

**МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра електроенергетики, електротехніки  
та електромеханіки**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання розрахунково-графічної роботи  
з дисципліни**

**« ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ »**

**Харків – 2017**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 20 березня 2017 р., протокол № 9.

Методичні вказівки призначені для студентів денної форми навчання спеціальності 144 «Теплоенергетика».

Укладачі:

доц. О. Є. Зінченко,  
асист. І. Є. Флото

Рецензент

доц. С. М. Тихонравов

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання розрахунково-графічної роботи  
з дисципліни

*« ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА ЕЛЕКТРОНІКИ »*

Відповідальний за випуск Зінченко О. Є.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

Підписано до друку 30.03.17 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,25. Тираж 75. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,

61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

## ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ.....	4
1 Завдання на розрахунок трифазного кола.....	5
2 Методичні вказівки до розв'язання завдання.....	9
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	26

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ ЗАВДАННЯ

Домашнє завдання (розрахунково-графічна робота) з дисципліни «Основи електротехніки та електроніки» призначене для закріплення найбільш складних розділів цього курсу.

При виконанні завдань студентам необхідно додержуватись таких вимог:

1 Кожен студент повинен виконувати завдання за номером варіанта, який видається викладачем. Завдання має бути виконане в термін, передбачений графіком самостійної роботи студентів.

2 Позначення електричних величин і одиниці вимірювання повинні відповідати звітності [1].

3 Завдання має бути виконано акуратно, без виправлень, написано чорнилом. На титульному аркуші повинні бути зазначені номер роботи і її назва, прізвище та ініціали студента, шифр групи і номер варіанта. У завданні повинні бути вказані всі вихідні дані і сформульовано його зміст.

4 Всі етапи розв'язання повинні мати пояснення з розрахунковими формулами, проміжними і кінцевими результатами розрахунку, а також одиницями вимірювання; результати обчислень записуються з точністю до четвертої значущої цифри.

5 Векторні діаграми і графіки необхідно креслити в масштабі на міліметровому папері за допомогою креслярських інструментів. Векторні діаграми повинні бути замкненими. Прийнятий масштаб указується на кресленні.

6 Наприкінці завдання повинні бути проставлені дата закінчення роботи й особистий підпис студента.

7 Після перевірки завдання викладачем проводиться співбесіда з оцінкою виконаної роботи.

## 1 Завдання на розрахунок трифазного кола

До симетричного трифазного джерела з лінійною напругою  $U_L$  підключено коло, показане на рисунку 1.1. Значення лінійної напруги, активних та реактивних опорів приймачів наведені в таблиці 1.1.

Необхідно знайти показання амперметрів і струм у нейтральному провіднику, а також активну, реактивну та повну потужність, що споживається колом у таких режимах:

- а) трифазному при симетричній системі напруг;
- б) при обриві однієї фази;
- в) при обриві тієї самої фази та нейтрального провідника;
- г) при обриві нейтрального провідника та короткому замиканні однієї фази.

Для всіх випадків побудувати векторні діаграми напруг і на них показати вектори струмів.

Варіант числових значень величин видається керівником.

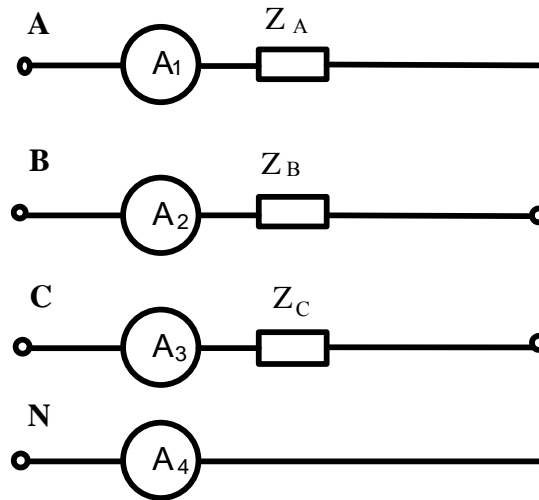


Рисунок 1.1

Таблиця 1.1

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
У <sub>п</sub> , В	220	380	660	127	220	380	660	127	220	380	660
Фаза А	R, Ом	14	18	17	9	7	6	5	12	10	-
	X <sub>L</sub> , Ом	13	8	-	-	-	-	-	7	-	-
	X <sub>C</sub> , Ом	-	-	14	8	8	-	12	-	12	18
з'єднання	парал.	посл.	посл.	парал.	-	посл.	-	парал.	парал.	посл.	-
Фаза В	R, Ом	12	6	19	12	10	13	8	11	14	18
	X <sub>L</sub> , Ом	-	-	6	9	9	-	-	8	-	6
	X <sub>C</sub> , Ом	-	14	-	-	-	7	8	10	-	-
з'єднання	-	посл.	-	посл.	парал.	посл.	посл.	посл.	парал.	-	посл.
Фаза С	R, Ом	12	8	13	8	11	12	14	12	10	9
	X <sub>L</sub> , Ом	-	-	-	-	-	10	-	-	11	8
	X <sub>C</sub> , Ом	20	-	-	-	-	-	-	12	16	-
з'єднання	парал.	-	посл.	-	посл.	-	посл.	-	посл.	посл.	парал.
Аварійний режим	“b”	обрив “a”	обрив “a”	обрив “c”	обрив “a”	обрив “b”	обрив “c”	обрив “a”	обрив “b”	обрив “c”	обрив “a”
	“c” і N <sub>n</sub>	обрив “a” і N <sub>n</sub>	обрив “b” і N <sub>n</sub>	обрив “c” і N <sub>n</sub>	обрив “b” і N <sub>n</sub>	обрив “c” і N <sub>n</sub>	обрив “a” і N <sub>n</sub>	обрив “b” і N <sub>n</sub>	обрив “c” і N <sub>n</sub>	обрив “a” і N <sub>n</sub>	обрив “c” і N <sub>n</sub>
	кз b і об. N <sub>n</sub>	кз c і об. N <sub>n</sub>	кз a і об. N <sub>n</sub>	кз b і об. N <sub>n</sub>	кз c і об. N <sub>n</sub>	кз a і об. N <sub>n</sub>	кз b і об. N <sub>n</sub>	кз a і об. N <sub>n</sub>	кз b і об. N <sub>n</sub>	кз c і об. N <sub>n</sub>	кз b і об. N <sub>n</sub>

