

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра «Електротехніка та електричні машини»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни

***«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»***

Харків – 2010

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Електротехніка та електричні

машини” 15 січня 2009 р., протокол № 7.

Методичні вказівки призначені для студентів спеціальності «Теплоенергетика» всіх форм навчання.

Укладачі:

доценти В.С. Блиндюк,
В.В. Пилипенко,
А.А. Прилипко

Рецензент

доц. С.В. Кошевий

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до практичних занять з дисципліни
«Електротехніка, електроніка та
електропостачання»

Відповідальний за випуск Прилипко А.А.

Редактор Еткало О.О.

Підписано до друку 29.04.09 р.
Формат паперу 60x84 1/16 . Папір писальний.
Умовн.-друк.арк. 2,5. Обл.-вид.арк. 2,75.
Замовлення № Тираж 100. Ціна

Видавництво УкрДАЗТу, свідоцтво ДК № 2874 від. 12.06.2007 р.
Друкарня УкрДАЗТу,
61050, Харків - 50, майд. Фейербаха, 7

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кафедра електротехніки та електричних машин

Методичні вказівки
до практичних занять з дисципліни «Електротехніка,
електроніка та електропостачання» для студентів спеці-
альності
«Теплоенергетика» всіх форм навчання

Харків 2010

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Електротехніка та електричні машини” 15 січня 2009 р., протокол № 7.

Укладачі:

доценти В.С. Блиндюк,
В.В. Пилипенко,
А.А. Прилипко

Рецензент

доц. С.В. Кошевий

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО ПРОВЕДЕННЯ ПРАКТИЧНИХ ЗАНЯТЬ

Одним з основних видів занять з курсу «Електротехніка, електроніка та електропостачання» є розв'язання задач на практичних заняттях. Пропоновані у методичних вказівках завдання охоплюють увесь матеріал курсу і відповідають типовій програмі.

При вивченні курсу студенти отримують необхідні знання з основних методів розрахунку, з якими доводиться зустрічатись у курсі «Електротехніка, електроніка та електропостачання». Метою практичних занять є засвоєння студентами відповідних розділів курсу.

Студенти повинні завчасно готуватися до практичних занять, згідно з планом. При необхідності їх кількість і тематика можуть бути відкориговані згідно з навчальним планом. Підготовка складається з вивчення відповідних розділів теоретичного курсу за конспектами лекцій і навчальної літератури. На практичних заняттях усім студентам необхідно мати калькулятор.

З кожної теми практичних занять надається приклад розв'язання типової задачі, потім студенти самостійно розв'язують задачі, а у кінці занять здають пророблений матеріал на перевірку викладачеві.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 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 таким же чином, як і постійного. Також цей метод називають методом комплексних величин, тому що наприклад вектор \dot{E} (ЕРС джерела) розглядається як величина комплексна (рисунок 1.1). Цей вектор розкладається на складові a – дійсне число, jb – уявне число. Уявне число є добуток дійсного числа b на уявну одиницю j , де $j = \sqrt{-1}$. Тоді записуємо, що $\dot{E} = a + jb$. Це алгебраїчна форма запису комплексної величини.

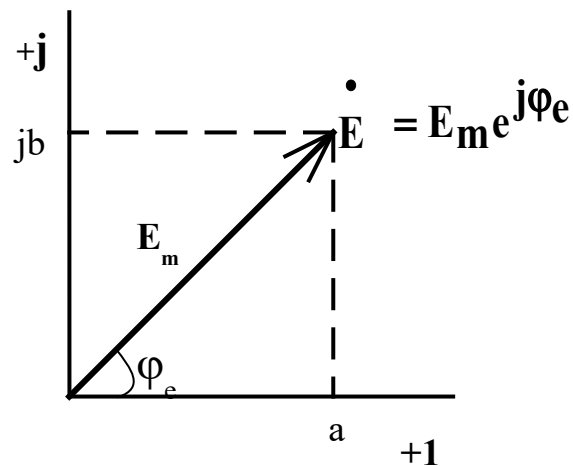


Рисунок 1.1

Якщо записати миттєве значення ЕРС таким чином:

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

де e_M – миттєве значення ЕРС;

ω - кутова частота;
 E_m - амплітудне значення ЕРС;
 φ_e - початкова фаза.

