

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до проведення практичних занять  
із навчальної дисципліни

**«ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ»**

*(для студентів 2 курсу денної, заочної та прискореної  
форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка)*

**Харків  
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова  
2018**

Методичні рекомендації до проведення практичних занять із дисципліни «Вступ до спеціальності» (для студентів 2 курсу денної, заочної та прискореної форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : В. М. Гаряжа, І. Т. Карпалюк. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 58 с.

Укладачі:  
доц. В. М. Гаряжа,  
канд. техн. наук, доц. І. Т. Карпалюк

Рецензент

**В. М. Охріменко**, кандидат технічних наук, доцент Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

*Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та електроспоживання міст, протокол № 8 від 11.04.2018.*

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
Заняття № 1      З'єднання приймачів електроенергії .....	5
Заняття № 2      Електричні кола з одним джерелом живлення .....	10
Заняття № 3      Розрахунок складних електричних кіл.....	15
Заняття № 4      Електричні кола змінного синусоїдального струму .....	22
Заняття № 5      Електричні кола трифазного струму .....	30
Заняття № 6      Трансформатори .....	36
Заняття № 7      Асинхронні машини .....	44
Заняття № 8      Вибір перерізу проводів ліній.....	48
Список рекомендованих джерел .....	57
Додаток А .....	58

## **ВСТУП**

Дисципліна «Вступ до спеціальності» у загальному вигляді включає такі курси, як «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні матеріали», «Електричні машини», «Електричні апарати», «Електропривод» та низку інших і знайомить студентів з історією розвитку і сучасними проблемами електротехніки, історією кафедри та становленням спеціальності, методикою розрахунку складних електричних кіл постійного і змінного струмів, основами теорії електричних машин і апаратів, процесами виробництва та споживання електроенергії, розрахунком електричних мереж і їхньою конструкцією, вибором окремих захисних апаратів, розрахунком електричних навантажень і основами техніки безпеки при роботі з електроустановками.

Програмою передбачені практичні заняття, тематика яких охоплює найважливіші питання курсу та дає змогу закріпити в студентів знання та сформувати вміння їх застосування на практиці.

Подані методичні рекомендації спрямовані на полегшення роботи студентів на аудиторних практичних заняттях і самостійного виконання задач.

## ЗАНЯТТЯ № 1 З'ЄДНАННЯ ПРИЙМАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

### Теоретичні відомості

В електричних схемах часто зустрічаються послідовні, паралельні та змішані з'єднання резисторів. Струм  $I$  і сумарний еквівалентний опір  $R$  при різних способах з'єднання резисторів визначають у такий спосіб:

*послідовне з'єднання (рис. 1.1):*

$$I = \frac{U}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U}{R}; \quad (1.1)$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3; \quad (1.2)$$

$$U = U_1 + U_2 + U_3; \quad (1.3)$$

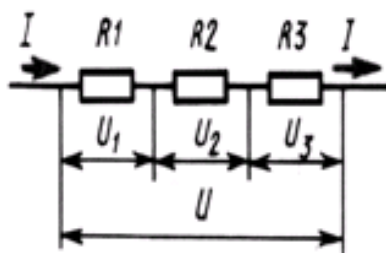


Рисунок 1.1 – Послідовне з'єднання резисторів

*паралельне з'єднання (рис. 1.2):*

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = U \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) = \frac{U}{R}; \quad (1.4)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \quad (1.5)$$

$$\text{або } g = g_1 + g_2 + g_3. \quad (1.6)$$

де  $g = \frac{1}{R}$  провідність кола, Сім.

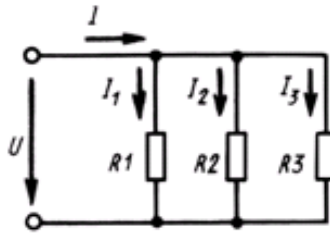


Рисунок 1.2 – Паралельне з'єднання резисторів

В окремому випадку паралельного з'єднання двох резисторів  $R_1$  і  $R_2$  –

$$R = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}.$$

У разі *змішаного з'єднання* (рис. 1.3) визначення еквівалентного опору кола виконують поетапно.

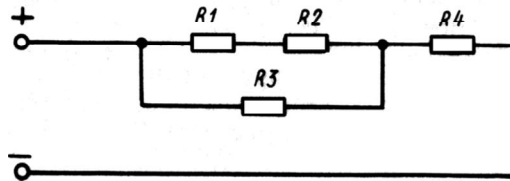


Рисунок 1.3 – Змішане з'єднання резисторів

Наприклад, у наведеній схемі спочатку визначається опір  $R_{12}$  послідовно включених резисторів  $R_1$  і  $R_2$ :

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

потім еквівалентний опір паралельно з'єднаних резисторів з опором  $R_{12}$  і  $R_3$ :

$$R_{123} = \frac{R_{12} \cdot R_3}{R_{12} + R_3}.$$

Після цього визначається загальний опір усього кола:

$$R = R_{123} + R_4.$$

Те саме виконують і в разі розрахунку складніших схем зі змішаним з'єднанням резисторів.

### Приклади розв'язання задач

**Приклад 1.1** Розрахувати загальний опір кола зображеного на рисунку 1.4 при  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 40 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 50 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 60 \text{ Ом}$ .

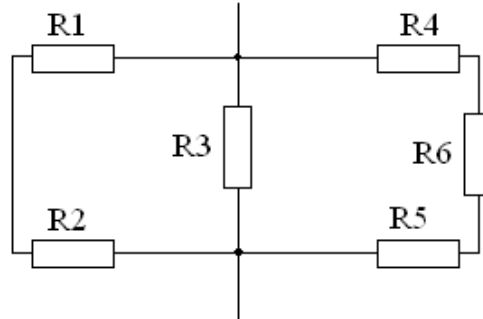


Рисунок 1.4 – Схема кола до прикладу 1

*Розв'язання:* Загальний опір резисторів  $R_1$  і  $R_2$ , які з'єднані між собою послідовно:

$$R_{12} = R_1 + R_2 = 10 + 20 = 30 \text{ Ом.}$$

Після цього схема матиме вигляд, зображений на рисунку 1.5.

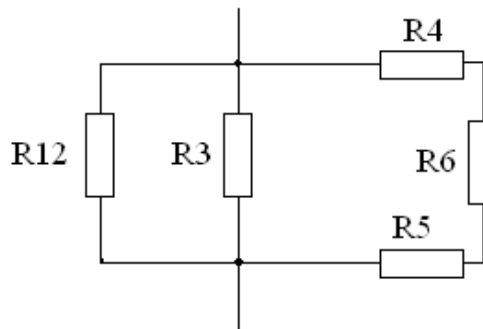


Рисунок 1.5 – Схема кола спрощена

Спростивши праве плече схеми, де опори  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$  з'єднані теж послідовно, одержимо  $R_{456} = R_4 + R_5 + R_6 = 40 + 50 + 60 = 150 \text{ Ом}$ .

Загальний опір трьох паралельно з'єднаних опорів знайдемо за формулою (1.5).

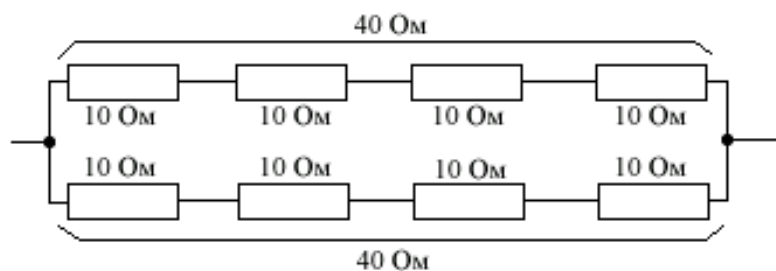
$$g = 1/30 + 1/30 + 1/150 = 0,033 + 0,033 + 0,0067 = 0,073 \text{ (1/Ом)}.$$

$$\text{Відповідно } R = 1/0,073 = 13,69 \text{ Ом}.$$

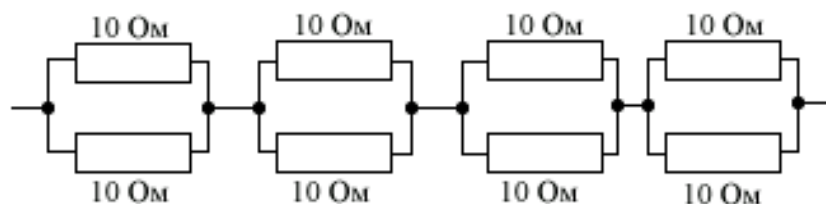
Обчислити загальний опір опорів R12 і R3 можна також за формулою 1.7. Результат 15 Ом. Перевірте самі. Цей опір після спрощення буде включений паралельно з опором R456. За цією самою формулою знаходимо:  $R = 15 \times 150 / (150 + 15) = 13,64 \text{ Ом}$ . Результати практично співпадають.

**Приклад 1.2** 8 опорів величиною 10 Ом необхідно з'єднати так, щоб загальний опір становив 20 Ом.

*Розв'язання:* Є два варіанти виконання – або з'єднати два опори по 40 Ом паралельно й тоді їхній загальний опір буде дорівнює половині кожного відповідно до формули, або зробити ланцюжок із чотирьох послідовно з'єднаних опорів по 5 Ом, кожний з яких буде складатися з двох паралельно з'єднаних опорів по 10 Ом. Схема першого варіанта виконання наведена на рисунку 1.6, а, другого на рисунку 1.6, б.



а



б

Рисунок 1.6 – Схема з'єднання варіант 1 (а) і варіант 2 (б)

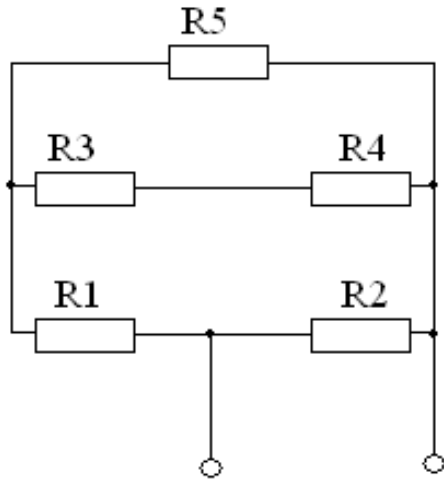


### Задачі для самостійного розв'язання

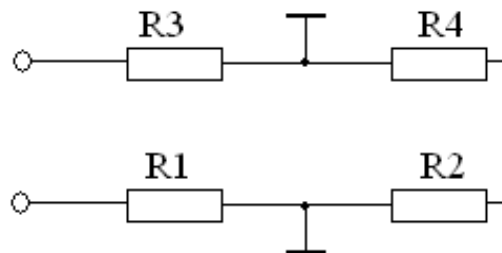
**Задача 1.1** Визначити опір кіл, зображених на рисунках 1.7, а, б, в, г.

Спочатку привести розв'язання в загальному вигляді, а потім у цифровому.

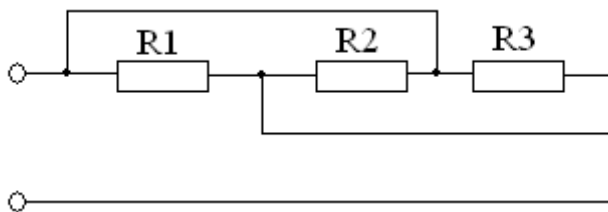
Варіанти приймаються згідно з порядковим номером в списку групи.



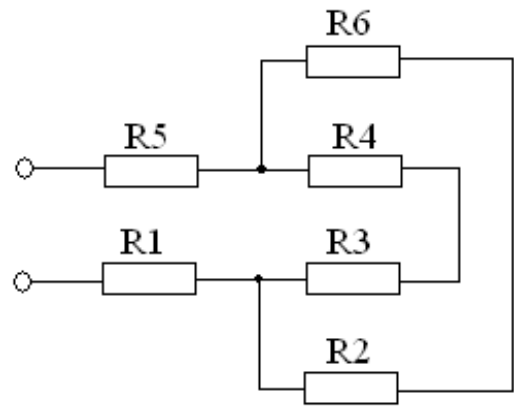
а



б



в



г

Рисунок 1.7 – Схеми електричних кіл для визначення опору

Таблиця 1.1 – Варіанти задач

Варіант	Рисунок	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	R4, Ом	R5, Ом	R6, Ом
1	2	3	4	5	6	7	8
1	7, а	60	60	60	60	120	–
2	7, б	10	20	30	40	–	–
3	7, в	120	120	120	–	–	–
4	7, г	5	30	25	15	35	10
5	7, а	10	50	40	40	80	–
6	7, б	30	25	15	35	–	–
7	7, в	80	80	40	–	–	–
8	7, г	10	16	5	25	7	14
9	7, а	30	80	40	60	100	–

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8
10	7, б	60	50	30	30	–	–
11	7, в	140	140	70	–	–	–
12	7, г	15	45	25	35	20	15
13	7, а	30	80	40	60	100	–
14	7, б	15	50	20	30	40	50
15	7, в	100	100	50	–	–	–
16	7, г	25	100	60	50	20	10
17	7, а	60	60	60	60	120	–
18	7, б	10	20	30	40	–	–
19	7, в	120	120	120	–	–	–
20	7, г	5	30	25	15	35	10
21	7, а	10	50	40	40	80	–
22	7, б	30	25	15	35	–	–
23	7, в	80	80	40	–	–	–
24	7, г	10	16	5	25	7	14
25	7, а	10	30	12	18	40	–

## ЗАНЯТТЯ № 2 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА З ОДНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЖИВЛЕННЯ

### *Теоретичні відомості*

У процесі розрахунку простих кіл з одним джерелом живлення найчастіше використовується закон Ома, який встановлює залежність між напругою та струмом.

Стосовно ділянки кола (у якому відсутні джерела струму) закон формулюється у такий спосіб: струм на ділянці електричного кола дорівнює напрузі на затискачах цієї ділянки, поділеній на її опір:

$$I = \frac{U}{R}. \quad (2.1)$$

Співвідношення між ЕРС, опором і струмом у замкнутому колі відповідно до закону Ома виражається формулою

$$I = \frac{E}{R+R_0}, \quad (2.2)$$

де  $R$  – опір зовнішньої частини кола;

$R_0$  – внутрішній опір джерела.