Продовження таблиці 1.1

Варіант	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
U <sub>п</sub> , В	127	220	380	660	127	220	380	660	127	220	380	
Фаза А	R, Ом X <sub>L</sub> , Ом X <sub>C</sub> , Ом	- 15 -	15 - 13	15 - 14	- - 16	12 6 -	18 - -	16 - 18	19 - -	14 - -	14 - 13	16 8 -
з'єднання	парал.	-	посл.	парал.	-	парал.	-	парал.	посл.	парал.	посл.	
Фаза В	R, Ом X <sub>L</sub> , Ом X <sub>C</sub> , Ом	10 6 16	6 19 -	15 14 -	2 - 8	12 16 -	- - 19	18 - -	2 16 -	16 19 -	15 16 -	
з'єднання	посл.	посл.	-	посл.	парал.	посл.	-	-	посл.	посл.	парал.	
Фаза С	R, Ом X <sub>L</sub> , Ом X <sub>C</sub> , Ом	15 - -	9 - 12	3 7 -	5 - 4	2 6 -	10 17 8	4 - 9	16 - -	- - 15	- 17 -	
з'єднання	-	посл.	посл.	парал.	посл.	парал.	посл.	посл.	-	-	-	
Аварійний режим	обрив "а" обрив "с" i N <sub>n</sub> кз с і об. N <sub>n</sub>	обрив "б" обрив "б" i N <sub>n</sub> кз а і об. N <sub>n</sub>	обрив "с" обрив "а" i N <sub>n</sub> кз b і об. N <sub>n</sub>	обрив "а" обрив "б" i N <sub>n</sub> кз b і об. N <sub>n</sub>	обрив "б" обрив "с" i N <sub>n</sub> кз с і об. N <sub>n</sub>	обрив "а" обрив "б" i N <sub>n</sub> кз а і об. N <sub>n</sub>	обрив "б" обрив "б" i N <sub>n</sub> кз с і об. N <sub>n</sub>	обрив "с" обрив "с" i N <sub>n</sub> кз а і об. N <sub>n</sub>	обрив "а" обрив "а" i N <sub>n</sub> кз а і об. N <sub>n</sub>	обрив "б" обрив "б" i N <sub>n</sub> кз с і об. N <sub>n</sub>	обрив "с" обрив "с" i N <sub>n</sub> кз а і об. N <sub>n</sub>	

Продовження таблиці 1.1

Варіант	23	24	25	26	27	28	29	30	31
U <sub>п</sub> , В	660	127	220	380	660	127	220	660	660
Фаза А	R, Ом	12	17	18	15	19	16	15	17
	X <sub>L</sub> , Ом	-	-	16	-	19	-	-	18
	X <sub>C</sub> , Ом	-	17	-	18	-	-	7	-
з'єднання	-	посл.	парал.	посл.	парал.	посл.	-	посл.	парал.
Фаза В	R, Ом	16	-	19	15	-	14	16	-
	X <sub>L</sub> , Ом	19	-	17	-	19	-	5	16
	X <sub>C</sub> , Ом	-	18	-	-	6	-	-	-
з'єднання	парал	-	посл	-	парал.	-	-	посл.	-
Фаза С	R, Ом	15	16	-	18	14	14	15	-
	X <sub>L</sub> , Ом	-	13	-	-	6	-	13	16
	X <sub>C</sub> , Ом	17	-	17	19	-	19	-	6
з'єднання	парал.	посл.	-	парал.	-	посл.	парал.	-	посл.
Аварійний режим	обрив “b”	обрив “c”	обрив “a”	обрив “c”	обрив “a”	обрив “b”	обрив “c”	обрив “a”	обрив “b”
	обрив “b” і N <sub>n</sub>	обрив “c” і N <sub>n</sub>	обрив “b” і N <sub>n</sub>	обрив “a” і N <sub>n</sub>	обрив “a” і N <sub>n</sub>	обрив “a” і N <sub>n</sub>	обрив “c” і N <sub>n</sub>	обрив “a” і N <sub>n</sub>	обрив “c” і N <sub>n</sub>
	кз b і об. N <sub>n</sub>	кз c і об. N <sub>n</sub>	кз c і об. N <sub>n</sub>	кз об. N <sub>n</sub>	кз c і об. N <sub>n</sub>	кз a і об. N <sub>n</sub>	кз a і об. N <sub>n</sub>	кз b і об. N <sub>n</sub>	кз і a об. N <sub>n</sub>



## 2 Методичні вказівки до розв'язання завдання

### 2.1 Застосування символічного методу для аналізу та розрахунку кіл синусоїдного змінного струму

Символічний метод дає змогу замінити геометричні дії над векторами на алгебраїчні. При цьому розрахунок кіл змінного струму роблять так само, як і постійного. Також цей метод називають методом комплексних величин, тому що, наприклад, вектор  $\underline{E}$  (ЕРС джерела) розглядається як величина комплексна (рисунок 2.1). Цей вектор розкладається на складові  $\mathbf{a}$  – дійсне число,  $\mathbf{j}\mathbf{b}$  – уявне число. Уявне число є добутком дійсного числа  $\mathbf{b}$  на уявну одиницю  $\mathbf{j}$ , де  $\mathbf{j} = \sqrt{-1}$ . Тоді записуємо, що  $\underline{E} = \mathbf{a} + \mathbf{j}\mathbf{b}$ . Це алгебраїчна форма запису комплексної величини.

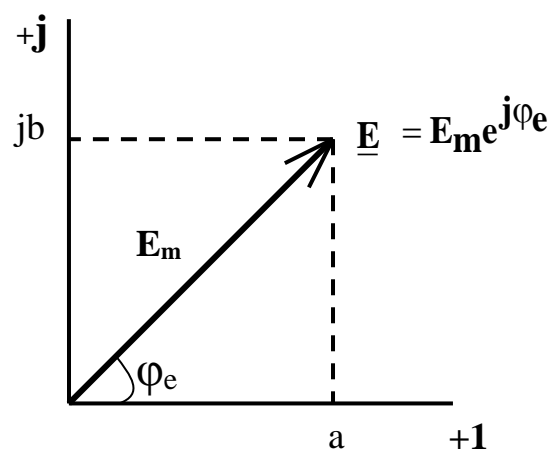


Рисунок 2.1

Якщо записати миттєве значення ЕРС так:

$$e_M = E_m \sin(\omega t + \varphi_e),$$

де  $e_M$  – миттєве значення ЕРС;

$\omega$  – кутова частота;

$E_m$  – амплітудне значення ЕРС;

$\varphi_e$  – початкова фаза,

то комплексне значення ЕРС має такий вигляд:  $\underline{E} = E_m e^{j\varphi_e}$  (показникова форма запису).