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

Аналогічно миттєве значення струму $i = I_m \sin(\omega \cdot t + \varphi_i)$ записується в такому вигляді $\dot{I} = I_m e^{j\varphi_i}$, а напруги $-u = U_m \sin(\omega \cdot t + \varphi_u)$, таким чином, $\dot{U} = U_m e^{j\varphi_u}$.

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

$$E_m e^{j\varphi_e} = E_m \cos(\varphi_e) + j E_m \sin(\varphi_e) = a + jb. \quad (1.1)$$

Щоб перейти навпаки із алгебраїчної до показникової форми потрібно спочатку знайти амплітуду

$$E_m = \sqrt{a^2 + b^2}, \text{ а потім початкову фазу } \varphi_e = \arctg \frac{b}{a}.$$

Аналіз кіл змінного струму

При послідовному з'єднанні елементів (рисунок 1.2) вектор напруги \dot{U} на затискачах кола дорівнює геометричній сумі векторів напруг окремих ділянок кола:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C. \quad (1.2)$$



Рисунок 1.2

Із формули (1.2) будують трикутник напруг (рисунок 1.3, а). Модулі векторів напруг, що входять у цей вираз, визначаються за формулами:

$U_R = IR$ - діюча напруга на активному опорі, що збігається по фазі зі струмом;

$U_L = IX_L$ - діюча напруга на індуктивному опорі, що випереджає струм по фазі на кут $\pi/2$;

$U_C = IX_C$ - діюча напруга на ємнісному опорі, що відстає від струму по фазі 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 1.3, б).

Струм при такому з'єднанні за законом Ома дорівнює такій величині:

$$\underline{i} = \frac{\underline{\dot{U}}}{\underline{Z}}$$

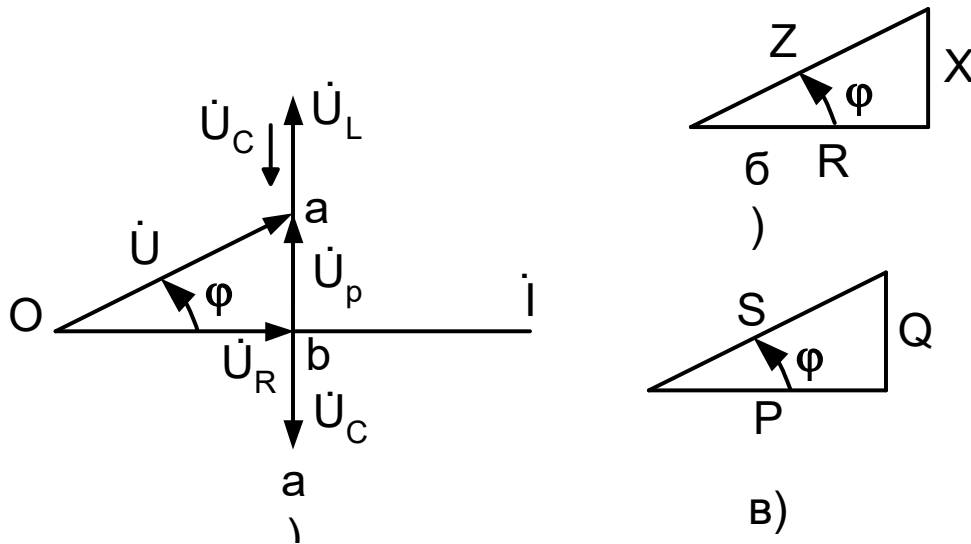


Рисунок 1.3

Помноживши сторони трикутника напруг на струм, одержимо трикутник потужностей (рисунок 1.3, в). З трикутника потужностей маємо:

$$P = U_R I = UI \cos \varphi = I^2 R \text{ - активна потужність кола, Вт;}$$

$$Q = Q_L - Q_C = U_p I = UI \sin \varphi = I^2 X \text{ - реактивна потужність кола, ВАр;}$$

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

При перемноженні або діленні комплексних величин застосовують показникову форму запису:

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

$$\tilde{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{U}} \cdot \dot{\mathbf{i}}^* = \mathbf{U} \cdot e^{-j\varphi_1} = \mathbf{U} \cdot \mathbf{I} \cdot e^{j(\varphi_U - \varphi_1)}.$$

де $\tilde{\mathbf{S}}$ - повна потужність кола у символічній формі;

$\dot{\mathbf{i}}^*$ - спряжений комплекс діючого значення струму.

