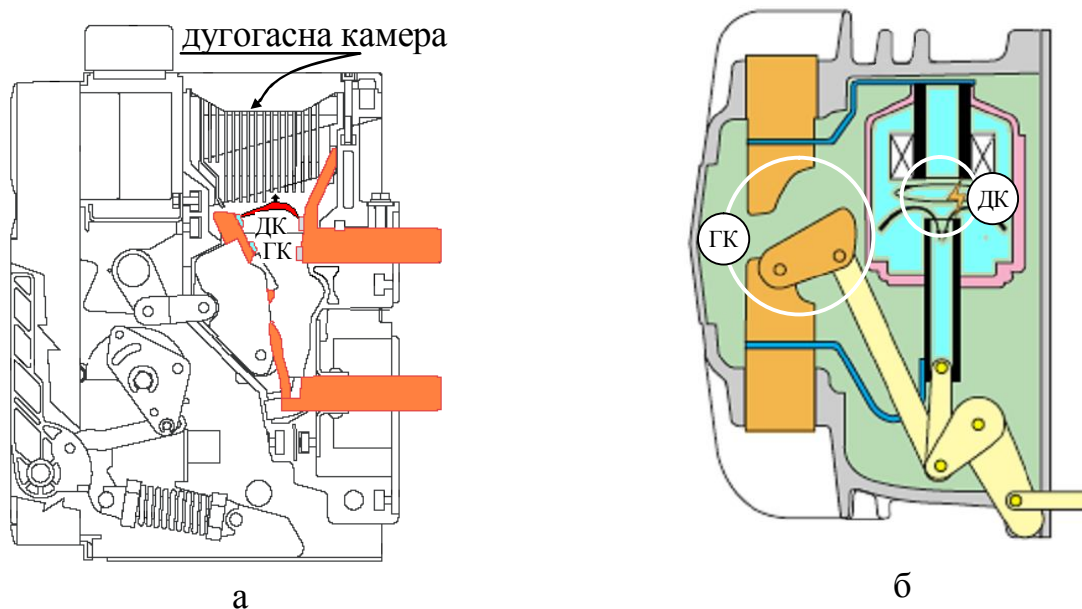


Рисунок 4.9 – Перерізи полюсів багатоамперного селективного відмикача низької напруги (а) та елегазового відмикача середньої напруги (б) з головними (ГК) та дугогасними (ДК) контактами

Дугогасний контакт завжди електрично приєднується паралельно головному контакту, причому конструкція контактної системи побудована таким чином, що дугогасний контакт замикається раніше та розмикається пізніше головного контакту. В переважній більшості комутаційних апаратів їх головні контакти виконують функції й дугогасних контактів. Дугогасні контакти виготовляють з більш дугостійких матеріалів – міді або спеціальних металокерамічних композицій. У замкненому стані головні та дугогасні контакти з'єднані паралельно, тому, завдяки низькому опору срібла, практично весь струм тече через головні контакти. При здійсненні операції вимикання першим розмикається головний контакт (ГК), але електрична дуга на ньому не виникає (отже, головний

контакт захищається від дугового зносу), тому що струм перетікає у коло дугогасного контакту (ДК), а вже після розмикання ДК саме на ньому встановлюється дуга, яка, завдяки електродинамічним силам, пересувається у дугогасну камеру апарата, де і згасає (рис. 4.9,а).

#### **4.4 Роз'єднувачі, вимикачі та комбінації із запобіжниками**

Роз'єднувач – це електромеханічний комутаційний апарат, який забезпечує у розімкненому положенні ізоляційний проміжок відповідно до приписаних вимог. До приписаних вимог мають входити вимоги щодо забезпечення функції роз'єднання, здатність розмикати та замикати коло при незначному струмі або незначній зміні напруги на терміналах кожного з його полюсів (до розмикання та після розмикання). На корпусах роз'єднувачів має бути розміщене попередження «Не розмикати під навантаженням» («Do not operate under load»). Роз'єднувач також здатний проводити струми при нормальних умовах в колі, а також впродовж визначеного часу проводити струм при ненормальних умовах, таких як коротке замикання. Таким чином, основним призначенням роз'єднувача (рис. 4.10,а) є забезпечення функції роз'єднання у розімкненому положенні

Вимикач – це електромеханічний комутаційний апарат, спроможний вмикати, проводити та вимикати струми при нормальних умовах у колі, при обумовлених перевантаженнях, а також витримувати впродовж обумовленого часу струми при обумовлених ненормальних умовах у колі, таких, як коротке замикання. Вимикач може бути спроможним вмикати, але не вимикати струми короткого замикання. Вимикачі, що забезпечують функцію роз'єднання, називають вимикачами-роз'єднувачами (рис. 4.10,б). Роз'єднувачі та вимикачі-роз'єднувачі застосовують у розподільних пристроях для здійснення ручних операцій вмикання/вимикання електричних кіл. Ці апарати не забезпечують захист мереж від перевантажень та коротких замикань, тому у розподільних пристроях послідовно до цих апаратів приєднують запобіжники.

Комбінація із запобіжником – це апарат, у якому поєднується роз'єднувач або вимикач-роз'єднувач та запобіжник. Такий апарат суттєво економить місце у розподільному пристрої та спрощує його виготовлення.

Найбільш розповсюдженими комбінаціями із запобіжниками є роз'єднувач-запобіжник (РЗ); вимикач-роз'єднувач-запобіжник (ВРЗ); запобіжник-роз'єднувач (ЗР) та запобіжник-вимикач-роз'єднувач (ЗВР). Перші два апарата (рис. 4.11) представляють собою просте поєднання комутаційного апарата з послідовно приєднаним до нього запобіжником. Останні два апарата – це спеціально сконструйовані апарати, у яких роль рухомого контакту виконує вставка запобіжника. У цих апаратах, а також у РЗ зазвичай реалізуються залежні ручні операції замикання та розмикання, у яких швидкість та сила операції зале-

жать від дії оператора. Оператор повинен швидко виконувати операцію розмикання, тому на корпусах апаратів із залежними ручними операціями виробники розміщують напис «Розмикати швидко» («Open quickly»). У ВРЗ з метою забезпечення надійного відмикання кіл з великими струмами реалізуються незалежні ручні операції, у яких швидкість та сила операції не залежать від дії оператора. Сучасні вимикачі-роз'єднувачі-запобіжники завдяки великій здатності до відмикання запобіжника забезпечують ефективний захист електроустановок від коротких замикань, а завдяки швидкому розмиканню контактів та потужній дугогасній системі вимикача – відмикання значних робочих струмів (до 3150 А) та струмів перевантаження. Значення їх робочих струмів не перевищує 400 А. В цих апаратах не виключається відносно повільне розмикання контактів.



Рисунок 4.10 – Роз'єднувач із залежними операціями замикання та розмикання (а) та вимикач-роз'єднувач з незалежними операціями замикання та розмикання (б).

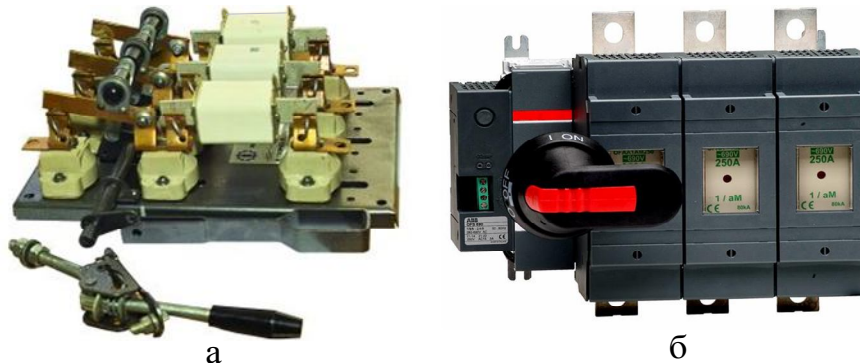


Рисунок 4.11 – Роз'єднувач-запобіжник із залежними операціями замикання та розмикання (а) та вимикач-роз'єднувач-запобіжник з незалежними операціями замикання та розмикання (б)

Комутаційні апарати з ручним керуванням передбачають роботу у колах змінного (АС) та постійного (DC) струму. Аббревіатури АС та DC входять у позначення категорій застосування цих апаратів. Літерою А позначають застосування з відносно частими комутаціями (комутаційний ресурс – до 10 000 операцій вмикання/вимикання), літерою В – з відносно рідкими комутаціями (до 2 000 операцій вмикання/вимикання). Наприклад – АС-20А, DC-20В.

## 5 ОСНОВИ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЕЛЕКТРОННІ ПРИСТРОЇ

### 5.1 Принцип роботи напівпровідникових приладів

#### *Напівпровідники. Загальні відомості*

Напівпровідники (НП) належать до класу речовин, що мають тверду кристалічну структуру і за провідністю (від  $10^{-10}$  до  $10^4$  Сим/см) займають проміжне місце між провідниками та діелектриками. До основних властивостей НП (германій, селен, телур, карбіди, сульфід) відносять від'ємний температурний коефіцієнт опору, зниження питомого опору при додаванні домішок, вплив радіації та електромагнітного випромінювання на його провідність. Також, на відміну від провідників, струм в НП забезпечується носіями двох зарядів: додатного (дірки) та від'ємного (електрони).

Провідність чистого НП має назву власної, а сам НП відносять до *i*-типу. Власна провідність НП звичайно невелика, тому для її збільшення використовують домішки. Домішка, що віддає вільні електрони, називається донорною (елементи V групи таблиці Менделєєва, наприклад, арсен As). НП з переважною кількістю вільних електронів та з додатними іонами домішки має назву НП з електронною провідністю, або НП *n*-типу. Якщо внесення домішки (елементи III групи таблиці Менделєєва, наприклад, індій In) призводить до утворення рухомих дірок та від'ємних іонів домішки, то таку домішку називають акцепторною. НП з переважною кількістю дірок – це НП з дірковою провідністю, або НП *p*-типу.

*p-n* переходом називається вузька зона на межі між шарами НП *p*-типу і *n*-типу, що характеризується відсутністю у прилеглий до цієї межі зоні вільних носіїв заряду, через що її опір нескінченний. Фізичні процеси, що відбуваються у *p-n* переході, визначають параметри та характеристики більшості НП приладів. До основних властивостей *p-n* переходу, що використовуються при побудові електронних НП приладів, відносять:

- односторонню провідність (вентильні властивості), тобто практично нульовий опір при прямому та практично нескінченний при зворотному вмиканні;
- дуже великий опір зони *p-n* переходу, як зони, де немає вільних носіїв заряду (запірні властивості);
- зміну ширини *p-n* переходу зі зміною величини зворотної напруги *i*, як результат, зміну ємності *p-n* переходу);
- стабільність напруги на *p-n* переході в режимі електричного пробую;
- наявність неосновних носіїв, що виникають внаслідок теплової генерації в шарах *p*-типу і *n*-типу.

Напівпровідникові (НП) прилади поділяються на такі групи:



- НП резистори;
- НП діоди;
- біполярні транзистори;
- уніполярні (польові) транзистори;
- тиристори.
- силові напівпровідникові модулі;
- інтегральні мікросхеми.

Останні дві групи є інтегрованими НП приладами.

### *Напівпровідникові резистори*

НП резистори мають два вихідних електроди і поділяються на лінійні та нелінійні. У лінійних резисторів, що виготовляються на основі напівпровідника і використовуються в інтегральних мікросхемах, питомий електричний опір не залежить від прикладеної напруги. У нелінійних резисторів (варисторів) питомий опір залежить від прикладеної напруги. Варистори використовують як обмежувачі напруги для захисту НП приладів від короточасних перенапруг.

Також існують НП резистори, опір яких залежить від температури навколишнього середовища. Це – терморезистори, що поділяються на термістори (із зростанням температури опір зменшується) та позистори (із зростанням температури опір зростає).

Терморезистори використовуються як датчики температури у системах регулювання температури, теплового захисту, протипожежної сигналізації, для термостабілізації режимів роботи електронних пристроїв.

У фоторезисторів опір залежить від ступеню освітлення. Їх застосовують у пристроях автоматики.

Умовні позначення НП резисторів наведені на рисунку 5.1.

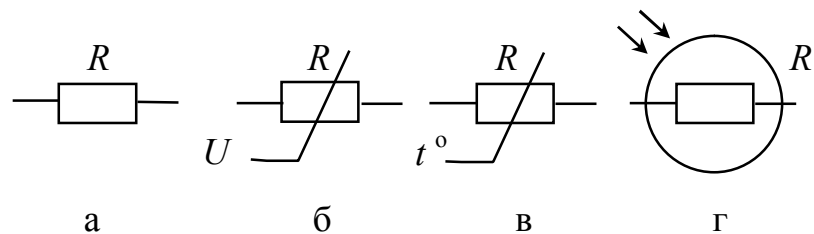


Рисунок 5.1 – Умовні позначення напівпровідникових резисторів: лінійного (а), варистора (б), терморезистора (в), фоторезистора (г)



## Напівпровідникові діоди

Напівпровідникові діоди – це НП прилади, виготовлені на основі двошарових НП структур, які використовують властивості  $p-n$  переходу.

Широко розповсюджені випрямні діоди, дія яких базується на використанні вентильних властивостей  $p-n$  переходу, тобто діод є автоматичним ключем, замкнений або розімкнений стан якого визначається полярністю прикладеної до нього напруги. Випрямні діоди призначені для випрямлення змінного струму низької частоти і їх основними параметрами є:

– середній прямий струм діода  $I_{сер}$ , тобто максимально допустиме середнє значення струму через діод у прямому напрямку за визначених умов охолодження (у сучасних діодів  $I_{сер} = 0,1 \div 6200 \cdot A$ );

– максимально допустимий прямий імпульсний струм діода  $I_{пр max}$ , який становить від  $10 \cdot I_{сер}$  до  $50 \cdot I_{сер}$ ;

– пряме падіння напруги  $U_{сер}$ , тобто середнє значення напруги на діоді при струмі  $I_{сер}$ , для діодів з кремнію становить  $0,6 \div 1,0$  В;

– максимально допустима зворотна напруга  $U_{зв max}$ , яка не призводить до виходу з ладу приладу за визначених умов охолодження  $U_{зв max} = 50 \div 1000$  В.

Діод має два електроди, що називаються анодом (А) і катодом (К). Провідний стан діоду характеризується тим, що електричний потенціал аноду вищий за потенціал катода (опір діода  $R_d \approx 0$ ). І навпаки, коли на аноді буде від'ємний потенціал відносно катода, діод буде знаходитися в непровідному стані ( $R_d \rightarrow \infty$ ). Умовне позначення діода наведено на рисунку 5.2,а.

Широко розповсюджені також НП діоди, у яких напруга в зоні електричного пробую (лавинopodobне зростання зворотного струму, що має зворотний характер при ефективному охолодженні  $p-n$  переходу) майже не залежить від струму. Такі НП діоди називаються стабілітронами, їх використовують для стабілізації напруги. Для запобігання теплового пробую, конструкція стабілітронів забезпечує ефективне відведення тепла від кристалу. Основними параметрами стабілітрону є напруга стабілізації  $U_{ст}$  (від 1 до 1000 В), мінімальний струм стабілізації  $I_{ст min}$  (одиниці мА); максимальний струм стабілізації  $I_{ст max}$  (від 0,02 до 1,5 А). Умовне позначення стабілітрона наведено на рисунку 5.2,б.

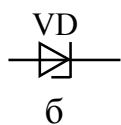
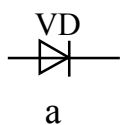


Рисунок 5.2 – Умовні позначення діода (а) та стабілітрона (б)

Найпростіша схема стабілізації наведена на рисунку 5.3.

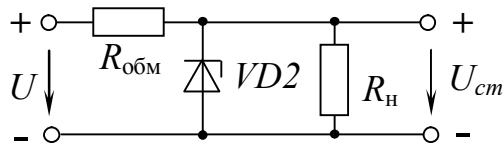


Рисунок 5.3 – Схема елементарного стабілізатора

### Транзистори

Транзистором називається електроперетворювальний НП прилад, який має один або декілька  $p-n$  переходів, три або більше виводів і здатний підсилувати потужність електричного сигналу. В електроніці використовують біполярні, польові транзистори з керуючим  $p-n$  переходом і польові з ізольованим затвором, виконані за структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори) та метал-окисел-напівпровідник (МОН-транзистори). Останні знаходять широке застосування у складі ІМС.