Аналогічно миттєве значення струму  $i = I_m \sin(\omega \cdot t + \varphi_i)$  як  $\underline{I} = I_m e^{j\varphi_i}$ , а напруги –  $u = U_m \sin(\omega \cdot t + \varphi_u)$ , таким чином,  $\underline{U} = U_m e^{j\varphi_u}$ .

Кожному вектору на комплексній площі відповідає певне комплексне число, яке може бути записане в показниковій або алгебраїчній формі. Перехід від показникової до алгебраїчної форми запису здійснюється за формулою

$$\underline{E}_m e^{j\varphi_e} = E_m \cos(\varphi_e) + jE_m \sin(\varphi_e) = \mathbf{a} + j\mathbf{b}. \quad (2.1)$$

Щоб перейти, навпаки, із алгебраїчної до показникової форми, потрібно спочатку знайти амплітуду  $E_m = \sqrt{\mathbf{a}^2 + \mathbf{b}^2}$ , а потім початкову фазу  $\varphi_e = \arctg \frac{\mathbf{b}}{\mathbf{a}}$ .

При послідовному з'єднанні елементів (рисунок 2.2) вектор напруги  $\underline{U}$  на затискачах кола дорівнює геометричній сумі векторів напруг окремих ділянок кола:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C. \quad (2.2)$$



Рисунок 2.2

Із формули (2.2) будують трикутник напруг (рисунок 2.3, а). Модулі векторів напруг, що входять у цей вираз, визначаються за формулами:

$U_R = IR$  – діюча напруга на активному опорі, що збігається за фазою зі струмом;

$U_L = IX_L$  – діюча напруга на індуктивному опорі, що випереджає струм за фазою на кут  $\pi/2$ ;

$U_C = IX_C$  – діюча напруга на ємнісному опорі, що відстає від струму за фазою на кут  $\pi/2$ .

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2} = \sqrt{U_a^2 + U_p^2},$$

де  $U_a = IR$  – активна складова напруги;

$U_p = U_L - U_C = I(X_L - X_C)$  – реактивна складова напруги.

Повний опір при послідовному сполученні має такий вигляд:

$$\underline{Z} = R + (jX_L - jX_C),$$

де  $X_L = \omega L$ ,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$ .

Для цієї величини будують трикутник опорів (рисунок 2.3, б).  
Струм при такому з'єднанні, за законом Ома,

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

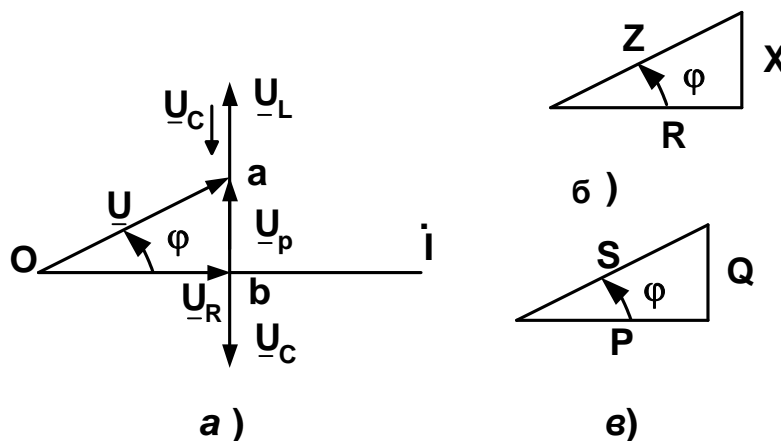


Рисунок 2.3

Помноживши сторони трикутника напруг на струм, одержимо трикутник потужностей (рисунок 2.3, в). З трикутника потужностей маємо:

$P = U_R I = UI \cos \varphi = I^2 R$  – активна потужність кола, Вт;

$Q = Q_L - Q_C = U_P I = UI \sin \varphi = I^2 X$  – реактивна потужність кола, ВАр;

$S = UI = I^2 Z = \sqrt{P^2 + Q^2}$  – повна потужність кола, ВА.

При перемноженні або діленні комплексних величин застосовують показникову форму запису

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{U \cdot e^{j\varphi_U}}{|Z| \cdot e^{j\varphi}} = \frac{U}{|Z|} \cdot e^{j(\varphi_U - \varphi)},$$

$$\underline{S} = \underline{U} \cdot \underline{I}'' = U \cdot e^{-j\varphi_I} = U \cdot I \cdot e^{j(\varphi_U - \varphi_I)},$$

де  $\underline{S}$  – повна потужність кола в символічній формі;

$\underline{I}''$  – спряжений комплекс діючого значення струму.

Для того щоб додати або відняти, застосовують алгебраїчну форму запису.

Якщо

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 3 - j12 \text{ Ом} \quad \text{та} \quad \underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2} = 4 - j10 \text{ Ом},$$

то 
$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = 7 - j22 \text{ Ом}.$$

При паралельному з'єднанні елементів (рисунок 2.4) знаходимо повний опір таким чином: спочатку записуємо чому дорівнює  $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L1}$  та  $\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2}$ , а потім еквівалентний опір кола

$$\underline{Z}_E = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

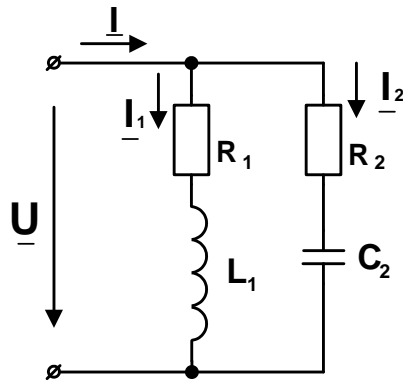


Рисунок 2.4

## 2.2 Трифазне коло, з'єднане «зіркою» в нормальному та аварійних режимах

Трифазне коло є сукупністю трьох електричних кіл, у яких діють синусоїдні ЕРС, однакові за частотою та амплітудою, що створюються спільним джерелом, зсунуті за фазою одна відносно одної на  $120^{\circ}$ . Трифазне коло складається з трифазного генератора, проводів для сполучення і приймачів або навантаження, які можуть бути однофазними чи трифазними. Трифазний генератор є синхронною машиною. На статорі генератора розміщена обмотка, що складається з трьох частин або фаз, просторово зміщених одна відносно одної на  $120^{\circ}$ . У фазах генератора індукуються симетрична трифазна система ЕРС, у якій електрорушійні сили однакові за амплітудою і розрізняються за фазою на  $120^{\circ}$ . Запишемо миттєві значення і комплекси діючих ЕРС:

$$e_A = E_m \cdot \sin \omega t, \quad e_B = E_m \cdot \sin(\omega t - 120^{\circ}),$$

$$e_C = E_m \cdot \sin(\omega t - 240^{\circ}) = E_m \cdot \sin(\omega t + 120^{\circ}).$$

$$\underline{E}_{mA} = E_m e^{j0^{\circ}}, \quad \underline{E}_{mB} = E_m e^{-j120^{\circ}}, \quad \underline{E}_{mC} = E_m e^{j120^{\circ}}.$$