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

Якщо

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

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

При паралельному з'єднанні елементів (рисунок 1.4) 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

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

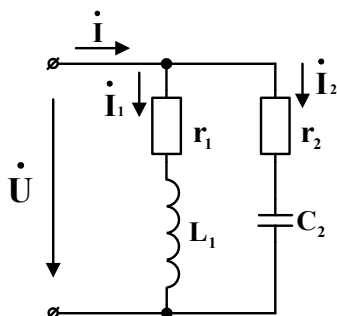


Рисунок 1.4

Приклад розрахунку електричних схем змінного струму із застосуванням символічного методу

Приклад 1.1

Дано:

Схема для розрахунку (рису-

$$U_m = 141,421 \text{ В}$$

$$\varphi = -45$$

$$R_1 = 3 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 4 \text{ Ом}$$

$$X_{C1} = 9 \text{ Ом}$$

$$X_{C2} = 7 \text{ Ом}$$

Знайти:

показання приладів;

закон зміни струму в колі;

закон зміни напруги в колі.

Побудувати векторну діаграму.

Розрахунки проводити символічним методом.

НОК 1.5)

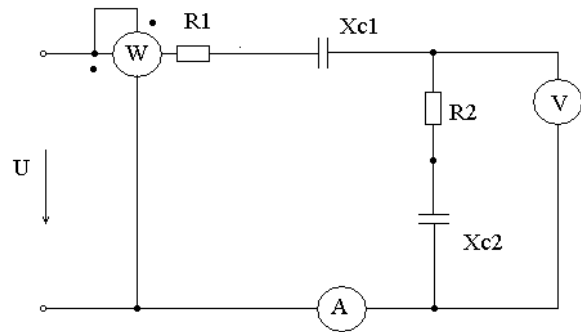


Рисунок 1.5

Розв'язання

Комплексні опори:

$$\underline{Z}_1 = R_1 - jX_{C1} = 3 - j9 = 9,487 e^{-j71,565} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C2} = 4 - j7 = 8,062 e^{-j60,255} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = 7 - j16 = 17,464 e^{-j66,371} \text{ Ом};$$

$$\varphi = \text{Arg}(\underline{Z}) = -66,371;$$

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 100 \text{ В.}$$

Комплекс напруги на вході

$$\dot{U} = 100 \cdot e^{-j45} \text{ В.}$$

Знаходимо комплекс струму за законом Ома

$$\dot{\mathbf{i}} = \frac{\dot{\mathbf{U}}}{\underline{\mathbf{Z}}_1} = 5.726 \cdot e^{j21.371} \text{ A.}$$

Знаходимо активну потужність

$$\mathbf{P} = \mathbf{U} \mathbf{I} \cos(\varphi) = 229,507 \text{ Вт.}$$

Показання приладів:

- амперметра **5,726A**
- вольтметра **100В**
- ватметра **229,507Вт**

Закон зміни струму

$$\mathbf{I}_M = \mathbf{I} \cdot \sqrt{2} = 8,098 \text{ A} \quad \varphi_1 = 21,371;$$

тоді $\mathbf{i}(t) = 8,098 \sin(\omega t + 21,371) \text{ A.}$

Закон зміни напруги

$$\mathbf{u}(t) = 100 \sin(\omega t - 45) \text{ В.}$$

Будуємо векторну діаграму (рисунок 1.6):

$$\dot{\mathbf{U}} = 100 \cdot e^{-j45} \text{ В} \quad \dot{\mathbf{i}} = 5.726 \cdot e^{j21.371} \text{ А}; \quad \dot{\mathbf{U}}_{R1} = \dot{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{R}_1 = 17.178 \cdot e^{j21.371} \text{ А};$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{R2} = \dot{\mathbf{i}} \cdot \mathbf{R}_2 = 22,904 \cdot e^{j21.371} \text{ А}; \quad \dot{\mathbf{U}}_{C1} = \dot{\mathbf{i}} \cdot (-j\mathbf{X}_{C1}) = 51.534 \cdot e^{-j68.629} \text{ А};$$

$$\dot{\mathbf{U}}_{C2} = \dot{\mathbf{i}} \cdot (-j\mathbf{X}_{C2}) = 40.082 \cdot e^{-j68.629} \text{ А};$$

$$\dot{\mathbf{U}}_1 = \dot{\mathbf{U}}_{R1} + \dot{\mathbf{U}}_{C1} = 54.321 \cdot e^{-j50.194} \text{ В};$$

$$\dot{\mathbf{U}}_2 = \dot{\mathbf{U}}_{R2} + \dot{\mathbf{U}}_{C2} = 46.164 \cdot e^{-j38.884} \text{ В.}$$