*Електрична енергія і потужність.* Для переносу заряду  $q$  ділянкою кола з напругою  $U$  на його кінцях витрачається енергія  $W$  :

$$W = q \cdot U. \quad (2.3)$$

*Потужність*  $P$  – це витрата енергії в одиницю часу:

$$P = \frac{W}{t} = \frac{q}{t} \cdot U = I \cdot U. \quad (2.4)$$

Відповідно до закону Ома можна одержати інші вирази для потужності електричного струму на ділянці кола з опором  $R$ :

$$P = I^2 \cdot R = \frac{U^2}{R}. \quad (2.5)$$

У разі використання основних одиниць (кулон, ампер, вольт, Ом, секунда) потужність виражається у *ватах*, енергія – у *джоулях*. В енергетиці користуються значно більшими величинами – кіловатами (кВт), мегаватами (МВт), кіловат – годинами (кВт – год.), мегават – годинами (МВт – год).

#### *Приклади розв'язання задач*

**Приклад 2.1** Визначити загальний опір електричного кола, напругу й потужність кожного опору (рис. 2.1) при  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 25$  Ом,  $R_3 = 15$  Ом і  $R_4 = 14$  Ом. Напруга джерела напруги  $U = 16$  В. Внутрішнім опором джерела потрібно нехтувати.

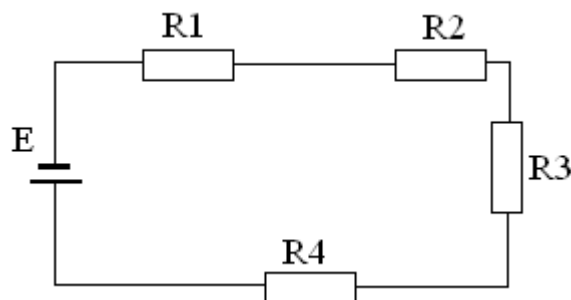


Рисунок 2.1 – Схема до прикладу 2.1

*Розв'язання:* Це електричне коло є колом з послідовно ввімкненими опорами. Загальний опір у цьому разі розраховується за формулою

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + R_4.$$

Одержимо  $R = 10 + 25 + 15 + 14 = 64 \text{ Ом}$ .

У разі послідовного ввімкнення струм однаковий у всьому колі й обчислюється як  $I = U/R$ , тому маємо:

$$I = 16/64 = 0,25 \text{ А}.$$

Згідно з законом Ома для ділянки кола напруги на кожному із провідників становлять:

$$U_1 = I \times R_1, U_2 = I \times R_2, U_3 = I \times R_3, U_4 = I \times R_4.$$

Тоді:  $U_1 = 0,25 \times 10 = 2,5 \text{ В}$ ;  $U_2 = 0,25 \times 25 = 6,25 \text{ В}$ ;  $U_3 = 0,25 \times 15 = 3,75 \text{ В}$ ;  $U_4 = 0,25 \times 14 = 3,5 \text{ В}$ .

Перевіряємо:  $U = 2,5 + 6,25 + 3,75 + 3,5 = 16 \text{ В}$ .

Потужність кожного елемента розраховується за формулою  $P = U \times I$ .  
Одержимо:  $P_1 = U_1 \times I = 2,5 \times 0,25 = 0,625 \text{ Вт}$ ;  $P_2 = U_2 \times I = 6,25 \times 0,25 = 1,5625 \text{ Вт}$ ;

$$P_3 = U_3 \times I = 3,75 \times 0,25 = 0,9375 \text{ Вт};$$

$$P_4 = U_4 \times I = 3,5 \times 0,25 = 0,875 \text{ Вт}.$$

Правильність розв'язання можна перевірити, розрахувавши баланс потужності для всього кола. Необхідно виконати умову:

$$U_1 \times I + U_2 \times I + U_3 \times I + U_4 \times I = U \times I.$$

*Перевіряємо:*

$$0,625 \text{ Вт} + 1,5625 \text{ Вт} + 0,9375 \text{ Вт} + 0,875 \text{ Вт} = 64 \text{ В} \times 0,25 \text{ А}. \text{ Звідки } 4 = 4.$$

Розрахунок виконаний вірно.

**Приклад 2.2** У домашню розетку через подовжувач увімкнений холодильник потужністю 300 Вт, пральна машина потужністю 2,5 кВт і

мікрохвильова піч потужністю 1,5 кВт. Визначити загальний струм у колі й струм кожного зі споживачів.

*Розв'язання:* Електрична схема ввімкнення споживачів наведена на рисунку 2.2 та є схемою з паралельним з'єднанням споживачів.

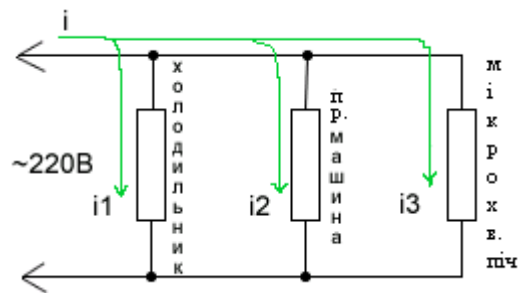


Рисунок 2.2 – Схема до прикладу 2.2

Струми приладів розрахуємо за формулою визначення потужності:

$$P = U \times I \text{ звідки } I = P/U.$$

Знаходимо  $I_1 = P_{\text{хол}}/U = 300/220 = 1,36(\text{A})$ ;  $I_2 = P_{\text{пр.м}}/U = 2\,500/220 = 11,369(\text{A})$ ;  $I_3 = P_{\text{мкр.хв}}/U = 1\,500/220 = 6,81(\text{A})$ . Загальний струм дорівнює сумі всіх струмів. Знаходимо:  $I = I_1 + I_2 + I_3 = 1,36 + 11,369 + 6,81 = 19,54(\text{A})$ .

Правильність Розв'язання можна перевірити, розрахувавши баланс потужності всього кола. З умови відомо, що загальна потужність дорівнює  $P = 300 \text{ Вт} + 2\,500 \text{ Вт} + 1\,500 = 4\,300 \text{ Вт} = 4,3 \text{ кВт}$ . Також потужність дорівнює добутку загального струму на напругу й становить:  $P = U \times I = 220 \times 19,54 = 4300 \text{ Вт} = 4,3 \text{ кВт}$ . Розрахунок виконаний вірно.

**Приклад 2.3** Необхідно виготовити новорічну гірлянду з однакових лампочок напругою 3,5 В. Скільки ламп буде потрібно для цього?

*Розв'язання:* Лампи мають меншу напругу, ніж напруга мережі, тому їх необхідно з'єднати послідовно. Оскільки параметри ламп однакові, необхідно загальну напругу розділити на робочу напругу ламп. Одержимо:  $N = 220/3,5 = 62,86$  (штук). Округляємо до цілого значення:  $N = 63$  штуки. Схема з'єднання ламп наведена на рисунку 2.3.

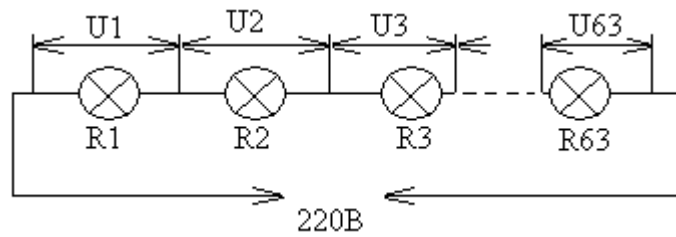


Рисунок 2.3 – Схема до прикладу 2.3

### *Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 2.1** Розрахувати напругу на кожній із ламп у схемі рисунок 2.3, але з урахуванням того, що одна лампа перегоріла та її замінили на лампу з параметрами  $U = 3,5 \text{ В}$  і струмом  $I = 0,26 \text{ А}$ . Інші лампи на ту саму напругу, але робочий струм  $I = 0,16 \text{ А}$ . Розрахувати потужності цих двох типів лампочок, струм у колі після заміни ламп, напругу на одному і другому типі ламп.

**Задача 2.2** Освітлення гаража було змонтоване з послідовно з'єднаних 20 ламп робочою напругою 12 В, потужністю 40 Вт кожна. Через якийсь час замінили 10 шт. з них на лампи з тією самою робочою напругою, але потужністю 60 Вт. Після такої заміни лампи, потужністю 40 Вт стали перегоряти частіше. Чи могло так статися й чому, адже загальна кількість ламп не змінилася, а половина з них навіть потужніші?

Як би вплинула аналогічна заміна ламп у разі їх паралельного з'єднання? Довести розрахунками.

**Задача 2.3** На будинку встановлений щиток із лічильником. У холодний період лічильник потрібно підігрівати. Необхідно з резисторів потужністю 100 Вт, які є в наявності з номіналами 400 Ом і 620 Ом застосувати ті, які зможуть обігрівати щиток при подачі на них напруги 220 В.

## ЗАНЯТТЯ № 3 РОЗРАХУНОК СКЛАДНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ

### Теоретичні відомості

*Складні електричні кола.* Складні електричні кола характеризуються наявністю гілок, вузлів, контурів.

*Гілка* – ділянка кола, уздовж якої проходить той самий струм і яка складається з послідовно з'єднаних елементів.

*Вузол* – місце з'єднання трьох і більше гілок.

*Контур* – будь-який замкнутий шлях кола, яким його можна обійти, рухаючись по гілках.

Наприклад, коло на рисунок 3.1 складається з п'яти гілок, трьох вузлів, шести контурів.

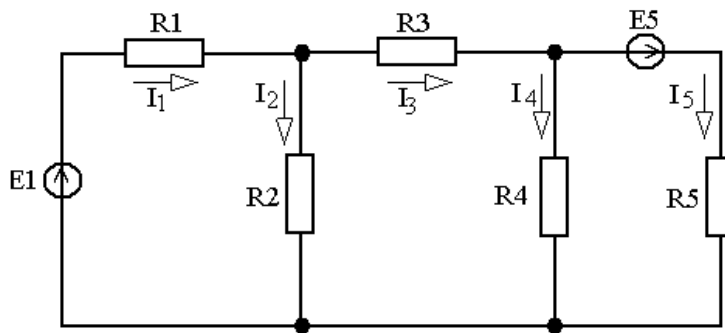


Рисунок 3.1 – Складне електричне коло

Розрахунки електричних кіл виконують за допомогою законів Кірхгофа. При цьому здебільшого приймачі електроенергії, увімкнені в коло постійного струму, можна розглядати як резистори, що мають ті самі опори, що й реальні приймачі. У схемах резистори позначаються R1, R2, R3, ....

Відповідно до *першого закону Кірхгофа* сума струмів, спрямованих до вузла електричного кола, дорівнює сумі струмів, спрямованих від нього. До того ж напрям струмів до вузла вважається позитивним, від вузла – негативним. Наприклад, для вузла 2 на рисунку 3.1 можна записати:

$$I_3 = I_4 + I_5; \text{ для вузла 3: } I_2 + I_4 + I_5 = I_1.$$

Відповідно до *другого закону Кірхгофа* у будь-якому замкнутому електричному контурі алгебраїчна сума ЕРС дорівнює алгебраїчній сумі напруг на опорах, що входять у цей контур. При цьому значення ЕРС і напруг вважають позитивними, якщо напрям ЕРС і струмів збігається з обраним напрямом обходу контуру.

Для запису рівнянь за другим законом Кірхгофа необхідно:

1) задати умовні позитивні напрямки ЕРС, струмів і напруг;

2) вибрати напрямок обходу контуру, для якого записується рівняння;

3) записати рівняння, користуючись одним із формулювань, до того ж складники, що входять до рівняння, беруть зі знаком «плюс», якщо їхні умовні позитивні напрями збігаються з напрямом обходу контуру й зі знаком «мінус», якщо вони протилежні.

Наприклад, для зовнішнього контуру схеми на рисунку 11 можна записати:

$$E_1 - E_5 = I_1 R_1 + I_5 R_5 + I_3 R_3; \text{ для внутрішнього контуру: } 0 = I_3 R_3 + I_4 R_4 - I_2 R_2.$$

*Розрахунок складних електричних кіл.* Складні електричні кола з декількома контурами та різним розміщенням у них джерел і споживачів енергії загалом не можна звести до сполучення паралельно та послідовно з'єднаних резисторів.

Для розрахунку складних кіл використовують різні методи. Найзагальнішим є *метод складання та вирішення рівнянь за законами Кірхгофа*.

Перед складанням рівнянь довільно задають напрям струмів у гілках, показавши їх на схемі стрілками.

Кількість необхідних рівнянь дорівнює кількості невідомих струмів, до того ж кількість рівнянь за першим законом Кірхгофа повинна бути на одне менша кількості вузлів кола. Інші рівняння складають за другим законом Кірхгофа, до того ж потрібно вибирати контури найпростіші й такі, щоб у



кожному з них була хоча б одна гілка, що не входить у раніше складені рівняння.

Розглянемо для прикладу схему, наведену на рисунку 3.2.

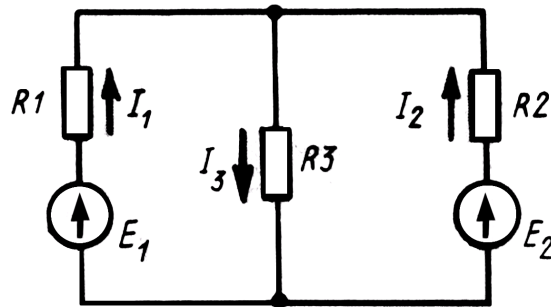


Рисунок 3.2 – До розрахунку складного кола

Для неї може бути складена система рівнянь

$$I_3 = I_1 + I_2;$$

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3;$$

$$E_2 = I_2 R_2 + I_3 R_3.$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, можна визначити струми  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , якщо відомі  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ .

#### *Приклади розв'язання задач*

**Приклад 3.1** В електричному колі (рис. 3.3) визначити струми в гілках, напруги на всіх елементах кола, напругу  $U_{13}$  між вузлами 1 – 3, потужність джерел з ЕРС, якщо  $E_1 = 12$  В,  $E_2 = 13,5$  В, потужність приймача з опором  $R_3$ , визначити режим роботи джерела  $E_1$ .  $R_{01} = 0,05$  Ом,  $R_{02} = 0,1$  Ом,  $R_3 = 2$  Ом,  $R_4 = R_5 = 4$  Ом.