Біполярний транзистор являє собою електронний НП прилад, що має два взаємодіючих електронно-діркових переходи і складається з трьох областей: емітера, бази і колектора.  $p-n$  перехід на межі областей емітер-база називається емітерним, а на межі база-колектор – колекторним. Провідність бази може бути як дірковою, так і електронною. Відповідно розрізняють транзистори  $n-p-n$  (рис. 5.4,а) та  $p-n-p$  (рис. 5.4,б) типу. Для забезпечення підсилюючих властивостей транзистора необхідне виконання наступних основних вимог (реалізуються при виробництві):

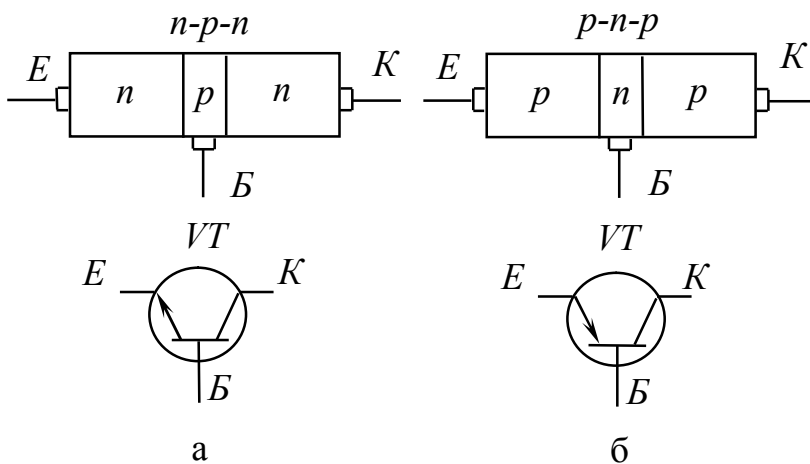


Рисунок 5.4 – Будова і умовні позначення транзисторів  $n-p-n$  (а) та  $p-n-p$  (б) типів

рі, а концентрація основних носіїв у колекторі багато менша, ніж в емітері;

– колектор виконується масивним і площа колекторного переходу у декілька разів більше площі емітерного переходу.

Принцип дії транзисторів обох типів однаковий. Розходження полягає лише у тому, що в транзисторі  $p-n-p$  типу основний струм, що тече через струк-

– база виконується тонкою, з товщиною меншою за довжину дифузійного пробігу електронів і має малу кількість основних носіїв заряду;

– концентрація основних носіїв у базі повинна бути значно меншою ніж в еміте-

туру, створюється дірками, інжекткованими з емітера, а у транзисторі *n-p-n* типу – електронами (напрямок протікання струму через транзистор вказує стрілка на його умовному позначенні).

До основних параметрів біполярних транзисторів належать:

- максимально допустимий струм колектора  $I_{KМАКС}$ , становить від 0,01 до 100 А;
- максимально допустимий імпульсний струм колектора  $I_{КІ}$ ;
- допустима робоча напруга  $U_{КЕ.МАКС}$ , становить від 20 до 1000 В;
- допустима потужність на колекторі  $P_K = I_K \cdot U_{КЕ}$  (якщо  $P_K < 0,3$  Вт, то

маємо транзистор малої потужності, якщо  $P_K = 0,3 \div 1,5$  Вт – середньої потужності, якщо  $P_K > 1,5$  Вт - великої потужності), за її перевищення кристал розплавиться.

Залежно від того, який з електродів транзистора є спільною точкою за змінним струмом для вхідного і вихідного кіл, можливі вмикання зі спільною базою; зі спільним емітером (СЕ) та зі спільним колектором. Найбільше поширення у підсилюючих каскадах та імпульсних пристроях одержала схема з СЕ як така, що дає найбільше підсилення за потужністю, забезпечуючи підсилення і за напругою, і за струмом (рис. 5.5).

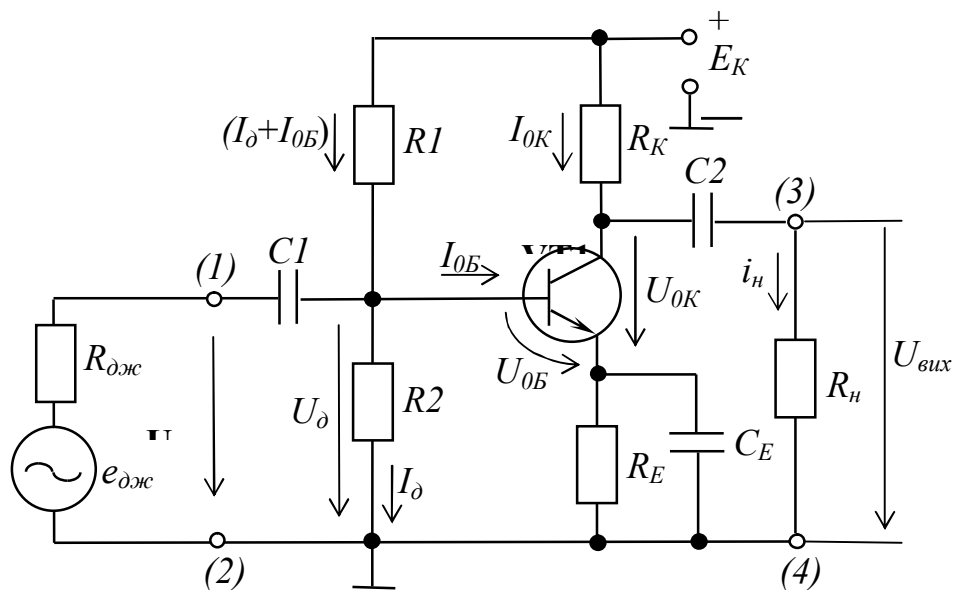


Рисунок 5.5 – Каскад попереднього підсилення на біполярному транзисторі зі СЕ

Незалежно від схеми вмикання біполярного транзистора він може працювати у трьох основних режимах:

- режим відсічки (закритий стан транзистора), коли емітерний та колекторний переходи зміщені у зворотному напрямі, струм у колі навантаження дуже малий та майже вся напруга джерела живлення прикладається до транзистора;
- активний режим, коли емітерний перехід зміщений у прямому напрямку, а колекторний – у зворотному та транзистор працює як підсилювач сигналу,

тобто змінам вхідного сигналу відповідають пропорційні зміни вихідного;

– режим насичення (відкритий стан), коли обидва переходи зміщені у прямому напрямку, струм транзистора залежить тільки від опору навантаження та зовнішньої напруги та на транзисторі падає незначна напруга (від 0,1 В до 0,3 В).

Режим роботи, у якому транзистор тривалий час знаходиться у режимі відсічки або насичення, називається ключовим режимом. Цей режим використовується в імпульсних схемах, а активний режим – у лінійних підсилювачах.

Електронним підсилювачем називається пристрій, призначений для підсилення потужності електричних сигналів без спотворення їхньої форми і частоти. Необхідність у підсилювачі виникає тоді, коли потужність джерела сигналу менша від потужності навантаження. У такому разі послідовно з навантаженням вмикають зовнішнє потужне джерело живлення і підсилюючий елемент (транзистор), на вхід якого діє джерело сигналу, змінюючи провідність останнього та забезпечуючи пропорційні вхідному сигналу зміни струму у колі навантаження. У результаті в навантаженні виділяється необхідна потужність за рахунок енергії джерела живлення.

Найпростіший підсилюючий вузол називають підсилюючим каскадом, а найважливішим параметром підсилювача є коефіцієнт підсилення – відношення напруги ( $U$  або  $P$ ) на виході підсилювача до напруги ( $U$  або  $P$ ) на вході. Він показує ступінь збільшення вихідного сигналу у порівнянні з вхідним. У ідеального лінійного підсилювача коефіцієнт підсилення не залежить від значень напруги і частоти вхідного сигналу. Коефіцієнт підсилення багатокаскадного підсилювача дорівнює добутку коефіцієнтів підсилення ввімкннутих послідовно каскадів.

У наш час поширені підсилювачі на інтегральних мікросхемах.

### *Тиристор*

Тиристор – це НП прилад, що має багаточарову структуру і ВАХ якого має ділянку з від'ємним опором. Його використовують як перемикач струму. Тиристор може знаходитися у двох станах: закритому і відкритому. Тиристори бувають двоелектродні – диністори та триелектродні – триністори, які знайшли широке розповсюдження в енергетичній електроніці.

Триністор (частіше називається просто тиристором) на відміну від диністора окрім силового кола «анод – катод» має ще й коло керування «керуючий електрод – катод», тобто від однієї з базових зон його зроблено вивід, який і є керуючим електроном.

Перевести тиристор із закритого стану у відкритий можна, пропустивши по колу «керуючий електрод – катод» струм керування  $i_{кер}$  за наявності на тиристорі прямої напруги. Достатній для відкривання тиристора час протікання струму керування складає мікросекунди. З відкритого стану у закритий тири-

тор переходить, якщо до нього на деякий час (сотні мікросекунд) прикласти зворотну напругу або зменшити струм, що протікає через нього, нижче струму утримання. Струм у колі керування при цьому повинен бути відсутнім. У колах постійного струму вимикання тиристора здійснюється шляхом примусової комутації, яка полягає у вмиканні паралельно тиристорі попередньо зарядженого конденсатора з напругою, полярність якої зворотна відносно тиристора. У колах змінного струму вимикання тиристора здійснюється природно в момент проходження струму через нуль (невимушена комутація) – тому тиристри в першу чергу використовують саме у колах змінного струму як напівкеровані електронні перемикачі, бо діючи на коло керування, їх можна лише вмикати. На рисунку 5.6 наведено спрощену схему однофазного регулятора та часові діаграми його роботи. Змінюючи затримку подачі сигналу керування відносно переходу напруги мережі  $u_m$  через нуль, тобто кут регулювання  $\alpha$ , від 0 до  $\pi$ , можна регулювати напругу на навантаженні  $u_n$  від нуля до максимуму.

Тиристри мають біля ста параметрів. Наведемо декілька основних з них:

- струм вмикання  $I_{вм}$ , тобто номінальний струм аноду, при якому прилад утримуються у відкритому стані відразу після вмикання, становить від 0,01 до 0,5 А;
- максимально допустиме значення середнього струму через тиристор за певних умов охолодження, що не призводить до перевищення допустимого рівня температури тиристора  $I_{сеп}$ , складає (0,1÷3200) А;
- час вмикання  $t_{вм}$  (час переходу тиристора з непровідного стану у провідний), становить від 1 до 10 ) мкс;
- час відновлення запірних властивостей  $t_{вим}$ , становить від 10 до 500 мкс.

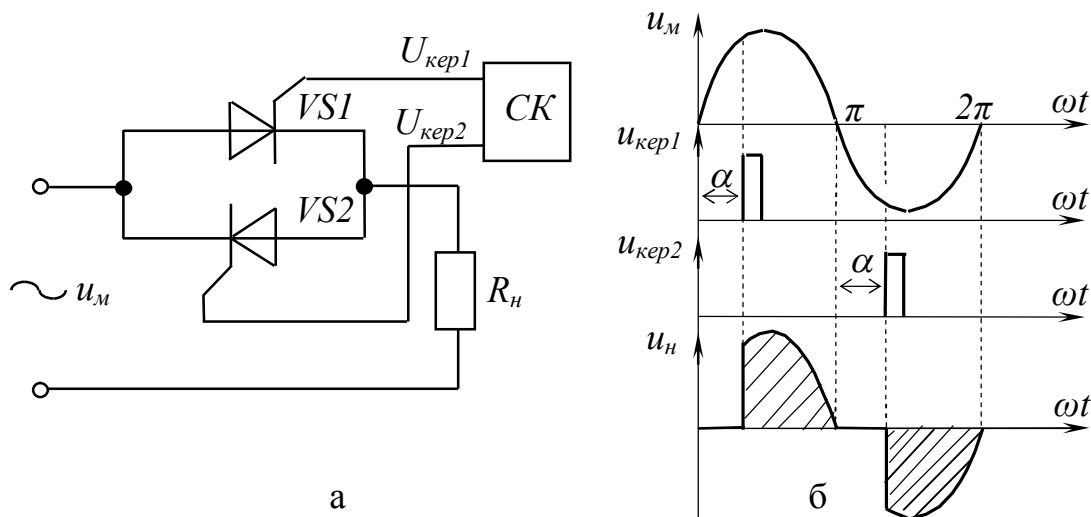


Рисунок 5.6 – Однофазний регулятор: а – електрична схема; б – часові діаграми роботи

## 5.2 Побудова і принцип роботи випрямлячів

В електротехніці зустрічаються навантаження, які споживають енергію тільки постійного струму (пристрої обчислювальної та електронної техніки, електричний транспорт, пристрої електрохімічної промисловості та ін.). Але найбільш розповсюдженими є джерела, що виробляють енергію змінного струму. Тому і виникає необхідність у перетворенні енергії змінного струму в енергію постійного струму. Пристрої, які забезпечують таке перетворення, називають випрямлячами. Склад випрямляча показано на узагальненій структурній схемі, наведеній на рисунку 5.7

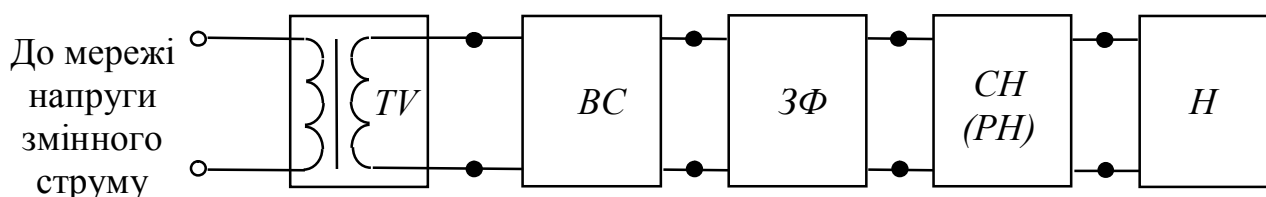


Рисунок 5.7 – Структурна схема випрямляча:

*TV* – трансформатор напруги; *BC* – вентильна схема; *3Φ* – згладжувальний фільтр; *CH (PH)* – стабілізатор (регулятор) напруги; *H* – навантаження

Випрямляч підмикається до розподільної мережі напруги змінного струму. Трансформатор призначений для перетворення величини напруги мережі до величини, необхідної для роботи випрямляча та забезпечує електричну розв'язку мережі і навантаження. Вентильна схема перетворює змінну напругу у випрямлену – пульсуючу однополярну. Вона, як правило, виконується на напівпровідникових ключах. Згладжувальні фільтри перетворюють випрямлену напругу у постійну (виконуються на реактивних елементах, так званні пасивні, або на транзисторах, операційних підсилювачах, так званні активні фільтри). Стабілізатор напруги підтримує напругу на навантаженні на незмінному рівні при змінах напруги мережі або навантаження у заданих межах.

При необхідності регулювання напруги на навантаженні за необхідним законом і у заданих межах використовують регулятори напруги. Зазначимо, що стабілізатор також являє собою різновид регулятора, у якого забезпечується автоматичне регулювання за ознакою постійності значення напруги на навантаженні. Регулятор (стабілізатор) може бути увімкнено і зі сторони змінної напруги (до трансформатора) [9].

Параметри вузлів випрямляча, їхніх елементів та режими роботи повинні бути узгоджені із заданими умовами роботи навантаження. Навантаження також вважають елементом випрямляча, бо зміни його опору в процесі роботи впливають на режим роботи усього пристрою.

Згладжувальний фільтр, стабілізатор (регулятор), а іноді й трансформатор можуть не входити до складу випрямляча, якщо в них немає необхідності. Крім вказаних вузлів, випрямляч може мати вузли і елементи захисту від короткого замикання, перевантаження, зниження напруги мережі та інші.