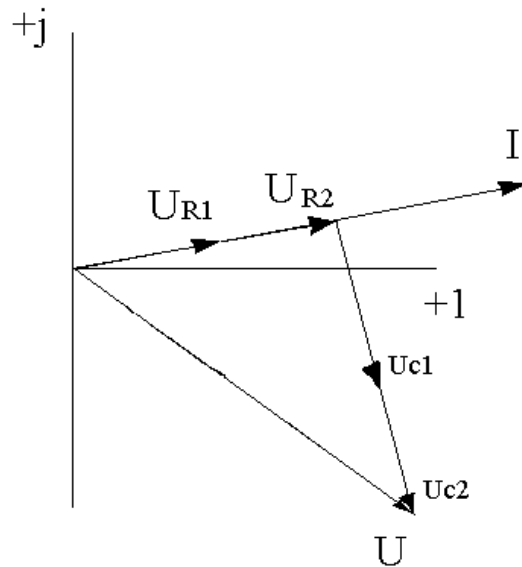


Рисунок 1.6

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1.1 Для кола (рисунок 1.7) синусоїдального струму задано параметри включених до нього елементів і діючі значення напруги на її затискачах, частота живильної напруги дорівнює $f = 50$ Гц. Визначити діючі значення струмів у вітках і в нерозгалуженій частині кола комплексним методом.

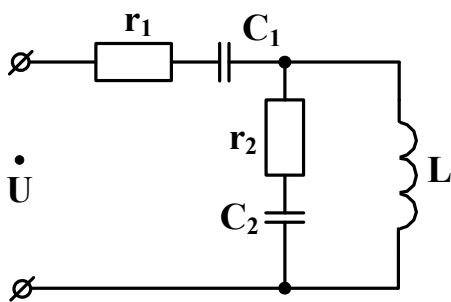


Рисунок 1.7

$$\dot{U} = 220 \text{ В}; r_1 = 6 \text{ Ом};$$

$$C_1 = 900 \text{ мкФ};$$

$$r_2 = 4 \text{ Ом}; C_2 = 900 \text{ мкФ};$$

$$L = 20 \text{ мГн}.$$

Задача 1.2 За заданими параметрами елементів і діючим значенням напруги на вході визначити струми комплексним методом у вітках і в нерозгалуженій частині кола, поданого на рисунку 1.8. Побудувати векторну діаграму.

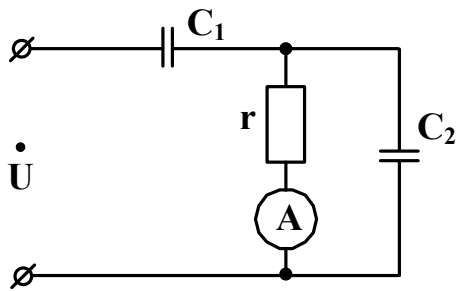


Рисунок 1.8

$$\dot{U} = 127 \text{ В};$$

$$f = 50 \text{ Гц}; \quad r = 10 \text{ Ом};$$

$$C_1 = 700 \text{ мкФ};$$

$$C_2 = 3500 \text{ мкФ}.$$

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 2

Трифазне коло в нормальному режимі

2.1 Основні визначення

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° . Трифазне коло складається з трифазного генератора, проводів для сполучення і приймачів або навантаження, які можуть бути однофазними або трифазними. Трифазний генератор є синхронною машиною. На статорі генератора розміщена обмотка, що складається з трьох частин або фаз, просторово зміщених відносно одної на 120° . У фазах генератора індукуються симетрична трифазна система ЕРС, у якій електрорушійні сили однакові за амплітудою і розрізняються за фазою на 120° . Запишемо миттєві значення і комплекси діючих ЕРС:

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

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

$$\dot{E}_{mA} = E_m e^{j0^\circ}, \quad \dot{E}_{mB} = E_m e^{-j120^\circ}, \quad \dot{E}_{mC} = E_m e^{-j240^\circ} = E_m e^{j120^\circ}.$$

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

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

2.2 Трифазне коло, з'єднане «зіркою»

Зі схеми на рисунку 2.1 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 по відношенню до відповідних фазних напруг.