*Розв'язання:* У колі три вузли, п'ять гілок, отже, для визначення струмів у гілках необхідно скласти систему з п'яти рівнянь для невідомих струмів і розв'язати її.

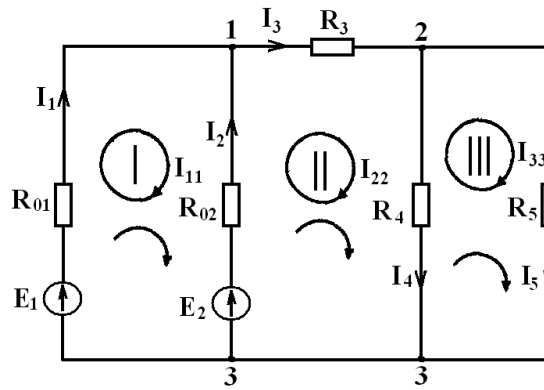


Рисунок 3.3 – Схема до прикладу 3.1

Як було зазначено вище, кількість рівнянь у системі, записаних за першим законом Кірхгофа, повинно дорівнювати двом, а інші три рівняння записують за другим законом Кірхгофа для незалежних контурів.

Для вузлів 1 і 2 і незалежних контурів I, II і III за зазначених умовних позитивних напрямках, ЕРС, струмів і напруг, а також при заданих напрямках обходу контурів система рівнянь має вигляд:

- для вузла 1  $I_1 + I_2 - I_3 = 0$ ;
- для вузла 2  $I_3 - I_4 - I_5 = 0$ ;
- для контуру I  $R_{01} = R_{02} = E_1 - E_2$ ;
- для контуру II  $R_{02} \times I_2 + R_3 \times I_3 + R_4 \times I_4 = E_2$ ;
- для контуру III  $-R_4 \times I_4 + R_5 \times I_5 = 0$ .

Розв'язуючи систему рівнянь будь-яким способом, отримуємо

$$I_1 = 7,93 \text{ A}; I_2 = 11,03 \text{ A}; I_3 = 3,1 \text{ A}; I_4 = I_5 = 1,55 \text{ A}.$$

Як бачимо з результатів розрахунку, струм  $I_1$  має від'ємне значення, що свідчить про те, що дійсний напрямок струму в цій гілці протилежний умовно прийнятому.

Напруга на елементах електричного кола згідно з законом Ома

$$U_3 = R_3 \times I_3 = 2 \times 3,1 = 6,2 \text{ В};$$

$$U_4 = R_4 \times I_4 = 4 \times 1,55 = 6,2 \text{ В};$$

$$U_5 = R_5 \times I_5 = 4 \times 1,55 = 6,2 \text{ В}.$$

Напругу між вузлами 1 і 3 знаходимо, користуючись другим законом Кірхгофа. У разі обходу контуру за годинниковою стрілкою маємо

$$E_2 = U_{02} + U_{13}; U_{13} = E_2 - U_{02} = E_2 - R_{02} \times I_2 = 13,5 - 0,1 \times 11 = 12,4 \text{ В.}$$

З електричної схеми видно, що напруга на затискачах джерел ЕРС  $E_1$  і  $E_2$  однакова й дорівнює  $U_{13}$ , оскільки відносно вузлів 1 і 3 вони включені паралельно.

$$\text{Потужність джерела ЕРС } E_2 - P_2 = E_2 \times I_2 = 13,5 \times 11 = 148,5 \text{ Вт.}$$

$$\text{Потужність приймача } - P_3 = R_3 \times I_3^2 = U_3 \times I_3 = 6,2 \times 3,1 = 19,2 \text{ Вт.}$$

У джерелі  $E_1$  струм і ЕРС направлені зустрічно, що означає, що це джерело за вказаних в умові задачі параметрах кола, споживає електричну енергію. Така ситуація є звичайною в автомобілях, де джерело ЕРС  $E_1$  – акумулятор, а джерело ЕРС  $E_2$  – генератор. У процесі роботи двигуна автомобіля:  $E > E_1$  і відбувається підзарядка акумулятора.

Рівняння балансу потужностей у цьому разі має вигляд

$$E_1 \times I_1 + E_2 \times I_2 = R_{01} \times I_1^2 + R_{02} \times I_2^2 + R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2 + R_5 \times I_5^2$$

Оскільки джерело ЕРС  $E_2$  працює в режимі споживання енергії та є електроприймачем, то рівняння балансу потужностей можна записати так:

$$E_2 \times I_2 = E_1 \times I_1 + R_{01} \times I_1^2 + R_{02} \times I_2^2 + R_3 \times I_3^2 + R_4 \times I_4^2 + R_5 \times I_5^2.$$

Після підстановки в цей вираз всіх параметрів, упевнімося, що потужність джерела електроенергії та сума потужностей всіх електроприймачів однакові

$$13,5 \times 11 = 12 \times 7,93 + 0,05 \times 7,93^2 + 0,1 \times 11,03^2 + 2 \times 3,1^2 + 4 \times 1,55^2 + 4 \times 1,55^2$$
$$148,5 \text{ Вт} \approx 148,9 \text{ Вт,}$$

що практично співпадає та підтверджує правильність розрахунків.

**Приклад 3.2** Користуючись методом контурних струмів, визначити струми в гілках електричного кола (рис. 3.3) при значенні параметрів всіх елементів кола, указаних у прикладі 3.1.

*Розв'язання:* В електричному колі три незалежних контури I, II і III. Напрямок контурних струмів задаємо такий, як зображено на рисунку 3.3.

Система рівнянь для контурних струмів у цьому разі має вигляд

$$R_{11} \times I_{11} + R_{12} \times I_{22} + R_{13} \times I_{33} = E_{11};$$

$$R_{21} \times I_{11} + R_{22} \times I_{22} + R_{23} \times I_{33} = E_{22};$$

$$R_{31} \times I_{11} + R_{32} \times I_{22} + R_{33} \times I_{33} = E_{33},$$

де  $E_{11} = E_1 - E_2$ ;  $E_{22} = E_2$ ;  $E_{33} = 0$ ;

$$R_{11} = R_{01} + R_{02}; R_{22} = R_{02} + R_3 + R_4; R_{33} = R_4 + R_5;$$

$$R_{12} = R_{21} = -R_{02}; R_{23} = R_{32} = -R_4; R_{13} = R_{31} = 0/$$

Опори та контурні ЕРС мають такі значення:

$$R_{11} = 0,05 + 0,1 = 0,15 \text{ Ом}; R_{22} = 0,1 + 2 + 4 = 6,1 \text{ Ом}; R_{33} = 4 + 4 = 8 \text{ Ом};$$

$$R_{12} = -0,1 \text{ Ом}; R_{13} = 0; R_{23} = -4 \text{ Ом};$$

$$E_{11} = 12 - 13,5 = -1,5 \text{ В}; E_{22} = 13,5 \text{ В}; E_{33} = 0.$$

Після розв'язання системи рівнянь, отримуємо

$$I_{11} = -7,93 \text{ А}; I_{22} = 3,1 \text{ А}; I_{33} = 1,55 \text{ А}.$$

Струми в гілках знаходимо із співвідношень

$$I_1 = I_{11} = -7,93 \text{ А}; I_2 = I_{22} - I_{11} = 3,1 + 7,93 = 11,03 \text{ А}; I_3 = I_{22} = 3,1 \text{ А};$$

$$I_4 = I_{22} - I_{33} = 3,1 - 1,55 = 1,55 \text{ А}; I_5 = I_{33} = 1,55 \text{ А}.$$

### *Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 3.1** Визначити струми в колі, зображеному на рисунку 3.4. ЕРС джерел дорівнюють:  $E_1 = 32 \text{ В}$ ;  $E_5 = 120 \text{ В}$ ;  $E_2 = 10 \text{ В}$ . Внутрішній опір джерела  $E_1$  становить  $R_0 = 2 \text{ Ом}$ , внутрішніми опорами інших джерел потрібно нехтувати. Опори резисторів:  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ;  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 6 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 5 \text{ Ом}$ ;  $R_5 = 8 \text{ Ом}$ .

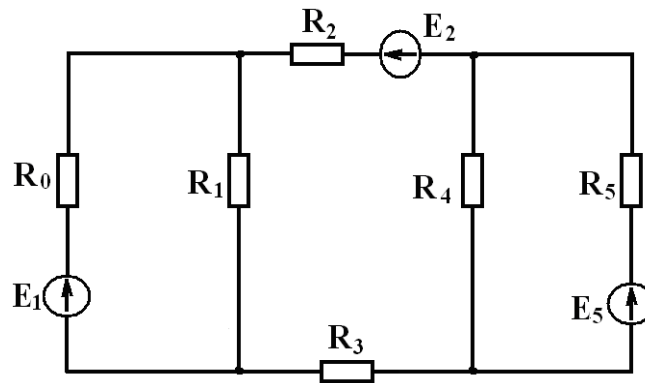


Рисунок 3.4 – Схема до задачі 3.1

*Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 3.2** Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.5. ЕРС джерел дорівнюють:  $E_1 = E_2 = 115$  В. Внутрішній опір джерела  $E_1$  становить  $R_{01} = 0,2$  Ом, джерела  $E_2$  –  $R_{02} = 0,4$  Ом. Опір резистора  $R = 5$  Ом. Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

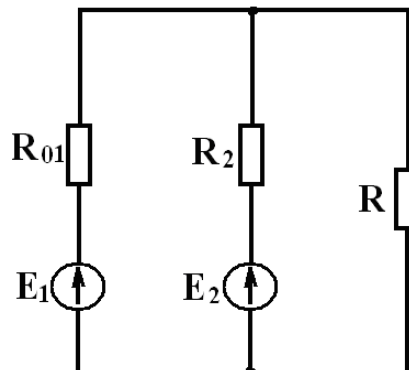


Рисунок 3.5 – Схема до задачі 3.2

**Задача 3.3** Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.5. ЕРС джерел:  $E_1 = 20$  В,  $E_2 = 22$  В. Внутрішній опір джерел становить  $R_{01} = R_{02} = 0,01$  Ом. Опір резистора  $R = 0,1$  Ом. Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

**Задача 3.4** Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.6. ЕРС джерел:  $E_1 = 100 \text{ В}$ ,  $E_2 = 120 \text{ В}$ ,  $E_3 = 150 \text{ В}$ . Опори резисторів  $R_1 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 0 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 100 \text{ Ом}$ ,  $R = 60 \text{ Ом}$ . Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

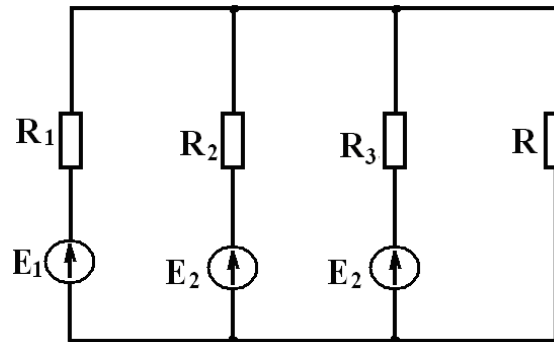


Рисунок 3.6 – Схема до задачі 3.4

**Задача 3.5** Визначити струми в колі зображеному на рисунку 3.6. ЕРС джерел:  $E_1 = 60 \text{ В}$ ,  $E_2 = 65 \text{ В}$ ,  $E_3 = 50 \text{ В}$ . Опори резисторів:  $R_1 = R_2 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 1 \text{ Ом}$ ,  $R = \infty$ . Перевірити правильність визначення струмів складанням балансу потужностей.

## ЗАНЯТТЯ № 4    ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ЗМІННОГО СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

### *Теоретичні відомості*

У колах змінного струму розглядають струми, ЕРС і напруги, що періодично змінюють напрям і значення. Зміни повторюються через деякий проміжок  $T$ , який називається *періодом*. Число періодів у секунду називається *частотою*  $f$ .

Широко використовується і дуже зручний для вивчення *синусоїдальний струм*.

На рисунку 4.1 наведене графічне зображення (часова діаграма) синусоїдального струму. Його миттєве значення описується формулою

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi), \quad (4.1)$$

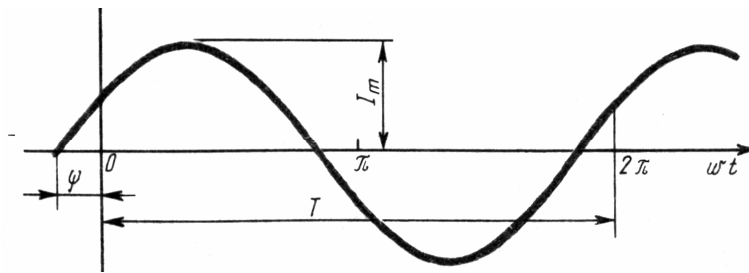


Рисунок 4.1 – Часова діаграма змінного струму

де  $I_m$  – максимальне значення (амплітуда) струму;

$\omega = 2\pi/T = 2\pi/f$  – кутова частота;

$\psi$  – початкова фаза (значення аргументу в початковий момент часу, тобто при  $t = 0$ ).

Період виражають у секундах (с), частоту – у герцах (Гц), фазу – у радіанах (рад) або градусах (град), кутову частоту – у радіанах на секунду (рад/с).

Усе зазначене про синусоїдальний струм стосується також синусоїдальних ЕРС і напруги.

*Діюче значення струму.* Енергетична дія струму (теплова та здатність робити механічну роботу) характеризується його *діючим значенням*.

Між діючими й амплітудними значеннями синусоїдальних величин існують співвідношення:

$$I = I_m / \sqrt{2}; \quad U = U_m / \sqrt{2}; \quad E = E_m / \sqrt{2}. \quad (4.2)$$

На шкали амперметрів і вольтметрів змінного струму зазвичай, наносять діючі значення струму та напруги.

*Векторні діаграми.* Розглядаючи безліч питань, пов'язаних із колами синусоїдального струму, зокрема під час їхніх розрахунків, зручно користуватися векторними діаграмами. Вони дають змогу зображувати синусоїдальні величини простіше, ніж за допомогою часових діаграм. Докладно з використанням векторних діаграм можна познайомитися в [2].