Випрямлячі класифікують за числом фаз – однофазні та багатофазні (останні – найчастіше трифазні). За потужністю вони бувають малої потужності (до 100 Вт), середньої (до 10 кВт) і великої (понад 10 кВт). Є некеровані випрямлячі та керовані. Перші будуються на некерованих вентилях – на діодах, другі – на керованих вентилях (тиристорах).

За принципом дії випрямлячі поділяються на однокітні та двокітні. Однокітними називають випрямлячі, у яких вторинною обмоткою трансформатора струм протікає один раз за період напруги мережі і лише в одному напрямку. Важливим параметром випрямляча є кратність пульсацій випрямленої напруги  $m$  – відношення частоти пульсацій випрямленої напруги до частоти мережі. У однокітних випрямлячів  $m$  відповідає числу фаз мережі. Двокітними називають випрямлячі, у яких по вторинній обмотці трансформатора струм за період напруги мережі протікає двічі і в різних напрямках. Кратність пульсацій у двокітних випрямлячів дорівнює подвоєному числу фаз.

Робота випрямляча фактично полягає у тому, що навантаження за допомогою ключів так підключається до джерела енергії змінного струму, щоб за час періоду його напруги струм у навантаженні протікав в одному напрямку. Виходячи з цього, найважливішим вузлом випрямляча є вентиляна схема, основою якої є діод, який, як було зазначено раніше, може бути в двох станах – провідному і невідному. Якщо електричний потенціал аноду вищий за потенціал катода, то діод буде в провідному стані (опір діода  $R_D \approx 0$ ). У випадку, коли на аноді буде від'ємний потенціал відносно катода, діод буде знаходитися в невідному стані ( $R_D \rightarrow \infty$ ).

Розглянемо принцип роботи однопівперіодного випрямляча (рис. 5.8,а). При підключенні послідовного з'єднання діода  $VD$  і активного опору  $R_H$  до джерела синусоїдної напруги  $u_2(t) = U_m \sin \omega t$  у додатний півперіод діод буде відкритим. Якщо прямим падінням напруги на діоді знехтувати ( $R_D \approx 0$ ), вважаючи діод ідеальним, то в додатний півперіод напруга джерела повністю прикладена до навантаження. Миттєве значення струму в колі:

$$i(t) = \frac{U_m}{R_H} \sin \omega t. \quad (5.1)$$

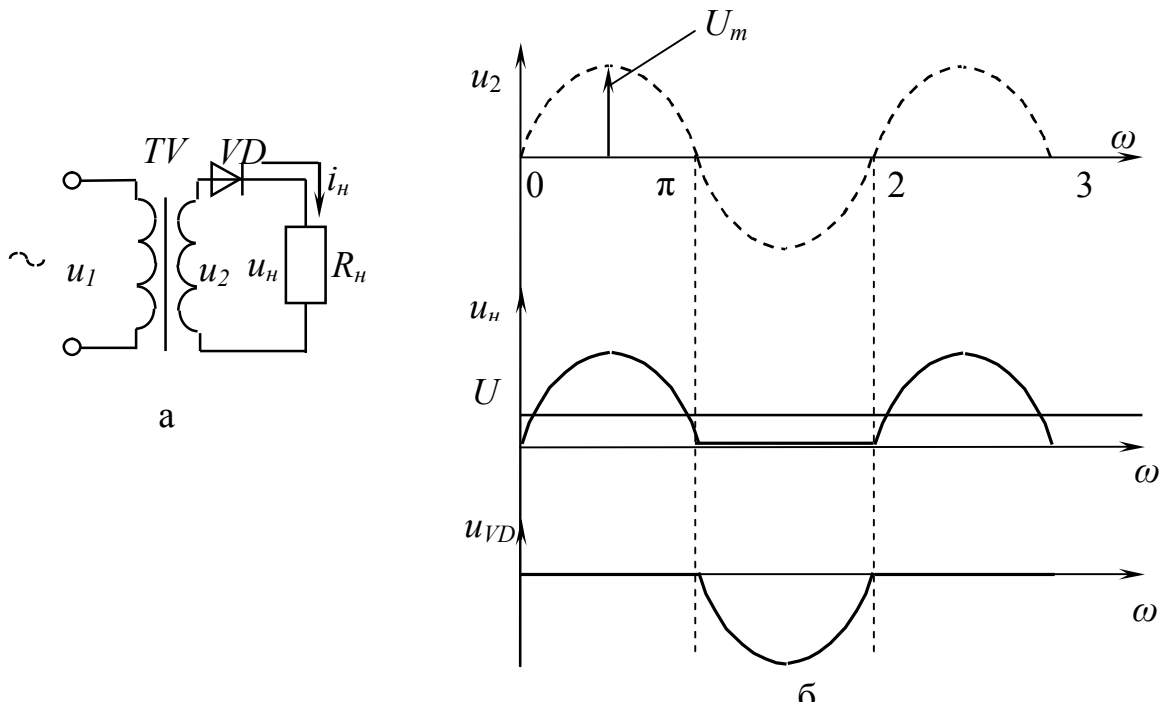


Рисунок 5.8 – Однофазний однопівперіодний випрямляч: схема (а) та часові діаграми (б) роботи

У від'ємний півперіод напруги джерела діод  $VD$  закритий ( $R_d \rightarrow \infty$ ). Якщо знехтувати зворотнім струмом, то від'ємна півхвиля напруги буде прикладена тільки до діода, і струм в навантаженні дорівнюватиме нулю. Амплітуда від'ємної півхвилі буде максимальною зворотною напругою діода:

$$U_{дзвmax} = \sqrt{2} \cdot U_2. \quad (5.2)$$

де  $U_2$  – діюче значення напруги джерела.

Розглянуті процеси періодично повторюються з частотою джерела напруги (рис. 5.8,б). В такому випрямлячі навантаженням використовується тільки додатний півперіод змінної напруги джерела, напруга на навантаженні  $R_H$  є пульсуючою і змінюється у межах від нуля до амплітуди вторинної напруги трансформатора  $U_m$ . Середнє значення напруги на навантаженні [9]:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u_2(t) dt = \frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi} \cdot (-\cos \omega t) = \frac{U_m}{\pi} = 0,318 \cdot U_m. \quad (5.3)$$

Середнє значення випрямленого струму навантаження та його амплітуда:

$$I_d = \frac{U_d}{R_H} \quad (5.4)$$

$$I_m = \frac{U_m}{R_H}. \quad (5.5)$$



Діюче значення напруги на навантаженні:

$$U_H = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{2\pi} u_2^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \cdot \int_0^{\pi} U_m^2 \sin^2 \omega t d(\omega t)} = 0,707 \cdot U_2. \quad (5.6)$$

Важливим недоліком роботи цього випрямляча є те, що випрямлена напруга має пульсуючий і переривчастий характер. Кількість пульсацій цієї напруги за період вторинної напруги трансформатора дорівнює одиниці.

Більш досконалим випрямлячем є однофазний двопівперіодний мостовий

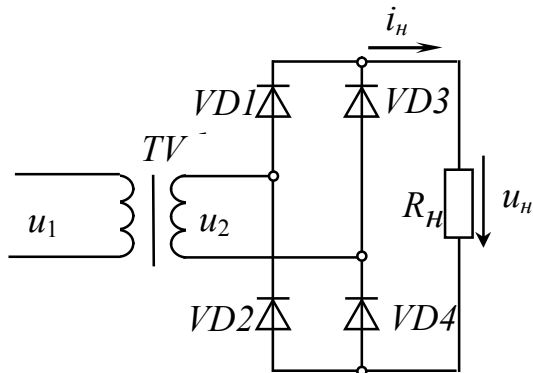


Рисунок 5.9 – Схема однофазного двопівперіодного мостового випрямляча

випрямляч, схема якого наведена на рисунку 5.9. Цей випрямляч має дві групи діодів – анодну (діоди  $VD2$  та  $VD4$ ) та катодну (діоди  $VD1$  та  $VD3$ ). На інтервалі  $0 \leq \omega t \leq \pi$  (у додатну півхвилю напруги джерела) діоди  $VD1$  та  $VD4$  будуть у відкритому стані, а діоди  $VD2$  і  $VD3$  в закритому, через навантаження проходить струм  $i_{VD1,4}$ . На інтервалі  $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$  (у від'ємний півперіод) в відкритому стані знаходяться діоди  $VD2$  і  $VD3$ , а в закритому

–  $VD1$  та  $VD4$ . Через навантаження  $i$  в цьому випадку проходить струм, причому

напрямок цього струму під час додатної і від'ємної півхвиль однаковий. Таким чином, у провідному стані в мостовому випрямлячі завжди знаходяться два діоди – один з катодної групи і один з анодної. Часові діаграми роботи однофазного двопівперіодного мостового випрямляча показані на рисунку 5.10.

Середнє значення напруги на навантаженні:

$$U_d = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{\pi} \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin \omega t d(\omega t) = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 = 0,9 \cdot U_2. \quad (5.7)$$

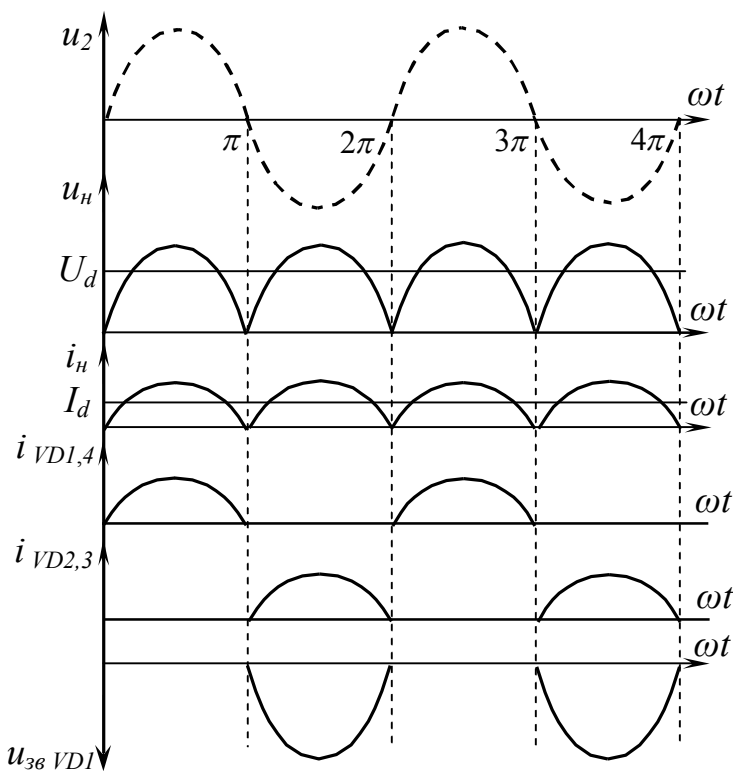


Рисунок 5.10 – Часові діаграми роботи однофазного двопівперіодного мостового випрямляча

Середнє значення струму в навантаженні:

$$I_d = \frac{U_d}{R_n} = 0,9 \cdot \frac{U_2}{R_n}. \quad (5.8)$$

Максимальне значення струму через діод:

$$I_{d\max} = \frac{\pi}{2} \cdot I_d. \quad (5.9)$$

Діюче значення струму в навантаженні:

$$I_n = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_d^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \int_0^\pi I_m^2 \cdot \sin^2 \omega t \cdot d\omega t} = \frac{\pi}{4} \cdot I_d. \quad (5.10)$$

Амплітудне значення зворотної напруги на закритому діоді:

$$U_{дзв.\max} = \sqrt{2} \cdot U_2. \quad (5.11)$$

Мостові випрямлячі забезпечують значно менші пульсації випрямленого струму, крім того більш ефективно використовують енергію джерела. Кількість пульсацій випрямленої напруги за період напруги мережі  $p=2$ .

У тому випадку, коли необхідним є споживання значної потужності навантаженням (більше 2 кВт) і воно підключено до трифазної мережі, застосовують трифазні випрямлячі. Найбільш простим з них є трифазний випрямляч з нульовим виводом (так звана схема Міткевича), наведений на рисунку 5.11.

Такий випрямляч містить трифазний трансформатор  $TV$ , вторинні обмотки якого обов'язково увімкнені за схемою «зірка», та три діоди  $VD1$ ,  $VD2$ ,  $VD3$ , які

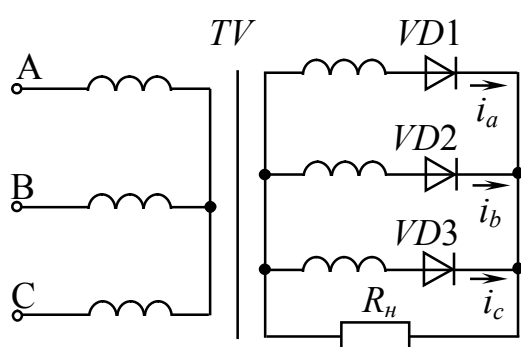


Рисунок 5.11 – Схема трифазного випрямляча з нульовим виводом

вмикаються послідовно з кожною вторинною обмоткою трансформатора. Другі електроди діодів об'єднуються, в залежності від необхідної полярності випрямленої напруги, анодами або катодами.

Аноди вентилів у даному разі підключені до виводів вторинної обмотки трансформатора, а катода з'єднані разом і утворюють додатний полюс випрямляча. Від'ємним полюсом є нульовий вивід трансформатора. В результаті, у кожен момент часу через навантаження протікає струм, що визначається фазою з найбільшою додатною напругою [9].

Як бачимо з часових діаграм, зображених на рисунку 5.12, напруга на навантаженні  $u_d$  і струм через нього  $i_d$  мають пульсуючий характер. Частота пульсації випрямленої напруги у три рази перевищує частоту мережі.

Недоліком схеми Міткевича є наявність постійного підмагнічування магнітопроводу трансформатора. Воно зумовлене тим, що, як і у будь-якої однофазної схеми, вторинною обмоткою трансформатора струм за період протікає лише один раз і в одному напрямку, тобто має постійну складову. Це вимагає використання трансформатора із підвищеним перерізом магнітопроводу, тобто з завищеною габаритною потужністю.

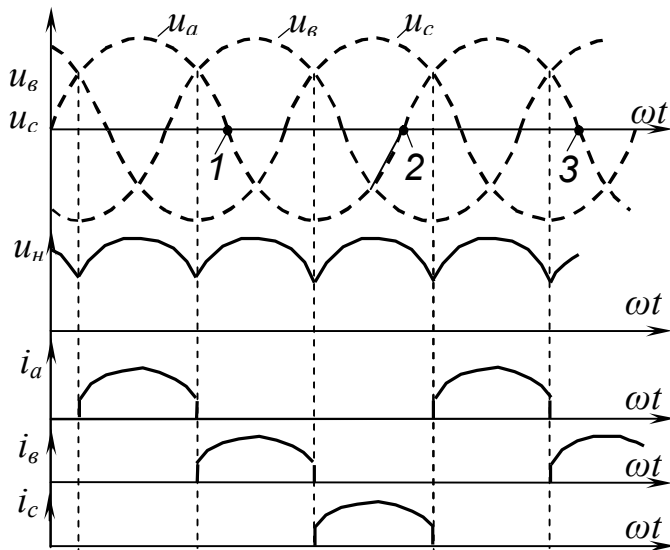


Рисунок 5.12 – Часова діаграма трифазного випрямляча з нульовим виводом

Кожний діод у цій схемі працює одну третину періоду, тому середній струм через нього  $I_a$  складає третину значення середнього випрямленого струму навантаження  $I_d$ . Кожна фаза забезпечує струм в навантаженні тільки третину періоду фазної напруги, коли діод відповідної фази знаходиться в провідному стані. Дві третини періоду діоди кожної фази закриті та знаходяться під дією зворотної напруги. У закритому стані потенціал анода діода у кожен момент часу визначається напругою своєї фази, а потенціал катода – напругою фази, що живить навантаження, тобто до нього прикладається лінійна напруга, максимальне значення якої становить:

$$U_{дзв.мах} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot U_2 = 2,09 \cdot U_d. \quad (5.12)$$

Для цих трифазних випрямлячів середнє значення випрямленої напруги на навантаженні можна знайти з виразу:

$$U_d = \frac{p}{\pi} \cdot \sin \frac{\pi}{p} \cdot U_{2m}, \quad (5.13)$$

де  $p$  – число тактів випрямляча за період фазної напруги мережі, до якої під'єднаний трансформатор  $TV$  (кількість перемикань діодів за період);

$U_{2m}$  – амплітудне значення напруги вторинних обмоток трансформатора.