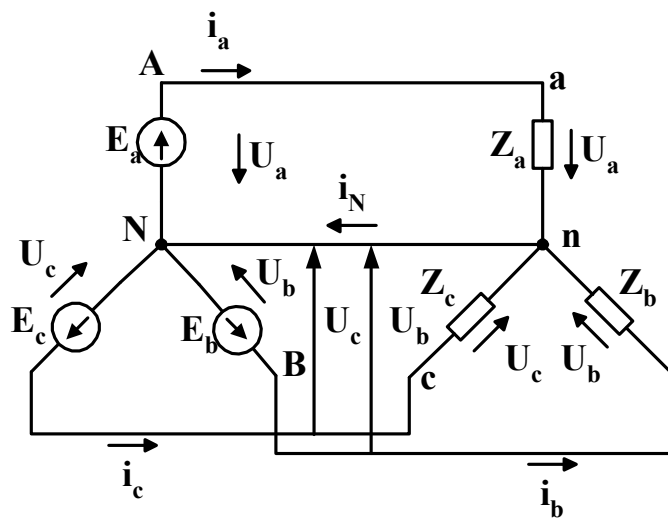


Рисунок 2.1

Векторна діаграма напруги і струмів при симетричному навантаженні зображена на рисунку 2.2.

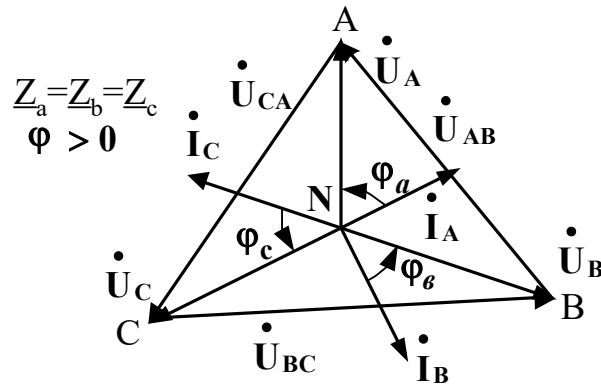


Рисунок 2.2

З діаграми видно, що $i_a + i_b + i_c = 0$, тобто при симетричному навантаженні струм у нейтральному проводі дорівнює нулю і необхідність у цьому проводі відпадає.

Трифазне коло без нейтрального проводу буде трипровідним (рисунок 2.3).

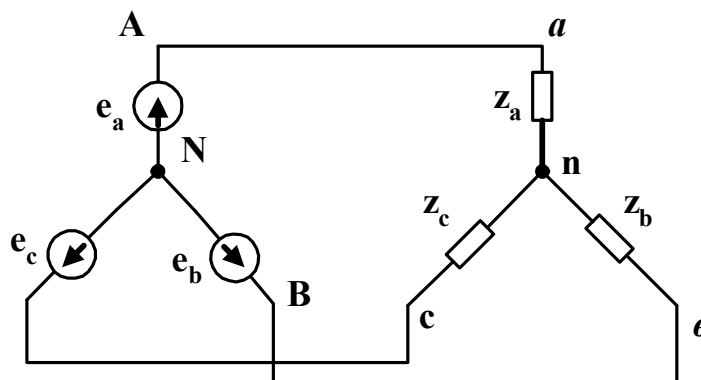


Рисунок 2.3

З векторної діаграми (рисунок 2.2) видно, що при з'єднанні «зіркою» симетричних (трифазних) приймачів

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

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 \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} . Система цих напруг задається джерелом електричної енергії. Вона симетрична і на векторній діаграмі утворить рівносторонній трикутник ABC. Вектори фазних напруг \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C зображуються таким чином, щоб виконувалися векторні співвідношення:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

При цьому точка N знаходиться в центрі трикутника ABC. Вектори фазних струмів \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C направляють під кутами φ_a , φ_b , φ_c до векторів відповідних фазних напруг.