*Розрахунок кіл змінного струму.* Під час розрахунків кіл змінного струму, так само як і кіл постійного струму, використовують закони Ома та Кірхгофа. Відмінність у застосуванні цих законів полягає в тому, що в колах змінного струму необхідно враховувати кути зсуву фаз між струмами та напругами.

*Послідовне з'єднання.* Розглянемо загальний випадок послідовного з'єднання резистора, котушки індуктивності й конденсатора (рис. 4.2, а).

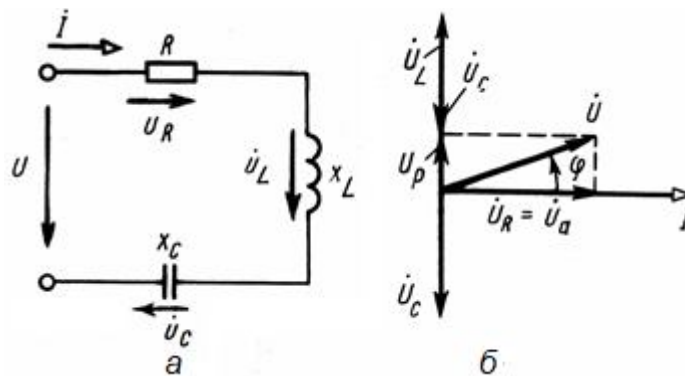


Рисунок 4.2 – Схема електричного кола з послідовним з'єднанням активного, індуктивного та ємнісного опору (а) та векторна діаграма для його розрахунку (б)

Для падінь напруги на окремих елементах можна записати:  $U_R = IR$ ,  $U_L = IX_L$ ;  $U_C = IX_C$ .

Ці падіння напруги мають відповідні кути зсуву фаз стосовно загального струму кола  $I$ .

На векторній діаграмі (рис. 4.2, б) відкладені вектори  $\dot{U}_R$ ,  $\dot{U}_L$ ,  $\dot{U}_C$ . Шляхом додавання цих векторів побудований вектор  $\dot{U}$ , що має активну  $\dot{U}_a = \dot{U}_R$  і реактивну  $\dot{U}_p = \dot{U}_L + \dot{U}_C$  складові. Для сумарної напруги  $U$  можна записати:

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = I\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}. \quad (4.3)$$

Величина  $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$  називається *повним опором кола* та виражається в омах.



Співвідношення  $U/I = Z$  – вираження закону Ома для кола змінного струму. Повна провідність кола  $y = 1/Z$ .

Кут зсуву фаз між струмом і напругою кола визначається за допомогою тригонометричних функцій  $\cos\varphi = U_R/U = R/Z$ ;  $\sin\varphi = (U_L - U_C)/U = (X_L - X_C)/Z$ .

Якщо  $X_L > X_C$ , то вектор  $\vec{U}$  випереджає вектор  $\vec{I}$ , якщо  $X_L < X_C$ , то  $\vec{U}$  відстає від  $\vec{I}$ .

Активна потужність кола

$$P = U_R I = UI \cos\varphi, \quad (4.4)$$

реактивна потужність

$$Q = (U_L - U_C) I = UI \sin\varphi. \quad (4.5)$$

Добуток діючих значень напруги та струму кола називається *повною потужністю* :

$$S = UI. \quad (4.6)$$

Очевидно, що  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , оскільки  $\sin^2\varphi + \cos^2\varphi = 1$ .

Величина  $\cos\varphi$  називається коефіцієнтом потужності.

*Паралельне з'єднання.* Струми в гілках паралельно з'єднаних елементів кіл мають відповідний фазовий зсув стосовно загальної напруги цих кіл. Тому загальний струм кола дорівнює сумі струмів окремих гілок з урахуванням фазових зсувів. Інакше кажучи, у цьому разі *вектор загального струму визначається сумою векторів струмів паралельних гілок*.

Розглянемо паралельне з'єднання трьох елементів, що мають активний опір  $R$ , індуктивний  $X_L$  та ємнісний  $X_C$  (рис. 4.3, а).

Для струмів гілок можна записати:

$$I_R = \frac{U}{R} = U \times g; \quad I_L = \frac{U}{X_L} = U \times b_L; \quad I_C = \frac{U}{X_C} = U \times b_C. \quad (4.7)$$

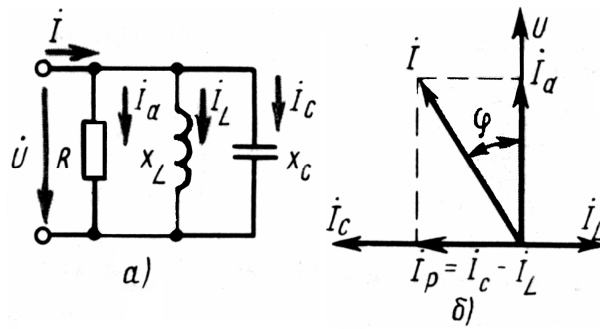


Рисунок 4.3 – Схема електричного кола з паралельним з'єднанням активного, індуктивного та ємнісного опору (а) та векторна діаграма для його розрахунку (б)

На векторній діаграмі (рис. 4.3, б) відкладені вектори  $\dot{I}_R$ ,  $\dot{I}_L$ ,  $\dot{I}_C$  і їх додаванням побудований вектор  $\dot{I}$ , що має активну  $\dot{I}_a = \dot{I}_R$  і реактивну  $\dot{I}_p = \dot{I}_L + \dot{I}_C$  складові. Для сумарного струму  $I$  маємо:

$$I = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2} = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = Uy. \quad (4.8)$$

Кут зсуву фаз  $\phi$  між струмом  $I$  і напругою  $U$  визначається за допомогою тригонометричних функцій:  $\cos\phi = I_R/I = g/y$ ;  $\sin\phi = (I_L - I_C)/I = (b_L - b_C)/y$ .

Якщо  $b_L > b_C$ , то навантаження в цілому має активно-індуктивний характер (вектор  $\dot{U}$  випереджає  $\dot{I}$ ), якщо  $b_L < b_C$  – активно-ємнісний (вектор  $\dot{U}$  відстає від вектору  $\dot{I}$  на кут  $\phi$ ).

Активна потужність кола  $P = UI_R = UI\cos\phi$ , реактивна потужність  $Q = U(I_L - I_C) = UI\sin\phi$ , повна потужність  $S = UI = P/\cos\phi = Q/\sin\phi$ .

#### Приклади розв'язання задач

**Приклад 4.1** Для визначення індуктивності котушки її включили спочатку в коло постійного струму за схемою рисунка 4.4, до того ж вольтметр показав  $U_{\pi} = 48$  В, а струм у колі дорівнював  $I_{\pi} = 8$  А. Потім котушку включили в коло змінного струму із частотою 50 Гц. При цьому показання вольтметра

дорівнювали  $U_{3M} = 120$  В при струмі  $I_{3M} = 12$  А. Визначити індуктивність котушки.

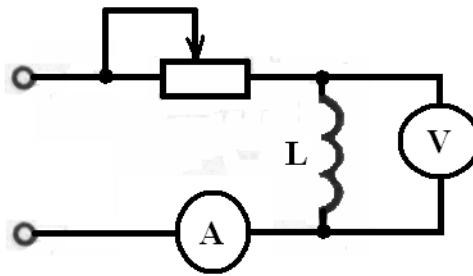


Рисунок 4.4 – Схема до прикладу 4.1

*Розв'язання:* Активний опір котушки становить  $R = \frac{U_p}{I_p} = \frac{48}{8} = 6$  Ом.

Повний опір котушки  $Z = \frac{U_{3M}}{I_{3M}} = \frac{120}{12} = 10$  Ом.

Індуктивний опір  $X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{10^2 - 6^2} = 8$  Ом.

Індуктивність котушки  $L = \frac{X}{2\pi f} = \frac{8}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0255$  Гн = 25,5 мГн.

**Приклад 4.2** Приймачі електроенергії, включені за схемою рисунка 4.5, приєднані до мережі синусоїдального змінного струму. Показання приладів: ватметра 940 Вт, вольтметра 220 В, амперметра 5 А. Опір  $R_2 = 22$  Ом.

Визначити величину опорів  $R_1$  і  $X_1$ . Знайти величину напруги на ділянці 1–2 і визначити зсув фаз між напругою та струмом на цій ділянці.

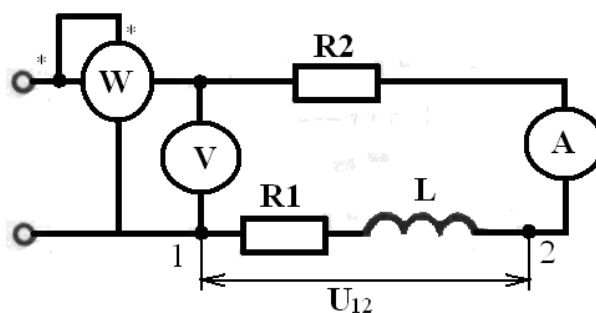


Рисунок 4.5 – Схема до прикладу 4.2

*Розв'язання:*

Активна потужність на ділянці з опором  $R_2$

$$P_2 = I^2 \cdot R_2 = 5^2 \cdot 22 = 550 \text{ Вт.}$$

Активна потужність на ділянці 12

$$P_1 = P - P_2 = 940 - 550 = 390 \text{ Вт.}$$

Активний опір цієї ділянки

$$R_1 = \frac{P_1}{I^2} = \frac{390}{5^2} = 15,6 \text{ Ом}$$

Зсув фаз струму й загальної напруги

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{940}{220 \cdot 5} = 0,855, \text{ отже, } \varphi = 31^\circ 15'.$$

Реактивний опір ділянки 12 можна виразити таким виразом:

$$X_1 = Z \cdot \sin \varphi,$$

де  $Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{5} = 44 \text{ Ом}$ , а  $\sin \varphi = 0,519$ .

Отже,  $X_1 = Z \cdot \sin \varphi = 44 \cdot 0,519 = 22,8 \text{ Ом}$

Наруга на ділянці 1 – 2

$$U_{1-2} = I \times \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = 5 \times \sqrt{15,6^2 + 22,8^2} = 138,1 \text{ В}$$

Зсув фаз на ділянці 1 – 2

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_1}{R_1} = \frac{22,8}{15,6} = 1,46, \text{ а } \varphi = 55^\circ 30'.$$

**Приклад 4.3** Визначити величину активного опору та ємності (рис. 4.6), якщо амперметр показує 4,2 А, вольтметр – 220 В, ватметр – 325 Вт.

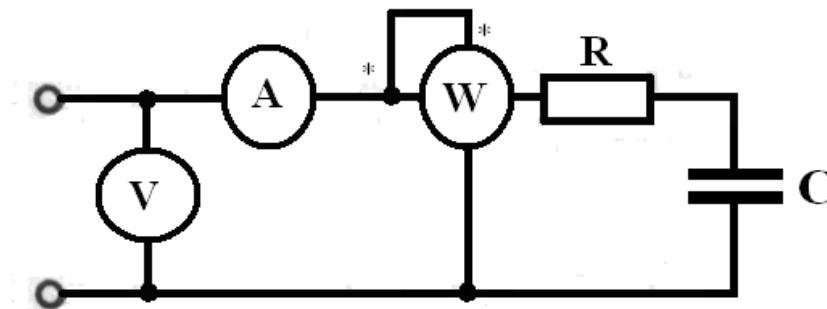


Рисунок 4.6 – Схема до прикладу 4.3

*Розв'язання:* Активний опір кола

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{325}{4,2^2} = 18,4 \text{ Ом.}$$

Повний опір кола

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{220}{4,2} = 52,4 \text{ Ом}$$

Реактивний опір кола

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{52,4^2 - 18,4^2} = 49,1 \text{ Ом}$$

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 49,1} = 65,1 \cdot 10^{-6} \text{ мкФ.}$$

### *Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 4.1** Визначити струм у котушці за даними прикладу 4.1, якщо ця котушка буде включена на синусоїдальну напругу із частотою 200 Гц, а напруга на її затисках буде дорівнювати 120 В.

**Задача 4.2** Ділянка з активним опором  $R_1$  та індуктивним  $X_1$  увімкнена послідовно з ділянкою, що містить активний опір  $R_2$  (рис. 4.5). Унаслідок приєднання цього кола в мережу з напругою 127 В виявилось, що на першій ділянці споживається потужність 800 Вт при коефіцієнті потужності 0,6, а на другому потужність 1,2 кВт. Визначити струм у цьому колі й загальний коефіцієнт потужності.

**Задача 4.3** Прилади, включені в коло котушки (рис. 4.6), показують: амперметр 5 А, вольтметр 220 В, ватметр 660 Вт. Визначити коефіцієнт потужності й параметри котушки, тобто її активний опір та індуктивність.

Як зміняться покази амперметра й ватметра і коефіцієнт потужності котушки, якщо частота мережі буде дорівнювати 200 Гц, а напруга залишиться незмінною?

**Задача 4.4** Активний опір дорівнює 4 Ом і котушка з активним опором 6 Ом та індуктивним 8 Ом з'єднані послідовно й включені в мережу з напругою 220 В.

Визначити активну, реактивну й повну потужності цього кола.

**Задача 4.5** У мережу змінного струму включені послідовно дві котушки: одна з активним опором 12 Ом й індуктивністю 22 мГн, інша з активним опором 8 Ом й індуктивністю 9,6 мГн. Струм у котушках дорівнює 5,7 А, а

частота дорівнює 50 Гц. Визначити потужність, яку споживає кожна котушка, і потужність усього кола.

**Задача 4.6** У мережу напругою 220 В увімкнені послідовно два приймачі: один з активним опором 20 Ом та ємністю 75 мкФ, а другий з активним опором 60 Ом і ємністю 175 мкФ (рис. 4.7).

Визначити струм у колі й побудувати трикутники опорів для першого та другого приймачів, а також для всього кола.

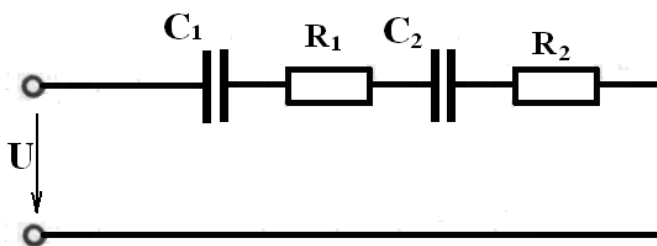


Рисунок 4.7 – До задачі 4.6

**Задача 4.7** Вольтметр, установлений на щитку споживача, показує 120 В, амперметр – 450 А, а ватметр – 50 кВт. Визначити активний, реактивний, повний опір споживача, а також реактивну, повну потужність і коефіцієнт потужності  $\cos \varphi$  споживача.