Для розглянутого випрямляча  $p=3$ , тому:

$$U_d = \frac{3}{\pi} \cdot \sin 60^\circ \cdot U_{2m} = 1,17 \cdot U_2. \quad (5.14)$$

Середнє значення струму в навантаженні  $R_n$

$$I_d = U_d / R_n . \quad (5.15)$$

Активна потужність, що виділяється на навантаженні  $P_n$  дорівнює

$$P_n = U_d \cdot I_d . \quad (5.16)$$

При розрахунках трифазного випрямляча потрібно знати крім  $U_{дзв.мах}$  величину середнього значення струму через діод  $I_a$  за період фазної напруги:

$$I_a = \frac{I_d}{3} . \quad (5.17)$$

З точки зору споживача будь-який випрямляч є джерелом енергії, і тому основними експлуатаційними характеристиками його є значення середньої напруги  $U_d$  і середнього струму  $I_d$  на навантаженні та зовнішня характеристика  $U_d = f(I_d)$ . Приблизний вигляд цієї характеристики показаний на рисунку

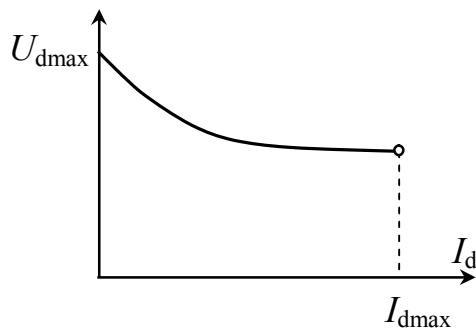


Рисунок 5.13 – Зовнішня характеристика випрямляча  $U_d = f(I_d)$

5.13. Найбільшим значення  $U_d$  буде при  $I_d = 0$  (режим без навантаження) і зменшується при збільшенні струму навантаження. Це зумовлено зростанням втрат потужності на ключових елементах у відкритому стані зі зростанням струму. Зменшення  $U_d$  від сили струму  $I_d$  також зумовлено впливом величин реактивного та активного опорів фазних обмоток трансформатора, опорів з'єднуючих провідників.

До інших експлуатаційних характеристик відносять значення коефіцієнту пульсацій випрямленої напруги  $K_n = U_m^{(1)} / U_d$  ( $U_m^{(1)}$  – амплітудне значення основної гармоніки випрямленої напруги при розкладанні її в ряд Фур'є), середнє значення струму через вентиль  $I_a$ , для керованих випрямлячів – регульовальну характеристику  $U_d = f(\alpha)$  ( $\alpha$  – кут керування тиристорів), амплітудне значення струму через вентиль  $I_{ам}$ , амплітудне значення зворотної напруги вентиля  $U_{звт}$ , коефіцієнт корисної дії  $\eta$ , надійність [9].

При розрахунку випрямляча відомими є параметри навантаження та мережі живлення, а невідомими – параметри елементів вузлів, що до нього входять. Теорія випрямлячів зводиться до розробки аналітичних виразів, що зв'язують відомі параметри напруги і навантаження з невідомими параметрами, які характеризують роботу вентиляльної схеми. На підставі цього робиться вибір типу вентилів для конкретної схеми випрямляча та розрахунок його вузлів.

## 6 ЕЛЕКТРОПРИВОД

### 6.1 Класифікація електроприводів

Електроприводом називається комплектний електромеханічний пристрій, що служить для перетворення електричної енергії у механічну. До складу електропривода входять електричні машини (у найпростішому випадку двигуни), передатні пристрої (редуктори і т.п.) і апаратура керування і захисти. В деякі види електроприводу входять перетворювальні пристрої: випрямлячі, перетворювачі частоти, інвертори. Тобто, електричним приводом називають електромеханічний пристрій, призначений для автоматизації робочих процесів.

Розглянемо класифікацію електроприводів.

Електроприводи, що використовуються у виробничих процесах, розділяють на три групи:

- груповий (трансмійсійний);
- одиночний (однодвигуновий);
- багатодвигуновий.

Груповий електропривод – це електропривод, у якому від одного двигуна рух передається групі робочих машин або механізмів.

Одиночним електроприводом називається привод, в якому робочі органи машини або виробничого механізму рухаються від одного двигуна. В одиничному електроприводі електродвигун з'єднується з робочою машиною ланцюговою або ремінною передачею за допомогою редуктора або муфт (транспортери, насоси і т.п.).

Багатодвигуновий електропривод – це привод, в якому декілька органів машини отримують рух кожний від свого двигуна (наприклад, підйомний мостовий кран).

За родом струму електроприводи бувають постійного або змінного струму.

За навантаженням електроприводи поділяють на приводи із постійним і змінним навантаженням. Прикладом приводу зі змінним навантаженням може служити привід поршневого насоса.

За режимом роботи електроприводи поділяють на приводи тривалого, короткочасного, повторно-короткочасного режимів. Пояснимо останнє положення. Як відомо, при роботі двигунів виникають втрати енергії, що приводять до нагрівання активних частин – обмоток і сердечників. Втрати енергії, а, отже, і нагрів двигуна залежать від навантаження. При вмиканні двигуна температу-

ра зростає за експоненціальним законом, а при вимиканні – також за експоненціальним законом зменшується до температури навколишнього середовища.

*Тривалий режим* (рис. 6.1) – це такий режим, при якому температура обмоток за час роботи досягає сталого значення [10].

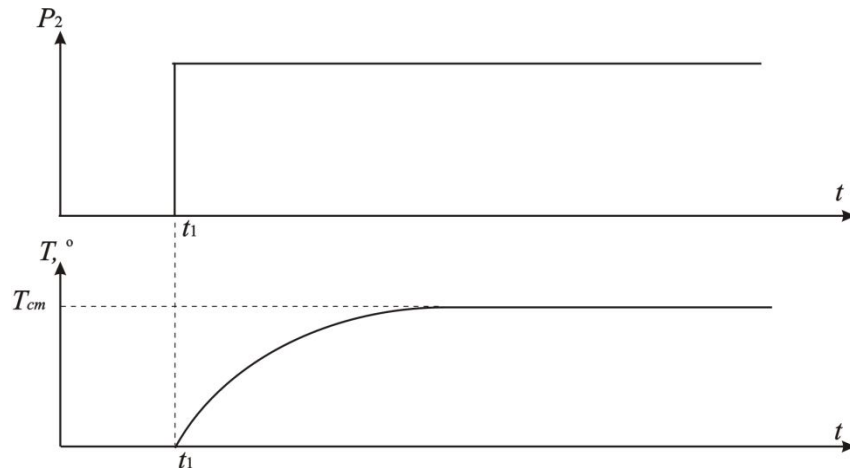


Рисунок 6.1 – Діаграми зміни потужності  $P$  і температури  $T$  у сталому режимі

*Короткочасний режим* (рис. 6.2) – це режим, коли за час роботи ( $t_1 \div t_2$ ) температура не встигає досягти сталого значення, але за час паузи ( $t_2 \div t_3$ ) двигун встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

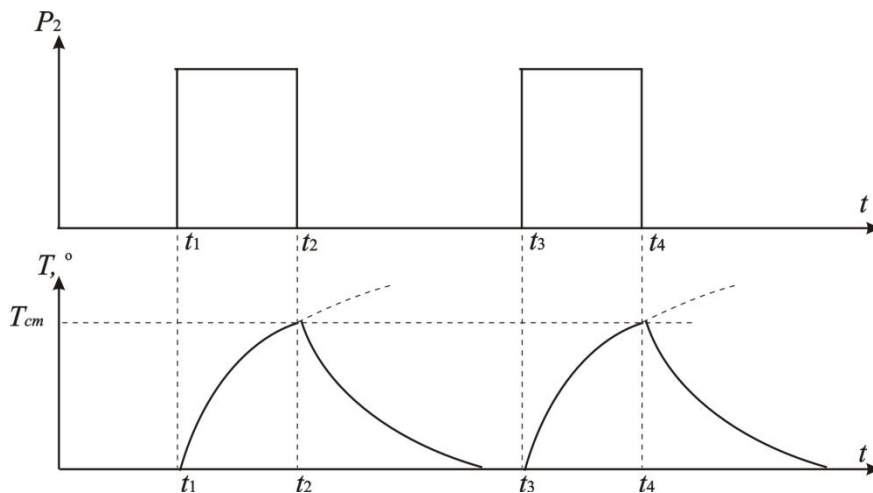


Рисунок 6.2 – Діаграми зміни потужності  $P_2$  і температури  $T$  в короткочасному режимі

*Повторно-короткочасний* (рис. 6.3.) – це режим, коли за час роботи температура не встигає досягти сталого значення  $T_{ст}$  та за час паузи двигун не встигає охолонути до температури навколишнього середовища.

За способом керування електроприводи поділяють на автоматизовані і неавтоматизовані. Більшість сучасних електроприводів є автоматизованими.

За кількістю швидкостей електроприводи бувають одношвидкісні і багато швидкісні, а за умовами використання – на стаціонарні і рухомі.

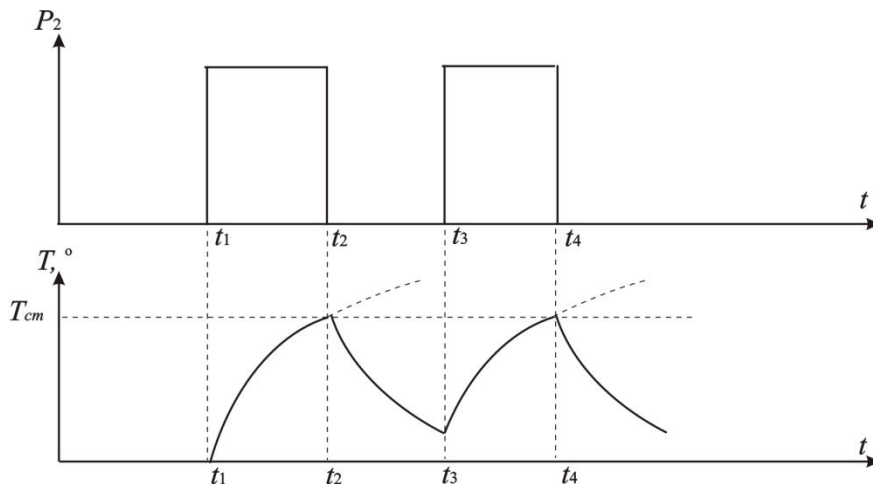


Рисунок 6.3 – Діаграми зміни потужності і температури в повторно-короткочасному режимі

## 6.2 Поняття про динаміку електроприводу

Дуже велике значення має розгляд динаміки електроприводу, тобто поведінка електропривода при перехідних процесах від одного сталого режиму до іншого. Ці процеси ускладнює те, що в них беруть участь як електричні і магнітні явища, так і механічні. Важливість питань динаміки впливає з того, що перехідні процеси у ряді приводів визначають продуктивність машин (наприклад, реверсивний прокатний стан, екскаватор і ін.).

До перехідних процесів відносяться пуск, гальмування, реверс і перехід з однієї швидкості на іншу. Часто необхідно знати час перехідного процесу, швидкості переміщення рухомих частин.

Для знаходження часу перехідного процесу потрібно розв'язати рівняння руху відносно часу  $t$ :

$$M_P - M_{CT} = J \cdot \frac{d\omega}{dt}, \quad (6.1)$$

де  $M_P$  – момент руху,

$M_{CT}$  – статичний момент;

$J$  – момент інерції;

$\omega$  – кутова швидкість.

Аналітичний розв'язок рівняння (6.1) пов'язано з декількома труднощами, бо момент руху і момент інерції є складними функціями швидкості. Широко використовують наближений графоаналітичний метод розрахунку. Вихідними є графік моменту сил опору на валу електродвигуна і його механічна характеристика.

При визначенні перехідних процесів графіки моментів розбиваються на рівні ділянки зі швидкістю  $\Delta n$ , що визначають середні значення моментів  $M_P$  і  $M_{CT}$ . На кожній ділянці визначають час  $\Delta t$ , замінюючи  $d\omega$  на  $\Delta\omega$  [10]:

$$\Delta t = \frac{J \cdot d\omega}{M_P - M_{CT}} = \frac{J \cdot \Delta n}{9550 \cdot (M_P - M_{CT})}. \quad (6.2)$$

Час пуску двигуна знаходиться як сума часів на кожній ділянці:

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_k, \quad (6.3)$$

де  $k$  – кількість ділянок розбиття.

Зміну швидкості переміщення рухомих частин в часі знаходять з рівняння руху:

$$\Delta\omega = \frac{M_P - M_{CT}}{J} \cdot \Delta t. \quad (6.4)$$

Швидкість визначають за (6.4) для кожної ділянки розбиття. Результати розрахунків заносять в таблицю, за якою будують графік швидкості руху у часі.

### 6.3. Вибір двигуна в системах електроприводу

Основним завданням при проектуванні приводу є вибір електродвигуна. Правильний вибір двигуна визначається як економічними, так і технічними вимогами до його параметрів і показників. Насамперед, при виборі віддають перевагу найбільш простим, дешевим і надійним двигунам – асинхронним і синхронним. Якщо ці машини не можуть задовольнити технічним вимогам, вибирають двигуни постійного струму. Таким чином, основними моментами вибору двигуна в системах електроприводу:

- вибір роду струму і номінальної напруги;
- вибір номінальної частоти обертання;
- вибір конструктивного виконання;
- вибір двигуна за потужністю.

Іноді рід струму, напруга і частота обертання визначаються виробничими умовами. Конструктивне виконання сучасних серій електродвигунів враховує наступні чинники: захист від впливу навколишнього середовища, забезпечення охолодження і спосіб монтажу.

За способом захисту від впливу навколишнього середовища електродвигуни виготовляють у захищеному, закритому і вибухозахищеному виконанні. Захищені від потрапляння дрібних предметів і крапель двигуни призначені для роботи в сухих непильних приміщеннях. Закриті двигуни встановлюють у приміщеннях із підвищеною вологістю, атмосферою, забрудненою пилом із метале-



вими включеннями, парами мастила або керосину. Вибухозахищені двигуни мають корпус, здатний витримати вибух газу усередині машини і викид полум'я у навколишнє середовище, що виникає при цьому. Вони призначені для роботи у вибухонебезпечних приміщеннях або шахтах. На кришці клемної коробки цих двигунів відлитої рельєфний знак РВ – рудничні вибухозахищені або ВЗГ – вибухонебезпечний у газовому середовищі. Без цих знаків застосування двигунів у вибухонебезпечних приміщеннях заборонено. Не можна також замість закритого двигуна встановлювати захищений.

За способом охолодження розрізняють двигуни з природним охолодженням, самовентиляцією (внутрішньою або зовнішньою) і стороннім продувом (примусове охолодження).

За способом монтажу двигуни бувають з горизонтальним розташуванням вала і станиною на лапах, із вертикальним розташуванням вала і фланцем і т.п. Двигун, що вибирається, повинний мати той самий спосіб установки, кріплення і з'єднання з механізмом, що й двигун, який замінюється.

За потужністю двигуни вибираються, насамперед, з умови припустимого нагрівання. Як уже зазначалося, при роботі двигуни нагріваються за рахунок втрат енергії. Припустимий нагрів визначається класом нагрівостійкості ізоляції обмоток даного двигуна. При цьому необхідно мати на увазі, що розрахунковий термін служби 15–20 років скорочується вдвічі, якщо температура обмоток у тривалому режимі перевищує розрахункову на 10°C. Якщо температура підвищується в 1,5 рази відносно допустимої, двигун виходить із ладу через 3 години.

#### **6.4 Поняття про автоматичне керування електродвигуном**

Принципи автоматичного керування електродвигуном простіше усього розібрати на прикладі найбільш простої схеми керування асинхронним двигуном за допомогою реверсивного магнітного пускача (рис. 6.4).