При несиметричному навантаженні (рисунок 2.4), 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 $I_N \neq 0$. Отже, нейтральний провід забезпечує симетрію фазних напруг приймача при несиметричних приймачах

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

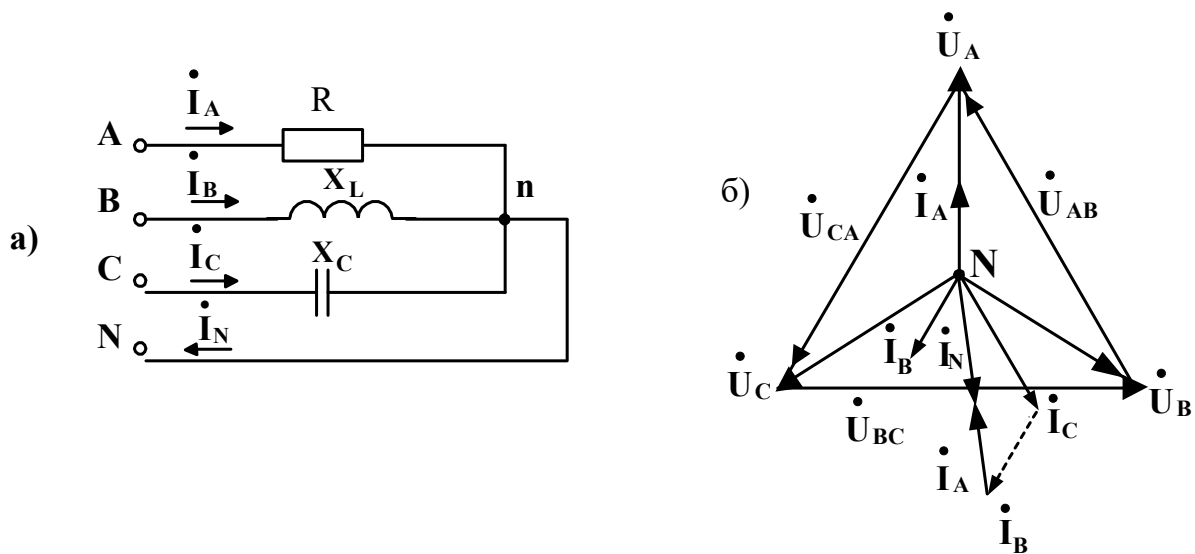


Рисунок 2.4 – Схема ввімкнення несиметричного приймача (а), векторна діаграма напруги і струмів (б)

Тому в чотириввідну 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. Очевидно, що струми в кожній з фаз можна визначити за формулами, що раніше наводилися, наприклад, $\dot{i}_A = \dot{U}_A / Z_A$.

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

Для визначення \dot{U}_{nN} можна користуватися формулою вузлової напруги

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

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

Фазні напруги і струми приймачів будуть відповідно такими:

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

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

За відомими $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c, \dot{U}_{nN}$ та $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ можна побудувати векторну діаграму напруги і струмів для цього випадку (рисунок 2.5).

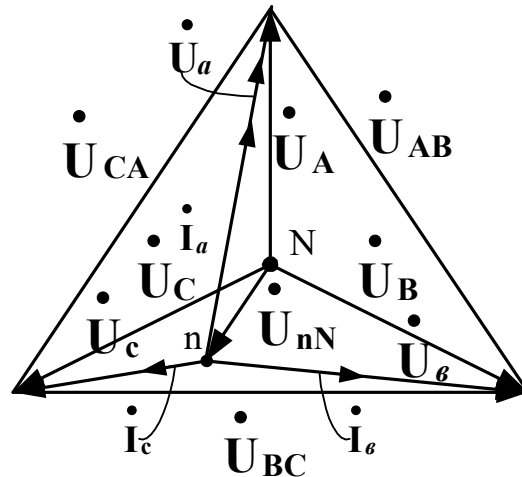


Рисунок 2.5 – Векторна діаграма при зсуві нейтралі

Векторна діаграма побудована у випадку активного несиметричного навантаження.

2.3 Трифазне коло, з'єднане «трикутником»

При з'єднанні споживачів «трикутником» (рисунок 2.6) кожен споживач вмикається між двома відповідними лінійними проводами, внаслідок чого знаходиться під лінійною напругою генератора, яка одночасно є фазовою напругою споживача.

Згідно з рисунком 2.6 $U_{AX}=U_{AB}$, $U_{BY}=U_{BC}$ та $U_{CZ}=U_{CA}$, тобто $U_{\phi}=U_{л}$. Фазні струми при з'єднанні споживачів «трикутником» позначаються двома індексами: I_{AX} , I_{BY} , I_{CZ} або I_{AB} , I_{BC} , I_{CA} . Струм фазовий і кут зсуву між фазовим струмом і фазовою напругою визначаються за формулами:

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB} / \underline{Z}_{AB}, \quad \dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC} / \underline{Z}_{BC}, \quad \dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA} / \underline{Z}_{CA},$$

ТОБТО $\dot{I}_{\phi} = \dot{U}_{\phi} / \underline{Z}_{\phi}$, $\varphi_{\phi} = \arctg X_{\phi} / R_{\phi}$.