Сума електрорушійних сил симетричної трифазної системи в будь-який момент часу дорівнює нулю:

$$e_A + e_B + e_C = 0, \quad \underline{E}_{mA} + \underline{E}_{mB} + \underline{E}_{mC} = 0.$$

Зі схеми на рисунку 2.5 видно, що при з'єднанні приймача «зіркою» фазні і лінійні струми рівні між собою. При симетричному навантаженні струми у фазах рівні і зсунуті на той самий кут відносно відповідних фазних напруг.

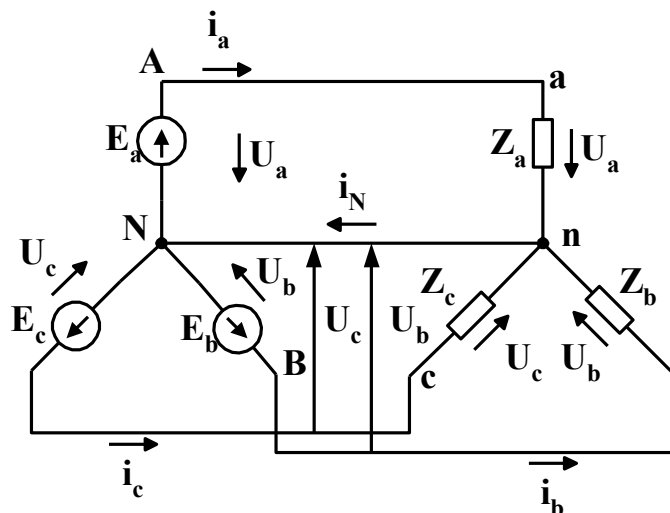


Рисунок 2.5

Векторна діаграма напруги і струмів при симетричному навантаженні зображена на рисунку 2.6.

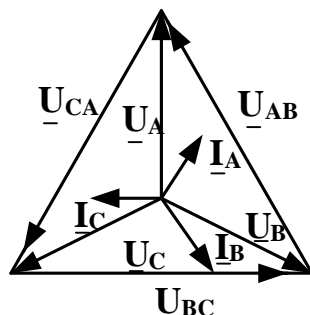


Рисунок 2.6

З діаграми видно, що  $\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = \mathbf{0}$ , тобто при симетричному навантаженні струм у нейтральному проводі дорівнює нулю і необхідність у цьому проводі відпадає.

Трифазне коло без нейтрального проводу буде трипроводним (рисунку 2.7).

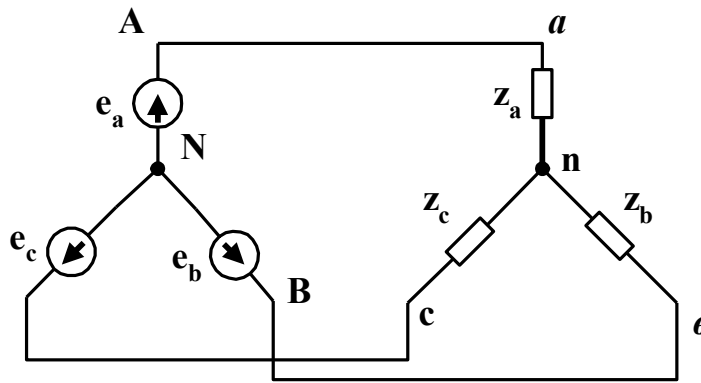


Рисунок 2.7

З векторної діаграми (рисунок 2.6) видно, що при з'єднанні «зіркою» симетричних (трифазних) приймачів

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \quad \text{і} \quad I_{\phi} = I_{\text{л}}.$$

Для визначення струмів при симетричному навантаженні досить визначити струм в одній з фаз, що входять у трифазне коло. У трипровідне коло при з'єднанні «зіркою» вмикаються тільки симетричні трифазні приймачі: електричні двигуни, електричні печі і т. п.

При побудові векторних діаграм для трифазних кіл за вихідні приймаються вектори лінійних напруг  $\underline{U}_{AB}$ ,  $\underline{U}_{BC}$ ,  $\underline{U}_{CA}$ . Система цих напруг задається джерелом електричної енергії. Вона симетрична і на векторній діаграмі утворить рівносторонній трикутник ABC. Вектори фазних напруг  $\underline{U}_A$ ,  $\underline{U}_B$ ,  $\underline{U}_C$  зображуються таким чином, щоб виконувалися векторні співвідношення

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B, \\ \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C, \\ \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A. \end{aligned}$$

При цьому точка N знаходиться в центрі трикутника ABC. Вектори фазних струмів  $\underline{I}_A$ ,  $\underline{I}_B$ ,  $\underline{I}_C$  направляють під кутами  $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$  до векторів відповідних фазних напруг.

При несиметричному навантаженні (рисунок 2.7), завдяки нейтральному проводу, напруги на кожній з фаз приймача будуть

незмінними і рівними відповідним фазним напругам джерела живлення як за величиною, так і за фазою.

При цьому струми у фазах будуть різними і через нейтральний провід буде протікати струм  $\underline{I}_N \neq 0$ . Отже, нейтральний провід забезпечує симетрію фазних напруг приймача при несиметричних приймачах.