## ЗАНЯТТЯ № 5 ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ТРИФАЗНОГО СТРУМУ

### *Теоретичні відомості*

*Трифазна система* становить сукупність трьох електричних кіл змінного струму однієї частоти, ЕРС яких зсунуті за фазою на  $1/3$  періоду.

Зазвичай амплітуди цих ЕРС однакові, тобто система симетрична. На рисунку 5.1, а дана часова діаграма таких ЕРС:  $e_A$ ,  $e_B$ ,  $e_C$ ; на рисунку 5.1, б – їхня векторна діаграма.

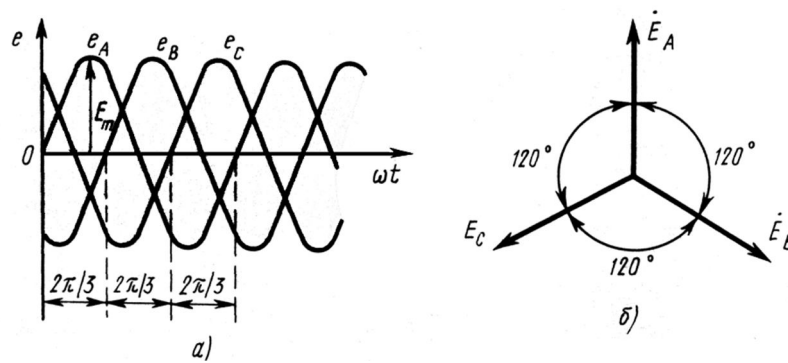


Рисунок 5.1 – Графік миттєвих значень трифазної системи ЕРС (а) і векторна діаграма (б)

Кожне окреме коло трифазної системи називають *фазою*.

Електроспоживачі й обмотки джерел енергії у трифазних системах можна з'єднати у вигляді *зірки* або *трикутника* (рис. 5.2).

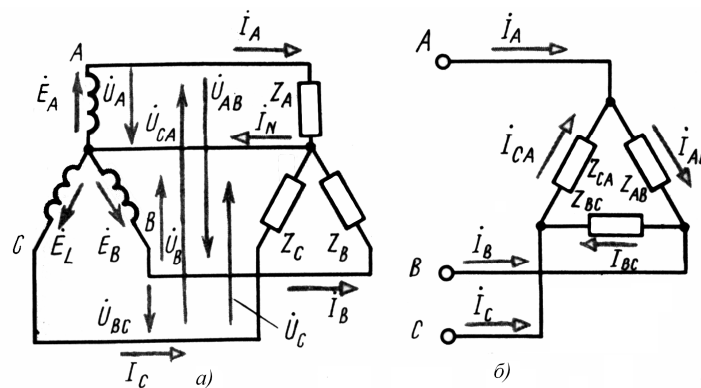


Рисунок 5.2 – Схеми з'єднань трифазних кіл

*З'єднання приймачів у вигляді зірки.* У разі з'єднанні фаз приймачів у вигляді зірки напруги на їхніх затискачах називають *фазними*  $U_{\phi}$  ( $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$ ), а напруги між лінійними проводами – *лінійними*  $U_L$  ( $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ ). На рисунку 5.2, а зазначені лінійні й фазні напруги, а на рисунку 5.3 побудована векторна діаграма для симетричної системи живильних напруг.

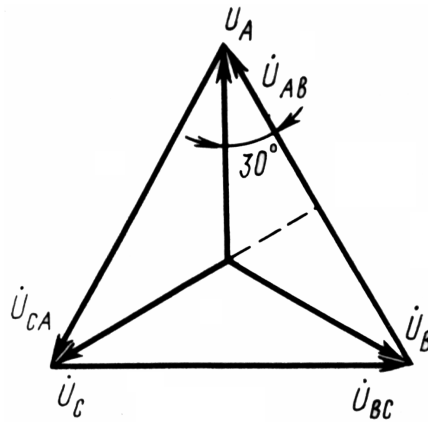


Рисунок 5.3 – Векторна діаграма напруг при з'єднанні приймача енергії в зірку

Співвідношення між векторами фазних і лінійних напруг такі:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A \quad (5.1)$$

Для симетричної системи

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi. \quad (5.2)$$

У разі з'єднання приймачів у вигляді зірки трифазна система може бути *чотирипровідною* (так умикають освітлювальні й побутові прилади, однофазні двигуни, тощо) або *трипровідною* (трифазні двигуни, індукційні печі, тощо).

Для чотирипровідної системи (рис. 5.2, а), де приймачі включені між нейтральним проводом і кожним із лінійних проводів, можна записати:

$$I_L = I_\phi; \quad (5.3)$$

$$I_A = U_A/Z_A; I_B = U_B/Z_B; I_C = U_C/Z_C; \quad (5.4)$$

$$\cos\varphi_A = R_A/Z_A; \cos\varphi_B = R_B/Z_B; \cos\varphi_C = R_C/Z_C; \quad (5.5)$$

Миттєве значення струму в нейтральному проводі:

$$i_N = i_A + i_B + i_C. \quad (5.6)$$



Діюче значення струму в нейтральному проводі характеризується геометричним додаванням векторів фазних струмів:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (5.7)$$

Навантаження всіх трьох фаз називається *симетричним*, якщо струм у них однаковий і однакові зсуви фаз між фазними напругами та струмами.

У разі симетричного навантаження сума векторів фазних струмів утворює замкнутий трикутник. Отже струм у нейтральному проводі дорівнює нулю. З цієї причини для симетричного трифазного навантаження (наприклад, трифазного двигуна) нейтральний провід не потрібний.

Розрахунок симетричної трифазної системи у разі рівномірного навантаження зводиться до розрахунку однієї фази незалежно від наявності нейтрального проводу. У цьому разі фазна напруга

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi = U_{\text{л}}/\sqrt{3},$$

фазний струм

$$I_A = I_B = I_C = I_\phi = U_\phi / Z_\phi,$$

косинус кута зсуву фаз струму і напруги

$$\cos \varphi = R_\phi / Z_\phi,$$

активна, реактивна і повна потужність відповідно:

$$P = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi;$$

$$Q = 3U_\phi I_\phi \sin \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}} \sin \varphi;$$

$$S = 3U_\phi I_\phi = \sqrt{3}U_{\text{л}} I_{\text{л}}.$$

У разі несиметричної системи напруг або нерівномірного навантаження фаз потужності визначаються окремо для кожної фази.

*З'єднання приймачів у вигляді трикутника.* У разі з'єднання приймачів енергії у вигляді трикутника (рис. 5.2, б) їхні фази приєднують до лінійних проводів, що йдуть від джерела електроенергії. Струм у кожному з лінійних проводів дорівнює різниці фазних струмів (за позитивні напрями струмів тут,

як і раніше, приймають напрямок від генератора до приймача). Це справедливо як для миттєвих, так і для діючих значень струмів, що знаходять як геометричну різницю векторів відповідних фазних струмів (рис. 5.4):

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

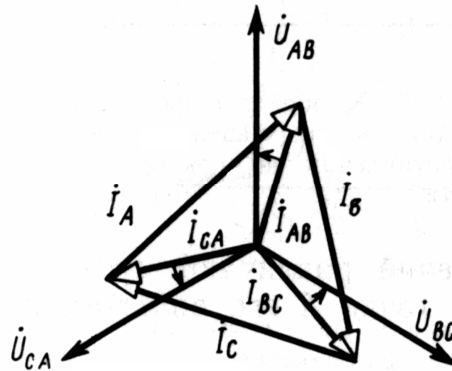


Рисунок 5.4 – Векторна діаграма напруг і струмів симетричного приймача, з'єднаного трикутником

Якщо система лінійних напруг *симетрична*, тобто  $U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\phi} = U_{\text{л}}$ , навантаження фаз рівномірне, тобто  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$  і  $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = \varphi_{\phi}$ , то й діючі значення фазних струмів рівні між собою, мають однаковий фазовий зсув  $\varphi_{\phi}$  щодо відповідних напруг і на  $120^\circ$  один відносно іншого. У цьому разі

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\phi}; \cos \varphi_{\phi} = R_{\phi} / Z_{\phi};$$

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \cos \varphi; Q = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}} \sin \varphi; S = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}.$$

#### Приклади розв'язання задач

**Приклад 5.1** Трифазний двигун серії А розвиває потужність 10 кВт. Визначити струм у лінії, якщо коефіцієнт потужності двигуна дорівнює 0,87, ККД його 0,82, а лінійна напруга мережі 220 В.

Визначити параметри схеми заміщення двигуна, якщо обмотки статора з'єднані у вигляді зірки.

На яку напругу потрібно вмикати двигун трикутником, щоб він розвивав ту саму потужність?

*Розв'язання:* Електрична потужність двигуна

$$P_e = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta} = \frac{10}{0,82} = 12,2 \text{ кВт}$$

Фазний струм

$$I = \frac{P_e}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\phi} = \frac{12\,200}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,87} = 36,8 \text{ А.}$$

Потужність однієї фази

$$P_a = \frac{P_e}{3} = \frac{12,2}{3} = 4,07 \text{ кВт.}$$

Активний опір фази

$$R_\phi = \frac{P_\phi}{I^2} = \frac{4070}{37^2} = 2,97 \text{ Ом.}$$

Повний опір фази

$$Z_\phi = \frac{U_\phi}{I} = \frac{220}{\sqrt{3} \times 37} = \frac{127}{37} = 3,43 \text{ Ом.}$$

Реактивний опір фази

$$X = Z \times \sin\phi = 3,43 \times 0,492 = 1,69 \text{ Ом.}$$

У вигляді трикутника двигун може бути приєднаний до мережі напругою 127 В, оскільки в цьому разі на кожен фазу буде діяти така сама напруга, як і у разі вмикання зіркою в мережу 220 В.

*Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 5.1** Три групи освітлювальних ламп розжарювання потужністю 200 Вт кожна номінальною напругою 220 В з'єднані у вигляді зірки з нейтральним проводом (рис. 5.5). У фазі А включені 6 ламп, у фазі В – 4, у фазі С – 2. Лінійна напруга мережі – 380 В. Визначити опори фаз, фазні струми і струм у нейтральному проводі, побудувати векторну діаграму.

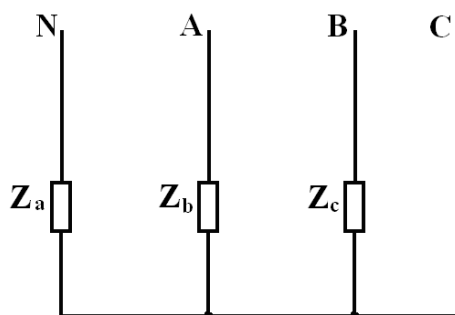


Рисунок 5.5 – До задачі 5.1

**Задача 5.2** До трифазного генератора з лінійною напругою 380 В приєднаний несиметричний споживач з активним навантаженням, з'єднаний у вигляді трикутника. Опір фаз  $R_{ab} = 5 \text{ Ом}$ ,  $R_{bc} = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_{ca} = 10 \text{ Ом}$ , опір проводів  $R_{\text{пр}} = 0,5 \text{ Ом}$ .

Визначити лінійні струми.

**Задача 5.3** У трипровідну лінію трифазного струму включені три однакові котушки. Як зміниться струм у котушках, струм у проводах, що підводять струм, і споживана потужність, якщо котушки перемкнуті із зірки на трикутник.

**Задача 5.4** Мідні дроти трифазної повітряної лінії напругою 6,6 кВ мають переріз  $50 \text{ мм}^2$ . До кінця лінії приєднаний споживач, потужність якого дорівнює 800 кВт, і  $\cos \varphi = 0,8$ . Визначити струм і напругу на початку лінії, якщо довжина лінії  $l = 8 \text{ км}$ , а реактивний опір кожного кілометра проводу дорівнює 0,4 Ом. Скласти електричну схему й побудувати векторну діаграму для неї.

## ЗАНЯТТЯ № 6 ТРАНСФОРМАТОРИ

### *Теоретичні відомості*

Зазвичай трансформатор складається зі сталевого замкнутого *магнітопроводу* та двох або декількох індуктивно зв'язаних між собою *обмоток*.

Обмотки трансформаторів здебільшого виконують у вигляді циліндричних котушок із мідних або алюмінієвих ізольованих один від одного проводів круглого або прямокутного перерізу.

*Принцип дії.* Дія трансформатора заснована на явищі взаємної індукції. Розглянемо двообмотковий однофазний трансформатор (рис. 6.1). У ньому є індуктивно зв'язані обмотки: первинна  $\omega_1$  і вторинна  $\omega_2$ . Якщо первинну обмотку підключити до джерела змінної напруги  $U_1$ , то по ній протікатиме струм  $i$ , що збудить в осерді трансформатора змінний магнітний потік  $\Phi$ . Цей потік, пронизуючи витки обмоток трансформатора, буде індукувати у них ЕРС  $e_1$  і  $e_2$ .

Якщо вторинну обмотку замкнути на який-небудь приймач енергії з опором  $Z_H$ , то по цій обмотці й через приймач протікатиме струм  $i_2$ .

У такий спосіб електрична енергія, трансформуючись, передається з первинного кола у вторинне.

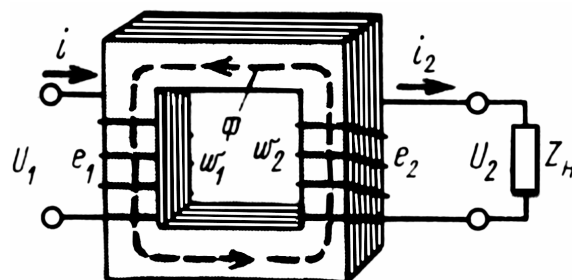


Рисунок 6.1 – Електромагнітна схема двообмоткового трансформатора

*ЕРС в обмотках.* Миттєві значення ЕРС, індукованих в обмотках трансформатора, визначаються за допомогою виразів

$$e_1 = -\omega_1 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}, e_2 = -\omega_2 \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \quad (6.1)$$

Діючи значення цих ЕРС у разі синусоїдальної зміни магнітного потоку  $\Phi$

$$E_1 \approx 4,44 \omega_1 f \Phi_m, E_2 \approx 4,44 \omega_2 f \Phi_m, \quad (6.2)$$

де  $f$  – частота мережі, Гц;

$\Phi_m$  – максимальне значення основного потоку, Вб.