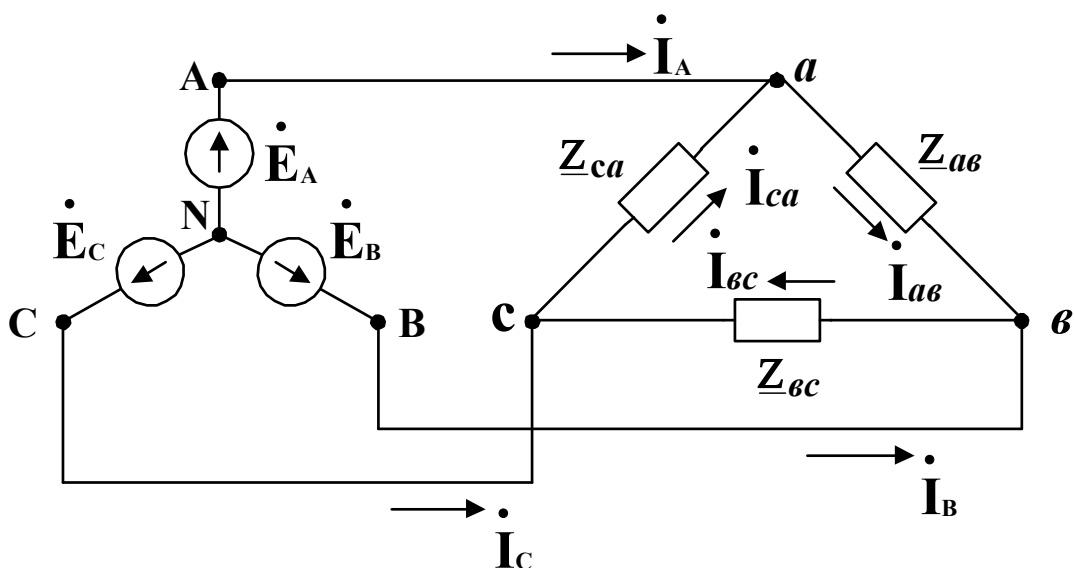


Рисунок 2.6 - Схема з'єднання споживачів «трикутником»

Лінійні струми I_A , I_B , I_C згідно з I законом Кірхгофа для вузлів **A**, **B**, **C** у загальному випадку дорівнюють геометричній різниці відповідних фазних струмів:

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

Коли навантаження рівномірне, лінійні струми будуть однаковими між собою за величиною і більші від фазових у $\sqrt{3}$ разів.

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3}I_{\text{ф}} .$$

Векторні діаграми напруги і струмів для симетричного і несиметричного навантажень при з'єднанні споживачів «трикутником» зображене на рисунку 2.7.