Призначення схеми: забезпечення автоматичного пуску, реверсу і захисту асинхронного короткозамкненого двигуна.

Склад схеми:

- *B* і *H* – котушки контакторів «*Вперед*» і «*Назад*» і їхні контакти – головні (в ланцюзі живлення двигуна) і допоміжні (в ланцюзі керування);
- кнопкова станція «*Вперед*», «*Назад*» і «*Стоп*»;
- теплові реле *РТ1* і *РТ2* і їхні контакти у колі керування;
- автоматичний вимикач «*Вкл*»;
- запобіжники *ЗП*.

Живлення двигуна і кола керування здійснюється від однієї мережі [10].

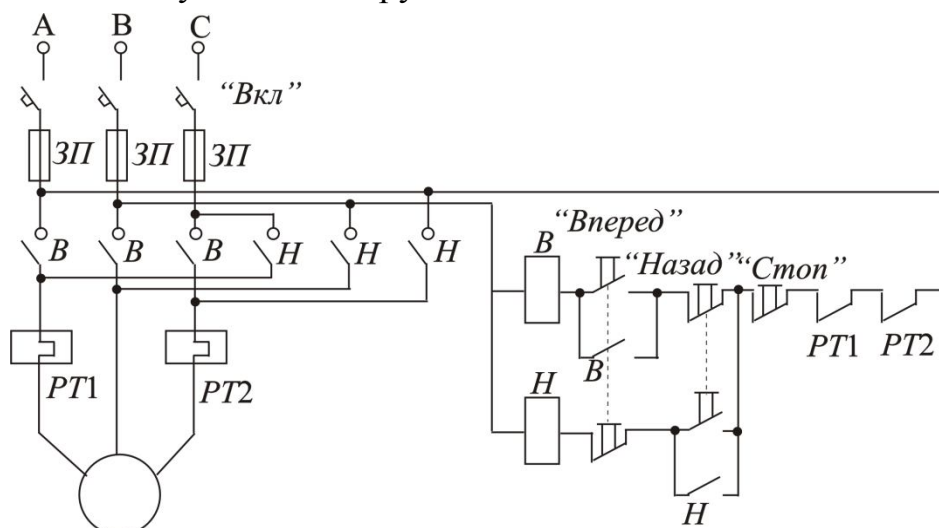


Рисунок 6.4. – Схема керування асинхронним двигуном

При вмиканні вимикача «Вкл» схема готова до роботи. Натисканням кнопки, наприклад, «Вперед», вмикають котушку контактора *В*. Спрацювавши, він замикає свої головні контакти *В* і приєднує двигун до мережі. Одночасно замикається його блок-контакт *В* у колі керування, що шунтує кнопку «Вперед». Кнопку можна відпустити. Для зупинки двигуна натискають кнопку «Стоп». Ланцюг котушки контактора *В* розривається, контактор відключається і від'єднує двигун від мережі. Для запобігання від одночасного натискання кнопок «Вперед» і «Назад» вони мають механічне блокування.

Автоматичний захист двигуна від тривалих перевантажень струмом здійснюється біметалічними тепловими реле *PT1* і *PT2*, що розмикають контакти, включені в коло живлення обмоток контакторів. При пуску двигуна виникає кидок струму. Якщо пусковий струм триватиме короткий час, теплові реле не встигають спрацювати. При перевантаженнях реле спрацьовують, вимикаючи контактор і двигун відключається від мережі. Повернення контактів після остигання біметалічної пластини робиться вручну після усунення причини перевантаження. Захист від струмів короткого замикання забезпечується плавкими запобіжниками. Вони також не спрацьовують від пускових струмів. При зникненні живлення контактор відключиться і від'єднає двигун від мережі. Це зроблено для захисту двигуна від самозапуску.

Розглянута схема є контакторно-релейною. В останній час все частіше застосовують безконтактну напівпровідникову апаратуру, побудовану на використанні тиристорів або силових транзисторів.

## 7 ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ

### Загальні відомості

Електрична енергія виробляється на електричних станціях – гідравлічних (ГЕС), теплових (ТЕС), атомних (АЕС) та електростанціях іншого типу (сонячних, вітряних, приливних та інших електростанціях, що працюють з відновлюваними джерелами енергії), де відповідно гідравлічна, тепла та атомна енергія перетворюється спочатку на механічну, а вже потім, за допомогою синхронних генераторів (гідрогенераторів на ГЕС та турбогенераторів на ТЕС та АЕС) механічна енергія перетворюється на електричну зазвичай на рівні середніх напруг (10–20 кВ). Місця споживання електричної енергії у переважній більшості випадків віддалені на десятки й сотні кілометрів від електростанцій, тому транспортування електроенергії до місць споживання, з метою зменшення втрат енергії, здійснюється на високих напругах (110 кВ та більше). Підвищення напруги здійснюється безпосередньо на електростанціях за допомогою силових трансформаторів, причому якщо генератори розташовують у спеціальних приміщеннях – машинних залах, то трансформатори – за межами приміщень – на спеціальній площадці, яку називають підвищувальною підстанцією і на якій крім трансформаторів встановлюють високовольтні комутаційні та інші апарати, які сприяють розподіленню електричної енергії між лініями електропередачі (ЛЕП), що відходять від цієї підстанції. Схема передачі електричної енергії від електростанції до кінцевого споживача зображена на рисунку 7.1.

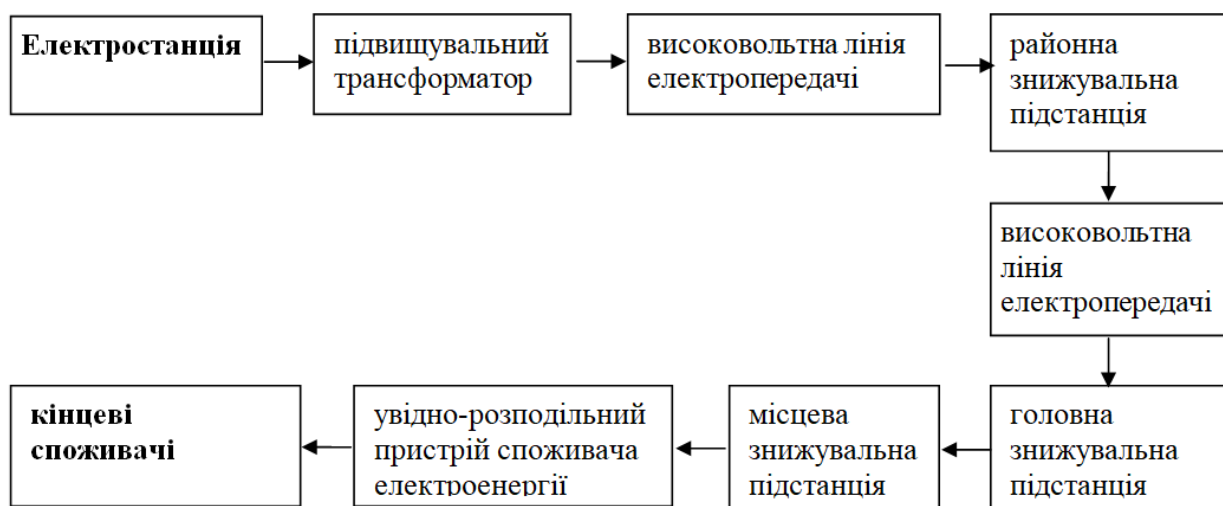


Рисунок 7.1 – Структурна схема електропостачання

Поблизу місця споживання електроенергії встановлюють так звані районні знижувальні підстанції, які приймають електричну енергію безпосередньо від високовольтних ЛЕП, знижують напругу до рівня 110–35 кВ та розподіляють енергію між головними підстанціями, які знижують напругу до рівня

10–6 кВ та розподіляють енергію між місцевими підстанціями. На місцевих підстанціях (наприклад тих, що встановлюються у житлових мікрорайонах) напруга знижується до рівня, на якому відбувається живлення кінцевих споживачів (у житлових мікрорайонах – це 220/380 В) і енергія розподіляється між ними. У споживача, перед тим, як потрапити до кінцевих електроприймачів (освітлювальні прилади, побутова електроапаратура тощо), електроенергія проходить через увідно-розподільний пристрій, де здійснюється облік спожитої енергії та її розподілення між електроприймачами [8].

### 7.1 Базові поняття системи електропостачання

*Система електропостачання (СЕ)* – сукупність електроустановок, призначених для забезпечення електроенергією цивільних або промислових споживачів. Система електропостачання зазвичай складається з джерел та систем перетворення, передачі й розподілу електричної енергії. Через те, що СЕС виконують вкрай важливу роль в роботі споживачів енергії, до них висувають такі вимоги: надійність і безперервність електропостачання споживачів; якість електроенергії, що надходить до споживача; безпека обслуговування складових СЕС; модульність і стандартизація; високі економічні показники; екологічність; ергономічність.

*Споживачами електроенергії (СЕЕ)* є об'єкти різних галузей промисловості, освітлювальні міські установки, цивільні об'єкти (житлові будинки тощо) Споживачі електричної енергії отримують її з розподільних мереж від енергетичних систем, від систем електропостачання промислових підприємств.

Електропостачання промислових *об'єктів* зазвичай здійснюється від трансформаторних підстанцій (ТП).

*Електроприймачами (ЕП)* – апарат, агрегат, механізм, призначений для перетворення електричної енергії в інший вид енергії. Це можуть бути електродвигуни приводів будівельних машин і механізмів, технологічні установки електропрогрівання бетону, нагрівачі, зварювальні агрегати, випрямляючі пристрої, високочастотні установки, електричні лампи освітлювальних установок, радіоелектронна апаратура.

Усі приймачі можуть бути підімкнені до розподільної мережі однієї напруги або до електричних мережі (ЕМ) різних напруг.

#### *Класифікація електроприймачів*

За надійністю електропостачання електроприймачі поділяються на три категорії.

*До першої категорії* належать ЕП і комплекси електроприймачів, перерва в електропостачанні яких може спричинити значний збиток, пошкодження основного устаткування, масовий брак продукції, розлад технологічного процесу. Ці приймачі повинні мати можливість забезпечення електроенергією не менше ніж від двох незалежних джерел живлення. Порухення електропостачання допускається тільки на час автоматичного відновлення електропостачання від іншого джерела.

Найбільш відповідальні ЕП і їх комплекси у нормальному режимі роботи повинні забезпечуватись електроенергією не менше ніж від трьох незалежних джерел живлення. Порухення електропостачання допускається тільки на час автоматичного відновлення.

*До другої категорії* відносяться ЕП і їх комплекси, перерва у електропостачанні яких призводить до масового недовипуску продукції, простоїв робітників і механізмів. Вони повинні забезпечуватись електроенергією від двох незалежних джерел живлення. Перерва у електропостачанні допускається на час, необхідний для автоматичного або оперативного перемикавання на друге джерело.

*До третьої категорії* відносяться ЕП і їх комплекси, що не потрапляють під визначення першої та другої категорій. Електропостачання тут може здійснюватися від одного джерела живлення. Перерва електропостачання допускається на час проведення відновлювальних робіт, але не більше однієї доби.

За режимами роботи електроприймачі поділяють на:

- приймачі, що працюють у режимі з малозмінним навантаженням (електродвигуни компресорів, насосів, вентиляторів і т.п.);
- приймачі, що працюють у режимі короткочасного навантаження;
- приймачі, що працюють у режимі повторно-короткочасного навантаження.

У першому режимі за один цикл роботи температура обмотки сягає постійного значення. Тривалість циклу роботи при цьому складається з часу вмикання, часу роботи на холостому ході і часу паузи. У другому режимі за один цикл роботи температура не досягає постійного значення, а за час паузи знижується до температури навколишнього середовища. У третьому режимі температура піднімається за час вмикання й знижується за час пауз, але нагрів при нормальному навантаженні не перевищує допустимої температури для даного класу ізоляції, а охолодження не досягає за час паузи температури навколишнього середовища.

Найбільш характерними приймачами електроенергії промислових підприємств, зокрема і нафтовидобувної галузі, є [3]:

- силові загальнопромислові пристрої (компресори, вентилятори, насоси і підйомно-транспортні пристрої);
- електричні освітлювальні установки;
- перетворювальні установки;
- електродвигуни виробничих механізмів;
- електричні пічі й електротермічні установки;
- електрозварювальні установки.

*Електричні мережі* (ЕМ) являють собою сукупність електроустановок для передачі та розподілу електроенергії, що складаються з трансформаторних підстанцій та розподільчих пристроїв, з'єднаних електричними лініями, що забезпечують їхній зв'язок з приймачами електроенергії.

Електричні мережі розрізняються за родом струму, напругою, режимами нейтралі, конструктивними ознаками. В основному мережі виконуються за системою трифазного змінного струму частотою 50 Гц. Ця система дозволяє здійснювати трансформацію електроенергії та передачу її на далекі відстані. У мережах змінного струму широко застосовують однофазні відгалуження до однофазних електроприймачів. В ЕМ можуть вмикатися установки підвищеної (до 10 кГц) і високої (вище 10 кГц) частоти з метою забезпечення надійної роботи окремих технологічних установок (нагрів металу під загартування, ковку, штампування, плавку металів). Для електропостачання окремих технологічних установок (електролізних, гальванічних, електроприводів підйомно-транспортних механізмів, верстатів) необхідний постійний струм. Для перетворення слугують двигун-генератори, випрямлячі.

В електромережах *лінії електропередач* (ЛЕП) можуть бути повітряними або кабельними. ЕМ та електроустановки у системах електропостачання можуть бути з *заземленою* або *ізолюваною нейтраллю*, що робиться для забезпечення безпеки експлуатації електроустановок.

При проектуванні та реконструкції систем електропостачання об'єктів необхідно знати електричні навантаження в електричних мережах. На підставі розрахунку електричних навантажень виконується розрахунок і вибір електричних мереж, комутаційних і захисних апаратів, джерел живлення, перетворювальних установок та інших електротехнічних пристроїв. Перевірка правильності вибору електричних мереж і електричних пристроїв за нагрівом і втратами напруги, розрахунок показників якості електроенергії, показників надійності систем електропостачання здійснюється на основі розрахунку електричних навантажень [7].

## 7.2 Структура мереж електропостачання промислових об'єктів

Система електропостачання промислових об'єктів – це сукупність електроустановок і пристроїв, призначених для виробництва, передачі і розподілу електроенергії, її обліку та контролю показників її якості. Електроустановки для виробництва та передачі електроенергії можуть бути власністю підприємства певної промислової галузі, або належати іншому підприємству чи об'єднанню.

Схеми електропостачання міст і промислових підприємств напряму пов'язані з надійністю забезпечення електричною енергією своїх споживачів. Де під надійністю розуміється здатність системи електропостачання і її окремих частин забезпечувати безперебійне постачання споживачів електричною енергією.

Основні принципи забезпечення надійного електропостачання полягають у такому:

- застосування відповідних (резервованих) схем електропостачання;
- використання резервних джерел живлення;
- використання мережної автоматики – автоматичного повторного включення (АПВ), автоматичного вводу резерву (АВР), автоматичного частотного розвантаження (АЧР) – комплексу пристроїв для автоматичного включення і відключення ЛЕП, трансформаторів і шин при порушенні електропостачання.

Підприємства нафто- та газовидобувної промисловості можуть мати власну електростанцію і забезпечувати електроенергією всі технологічні установки і процеси, передавати електроенергію власними електричними мережами. Підприємства можуть одержувати електроенергію від електроустановок (електростанцій і підстанцій), що належать центральній енергосистемі або сусідньому промислового підприємству.

Взагалі, найбільш поширеною схемою електропостачання, за якою промислові підприємства отримують електроенергію є постачання від районних електричних мереж (РЕМ) регіональної енергосистеми.

Більшість електроприймачів технологічних установок, побутових установок будівельних майданчиків, призначені для роботи за напруги до 1 кВ. Перетворення електроенергії відбувається на підстанціях споживачів, а її розподіл – розподільними мережами за напруги 0,4 кВ.

На рисунку 7.2 наведено схему електропостачання промислового об'єкта від генераторів власної електростанції (рис. 7.2, а) і від РЕМ (рис. 7.2, б).