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C.$$

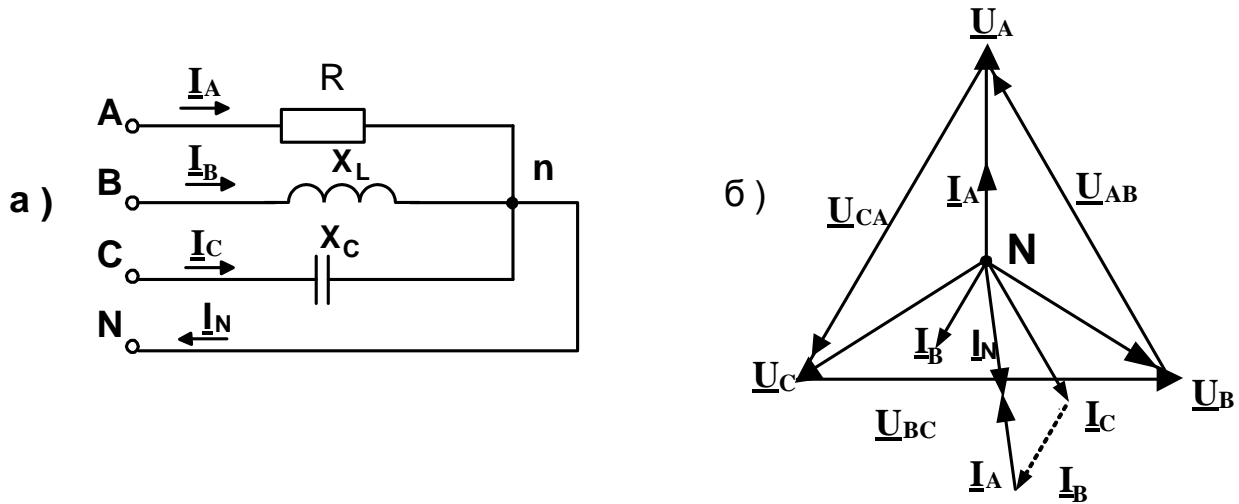


Рисунок 2.8 – Схема ввімкнення несиметричного приймача (а), векторна діаграма напруги і струмів (б)

Тому в чотирипровідну мережу вмикають однофазні несиметричні приймачі (наприклад, лампи розжарювання), і режим роботи кожної фази приймача, що знаходиться під незмінною фазною напругою джерела живлення, не буде залежати від режиму роботи інших фаз. Видно, що струми в кожній з фаз можна визначити за формулами, що раніше наводилися, наприклад  $\underline{I}_A = \underline{U}_A / \underline{Z}_A$ .

У випадку обриву нейтрального проводу і несиметричному навантаженні між нейтральними точками генератора і приймача виникає напруга зсуву нейтралі  $U_{nN}$ , що викликає перекид фазних напруг на приймачах. Тому в нейтральний провід не вмикають ні плавкі запобіжники, ні рубильники, ні вимикачі.

Для визначення  $U_{nN}$  можна користуватися формулою вузлової напруги



$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

де  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$  – комплексні провідності фаз навантаження,

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A}, \quad \underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_B}, \quad \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_C}.$$

Знаючи  $\underline{U}_{nN}$ , можна визначити фазні напруги приймачів і розрахувати струми, які протікають через них.

Фазні напруги і струми приймачів будуть відповідно такими:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN},$$

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_A} = \underline{U}_a \underline{Y}_A; \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_B} = \underline{U}_b \underline{Y}_B; \quad \underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_C} = \underline{U}_c \underline{Y}_C.$$

За відомими  $\underline{U}_a, \underline{U}_b, \underline{U}_c, \underline{U}_{nN}$  та  $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$  можна побудувати векторну діаграму напруги і струмів для цього випадку (рисунок 2.9).

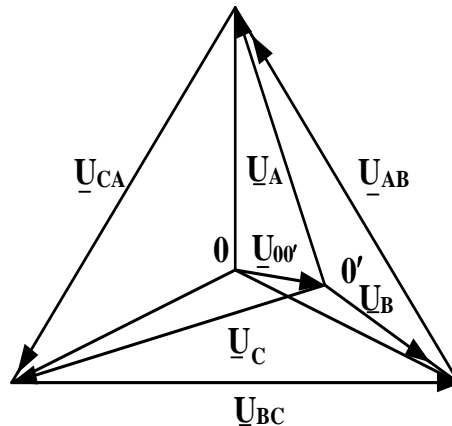


Рисунок 2.9 – Векторна діаграма при зсуві нейтралі

При короткому замиканні фази А (трипровідна система) має місце векторна діаграма рисунка 2.10. З неї випливає

$$\underline{U}_{BN'} = \sqrt{3} U_\phi e^{-j150^\circ}; \quad \underline{U}_{CN'} = \sqrt{3} U_\phi e^{j150^\circ};$$

$$\underline{I}_B = \sqrt{3} I_\phi e^{j(150^\circ + \varphi)}; \quad \underline{I}_C = \sqrt{3} I_\phi e^{j(150^\circ - \varphi)}; \quad \underline{I}_A = 3 I_\phi e^{-j\varphi}.$$

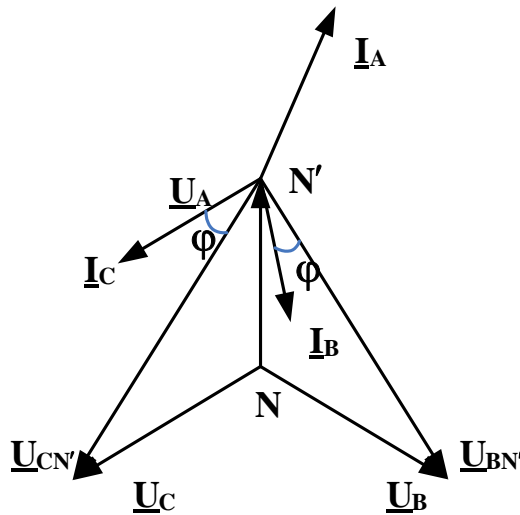
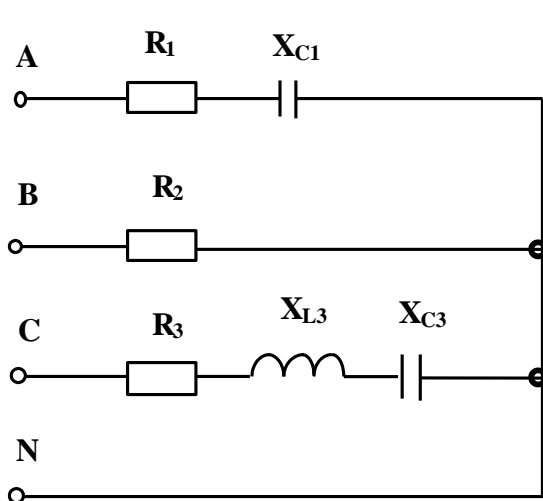


Рисунок 2.10

### 2.3 Приклад розрахунку трифазного кола

Нехай задана схема, зображена на рисунку 2.11.