Відношення ЕРС обмоток трансформатора, дорівнює відношенню кількості витків і називається *коефіцієнтом трансформації*

$$k_T = E_1/E_2 = \omega_1/\omega_2. \quad (6.3)$$

При  $k_T > 1$  трансформатор понижувальний, при  $k_T < 1$  – підвищувальний. Будь-який трансформатор можна використати і як підвищувальний, і як понижувальний.

*Режими роботи.* У режимі неробочого ходу трансформатора коло його вторинної обмотки розімкнуте; до первинного підведена номінальна напруга  $U_{1н}$ , у ньому протікає невеликий струм неробочого ходу  $I_0$ . За цих умов можна вважати, що  $E_1 = U_1$  і  $E_2 = U_2$ , тому коефіцієнт трансформації і визначають при цьому режимі роботи трансформатора.

За дослідом неробочого ходу можна знайти також втрати потужності  $P_0$  у сталі магнітопроводу на гістерезис і вихрові струми.

У робочому режимі роботи трансформатора його обмотками  $\omega_1$  і  $\omega_2$  проходять струми  $I_1$  і  $I_2$  при напругах на обмотках  $U_1$  і  $U_2$ . У номінальному робочому режимі – номінальні струми  $I_{1н}$ ,  $I_{2н}$  при номінальних напругах  $U_{1н}$  і  $U_{2н}$ .

Нехтуючи спадом напруги в первинній обмотці трансформатора, можна вважати  $U_1 \approx E_1$ . Тоді при незмінній за значенням напрузі  $U_1 = U_{1н}$  при будь-якому навантаженні трансформатора ЕРС  $E_1$  постійна. Оскільки ЕРС  $E_1$  залежить від магнітного потоку ( $E_1 = 4,44 \omega_1 \Phi f$ ), то і магнітний потік при будь-якому навантаженні можна вважати постійним.

Струм  $I_2$ , що проходить у вторинній обмотці трансформатора, створює свій магнітний потік. Унаслідок збільшення струму  $I_2$  збільшується і струм  $I_1$ . Магнітні потоки, створювані цими струмами, урівноважуються, і результуючий магнітний потік в осерді зберігає практично незмінне значення.

Якщо знехтувати втратами в трансформаторі, то можна вважати рівними потужності трансформатора, споживану з мережі й ту, що віддається споживачеві:

$$U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2. \quad (6.4)$$

Тоді

$$I_2/I_1 = U_1/U_2 = \omega_1/\omega_2 = k_T; I_2 = k_T I_1.$$

У понижувальному трансформаторі  $U_1 > U_2$  у  $k_m$  раз;  $I_1 < I_2$  також у  $k_m$  раз. У підвищувальному трансформаторі співвідношення зворотне.

Завантаження трансформатора в робочому режимі оцінюються за коефіцієнтом завантаження

$$\beta = \frac{P_2}{S_H \cos \phi} = \frac{I_2}{I_{2H}}, \quad (6.5)$$

де  $P_2$  – корисна потужність трансформатора;

$S_H$  – номінальна повна потужність;

$\cos \phi$  – коефіцієнт потужності навантаження.

*У режимі короткого замикання вторинна обмотка трансформатора замкнута накоротко. Необхідно розрізняти коротке замикання в умовах експлуатації та досліду. Дослід короткого замикання виконують при такій первинній напрузі, щоб значення струмів  $I_1$  і  $I_2$  обмоток трансформатора були номінальними. Цю напругу  $U_K$  (у відсотках від  $U_{1H}$ ) вказують на щитку трансформатора поруч з іншими номінальними даними. Вона характеризує значення опорів обмоток трансформатора та використовується у процесі розрахунків спадання напруги у разі навантаження та струмів короткого замикання:*

$$I_{1K} = I_{1H} \frac{100}{U_K \%}. \quad (6.6)$$

Меншому значенню ЕРС  $E_1 \approx U_k$  відповідає менше значення магнітних втрат. Втрати  $P_k$  в обмотках, які визначаються у цьому досліді такі самі, як і в номінальному режимі роботи трансформатора, оскільки в обмотках протікають номінальні струми.

*Зовнішня характеристика.* Зі зміною навантаження трансформатора змінюються струми  $I_1$  і  $I_2$  у його обмотках, спадання напруги в них і напруга  $U_2$  на затискачах вторинної обмотки.

Залежність  $U_2(I)$  називається *зовнішньою характеристикою*. У разі активно-індуктивного навантаження ця характеристика має вигляд похилої прямої, (рис. 6.2), де зазначена зміна напруги  $\Delta U$  при номінальному струмі  $I_{2H}$ .

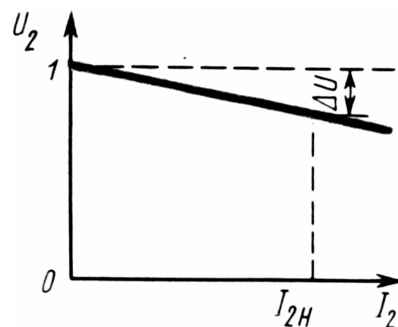


Рисунок 6.2 – Зовнішня характеристика трансформатора

*Втрати та ККД.* Перетворення електроенергії в трансформаторах відбувається з високим ККД (до 98–99 %). Періодичні зміни магнітного поля в магнітопроводі трансформатора супроводжуються втратами в сталі магнітопроводу на гістерезис і вихрові струми.

*Втрати в сталі* не залежать від навантаження та дорівнюють втратам неробочого ходу:

$$\Delta P_{ст} = P_0. \quad (6.7)$$



Протікання струмів обмотками трансформатора спричиняє *втрати потужності в них*, пропорційні квадрату коефіцієнта завантаження трансформатора:

$$\Delta P_{об} = \beta^2 P_K, \quad (6.8)$$

де  $P_K$  – номінальні втрати в обмотках.

*ККД трансформатора*

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{ст} + \Delta P_{об}} = \frac{\beta S_H \cos \phi}{\beta S_H \cos \phi + P_0 + \beta^2 P_K}. \quad (6.9)$$

*Трифазний трансформатор.* Для трансформації трифазного струму можливо використовувати три однофазних трансформатори (рис. 6.5, а), але частіше застосовують *трифазні трансформатори* (рис. 6.5, б) із загальним для всіх фаз магнітопроводом.

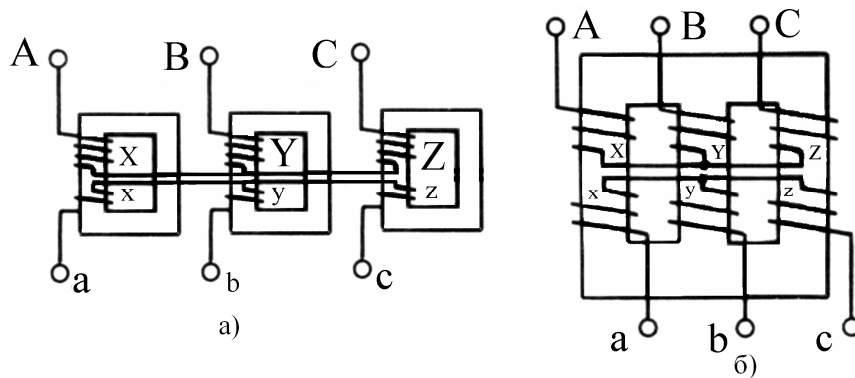


Рисунок 6.3 – Схеми вмикання трансформаторної групи (а) і трифазного тристержневого трансформатора (б)

Головними способами з'єднання обмоток є з'єднання у вигляді зірки та трикутника. Відношення лінійних напруг залежить від способу з'єднань обмоток трансформатора. При схемах з'єднання обмоток «зірка» або «трикутник» відношення напруг дорівнюють коефіцієнту трансформації; при

схемах «зірка – трикутник» і «трикутник – зірка» відношення напруг відповідно більше і менше цього коефіцієнта в  $\sqrt{3}$  раз.

### *Приклади розв'язання задач*

**Приклад 6.1** Трифазний трансформатор працює на освітлювальну мережу з навантаженням 45 кВт. Вторинна напруга дорівнює при цьому навантаженні 220 В, а первинна – 6 000 В. Визначити вторинний і первинний струми трансформатора, якщо він з'єднаний за схемою Y/Y і працює з ККД 0,9.

*Зауваження.* Величину  $\cos \varphi_1$  приблизно приймаємо рівним одиниці, тому що навантаження активне.

*Розв'язання:* Фазна потужність у вторинній обмотці (навантаження вважається рівномірним)

$$P_{\phi} = \frac{P_2}{3} = \frac{45}{3} = 15 \text{ кВт.}$$

Вторинна фазна напруга

$$U_{\phi} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В.}$$

Вторинний струм

$$I_2 = \frac{15\,000}{127} = 118 \text{ А,}$$

$$\text{чи } I_2 = \frac{P_2}{\sqrt{3} \cdot U_2 \cdot \cos \varphi_2} = \frac{45\,000}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 1,0} = 118 \text{ А.}$$

Оскільки  $P_1 = \frac{P_2}{\eta} = \frac{45}{0,9} = 50 \text{ кВт}$ , то первинний струм –

$$I = \frac{P_1}{\sqrt{3} \times U_1 \times \cos \varphi_1} = \frac{50\,000}{\sqrt{3} \times 6000 \times 1,0} = 4,8 \text{ А.}$$

### *Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 6.1** Однофазний трансформатор включений у мережу 220 В. Первинна обмотка трансформатора має 800 витків, вторинна – 46 витків. Визначити коефіцієнт трансформації та напругу вторинної обмотки.

**Задача 6.2** Вторинна обмотка трансформатора, указанного у попередньому завданні, живить лампи розжарювання, струм при цьому становить 8 А. Визначити струм, який споживає трансформатор із мережі, якщо ККД його дорівнює 90 %.

**Задача 6.3** Вторинна обмотка трифазного трансформатора віддає потужність 30 кВА; ККД трансформатора 95 % і включений він у мережу 3 000 В. Визначити струм первинної обмотки.

**Задача 6.4** Трипровідна мережа живить трифазний трансформатор, номінальна потужність якого дорівнює 75 кВА при напрузі 400 В.

У мережу включене рівномірне змішане навантаження, до того ж фазні опори еквівалентної зірки навантаження дорівнюють: активний 2 Ом і індуктивний 1,5 Ом.

Чи можна підключити в цю мережу ще яке-небудь навантаження (чисто активне чи активне й індуктивне), якщо можна, то яке?

**Задача 6.5** Які будуть коефіцієнти трансформації лінійних напруг трифазного трансформатора при групах з'єднань Y/Y, Y/D і D/Y, якщо відношення числа витків, що припадає на одну фазу,  $\frac{\omega_1}{\omega_2} = 2$ .

**Задача 6.6** Для одержання чотирипровідної трифазної системи з'єднали в групу три однакових однофазних трансформатори по 25 кВА при вторинній напрузі 220 В. В отриману мережу включили змішане навантаження, до того ж фазні опори еквівалентної зірки навантаження дорівнювали: активний 20 Ом та індуктивний 15 Ом. Визначити струми в проводах.

**Задача 6.7** Три однакових однофазних трансформатори з'єднані в групу, до того ж вторинні обмотки їх утворюють зірку із лінійною напругою 380 В. До цієї групи трансформаторів підключена рівномірне й однорідне навантаження, до того ж активний опір кожної фази еквівалентного трикутника навантаження дорівнює 31,6 Ом, а індуктивний – 24,5 Ом.

Визначити фазні й лінійні струми.

## ЗАНЯТТЯ № 7 АСИНХРОННІ МАШИНИ

### Теоретичні відомості

*Асинхронні машини зазвичай використовують як двигуни.*

Найрозповсюдженішими є *трифазні асинхронні двигуни*.

Недоліком асинхронних двигунів є труднощі, обумовлені регулюванням частоти обертання. Крім того, ці двигуни мають відносно низький  $\cos \varphi$  (0,85–0,9 при повному навантаженні; і 0,2–0,3 на холостому ході).

Залежно від конструкції обмотки ротора розрізняють асинхронні двигуни з короткозамкнутим і фазним роторами.

Трифазний асинхронний *двигун із короткозамкнутим ротором* простий, надійний у роботі та дешевий. Обмотку ротора такого двигуна зазвичай виконують з алюмінієвих стержнів, які заливають без ізоляції в пази.

У пазах ротора *двигуна з фазним ротором* укладають обмотку, подібну до обмотки статора. Фазні обмотки ротора з'єднують у вигляді зірки, а три її виводи приєднують до трьох контактних кілець, насаджених на вал й ізольованих одне від одного та від вала. За допомогою щіток, накладених на кільця, обмотка ротора може бути замкнута накоротко або на опір. Двигуни з фазним ротором складніші, дорожчі й менш надійні в експлуатації, ніж із короткозамкнутим, але мають кращі пускові й регульовальні властивості.

Ротор двигуна обертається з асинхронною швидкістю  $n_2$  меншою, ніж синхронна швидкість обертання поля  $n_1$ . Різниця швидкостей обертання поля та ротора характеризується *ковзанням*  $S$ , яке зазвичай виражається у відсотках:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100 \%. \quad (7.1)$$

У номінальному режимі роботи двигуна  $S$  звичайно невелике (2–6 %). Якщо ротор нерухомий ( $n_2 = 0$ ), то  $S = 100 \%$ .

Наявність різниці швидкостей  $n_1$  і  $n_2$  *принципово необхідна* (у двигуні), оскільки тільки при цьому магнітне поле перетинає провідники ротора, у них

наводиться ЕРС, виникають струми, створюється електромагнітний обертальний момент.

Ковзання асинхронного двигуна залежно від навантаження майже не змінюється. Але асинхронна машина, працюючи в режимі двигуна, змінює швидкість обертання від  $n = 0$  (момент пуску) до  $n \approx n_1$ . (неробочий хід) і, відповідно, ковзання від  $s = + 1$  до  $s = 0$ .