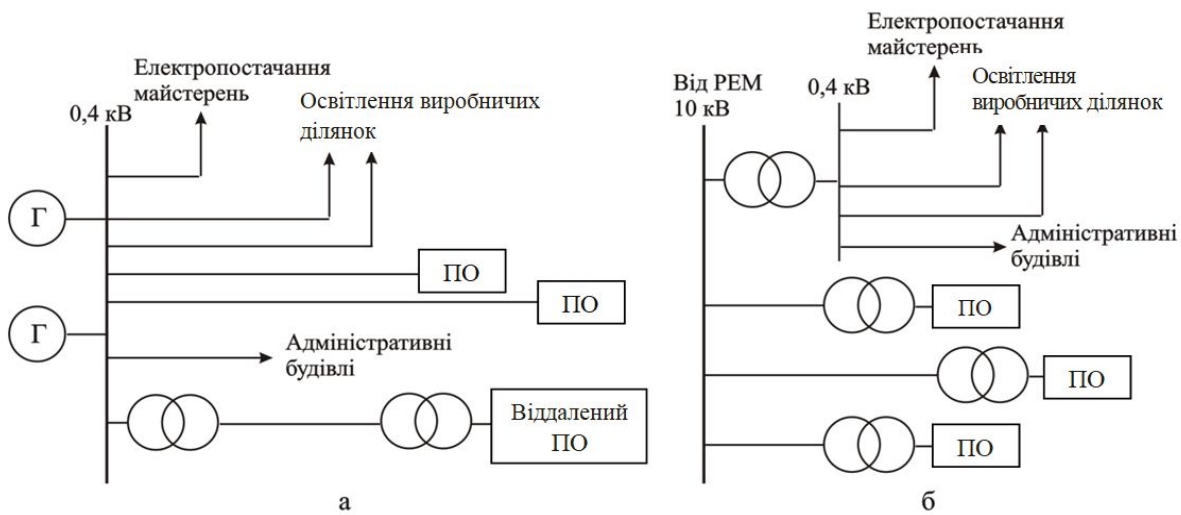


Рисунок 7.2 – Системи електропостачання промислових об'єктів:  
 а – від генераторів власної електростанції, б – від районної енергомережі (де Г – генератор електростанції, ПО – промисловий об'єкт, РЕМ – районна електрична мережа)

Наведена система електропостачання підприємств є складною системою, яку можна умовно поділити на підсистему зовнішнього електропостачання, систему внутрішнього електропостачання і систему внутрішньоцехового електроспоживання. У той же час система електропостачання підприємства нафто-газовидобувної галузі є підсистемою енергосистеми та підсистемою технологічної системи виробництва на цьому підприємстві [7].

У систему зовнішнього електропостачання входить сукупність електроустановок та пристроїв між вузловим розподільчим пунктом енергосистеми і знижувальні трансформаторні підстанції (ТП) самого підприємства. В системі зовнішнього електропостачання підприємства застосовуються, в основному, напруги 6-35 кВ.

Система внутрішнього електропостачання великого промислового підприємства характеризується великою розгалуженістю розподільчої мережі, що має повітряні і кабельні лінії, велику кількість розподільчих пунктів (РП), ТП, комутаційних апаратів. Розподіл електроенергії в системі внутрішнього електропостачання здійснюється при напругах 6, 10 кВ. До системи внутрішнього електропостачання дрібних ПО відносять електричні мережі низької напруги від електростанції або ТП до вводу в цех або технологічні установки.

Зазвичай система внутрішнього об'єктового електропостачання є електричною мережею з напругою 380/220 В (лінійна/фазна напруги). Вона складається з цехових (або подібних за значенням) мереж, виконаних кабелями і про-



водами з комутаційними і захисними апаратами, від розподільчого пункту до електроприймачів.

### 7.3 Типові схеми електропостачання промислового об'єкта

На рисунку 7.3,а показано схему електропостачання будівництва великого промислового підприємства. Джерелом живлення є енергосистема. Електропостачання може здійснюватися від підстанції районної енергосистеми (рис. 7.3, б). Розподіл електроенергії до електроприймачів на напругу до 1000 В здійснюється розподільними мережами низької напруги (рис. 7.3, в).

Можливе електропостачання будівельних майданчиків і виробництв від суміжних джерел живлення, наприклад, від енергосистеми і від власної електростанції.

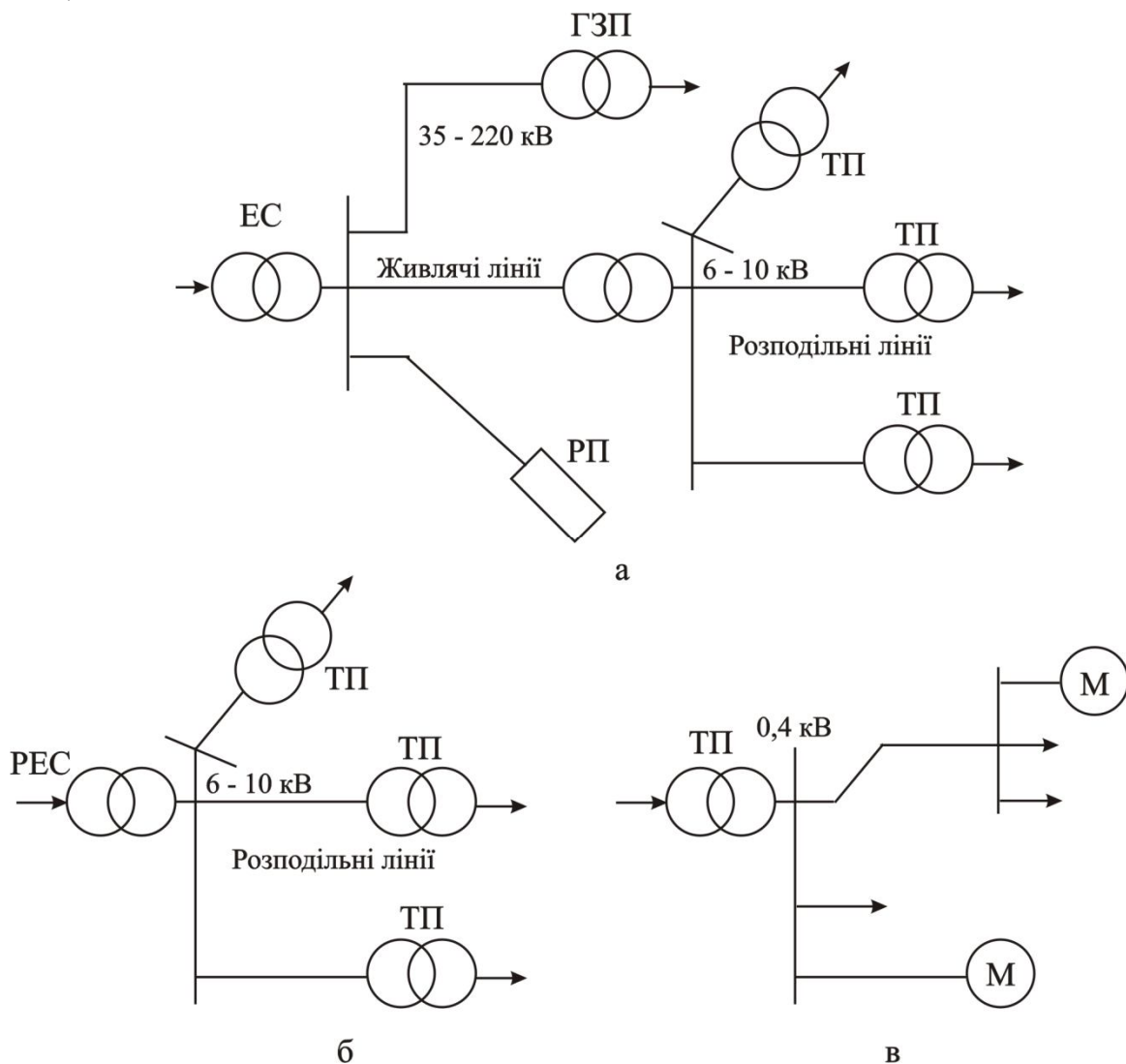


Рисунок 7.3 – Схема електропостачання промислових об'єктів:  
 а – від енергосистеми; б – від районної енергосистеми; в – від споживчої підстанції; ЕС – енергосистема; ГЗП – головна знижувальна підстанція;  
 ТП – трансформаторна підстанція; РЕС – районна енергосистема;  
 РП – розподільний пункт; М – навантаження

Напруга на шинах РП від енергосистеми і власної електростанції при цьому має збігатися (рис. 7.4, а). При розбіжності напруг застосовується трансформація напруги від енергосистеми через трансформатори Т1 і Т2 (рис. 7.4, б). Можливе електропостачання при двобічному живленні [10].

Схеми електропостачання з двобічним живленням підвищують надійність електропостачання, оскільки при пошкодженні однієї з ліній електропостачання споживачів, що живляться від пошкодженої лінії, відновлюється від другої лінії через секційний вимикач на стороні нижчої напруги.

Напруга електричних мереж в системі внутрішнього електропостачання може бути 6, 10 і 20 кВ. Найбільш поширеною є напруга 10 кВ. Вона є більш економічною у порівнянні з напругою 6 кВ за рівнем втрат потужності і напруги у мережах.

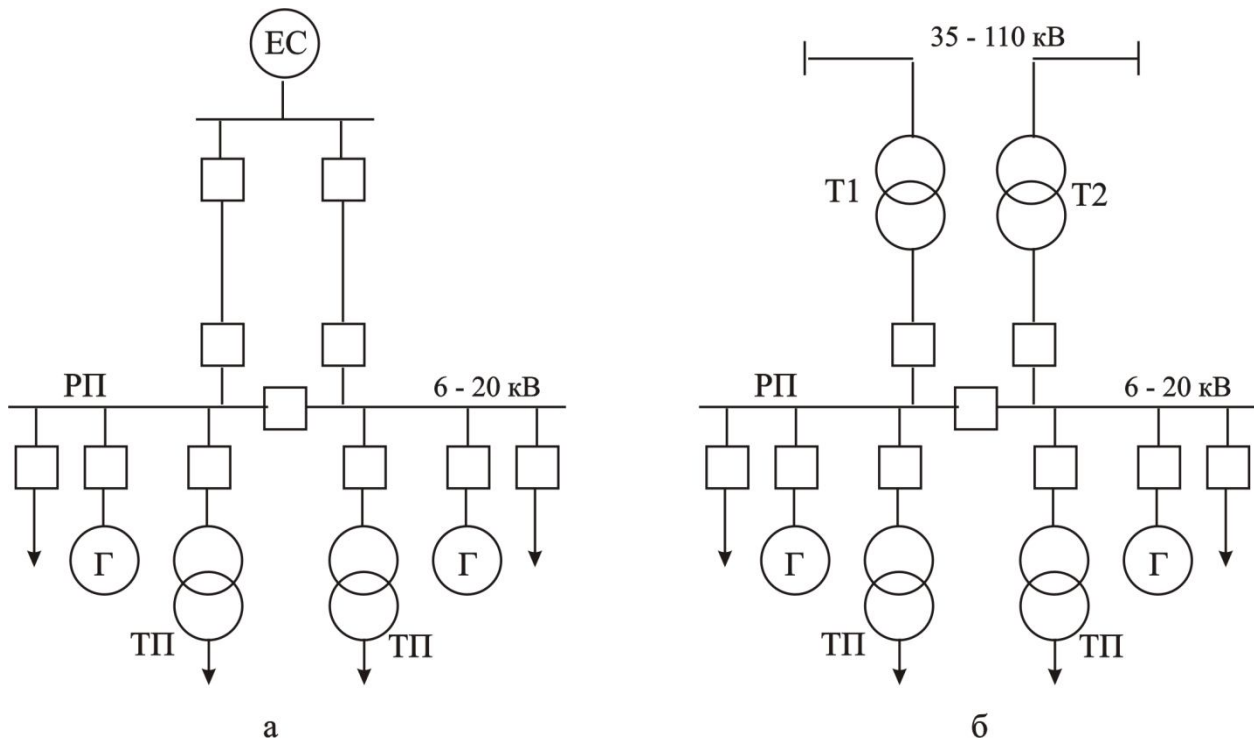


Рисунок 7.4 – Схема електропостачання від енергосистеми і власної електростанції: а – на однаковій напрузі; б – з трансформацією напруги; ЕС – енергосистема; РП – розподільний пункт; ТП – споживча трансформаторна підстанція; Г – генератор електростанції; Т1, Т2 – знижувальні трансформатори

Напруга 6 кВ використовується в системах, де перехід на напругу 10 кВ вважається нераціональним у зв'язку із заміною трансформаторів і електроприймачів (наприклад, електродвигунів). Напругу 20 кВ поки застосовується тільки в мережах, близьких від електростанцій з генераторною напругою 20 кВ.

Передача електроенергії від джерела живлення до РП, ТП або окремих електроприймачів може здійснюватися за радіальною (рис. 7.5, а),

магістральною (рис. 7.5, б), або змішаною схемою, що поєднує елементи радіальних і магістральних схем.

Радіальні схеми мають високу надійність. Лінії електропередач за цими схемами відходять від джерела живлення «за радіусами» до РП або ТП.

Недоліком схеми є те, що при аварійному відключенні лінії живлення може виявитися знеструмленою велика група споживачів. Цей недолік усувається застосуванням резервних джерел електроенергії.

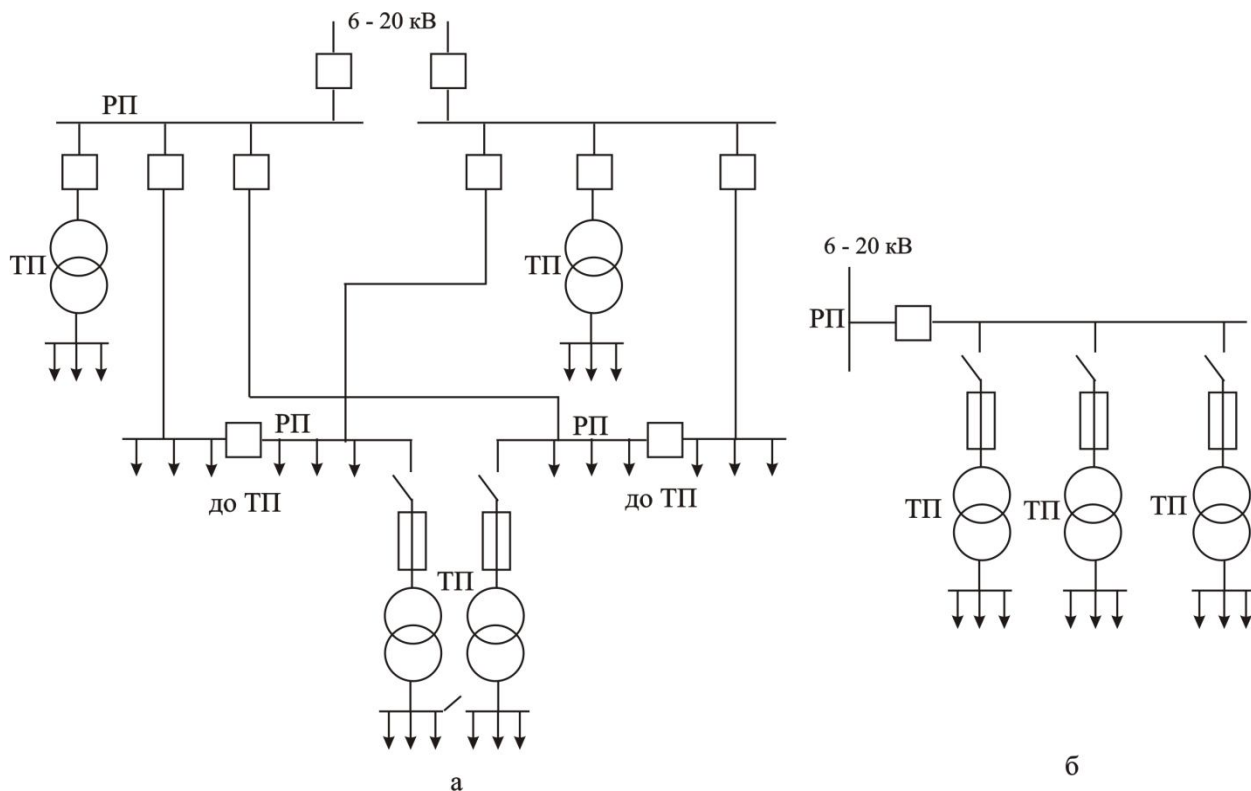


Рисунок 7.5 – Схема розподілу електроенергії: а – радіальна; б – магістральна

При магістральній схемі одна живляча магістраль обслуговує кілька ТП або РП. Розподіл енергії здійснюється шляхом виконання відгалужень від повітряної або кабельної лінії до окремих підстанцій. Живлення ТП можна здійснити шляхом почергового введення ЛЕП спочатку від РП до однієї ТП, потім від неї до іншої ТП і т. д. При магістральних схемах зменшується протяжність мереж, кількість вимикачів на РП, знижуються втрати потужності в мережах, втрати на спорудження мереж. Недоліком магістральних схем є зниження надійності у порівнянні з радіальними схемами, бо при пошкодженні магістралі знеструмленими виявляються всі споживачі, що живляться від неї [10].