Вихідні дані:  $U_{л}=220$  В,  
 $R_1=8$  Ом,  $X_{C1}=6$  Ом,  
 $R_2=7$  Ом,  $R_3=9$  Ом,  
 $X_{L3}=4$  Ом,  $X_{C3}=5$  Ом.

Рисунок 2.11

### Розрахунок трифазного кола при симетричній системі напруг

Визначаємо діюче значення фазної напруги джерела та записуємо в комплексній формі напруги фаз:

$$U_{\Phi} = \frac{U_{\text{Л}}}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127,02 \text{ В},$$

$$\underline{U}_A = U_{\Phi} \cdot e^{j0^\circ} = 127,02 \cdot e^{j0^\circ} = 127,02 \text{ В},$$

$$\underline{U}_B = U_{\Phi} \cdot e^{-j120^\circ} = 127,02 \cdot e^{-j120^\circ} = -63,51 - j110 \text{ В},$$

$$\underline{U}_C = U_{\Phi} \cdot e^{j120^\circ} = 127,02 \cdot e^{j120^\circ} = -63,51 + j110 \text{ В}.$$

Визначаємо комплексні опори навантаження у фазах:

$$\underline{Z}_A = \sqrt{R_A^2 + X_A^2} \cdot e^{j \arctg \frac{X_A}{R_A}} = Z_A \cdot e^{j\phi_A} = \sqrt{8^2 + (-6)^2} \cdot e^{j \arctg \frac{-6}{8}} = 10 \cdot e^{-j36,87^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_B = \sqrt{R_B^2 + X_B^2} \cdot e^{j \arctg \frac{X_B}{R_B}} = Z_B \cdot e^{j\phi_B} = \sqrt{7^2} \cdot e^{j \arctg \frac{0}{7}} = 7 \cdot e^{j0^\circ} \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_C = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \cdot e^{j \arctg \frac{X_C}{R_C}} = Z_C \cdot e^{j\phi_C} = \sqrt{9^2 + (4-5)^2} \cdot e^{j \arctg \frac{4-5}{9}} = 9,06 \cdot e^{-j6,34^\circ} \text{ Ом}.$$

Визначаємо фазні струми за законом Ома:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A} = I_A \cdot e^{j\phi_A} = I_{Aa} + jI_{Ap} = \frac{127,02 \cdot e^{j0^\circ}}{10 \cdot e^{-j36,87^\circ}} = 12,7 \cdot e^{j36,87^\circ} = 10,16 + j7,62 \text{ А},$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B} = I_B \cdot e^{j\phi_B} = I_{Ba} + jI_{Bp} = \frac{127,02 \cdot e^{-j120^\circ}}{7 \cdot e^{j0^\circ}} = 18,15 \cdot e^{-j120^\circ} = -9,08 - j15,7 \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C} = I_C \cdot e^{j\phi_C} = I_{Ca} + jI_{Cp} = \frac{127,02 \cdot e^{j120^\circ}}{9,06 \cdot e^{-j6,34^\circ}} = 14,02 \cdot e^{j126,34^\circ} = -8,31 + j11,29 \text{ А}.$$

Обчислюємо струм у нульовому провіді за першим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0 &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = (I_{Aa} + I_{Ba} + I_{Ca}) + j(I_{Ap} + I_{Bp} + I_{Cp}) = I_0 \cdot e^{j\phi_0} = \\ &= (10,16 - 9,08 - 8,31) + j(7,62 - 15,7 + 11,29) = -7,23 + j3,21 = 7,91 \cdot e^{j156,06^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Знаходимо показання амперметрів (вони вимірюють діючі значення струмів):

$$I_{A1}=12,7 \text{ А}, I_{A2}=18,15 \text{ А}, I_{A3}=14,02 \text{ А}, I_{A4}=7,91 \text{ А}.$$

Обчислюємо активну, реактивну, повну потужності кожної фази і всієї системи живлення.

Активна потужність:

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A = 12,7^2 \cdot 8 = 1290,32 \text{ Вт},$$

$$P_B = I_B^2 \cdot R_B = 18,15^2 \cdot 7 = 2305,96 \text{ Вт},$$

$$P_C = I_C^2 \cdot R_C = 14,02^2 \cdot 9 = 1769,04 \text{ Вт}.$$

Реактивна потужність:

$$Q_A = I_A^2 \cdot X_A = 12,7^2 \cdot (-6) = -967,74 \text{ ВАр},$$

$$Q_B = I_B^2 \cdot X_B = 18,15^2 \cdot 0 = 0 \text{ ВАр},$$

$$Q_C = I_C^2 \cdot X_C = 14,02^2 \cdot (-1) = -196,56 \text{ ВАр}.$$

Сумарні потужності трифазної системи:

$$P_{3\Phi} = P_A + P_B + P_C = 1290,32 + 2305,96 + 1769,04 = 5365,32 \text{ Вт},$$

$$Q_{3\Phi} = Q_A + Q_B + Q_C = -967,74 - 196,56 = -1164,3 \text{ ВАр}.$$

Повна потужність трифазної системи живлення:

$$S_{3\Phi} = \sqrt{P_{3\Phi}^2 + Q_{3\Phi}^2} = \sqrt{(5365,32)^2 + (-1164,3)^2} = 5490,2 \text{ ВА}.$$

Будуємо векторну діаграму напруг і струмів (рисунок 2.12).

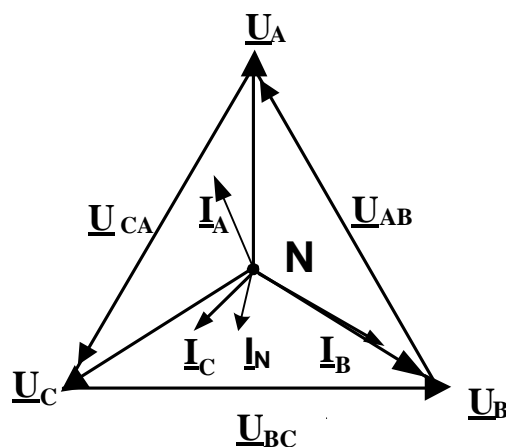


Рисунок 2.12

## Розрахунок трифазного кола при обриві фази А

Визначаємо фазні струми:

$$\underline{I}_A = 0,$$

$$\underline{I}_B = 18,15 \cdot e^{-j120^\circ} = -9,08 - j15,7 \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = 14,02 \cdot e^{j126,34^\circ} = -8,31 + j11,29 \text{ А}.$$

Обчислюємо струм у нульовому проводі за першим законом Кірхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0 &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = (\underline{I}_{Aa} + \underline{I}_{Ba} + \underline{I}_{Ca}) + j(\underline{I}_{Ap} + \underline{I}_{Bp} + \underline{I}_{Cp}) = \underline{I}_0 \cdot e^{j\phi_1} = \\ &= (0 - 9,08 - 8,31) + j(0 - 15,7 + 11,29) = -17,39 - j4,41 = 25 \cdot e^{-j166^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Знаходимо показання амперметрів (вони вимірюють діючі значення струмів):

$$I_{A1}=0 \text{ А}, \quad I_{A2}=18,15 \text{ А}, \quad I_{A3}=14,02 \text{ А}, \quad I_{A4}=25 \text{ А}.$$

Обчислюємо активну, реактивну, повну потужності кожної фази і всієї системи живлення.