Зі зміною швидкості обертання ротора двигуна змінюється частота ЕРС і струмів в обмотці ротора, що видно з рівняння

$$f_2 = \frac{p \times (n_1 - n_2)}{60} = \frac{p \times n_1}{60} \times \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} = f_1 \times s. \quad (7.2)$$

При пуску двигуна  $s = 1$ ,  $f_2 = f_1$ ; при неробочому ході  $s \approx 1$ ,  $f_2 \approx 0$ .

Величина ЕРС, що наводиться в обмотці ротора дорівнює

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi_m, \quad (7.3)$$

де  $E_{2s}$  – електрорушійна сила в обмотці ротора;

$\Phi_m$  – максимальне значення магнітного потоку статора;

$k_2 < 1$  – обмотковий коефіцієнт, що враховує зменшення ЕРС ротора внаслідок геометричного додавання ЕРС, що наводяться в окремих його провідниках, і вкорочення кроку обмотки ротора.

Оскільки,  $f_2 = f_1 \cdot s$ , то величина ЕРС  $E_{2s}$  при деякому ковзанні виражається за допомогою формули

$$E_{2s} = 4,44 f_1 \cdot s \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi_m = E_2 \cdot s, \quad (7.4)$$

де  $E_2$  – ЕРС в фазі обмотки ротора в момент пуску, коли  $f_2 = f_1$ .

**Приклад 7.1** Визначити ковзання у відсотках для шестиполюсного асинхронного двигуна, якщо його ротор робить 960 об/хв. Частота мережі – 50 Гц.

*Розв'язання:* Швидкість обертання електромагнітного поля статора:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1\,000 \text{ об/хв.}$$

Тоді ковзання становить

$$s = \frac{1\,000 - 960}{1\,000} \cdot 100 = 4 \, \%.$$

**Приклад 7.2** Амплітудне значення магнітного потоку АД  $\Phi_m = 0,015$  Вб, кількість витків у фазних обмотках статора  $w_1 = 200$  і ротора  $w_2 = 20$ , їхні обмоткові коефіцієнти  $k_1 = 0,94$ , а  $k_2 = 0,96$ , ковзання в номінальному режимі  $s_{\text{ном}} = 0,05$ , частота мережі 50 Гц. Визначити діюче значення ЕРС в фазних обмотках статора та нерухомого ротора, коефіцієнт трансформації за ЕРС, частоту ЕРС і струму в обмотці ротора, а також діюче значення ЕРС в обмотці ротора у разі номінального навантаження.

*Розв'язання:* ЕРС, що індукується в фазних обмотках статора та нерухомого ротора:

$$E_1 = 4,44 f \cdot w_1 \cdot k_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 200 \cdot 0,94 \cdot 0,015 = 626 \text{ В};$$

$$E_2 = 4,44 f \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot 50 \cdot 20 \cdot 0,96 \cdot 0,015 = 64 \text{ В.}$$

Коефіцієнт трансформації за ЕРС:

$$k_e = \frac{w_1 \cdot k_1}{w_2 \cdot k_2} = \frac{200 \cdot 0,94}{20 \cdot 0,96} = 9,78/$$

Частота ТНС і струму в обмотці ротора, що обертається:

$$f_2 = f_1 \cdot s_{\text{ном}} = f \cdot s_{\text{ном}} = 50 \cdot 0,05 = 2,5 \text{ Гц.}$$

ЕРС, індукована в обмотці ротора, що обертається:

$$E_{2s} = 4,44 f_2 \cdot w_2 \cdot k_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot 2,5 \cdot 20 \cdot 0,96 \cdot 0,015 = 3,2 \text{ В.}$$

#### *Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 7.1** Номінальна частота обертання АД  $n_2 = 960$  об/хв. Визначити кількість пар полюсів двигуна, номінальне ковзання, частоту ЕРС в обмотці ротора, який обертається, якщо частота мережі 50 Гц.

**Задача 7.2** Трифазний двигун 14 кВт, 220 В працює з  $\cos \varphi = 0,88$  у разі повного навантаження, а струм у проводах, що підводять живлення дорівнює 47,5 А. Знайти ККД двигуна.

**Задача 7.3** Трифазний двигун, уключений трикутником у мережу напругою 500 В, розвиває потужність 36,8 кВт при  $\cos \varphi = 0,875$ . ККД його становить  $\eta = 0,92$ .

Для якої напруги можна застосувати цей двигун, якщо його обмотку з'єднати у вигляді зірки за умови, що струм у кожній фазі двигуна повинен залишатися незмінним? Як зміниться при цьому струм у живильних проводах і потужність двигуна?

**Задача 7.4** Трифазний асинхронний двигун із короткозамкнутим ротором працює з номінальним ковзанням  $s_{\text{ном}} = 0,04$ . Частота живильної мережі  $f = 50$  Гц, максимальне значення обертового магнітного потоку  $\Phi_m = 0,01$  Вб, кількість витків обмотки статора  $w_1 = 100$ , ротора  $w_2 = 1$  та їхні обмоткові коефіцієнти  $k_1 = 0,95$ ,  $k_2 = 1$ . Визначити коефіцієнт трансформації ЕРС, діюче значення ЕРС в фазах обмотки статора, обертового та нерухомого ротора.

**Задача 7.5** У фазі ротора трифазного асинхронного двигуна, який обертається з частотою  $n_{2\text{ном}} = 1\,440$  об./хв., індукується ЕРС  $E_{2s} = 0,15$  В. Частота напруги мережі  $f = 50$  Гц. Визначити ЕРС у фазі ротора в момент пуску двигуна.

**Задача 7.6** Трифазний асинхронний двигун включений у мережу з лінійною напругою 220 В. Струм в обмотці статора 30 А при коефіцієнті потужності  $\cos \varphi = 0,8$ . Сумарні втрати в двигуні становлять 1 000 Вт. Визначити ККД двигуна.

## ЗАНЯТТЯ № 8 ВИБІР ПЕРЕРІЗУ ПРОВОДІВ ЛІНІЙ

### *Теоретичні відомості*

Вибір перерізу проводів виконується за трьома критеріями: ра механічною міцністю ( $q_{\text{мех}}$ ), за струмом навантаження ( $q_I$ ) і за втратою напруги ( $q_u$ ).

### *Вибір за механічною міцністю*

Залежно від умов прокладання проводів і матеріалу провідної жили в довідникових таблицях зазначаються мінімально припустимі перерізи проводів із позиції механічної міцності. Вибраний переріз повинен задовольняти умові  $q_{\text{мех}} > q_{\text{мін}}$ . Для більшості умов прокладання алюмінієвих проводів  $q_{\text{мін}} = 2,5 \text{ мм}^2$ , а для мідних –  $q_{\text{мін}} = 0,5 \text{ мм}^2$ .

### *Вибір за струмом навантаження*

Струм у провіднику залежить від потужності електроприймача: чим більша потужність, тим більший струм у провіднику. У провіднику з опором  $R$  під час протікання струму  $I$  мають місце втрати потужності  $I^2 \cdot R$ , при цьому провід і його ізоляція нагріваються. Оскільки потужність втрат залежить від струму й опору проводу, а опір залежить від перерізу проводу, то для проводу з конкретним перерізом зі збільшенням струму збільшується температура нагріву ізоляції. Кожний клас ізоляції має максимально допустиму температуру нагріву  $i$ , відповідно, максимально допустимий струм  $I_{\text{доп}}$ .

Залежно від перерізу проводу, матеріалу провідної жили, класу ізоляції, умов прокладення проводів і їхньої кількості в довідникових таблицях приведені допустимі значення струму в проводах [1].

Після визначення розрахункового струму  $I_p$  у проводі за таблицями знаходять такий переріз, щоб  $I_{\text{доп}} \geq I_p$ . Розрахунковий струм залежить від типу та кількості електроприймачів, приєднаних до певної лінії.



У разі однофазного приймача, приєднаного в кінці лінії, потужністю  $P$ , розрахунковий струм знаходять за формулою

$$I_p = \frac{P}{U_\phi \cdot \cos\varphi}, \quad (8.1)$$

де  $U_\phi$  – фазна напруга;

$\cos\varphi$  – коефіцієнт потужності електроприймача.

У разі трифазного приймача, приєднаного в кінці лінії, розрахунковий струм:

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_\Delta \cdot \cos\varphi}, \quad (8.2)$$

де  $P$  – потужність трифазного приймача;

$U_\Delta$  – лінійна напруга.

Як однофазні, так і трифазні електроприймачі можна розподілити вдовж однієї лінії (рис. 8.1), тобто приєднати до лінії в різних точках.

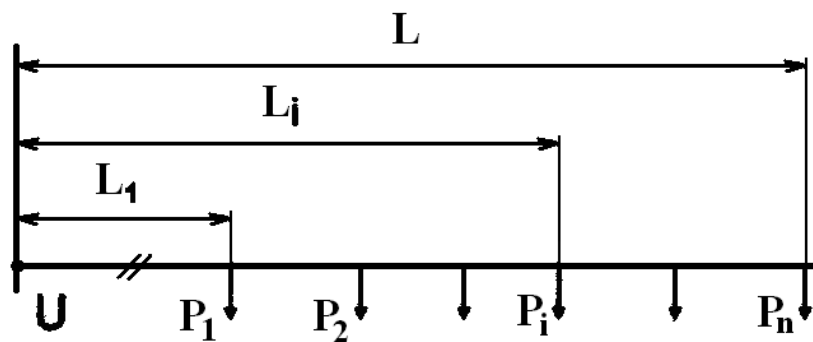


Рисунок 8.1 – Схема приєднання приймачів електроенергії

У цьому разі у вище наведених формулах потрібно приймати розрахункову потужність.

$$P_p = K_\Pi \sum_{i=1}^n P_i, \quad (8.3)$$

де  $P_i$  – номінальна потужність  $i$ -го електроприймача;

$K_\Pi$  – коефіцієнт попиту;

$n$  – кількість споживачів, приєднаних до лінії.

Коефіцієнт попиту враховує те, що не всі приймачі електроенергії можуть бути одночасно ввімкненими, не всі працюють у номінальному режимі та інші умови. Для декількох світильників, приєднаних до лінії, що вмикається одним вимикачем коефіцієнт попиту  $K_{\text{п}} = 1$ . Для лінії що живить світильники низки приміщень, приймають  $K_{\text{п}} = 0,8-0,9$ .

У разі приєднання до лінії електродвигунів чи електротехнічних установок зі змінною потужністю у першому наближенні для визначення коефіцієнта потужності можна користуватися таблицею 8.1.

Таблиця 8.1 – Залежність коефіцієнта попиту від кількості електроприймачів

n	2	3	4	5	6	8	9	10	15	20
$K_{\text{п}}$	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,47	0,44	0,35	0,31

#### *Вибір за втратою напруги*

Кожний приймач електроенергії має номінальну напругу, зазначену в паспорті. Більшість приймачів допускають відхилення напруги  $\pm 5 \%$ . Це означає, що в лініях передачі до найвіддаленішого споживача допускається втрата напруги не більша  $5 \%$ .

Як відомо, на ділянці електричного кола зі струмом  $I$  втрата напруги дорівнює  $\Delta U = I (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi)$ , де  $R$  і  $X$  – активний і індуктивний опір даної ділянки кола. В мережах напругою до 1 кВ індуктивним опором нехтують і вважають, що

$$\Delta U = I \cdot R \cdot \cos \varphi. \quad (8.4)$$

У разі однофазного навантаження в кінці лінії (рис. 8.2) струм навантаження знаходять за формулою (8.1), а опір – за формулою  $R = \frac{2L}{\gamma q}$ ,

де  $\gamma$  – питома провідність матеріалу лінії  $\frac{\text{М}}{\text{ОМ} \times \text{мм}^2}$ ;

$L$  – довжина лінії, м;

$q$  – переріз проводу лінії,  $\text{мм}^2$ .

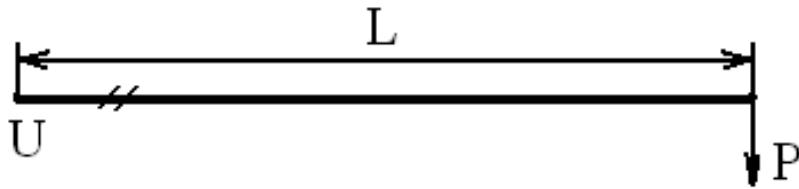


Рисунок 8.2 – Схема однофазної лінії з навантаженням на кінці

Після заміни втрати напруги в вольтах на втрату напруги у % отримуємо формулу для визначення перерізу проводу, який забезпечить допустиму втрату напруги:

– для однофазного навантаження в кінці лінії

$$q_{\Delta u} = \frac{200 \cdot P \cdot L}{\gamma \cdot \Delta u \cdot U_{\phi}^2}; \quad (8.5)$$

– для однофазних навантажень, розподілених уздовж лінії

$$q_{\Delta u} \geq \frac{200 \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i}{\gamma \cdot \Delta u \cdot U_{\phi}^2}; \quad (8.6)$$

– для трифазного навантаження в кінці лінії

$$q_{\Delta u} = \frac{100 \cdot P \cdot L}{\gamma \cdot \Delta u \cdot U_{\phi}^2}; \quad (8.7)$$

– для трифазних навантажень, розподілених уздовж лінії:

$$q_{\Delta u} \geq \frac{100 \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i}{\gamma \cdot \Delta u \cdot U_{\phi}^2}. \quad (8.8)$$

У формулах (8.5) – (8.8) питому провідність проводів приймають рівною:

для алюмінієвих – 33, для мідних –  $54 \frac{\text{М}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$ .

Після знаходження трьох значень перерізу проводу, як вибраний  $q_{\text{вибр}}$  приймають найбільший переріз із трьох ( $q_{\text{мех}}$ ,  $q_i$ ,  $q_{\Delta u}$ ). Далі визначають дійсну втрату напруги на ділянці  $\Delta u_d$  за цим перерізом:

$$\Delta u_d = \Delta u \frac{q_{\Delta u}}{q_{\text{вибр}}}. \quad (8.9)$$

**Приклад 8.1** Асинхронний двигун потужністю  $P_2 = 4,5$  кВт,  $\cos \varphi = 0,8$ ,  $\eta = 0,85$ ,  $U_{\text{ном}} = 380$  В приєднаний до лінії завдовжки 40 м. Вибрати переріз проводу марки АПРТО при  $\Delta u = 3$  %.