#### *Розподіл електроенергії в мережах до 1 кВ*

Схема електропостачання промислових об'єктів залежить від їх категорії за надійністю і безперебійністю електропостачання. Для електропостачання ви-

робничих електроприймачів застосовують радіальні, магістральні і змішані схеми.

Магістральна схема застосовується для живлення декількох електроприймачів окремого технологічного агрегату, або невеликої кількості дрібних електроприймачів, не пов'язаних технологічним процесом (рис. 7.6, а).

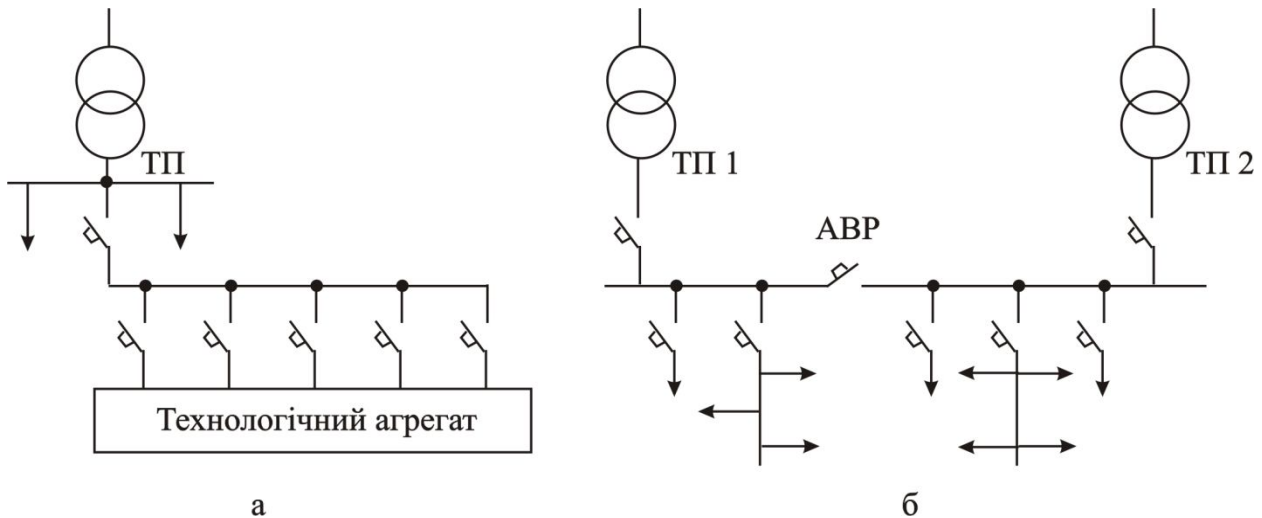


Рисунок 7.6 – Схеми електропостачання виробничих споживачів:  
а – магістральна; б – змішана; ТП – трансформаторна підстанція;  
Т1, Т2 – трансформатори двотрансформаторної ТП

За радіальною схемою підключаються найбільш потужні електроприймачі або окремі розподільчі пункти.

Чисто радіальні або магістральні схеми застосовують рідко, Найбільшого поширення набули змішані схеми, що за своїми властивостями і структурою поєднують ознаки радіальних і магістральних схем (рис. 7.6, б) [10].

## 7.4 Розрахунок електричних мереж

### *Розрахунок електричних навантажень*

Електричне навантаження – це величина, що характеризує споживання електроенергії окремими приймачами чи групою приймачів. При проектуванні систем електропостачання електричне навантаження в основному задають потужністю чи струмом.

Проектування системи електропостачання кожного промислового об'єкта починається з визначення очікуваних (інакше розрахункових) електричних навантажень цього об'єкта, зокрема їх середніх і максимальних значень.

*Середнє навантаження* (або потужність) споживача за розглянутий період (добу, рік або за найбільш навантажену зміну) визначаються відповідно до виразу:

$$P_c = \frac{W}{T} \quad (7.1)$$

де  $W$  – витрата електроенергії за розглянутий період, кВт·год;

$T$  – тривалість розглянутого періоду роботи споживача, год.

Середнє навантаження за рік використовують для визначення річних втрат електроенергії, а середнє навантаження за найбільш завантажену зміну – для визначення розрахункового максимуму навантаження.

Середні навантаження за найбільш завантажену зміну  $P_{зм}$  (зазвичай денну) найчастіше визначають за формулою

$$P_{зм} = k_B \cdot P_H \quad (7.2)$$

де  $k_B$  – коефіцієнт використання активної потужності приймача або групи приймачів;

$P_H$  – номінальна потужність приймача або групи однойменних приймачів.

Знання розрахункових максимальних навантажень системи електропостачання необхідно для вибору елементів електричних мереж за критеріями припустимого нагрівання і відхилення напруги, визначення максимальних втрат потужності в мережах, вибору трансформаторів підстанцій й елементів захисту груп споживачів і системи електропостачання в цілому.

*Максимальне навантаження.* Максимальне навантаження являє собою найбільше значення потужності протягом деякого проміжку часу. За тривалістю розрізняють два види максимальних навантажень:

– максимально тривалі навантаження (10, 15, 30, 60, 120 хв.).

Використовуються для вибору елементів системи електропостачання за нагрівом і розрахунку максимальних втрат потужності;

– максимально короткочасні чи пікові тривалістю 1–2 с.

Використовуються для визначення втрат напруги в контактних мережах, перевірки мереж за умовами самозапуску електродвигунів, вибору плавких ставок запобіжників, розрахунків струмів спрацьовування релейного захисту.

*Розрахункове навантаження (за допустимим нагрівом).* Під розрахунковим навантаженням (за допустимим нагрівом) розуміється таке тривале незмінне навантаження елемента системи електропостачання, що еквівалентне очікуваному змінному навантаженню за найбільш важким тепловим впливом: максимальній температурі нагріву провідника чи тепловому зносу його ізоляції. При змінному графіку навантаження в якості розрахункового навантаження за

допустимим нагрівом приймається максимальне середнє навантаження різної тривалості – 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2; 2,5 годин (залежно від типу лінії електропередачі (ЛЕП) та умов їх прокладки, перерізу, напруги).

Визначення розрахункового навантаження проводять від нижчих до вищих ступенів системи електропостачання, розглядаючи по черзі окремі вузли електричних мереж. При цьому розрізняють навантаження, приведені до введення конкретного споживача і навантаження елементів системи (ЛЕП, ПС). Точність визначення розрахункового навантаження визначається характером задачі. Розрахункові навантаження, обумовлені на розрахунковий термін, тобто на заданий рівень виробництва, вимагають більшої точності. Розрахункові навантаження, обумовлені на перспективу, тобто очікувані навантаження, чи обумовлені на стадії попередніх обґрунтувань, допускають меншу точність і їхній розрахунок робиться за орієнтованими показниками. Найбільшою точністю визначення навантаження за розрахунковий термін мають методи визначення навантаження споживачів. Визначення навантаження вищих ступенів системи електропостачання проводиться з меншою точністю, що визначається великою кількістю графіків навантаження споживачів і складністю обліку їхнього споживання.

### *Розрахунок елементів електричних мереж*

Розрахунок схем електропостачання виконують з метою визначення параметрів режиму роботи (струмів, потужностей, напруг) з подальшим їх використанням для вибору елементів електричних мереж, таких як ЛЕП, силового устаткування, типів трансформаторів, елементів релейного захисту й автоматики тощо.

Електричні мережі можуть працювати у різних режимах роботи, що характеризуються різними значеннями зокрема таких електричних величин, як струми і напруги на окремих ділянках цієї мережі. Виділяють три режими роботи електричних мереж і локальних електричних кіл [3]:

– нормальний режим роботи – режим надійного електропостачання, при якому всі елементи схеми електропостачання знаходяться в роботі і параметри режиму не перевищують нормально допустимих меж;

– післяаварійний режим роботи – режим роботи, при якому в схемі відсутній один чи кілька елементів і параметри режиму не перевищують допустимих меж для даного режиму;

– аварійний режим роботи – режим роботи, викликаний пошкодженням елементів мережі чи короткими замиканнями (КЗ) і який характеризується протіканням надвисоких струмів.

### *Розрахунок струмів короткого замикання*

КЗ називається всяке, не передбачене нормальними умовами роботи замикання між фазами трифазної системи електропостачання, а в чотиривідних системах із заземленими нейтраліями – також замикання однієї чи декількох фаз на землю (або на нульовий провід).

Розрахунок значень струмів КЗ роблять з метою перевірки провідників і апаратів на термічну і динамічну стійкості при протіканні максимально можливих струмів КЗ (найчастіше струму трифазного КЗ). Також важливим є визначення струмів КЗ для перевірки параметрів роботи апаратів захисту, зокрема релейного захисту. Такий розрахунок виконується у розрахунку на мінімальні струми КЗ (найчастіше двох- чи однофазного струму КЗ при КЗ в кінці ділянки, що захищається).

При розрахунку струмів КЗ можуть прийматися деякі припущення, допустимі нормативними документами:

Струм симетричного КЗ в еквівалентній схемі щодо точки КЗ визначається наступним виразом:

$$i = \sqrt{2}I_{nt} \cdot \sin(\omega t - \varphi) + \sqrt{2}I_{n0} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = i_n + i_a, \quad (7.3)$$

де  $i_n$  і  $i_a$  – миттєві значення періодичної і аперіодичної складових струму КЗ;

$I_{nt}$  – діюче значення періодичної складової струму КЗ, у загальному випадку змінне у часі;

$I_{n0}$  – початкове діюче значення періодичної складової струму КЗ;

$\omega$  – кутова частота змінного струму;

$t$  – час;

$\tau$  – постійна часу кола, що визначається відношенням реактивного і активного опорів

$$\frac{L}{r} = \frac{x}{\omega r}.$$

Ударний струм КЗ, що настає через півперіоду після виникнення КЗ, визначається в такий спосіб:

$$i_{y\partial} = \sqrt{2}I^n \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi}{x}}\right) = k_{y\partial} \cdot \sqrt{2} \cdot I^n, \quad (7.4)$$

де  $k_{y0}$  – ударний коефіцієнт.

При проведенні розрахунків струмів КЗ слід враховувати такі практичні рекомендації, що відносяться до мереж низької та високої напруги (НН і ВН):

– у мережах ВН результуючий активний опір звичайно не перевищує  $1/3$  реактивного, у зв'язку з чим його вплив на повний опір не перевищує 5%, тому активними опорами в мережах ВН, як правило, нехтують (винятком можуть бути мережі з довгими кабельними лініями малого перерізу);

– опори електричних апаратів, коротких шинних з'єднань і т.п. у мережах ВН у порівнянні з опорами ліній, ДЖ і струмообмежувальних реакторів досить малі;

– у мережах НН активні опори істотні й ними, як правило, не можна зневажати. Велике значення можуть також мати опори електричних апаратів, коротких шинних ділянок, трансформаторів струму, а також іноді контактних з'єднань.

За характером періодичної складової струму КЗ розрізняють наступні два випадки:

1. Діюче значення періодичної складової струму КЗ у часі практично незмінне. Це має місце, коли струм КЗ відносно малий у порівнянні з номінальним струмом ДЖ (генератора), що живить коло КЗ.

2. Діюче значення періодичної складової струму КЗ у часі змінюється. Це має місце, коли струм КЗ досить великий і викликає помітні електромагнітні перехідні явища в генераторі, що живить коло КЗ.

Крім цього на струм КЗ можуть впливати зміни, що відбуваються в схемі електропостачання під час КЗ (відключення і переключення в схемі, нагрівання провідників струмом КЗ та ін.).

#### *Розрахунок струмів КЗ з незмінною періодичною складовою*

Періодична складова струму КЗ, з урахуванням нормованих припущень при розрахунках КЗ, вважається практично незмінною в часі, якщо її зміни залишаються в межах 10%. Такий характер зміни періодичної складової струму КЗ має місце при віддаленому місці КЗ від генераторів (КЗ у мережі НН, що живиться від мережі ВН).

При незначній відстані місця КЗ від генератора (КЗ за трансформатором, підключеним до генератора) періодична складова струму КЗ може вважатися незмінною, якщо індуктивний опір кола КЗ, віднесений до номінального опору генератора, більше чи дорівнює 3.



### *Розрахунок струмів КЗ зі змінною періодичною складовою.*

Зміна періодичної складової струму КЗ відбувається за складним законом від початкового значення  $I''$  до сталого значення  $I_\infty$ . Одним з практичних методів розрахунку таких видів КЗ є метод «розрахункових кривих» (існує ще метод «спрямлених характеристик»). Даний метод розрахунку базується на використанні розрахункових кривих (залежність струму як функція струму від відношення індуктивного опору кола КЗ до номінального опору генератора) отриманих для типових синхронних машин [10].

### *Розрахунок струмів КЗ в установках постійного струму*

Відмінність полягає в тому, що струм КЗ визначається відношенням напруги, що діє в короткозамкненому контурі, до еквівалентного активного опору цього контуру:

$$I_K = \frac{U_K}{R_K} . \quad (7.5)$$

### *Вибір перерізу провідників*

Переріз провідників повинен вибиратися залежно від ряду технічних і економічних факторів. Технічні фактори такі:

- нагрівання провідника тривалим робочим струмом;
- допустиме падіння напруги;
- вплив струму КЗ (термічна стійкість провідника, динамічна стійкість провідника (для твердих шин), необхідне значення струму однофазного КЗ у мережах НН з глухозаземленою нейтраллю (чотирипровідна мережа);
- механічна міцність – стійкість до механічного навантаження від власної маси, ожеледі, вітру;
- втрати на корону.

Економічні фактори полягають в оптимальному сполученні збільшення капіталовкладень у будівництво мережі і зменшення вартості втрат потужності при зміні перерізу провідників.

### *Вибір перерізу провідників за нагрівом*

Ця умова вибору перерізу обумовлена необхідністю збереження електричних і механічних властивостей провідників при їхньому нагріванні тривалими робочими струмами.

Вибір перерізу провідника за нагрівом необхідно робити, виходячи з двох умов.

1. Найбільший тривалий струм у лінії не повинен перевищувати допустимого струму, де під допустимим струмом розуміється такий тривалий струм, при якому зберігаються електричні й механічні властивості провідника.

У цій умові можна коригувати як найбільший тривалий струм, так і допустимий струм при перевантаженнях в післяаварійних режимах з урахуванням умов прокладки провідника.

2. Допустимий тривалий струм  $I_{\text{дп.трив.}}$  повинен перевищувати чи бути рівним номінальному струму апарата, що захищає провідник  $I_{\text{ном.зах.ап.}}$  з урахуванням коефіцієнта  $K$  для мереж низької напруги:

$$I_{\text{дп.трив.}} \geq \frac{I_{\text{ном.зах.ап.}}}{K} \quad (7.6)$$

Значення коефіцієнта  $K$  для міських мереж складає 0,8 (величина 0,8 обумовлена запасом провідника за нагрівом у зв'язку з недостатнім оглядом цих мереж і неконтрольованим підключенням додаткового навантаження), для промислових мереж – 3 (величина 3 обумовлена великими пусковими струмами двигунів, що не повинні відключатися захисними апаратами, і кращим оглядом ліній).