Активна потужність:

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A = 0^2 \cdot 8 = 0 \text{ Вт},$$

$$P_B = I_B^2 \cdot R_B = 18,15^2 \cdot 7 = 2305,96 \text{ Вт},$$

$$P_C = I_C^2 \cdot R_C = 14,02^2 \cdot 9 = 1769,04 \text{ Вт}.$$

Реактивна потужність:

$$Q_A = I_A^2 \cdot X_A = 0^2 \cdot (-6) = 0 \text{ ВАр},$$

$$Q_B = I_B^2 \cdot X_B = 18,15^2 \cdot 0 = 0 \text{ ВАр},$$

$$Q_C = I_C^2 \cdot X_C = 14,02^2 \cdot (-1) = -196,56 \text{ ВАр}.$$

Сумарні потужності трифазної системи:

$$P_{3\phi} = P_A + P_B + P_C = 0 + 2305,96 + 1769,04 = 4075 \text{ Вт},$$

$$Q_{3\Phi} = Q_A + Q_B + Q_C = 0 - 196,56 = -196,56 \text{ ВАр.}$$

Повна потужність трифазної системи живлення:

$$S_{3\Phi} = \sqrt{P_{3\Phi}^2 + Q_{3\Phi}^2} = \sqrt{(4075)^2 + (-196,56)^2} = 4079,74 \text{ ВА.}$$

Будуємо векторну діаграму напруг і струмів (рисунок 2.13).

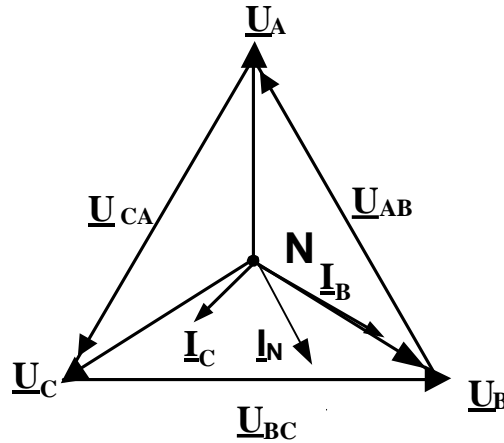


Рисунок 2.13

### Розрахунок трифазного кола при обриві фази А та нейтрального проводу

Обчислюємо напругу між нейтральними точками джерела і навантаження при обриві нейтрального проводу:

$$\underline{U}_{NN'} = \frac{\underline{U}_A \cdot \frac{1}{\underline{Z}_A} + \underline{U}_B \cdot \frac{1}{\underline{Z}_B} + \underline{U}_C \cdot \frac{1}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}}.$$

При обриві фази А

$$\underline{U}_{NN'} = \frac{\underline{U}_B \cdot \frac{1}{\underline{Z}_B} + \underline{U}_C \cdot \frac{1}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}},$$

$$\underline{U}_{NN'} = \frac{127,02 \cdot e^{-j120^\circ} \cdot \frac{1}{7 \cdot e^{j0^\circ}} + 127,02 \cdot e^{j120^\circ} \cdot \frac{1}{9,06 \cdot e^{-j6,34^\circ}}}{\frac{1}{7 \cdot e^{j0^\circ}} + \frac{1}{9,06 \cdot e^{-j6,34^\circ}}} = 69,9 \cdot e^{-j174,4^\circ} = -69,568 - j6,827 \text{ В.}$$

Визначаємо величину фазних напруг споживачів при обриві нейтрального проводу:

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{NN'} = 127,02 - (-69,568 - j6,827) = 196,568 + j6,827 = 196,687e^{j2^\circ} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{NN'} = -63,51 - j110 - (-69,568 - j6,827) = 6,068 - j103,159 = 103,337e^{-j87^\circ} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{00} = -63,51 + j110 - (-69,568 - j6,827) = 6,068 + j116,812 = 116,969e^{j87^\circ} \text{ В.}$$

Визначаємо фазні струми:

$$\underline{I}_A = 0,$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_B} = \frac{103,337 \cdot e^{-j87^\circ}}{7 \cdot e^{j0^\circ}} = 12,917 \cdot e^{-j87^\circ} = 0,759 - j12,895 \text{ А,}$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_C} = \frac{116,969 \cdot e^{j87^\circ}}{9,06 \cdot e^{-j6,34^\circ}} = 12,917 \cdot e^{j93^\circ} = -0,759 + j12,895 \text{ А.}$$

Знаходимо показання амперметрів (вони вимірюють діючі значення струмів):

$$\underline{I}_{A1}=0 \text{ А, } \underline{I}_{A2}=12,917 \text{ А, } \underline{I}_{A3}=12,917 \text{ А, } \underline{I}_{A4}=0 \text{ А.}$$

Обчислюємо активну, реактивну, повну потужності кожної фази і всієї системи живлення.