*Розв'язання:* Переріз проводу за механічною міцністю  $q_{\text{мех}} = 2,5 \text{ мм}^2$ .

Розрахунковий струм:

$$I_p = \frac{P}{\eta \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi} = \frac{4\,500}{0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot 380_{\text{л}} \cdot 0,8} = 10 \text{ А}.$$

Згідно з таблицею 8.1 для трипровідної лінії, прокладеної в сталевій трубі, переріз проводу за струмом навантаження  $q_i = 2,0 \text{ мм}^2$  ( $I_{\text{доп}} = 18 \text{ А} > 10 \text{ А}$ ).

Переріз за втратою напруги ( $\Delta u = 3$  %)

$$q_{\Delta u} = \frac{100 \cdot P_2 \cdot L}{\eta \cdot \gamma \cdot \Delta u \cdot U_{\text{л}}^2} = \frac{100 \cdot 4\,500 \cdot 40}{0,85 \cdot 33 \cdot 3 \cdot 380^2} = 1,5 \text{ мм}^2.$$

Остаточно приймаємо переріз  $2,5 \text{ мм}^2$ .

**Приклад 8.2** Світильники з лампами розжарювання приєднані до однієї лінії напругою 220 В. Потужність лампи  $P = 100$  Вт, кількість ламп  $n = 15$ . Відстань між лампами 4 м, загальна довжина лінії  $L = 60$  м. Знайти переріз проводу АПВ, якщо  $\Delta u = 2$  %.

*Розв'язання:* Переріз проводу за механічною міцністю  $q_{\text{мех}} = 2,5 \text{ мм}^2$ .

Розрахунковий струм

$$I_p = \frac{P}{U_{\phi} \cdot \cos \varphi} = \frac{100 \cdot 15}{220 \cdot 1,0} = 6,82 \text{ А}.$$

Переріз за струмом навантаження  $q_i = 2,0 \text{ мм}^2$ .

Переріз за втратою напруги ( $\Delta u = 2 \%$ )

$$q_{\Delta u} = \frac{200 \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i}{\gamma \cdot \Delta u \cdot U_{\phi}^2} = q_{\Delta u} \geq \frac{200 \cdot 100 \cdot 480}{33 \cdot 2 \cdot 220^2} = 3 \text{ мм}^2.$$

Вибраний переріз  $q_{\text{вибр}} = 4,0 \text{ мм}^2$ .

Дійсна втрата напруги на ділянці  $\Delta u_d$  за цим перерізом:

$$\Delta u_d = 2 \cdot \frac{3}{4} = 1,5 \%$$

**Приклад 8.3** До трипровідної лінії приєднані 10 асинхронних двигунів з однаковим ККД ( $\eta = 0,85$ ) і коефіцієнтом потужності ( $\cos \phi = 0,82$ ). Лінійна напруга  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ . Вибрати переріз проводу АПРТО за допустимої втрати напруги  $\Delta u_d = 3 \%$ . Потужність двигунів  $P_{2i}$  і відстань  $L_i$  між ними наведені в таблиці 8.2.

Таблиця 0.2 – Дані до прикладу 8.3.

$P_{2i}, \text{ кВт}$	11	7,5	4,0	15	5,5	4,0	11	3,0	2,2	5,5
$L_i, \text{ м}$	10	12	15	20	23	25	28	30	32	35

*Розв'язання:* Переріз проводу за механічною міцністю  $q_{\text{мех}} = 2,5 \text{ мм}^2$ .

Розрахунковий струм при коефіцієнті попиту  $k_{\text{п}} = 0,44$ :

$$I_p = \frac{k_{\text{п}} \cdot \sum_{i=1}^{10} P_i}{\eta \cdot \sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \phi} = \frac{0,44 \cdot 68\,700}{0,85 \cdot \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 0,82} \approx 66 \text{ А}.$$

Переріз проводу за струмом навантаження  $q_i = 25,0 \text{ мм}^2$ , для якого  $I_{\text{доп}} = 80 > 66 \text{ А}$  при прокладці трьох проводів у сталій трубі.

Переріз проводу за допустимою втратою напруги:

$$q_{\Delta u} = \frac{100 \cdot k_{\text{п}} \cdot \sum_{i=1}^n P_i \cdot L_i}{\eta \cdot \gamma \cdot \Delta u \cdot U_{\text{л}}^2} = \frac{100 \cdot 0,444 \cdot 1423 \cdot 10^3}{0,85 \cdot 33 \cdot 3 \cdot 380^2} = 5,1 \text{ мм}^2.$$

Приймаємо переріз проводу  $q_{\text{вибр}} = 4,0 \text{ мм}^2$ .

Дійсна втрата напруги на ділянці  $\Delta u_d$  у разі цього перерізу:

$$\Delta u_d = 3 \cdot \frac{4,33}{16} = 0,61 \text{ \%}.$$

#### *Задачі для самостійного розв'язання*

**Задача 8.1** Вибрати переріз проводу за наявності одного однофазного електроприймача в кінці лінії. Напруга  $U_\phi = 220 \text{ В}$ . Спосіб прокладки проводів, матеріал провідної жили та допустима втрата напруги задаються окремо. Потужність електроприймача, коефіцієнт потужності та довжина лінії приведені в таблиці 8.3.

Таблиця 8.3 – Дані для задачі 8.1

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P, кВт	3	10	8	12	9,6	5,5	7,2	4,5	6,0	9,0	8,6	7,5
L, м	50	40	60	20	40	55	65	90	80	65	60	70
cos φ	0,8	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8

**Задача 8.2** Вибрати переріз проводу за наявності одного трифазного приймача в кінці лінії. Напруга  $U_\Delta = 220 \text{ В}$ . Прокладка проводів – у трубі. Матеріал провідної жили (мідь чи алюміній) – за вказівкою викладача. Потужність електроприймача, коефіцієнт потужності, довжина лінії та допустима втрата напруги приведені в таблиці 8.4.

Таблиця 8.4 – Дані до задачі 8.2

№ з/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
P, кВт	3	10	8	12	9,6	5,5	7,2	4,5	6,0	9,0	8,6	7,5
L, м	50	40	60	20	40	55	65	90	80	65	60	70
cos φ	0,8	1,0	0,9	0,7	0,6	0,5	0,7	0,8	0,9	0,9	0,8	0,8
$\Delta u$	2	2	2	2	2	2	2,5	2,5	2,5	3	3	3

**Задача 8.3** Вибрати переріз проводу за наявності однофазних електроприймачів розподілених вздовж лінії. Напруга  $U_\phi = 220 \text{ В}$ . Прокладка проводів відкрита. Матеріал провідної жили за вказівкою викладача.

Потужність електроприймачів і відстань від джерела живлення до електроприймачів приведені в таблиці 8.5.

Таблиця 8.5 – Дані до задачі 8.3

а) $P_1 = 200 \text{ Вт}; \cos \varphi = 0,8; \Delta u = 1,5 \%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L_i$	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
б) $P_1 = 100 \text{ Вт}; \cos \varphi = 1,0; \Delta u = 1,5 \%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L_i$	10	13	15	18	20	22	25	27	30	32	35	38
в) $P_1 = 100 \text{ Вт}; \cos \varphi = 0,6; \Delta u = 1,2 \%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L_i$	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
г) $P_1 = 300 \text{ Вт}; \cos \varphi = 0,8; \Delta u = 1,5 \%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L_i$	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23	25	27
д) $P_1 = 100 \text{ Вт}; \cos \varphi = 0,7; \Delta u = 1,5 \%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L_i$	10	13	15	18	20	22	25	27	30	32	35	38
е) $P_1 = 200 \text{ Вт}; \cos \varphi = 1,0; \Delta u = 1,5 \%$												
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$L_i$	10	13	15	18	20	22	25	27	30	32	35	38

**Задача 8.4** Вибрати переріз проводу за наявності трифазних електроприймачів розподілених вздовж лінії. Напруга  $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ . Прокладка проводів в трубах. Матеріал провідної жили за вказівкою викладача. Потужність електроприймачів і відстань від джерела живлення до електроприймачів приведені в таблиці 8.6.

Таблиця 8.6 – Дані до задачі 8.4

а) $P_{2i} = 2,8 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,85; \Delta u = 2,0 \%; \eta = 0,8;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
l	2	3	4	5	6	7	8	9
$L_{i, \text{ м}}$	10	13	16	20	22	24	26	28
б) $P_{2i} = 4,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,8; \Delta u = 2,0 \%; \eta = 0,85;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{i, \text{ м}}$	6	9	12	15	18	21	24	27
в) $P_{2i} = 1,7 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,75; \Delta u = 2,0 \%; \eta = 0,7;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{i, \text{ м}}$	8	12	16	20	24	28	32	36
г) $P_{2i} = 2,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,6; \Delta u = 2,0 \%; \eta = 0,9;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{i, \text{ м}}$	10	12	18	20	23	26	30	40

Продовження таблиці 8.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9
д) $P_{2i} = 4,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,85; \Delta u = 1,5 \%; \eta = 0,8;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	10	13	16	20	22	24	26	28
е) $P_{2i} = 1,5 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,8; \Delta u = 1,5 \%; \eta = 0,85;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	6	9	12	15	18	21	24	27
ж) $P_{2i} = 2,8 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,75; \Delta u = 1,0 \%; \eta = 0,7;$								
i	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_i, \text{ м}$	8	12	16	20	24	28	32	36
з) $P_{2i} = 3,0 \text{ кВт}; \cos \varphi = 0,6; \Delta u = 1,0 \%; \eta = 0,9;$								
i	1	2	3	4	5	6		
$L_i, \text{ м}$	10	12	18	20	23	26		



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ-2017) для України / Міністерство енергетики та вугільної промисловості України. – перероб. і доп. – Харків : Форт, 2017. – 760 с.
2. Будіщев М. С. Електротехніка, електроніка та мікропроцесорна техніка : підручник / М. С. Будіщев. – Львів : Афіша, 2001. – 424 с.
3. Колонтаєвський Ю. П. Промислова електроніка і мікросхемотехніка / Ю. П. Колонтаєвський; Під ред. А. Г. Соскова. – Вид. 2е, виправл. і доповн. – Харків : ХДАМГ, 2003 – 281 с.
4. Теорія електропривода : підручник / [М. Г. Попович, М. Г. Борисик, В. А. Гаврилюк та ін.]; За ред. М. Г. Поповича. – Київ : Вища шк., 1993. – 454 с.
5. Клауснитцер Г. Введение в электротехнику / Г. Клауснитцер; пер. с нем. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 480 с.
6. Руденко В. С. Промислова електроніка / В. С. Руденко, В. Я. Ромашко, В. В. Трифонюк. – Київ : Либідь, 1993. – 432 с.
7. Веников В. А. Введение в специальность : учеб. пособие для вузов / В. А. Веников, Е. В. Путятин. – М. : Высш. шк., 1978 – 294 с.
8. Касаткин А. С. Электротехника: учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 6-е изд. перераб. – М. : Высш. шк., 1999 – 542 с.
9. Сборник задач по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие для неэлектротехн. спец. вузов / [В. Г. Герасимов, Х. Э. Зайдель, В. В. Коген-Далин и др.] ; Под ред. В. Г. Герасимова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1987. – 288 с.; ил.
10. Гаряжа В. М. Вступ до спеціальності, конспект лекцій (для студентів 2 курсу денної, заочної і прискореної форми навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр» за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. М. Гаряжа, І. Т. Карпалюк; Харків. нац. унт міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 178 с.

## ДОДАТОК А

Допустимі струми для проводів з гумовою і пластмасовою ізоляцією

Таблиця А.1 – Тривалий допустимий струм  $I_{\text{доп}}$  для проводів з гумовою та пластмасовою ізоляцією на напругу до 1 кВ з алюмінієвими (числівник) і мідними (знаменник) жилами при температурі навколишнього повітря 25<sup>0</sup>С

АПР, АПРТО, АПРВ, АПВ, ПР, ПРТО, ПРГ, ПРВ, ПВ, ПГВ, ПРГВ						
Переріз проводу, мм <sup>2</sup>	Допустимий струм $I_{\text{доп}}$ , залежно від способу прокладки					
	відкрито	у сталених трубах при кількості проводів у трубі				
		2	3	4	5 – 6	7 – 8
1,0	– /17	– /16	– /15	– /14	–	–
1,2	– /20	– /18	– /16	– /15	–	–
1,5	– /23	– /19	– /17	– /16	– /15	– /14
2,0	21/26	19/24	18/22	15/20	12/17	11/16
2,5	24/30	20/27	18/25	19/25	15/20	14/19
3,0	27/34	24/32	22/28	21/26	18/22	17/21
4,0	32/41	28/38	28/35	23/30	22/28	21/26
5,0	36/46	32/42	30/39	27/34	24/33	22/28
6,9	39/50	36/46	32/42	30/40	26/34	24/31
8,0	46/62	43/54	40/51	37/46	30/40	29/38
10,0	60/80	50/70	47/60	39/50	38/48	35/45
16,0	75/100	60/85	60/80	55/75	48/64	45/60
25,0	105/140	85/115	80/100	70/90	65/80	60/75
35,0	130/170	100/135	95/125	85/115	75/100	70/95
50,0	165/215	140/185	130/170	120/150	105/135	95/125
70,0	210/270	175/225	165/210	140/185	130/165	125/155
95,0	255/330	215/275	200/255	175/225	–	–

*Виробничо-практичне видання*

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до проведення практичних занять  
із навчальної дисципліни

**«ВСТУП ДО СПЕЦІАЛЬНОСТІ»**

*(для студентів 2 курсу денної, заочної та прискореної  
форм навчання освітньо-кваліфікаційного рівня «бакалавр»  
за спеціальністю 141 – Електроенергетика,  
електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі : **ГАРЯЖА** Василь Миколайович,  
**КАРПАЛЮК** Ігор Тимофійович

*Відповідальний за випуск П. П. Рожков*

*Редактор В. І. Шалда*

*Комп'ютерний набір І. Т. Карпалюк*

*Комп'ютерне верстання І. В. Волосожарова*

План 2018, поз. 259 М

---

Підп. до друку 05.06.2018. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,6.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.