Перевірці перерізу провідників за нагрівом підлягають лінії всіх класів напруги [3].

#### *Вибір перерізу провідників за допустимою втратою напруги*

Ця умова вибору перерізу обумовлена вимогами державного стандарту щодо якості електричної енергії. Так, нормально і гранично припустимі значення сталого відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії складають відповідно  $\pm 5\%$  і  $\pm 10\%$ . Вибір перерізу провідника за допустимою втратою напруги відповідає виконанню умови

$$\Delta U_{\text{нб.}} \leq \Delta U_{\text{прип.}} \quad (7.7)$$

де  $\Delta U_{\text{нб.}}$  – втрати напруги до найбільш віддаленої точки мережі, обумовлені опором провідника.

При виборі перерізу за допустимою втратою напруги можуть бути накладені додаткові економічні умови.

Вибір перерізу дроту за умови його рівності на всіх ділянках лінії:

$$F = \frac{\sum_{k=1}^m \sum_{j=2}^m \sqrt{3} \cdot I_{kj} \cdot l_{kj} \cdot \cos \varphi_{kj}}{\gamma \cdot \Delta U_{\text{прип.а}}} \quad (7.8)$$

$$F \leq \Delta U_{\text{нрпн.а}} \quad (7.9)$$

де  $l_{kj}$  і  $I_{kj}$  – довжина і струм по ділянці лінії з початком  $k$  і кінцем  $j$ ;

$\gamma$  – розрахункова питома провідність провідника;

$U_{\text{нрпн.а}}$  – припустима втрата напруги за активною складовою.

Ця додаткова економічна умова використовується при виборі перерізу провідників у міських електричних мережах, де рівність перерізів провідників забезпечує найбільш вигідні умови для будівництва та монтажу мережі.

Вибір перерізу за умови мінімуму втрат потужності:

$$F_{kj} = \frac{I_{kj}}{J_{\Delta U}} \quad (7.10)$$

де  $J_{\Delta U}$  – щільність струму, яка визначається наступним чином:

$$J_{\Delta U} = \frac{\gamma \cdot \Delta U_{\text{нрпн.а}}}{\sum_{\substack{k=1 \\ j=2}}^m \sqrt{3} \cdot I_{kj} \cdot l_{kj} \cdot \cos \varphi_{kj}} \quad (7.11)$$

Ця додаткова економічна умова використовується при виборі перерізу провідників у мережах промислових підприємств, де відносно короткі лінії й великі навантаження, тобто витрати провідникового металу незначні, а втрати електроенергії великі.

Вибір перерізу за умови мінімальної витрати провідникового матеріалу на спорудження лінії:

$$F_{(n-1)n} = \frac{\rho \sqrt{P_{(n-1)n}}}{\Delta U_{\text{нрпн.а}} U_{\text{ном}}} \cdot \sum_{\substack{k=1 \\ j=2}}^m l_{kj} \cdot \sqrt{P_{kj}} \quad (7.12)$$

де  $\rho$  – розрахунковий питомий опір провідника;

$n$  – номер вузла навантаження.

Ця додаткова економічна умова використовується при виборі перерізу провідників у сільських мережах при малому навантаженні, де економія провідникового металу більш доцільна, ніж економія втрат електроенергії. Перевірці перерізу провідників за припустимою втратою напруги підлягають лінії напругою до 20 кВ. Це обумовлено особливістю активного опору в цих мережах, що, на відміну від реактивного, міняється в значному діапазоні при зміні перерізу.

## 7.5 Принципи побудови і розрахунку мереж освітлення та електропостачання в окремих приміщеннях

### *Групові лінії освітлення*

Групові розподільні щитки мережі освітлення доцільно, як і в силових мережах, розміщувати в центрі навантажень із зсувом в бік джерела живлення. Однак, за умовами архітектурно-планувальних рішень й інтер'єра приміщень від цієї рекомендації доводиться відступати, розташовуючи щитки на сходових клітинах, у коридорах у спеціальних шафах-нішах, які передбачаються в архітектурно-будівельній частині проекту.

Групові лінії, що відходять від щитків, можуть бути однофазними (фаза і нуль), двофазними (дві фази і нуль) і трифазними чотирипровідними (три фази і нуль). Апарати захисту в нульових проводах встановлювати не дозволяється, за винятком вибухонебезпечних приміщень класу В-1, де з метою підвищення вибухобезпеки апарати захисту встановлюють не тільки у фазних, але й у нульових проводах, а для занулення застосовують окремий захисний провідник.

Рекомендації для вибору тієї або іншої схеми групової лінії не можуть бути однозначними, тому що значною мірою залежать від довжини, кількості світильників, їхнього розташування, зручності керування й експлуатації, а також забезпечення нормованих рівнів коефіцієнта пульсації при люмінесцентному освітленні у приміщеннях з напруженою зоровою роботою. Треба пам'ятати, що перевагу варто віддавати трифазним чотирипровідним груповим лініям, що забезпечують у три рази більше навантаження й у 6 разів менші втрати напруги порівняно з однофазними груповими лініями, але за вдвічі більшої довжини проводів. У невеликих приміщеннях, де немає особливих вимог до якості освітлення і встановлена невелика кількість світильників, застосовуються однофазні групові лінії. У приміщеннях коридорного типу з великою кількістю дрібних приміщень коридором прокладають чотирипровідну групову лінію, відгалуження у кімнати виконують двопровідними.

Проектування групових мереж електричного освітлення передбачено такими рекомендаціями [11]:

1. Живлення штепсельних розеток місцевого освітлення належить, як правило, виділяти в окремі групові лінії, якщо це не пов'язано зі значним збільшенням довжини мережі.

2. До групових ліній освітлення сходів, поверхових коридорів, холів, технічних підпіль, підвалів і горищ, як і в житлових будинках, припускається приєднувати до 60 люмінесцентних ламп або ламп розжарювання потужністю до 65 Вт включно на фазу.

3. При прокладанні загальними трасами рекомендовано об'єднувати нульові проводи ліній одного виду освітлення ліній різних фаз мережі. Об'єднання нульових проводів ліній робочого, евакуаційного й аварійного освітлення не дозволяється.

4. Спільні нульові проводи для кількох ліній при прокладанні в трубах повинні прокладатися разом з фазними проводами.

5. Вимикачі повинні встановлюватися тільки на фазних проводах, за винятком випадків, передбачених гл. 7.3 ПУЕ (Правила улаштування електроустановок) для вибухонебезпечних приміщень класу В-1. При живленні багатолампових світильників чотири- або трипровідними лініями варто передбачати одне тимчасове вимикання усіх фазних проводів.

6. Розподіл навантажень між фазами мережі освітлення повинний бути рівномірним, різниця в струмах найбільш і найменш навантаженої фази не повинна перевищувати 30 % у межах одного щитка і 10 % на початку живлячих ліній.

7. Керування загальним освітленням рекомендується здійснювати наступним чином:

- у приміщеннях з природним освітленням передбачати вимикання світильників рядами, паралельними вікнам;

- на одне вимикання поєднувати тільки світильники, що вимагають сумісної дії за умовами технологічного процесу;

- у великих приміщеннях, наприклад, таких, як конференц-зали, вестибюлі, а також в різних коридорах і проходах передбачати можливість вмикання невеликої частини світильників, що створюють по всій площі освітленість, достатню для прибирання приміщення;

- керування евакуаційним і аварійним освітленням повинне передбачатися з щитків при мінімальній кількості останніх;

- світильники у входів у будинки варто приєднувати до групової мережі внутрішнього освітлення, переважно до мережі аварійного освітлення;

- світильники і штепсельні розетки місцевого і переносного освітлення при напрузі 12–42 В варто живити від знижувальних трансформаторів, що приєднуються до мережі робочого або евакуаційного освітлення (в останньому випадку тільки окремими групами) [10].

Приміщення з достатнім природним освітленням і без нього повинні жити окремими групами. Допускається застосування для обох видів приміщень загальних груп з установкою додаткових вимикачів для приміщень, що мають природне освітлення. Додаткові вимикачі варто передбачати також для

аварійного й евакуаційного освітлення окремих непрохідних приміщень, у яких люди не знаходяться постійно (гардероби, конференц-зали, тощо)

### *Схеми освітлювальних мереж*

Електропостачання світильників загального освітлення будівель здійснюється за напруги 380/220 В змінного струму при заземленій нейтралі і за напруги 220 В при ізольованій нейтралі. Для світильників місцевого освітлення з лампами розжарювання, або люмінесцентними лампами застосовується напруга не більше 220 В у приміщеннях без підвищеної небезпеки і не більше 42 В у приміщеннях з підвищеною небезпекою. Для переносних ручних світильників у приміщеннях з підвищеною небезпекою застосовується напруга до 42 В. При обмежених умовах роботи живлення переносних світильників повинно бути здійснене при напрузі до 12 В через спеціально призначені трансформатори.

Схеми електропостачання освітлювального навантаження в системі електропостачання цеху (ферми) будь-якого підприємства відповідають схемам електропостачання силового навантаження, що розглядалися вище. При цьому до схем електропостачання освітлювальних навантажень пред'являються наступні вимоги:

1. Електропостачання освітлювальної навантаження повинне забезпечуватися спільно з електропостачанням силового навантаження або роздільно від електропостачання силового навантаження. Доцільність суміщення живлення електроприймачів силових та освітлювальних навантажень повинна підтверджуватися техніко-економічними розрахунками.

2. Схеми живлення освітлювальних установок в будинках (ремонтні цехи і майстерні, бетонні і розчинні заводи, адміністративні приміщення) повинні допускати автоматизоване керування освітленням.

3. Схеми живлення освітлювальних установок повинні забезпечувати надійність і безпеку електропостачання.

Аварійне освітлення вимагає створення для нього самостійної системи електропостачання, незалежної від мережі робочого освітлення. Незалежним джерелом живлення аварійного освітлення є трансформатор, що одержує живлення від шин, не пов'язаних з шинами робочого освітлення, генератор, що приводиться первинним двигуном або акумуляторна батарея.

На рисунку 7.7 наведено схему спільного живлення силового та освітлювального навантаження від двох однострансформаторних підстанцій. Схема суміщеного живлення силового та освітлювального навантажень від одного тран-

сформатора знижує кількість трансформаторів у порівнянні зі схемою роздільного живлення цих навантажень [7].

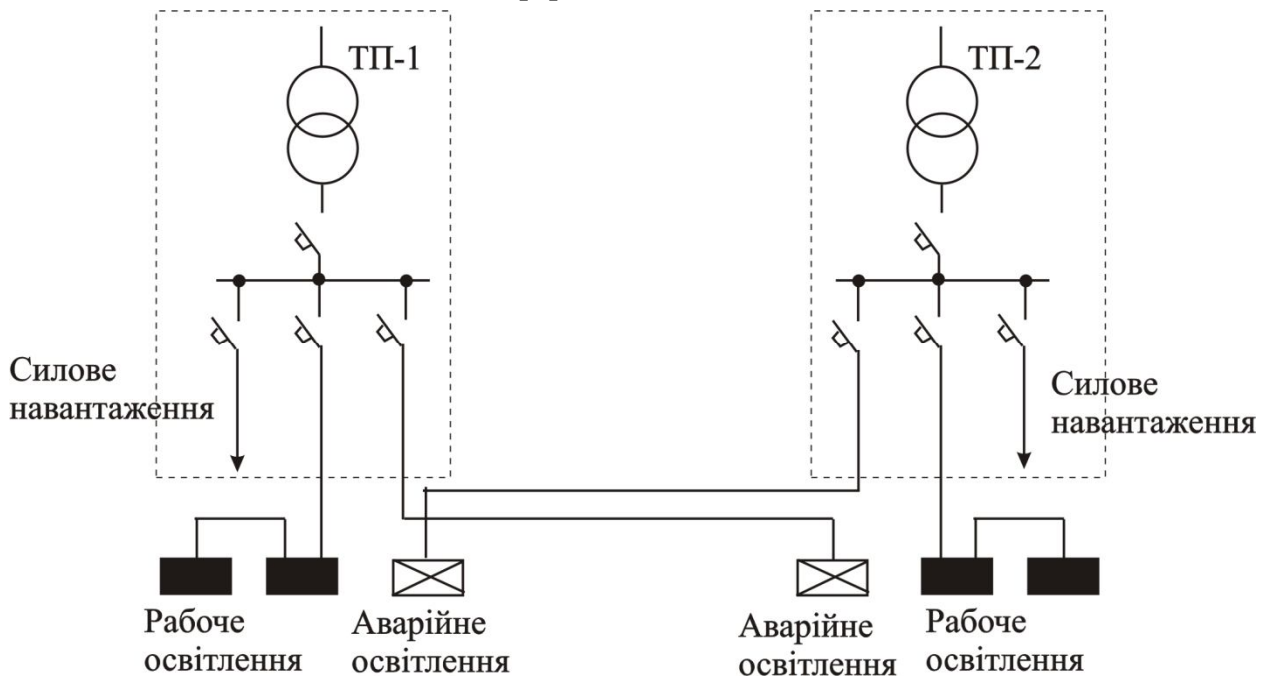


Рисунок 7.7 – Схема спільного живлення силового та освітлювального навантажень від двох підстанцій (ТП-1 і ТП-2)

## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Мілих В. І. Електротехніка, електромеханіка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / В. І. Мілих, О. О. Шавьолкін ; за заг. ред. В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2015. – 688 с.
2. Форкун Я. Б. Текст лекцій з дисципліни «Теоретичні основи електротехніки», частина І (для студентів усіх форм навчання напрямів 6.050701 – Електротехніка та електротехнології, 6.050702 – Електромеханіка спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Я. Б. Форкун, М. Л. Глебова, Н. О. Сабалаєва ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2016. – 102 с.
3. Касаткин А. С. Электротехника : учеб. пособие для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов ; за общ. ред. А. С. Касаткина. – М. : Энергоатомиздат, 1995. – 240 с.
4. Тугай Д. В. Текст лекцій з дисципліни «Основи метрології та електровимірювань» (для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології) / Д. В. Тугай, О. В. Дорохов ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2011. – 120 с.
5. Кованько В. В. Загальнотехнічні вимірювання і прилади : навч. посібник / В. В. Кованько, В. В. Древецький, А. О. Христюк. – Рівне : НУВГП, 2013. – 189 с.
6. Поліщук Є. С. Метрологія та електровимірювальна техніка : підручник / Є. С. Поліщук, М. М. Дорожовець, В. О. Яцук; за ред. Є. С. Поліщука. – Львів : Бескід БІТ, 2003. – 544 с.
7. Електротехніка у будівництві : навч. посібник / А. Є. Ачкасов, В. А. Лушкін, В. М. Охріменко та ін. ; Харків. нац. академія міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2009. – 363 с.
8. Клименко Б. В. Электричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посібник / Харків : Вид-во «Точка», 2012. – 340 с.
9. Сосков А. Г. Промислова електроніка : підручник / А. Г. Сосков, Ю. П. Колонтаєвський ; за ред. А. Г. Сокова. – 2-е вид. – Київ : Каравела, 2016. – 536 с.
10. Дорохов О. В. Текст лекцій з дисципліни «Електротехніка» та «Електротехніка в будівництві» (для студентів усіх форм навчання за напрямами підготовки 6.060101 – Будівництво, 6.060103 – Гідротехніка (Водні ресурси)) / О. В. Дорохов, Д. В. Тугай, Ю. П. Колонтаєвський ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2011. – 120 с.
11. ДБН В.2.5.-23-2003. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. – Київ : Державний комітет України з будівництва та архітектури, 2004. – 133 с.



*Навчальне видання*

**САБАЛАЄВА** Наталія Олегівна,

**ФОРКУН** Яна Борисівна

**ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**

**КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ**

*(для студентів усіх форм навчання спеціальності  
185 – Нафтогазова інженерія та технології)*

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *Н. О. Сабалаєва*

План 2018, поз. 136Л

---

Підп. до друку 23.05.2019. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 6,0.

Тираж 50 пр. Зам. № .

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rektorat@kname.edu.ua](mailto:rektorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.