Активна потужність:

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A = 0^2 \cdot 8 = 0 \text{ Вт,}$$

$$P_B = I_B^2 \cdot R_B = 12,917^2 \cdot 7 = 1167,94 \text{ Вт,}$$

$$P_C = I_C^2 \cdot R_C = 12,917^2 \cdot 9 = 1501,64 \text{ Вт.}$$

Реактивна потужність:

$$Q_A = I_A^2 \cdot X_A = 0^2 \cdot (-6) = 0 \text{ ВАр,}$$

$$Q_B = I_B^2 \cdot X_B = 12,917^2 \cdot 0 = 0 \text{ ВАр},$$

$$Q_C = I_C^2 \cdot X_C = 12,917^2 \cdot (-1) = -166,85 \text{ ВАр}.$$

Сумарні потужності трифазної системи:

$$P_{3\Phi} = P_A + P_B + P_C = 0 + 1167,94 + 1501,64 = 2669,6 \text{ Вт},$$

$$Q_{3\Phi} = Q_A + Q_B + Q_C = 0 + 0 - 166,85 = -166,85 \text{ ВАр}.$$

Повна потужність трифазної системи живлення:

$$S_{3\Phi} = \sqrt{P_{3\Phi}^2 + Q_{3\Phi}^2} = \sqrt{(2669,6)^2 + (-166,85)^2} = 2674,8 \text{ ВА}.$$

Будуємо векторну діаграму напруг і струмів (рисунок 2.14).

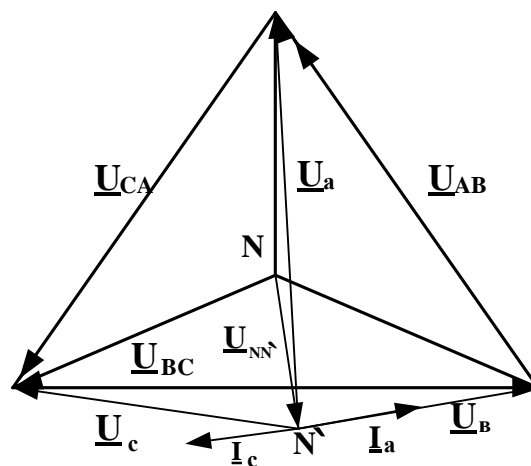


Рисунок 2.10

### Розрахунок трифазного кола при обриві нейтрального проводу та короткому замиканні фази А

При короткому замиканні фази А (трипровідна система) має місце векторна діаграма рисунка 2.15. З неї випливає

$$\underline{U}_{NN'} = \underline{U}_A; \quad \underline{U}_{BN'} = \sqrt{3} U_\phi e^{-j150^\circ}; \quad \underline{U}_{CN'} = \sqrt{3} U_\phi e^{j150^\circ}.$$



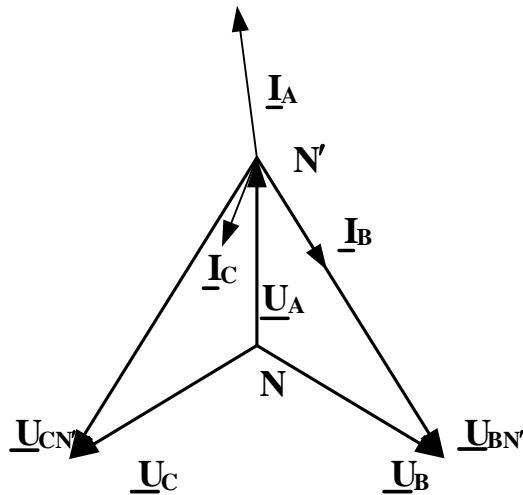


Рисунок 2.15

Визначаємо величину фазних напруг споживачів при обриві нейтрального проводу та короткому замиканні фази А:

$$\underline{U}_{NN'} = 127e^{j0^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BN'} = 220e^{-j150^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{AN'} = 220e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Визначаємо фазні струми:

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_{BN'}}{\underline{Z}_B} = \frac{220 \cdot e^{-j150^\circ}}{7 \cdot e^{j0^\circ}} = 27,5 \cdot e^{-j150^\circ} = -23,8 - j13,8 \text{ А},$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_{CN'}}{\underline{Z}_C} = \frac{220 \cdot e^{j150^\circ}}{9,06 \cdot e^{-j6,34^\circ}} = 24,3 \cdot e^{j156^\circ} = -22,25 + j9,75 \text{ А},$$

$$\underline{I}_A = -(\underline{I}_B + \underline{I}_C) = 46,1 + j4 = 46,2e^{j5^\circ} \text{ А}.$$

Знаходимо показання амперметрів (вони вимірюють діючі значення струмів):

$$I_{A1}=46,2 \text{ А}, I_{A2}=27,5 \text{ А}, I_{A3}=24,3 \text{ А}, I_{A4}=0 \text{ А}.$$

Обчислюємо активну, реактивну, повну потужності кожної фази і всієї системи живлення.

Активна потужність:

$$\begin{aligned}P_A &= I_A^2 \cdot R_A = 46,2^2 \cdot 0 = 0 \text{ Вт}, \\P_B &= I_B^2 \cdot R_B = 27,5^2 \cdot 7 = 5294 \text{ Вт}, \\P_C &= I_C^2 \cdot R_C = 24,3^2 \cdot 9 = 5314 \text{ Вт}.\end{aligned}$$

Реактивна потужність:

$$\begin{aligned}Q_A &= I_A^2 \cdot X_A = 46,2^2 \cdot 0 = 0 \text{ ВАр}, \\Q_B &= I_B^2 \cdot X_B = 27,5^2 \cdot 0 = 0 \text{ ВАр}, \\Q_C &= I_C^2 \cdot X_C = 24,3^2 \cdot (-1) = -591 \text{ ВАр}.\end{aligned}$$

Сумарні потужності трифазної системи:

$$\begin{aligned}P_{3\Phi} &= P_A + P_B + P_C = 0 + 5294 + 5314 = 1061 \text{ Вт}, \\Q_{3\Phi} &= Q_A + Q_B + Q_C = 0 + 0 - 591 = -591 \text{ ВАр}.\end{aligned}$$

Повна потужність трифазної системи живлення:

$$S_{3\Phi} = \sqrt{P_{3\Phi}^2 + Q_{3\Phi}^2} = \sqrt{(1061)^2 + (-591)^2} = 1214 \text{ ВА}.$$

На векторній діаграмі напруг побудуємо вектори струмів (рисунок 2.15).

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Коновалов, Е. В. Студентська навчальна звітність [Текст]/ Е. В. Коновалов, Л. М. Козар. – Харків: УкрДАЗТ, 2005.
- 2 Касаткин, А. С. Электротехника [Текст] / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М.: Высшая школа, 2000.
- 3 Электротехника [Текст] / под ред. В. Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1985.
- 4 Паначевний, Б. І. Загальна електротехніка: теорія і практикум [Текст] / Б. І. Паначевний, Ю. Ф. Свергун. – К.: Каравела, 2004.
- 5 Новиков Ю. Н. Электротехника и электроника [Текст] / Ю. Н. Новиков. – СПб.: Питер, 2005.