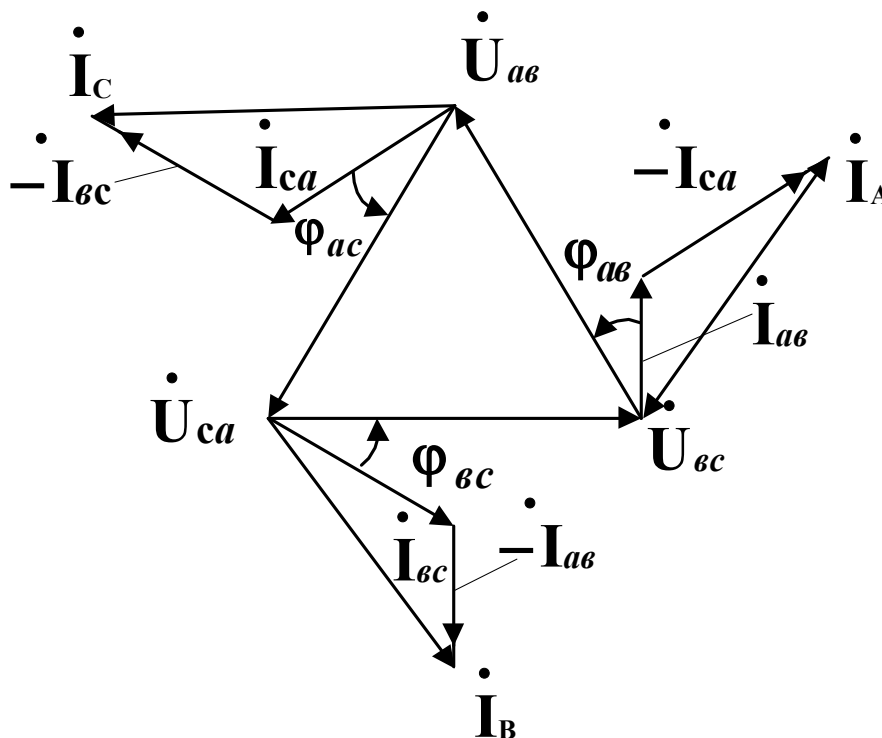


Рисунок 2.7 - Векторна діаграма при з'єднанні споживачів «трикутником»

Приклад розрахунку трифазного кола в без-аварійному режимі

Приклад 2.1

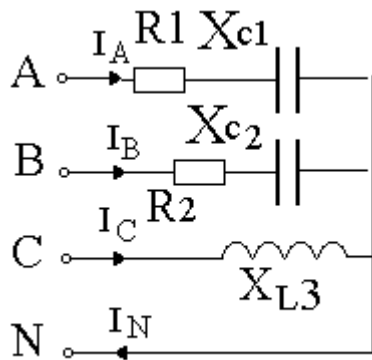


Рисунок 2.5 - Схема для розрахунку

Дано:
 $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$
 $R_1 = 4 \text{ Ом}$
 $R_2 = 7 \text{ Ом}$
 $X_{C1} = 7 \text{ Ом}$
 $X_{C2} = 5 \text{ Ом}$
 $X_{L3} = 9 \text{ Ом}$

Знайти: струми у фазах та в нейтральному проводі (рисунок 2.8), показання приладів, потужність трифазної системи. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язання

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

Фазна напруга джерела. У кожній фазі напруга має однакову амплітуду, але різний зсув фаз, що відрізняється один від одного на 120° :

$$\dot{U}_A = U_{\phi} = 127 \text{ В};$$

$$\dot{U}_B = U_{\phi} e^{-120j} = 127 e^{-120j} \text{ В};$$

$$\dot{U}_C = U_{\phi} e^{120j} = 127 e^{120j} \text{ В.}$$

Фазні опори кола:

$$\underline{Z}_A = R_1 - jX_{C1} = 4 - j7 = 8e^{-j60} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_B = R_2 - jX_{C2} = 7 - j5 = 8,6e^{-j35} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = X_{L3} = 9e^{j90} \text{ Ом.}$$

Визначимо фазні струми:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} = 15,7e^{j60} \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = 14,8e^{-j84} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = 14,1e^{j30} \text{ A}.$$

Струм у нейтральному проводі:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 22,3e^{j15,7} \text{ A}.$$

Визначимо, що показують амперметри

$$I_{A1} = 15,7 \text{ A};$$

$$I_{A2} = 14,8 \text{ A};$$

$$I_{A3} = 14,1 \text{ A};$$

$$I_{A4} = 22,3 \text{ A}.$$

Знаходимо активну та реактивну потужності

активна потужність:

$$P_a = I_a U_a \cos(\varphi_a); \quad P_b = I_b U_b \cos(\varphi_b); \quad P_c = I_c U_c \cos(\varphi_c);$$

$$P_a = 992,8 \text{ Вт}; \quad P_b = 1526 \text{ Вт}; \quad P_c = 0 \text{ Вт};$$

$$P = P_a + P_b + P_c = 2519 \text{ Вт};$$

реактивна потужність:

$$Q_a = I_a U_a \sin(\varphi_a); \quad Q_b = I_b U_b \sin(\varphi_b); \quad Q_c = I_c U_c \sin(\varphi_c);$$

$$Q_a = -1737 \text{ ВАр}; \quad Q_b = 1090 \text{ ВАр}; \quad Q_c = 1793 \text{ ВАр};$$

$$Q = Q_a + Q_b + Q_c = -1035 \text{ ВАр};$$

повна потужність системи:

$$S = P + jQ = 2519 - j 1035 \text{ ВА.}$$

Побудуємо векторну діаграму напруг разом з векторами струмів (рисунок 2.9).

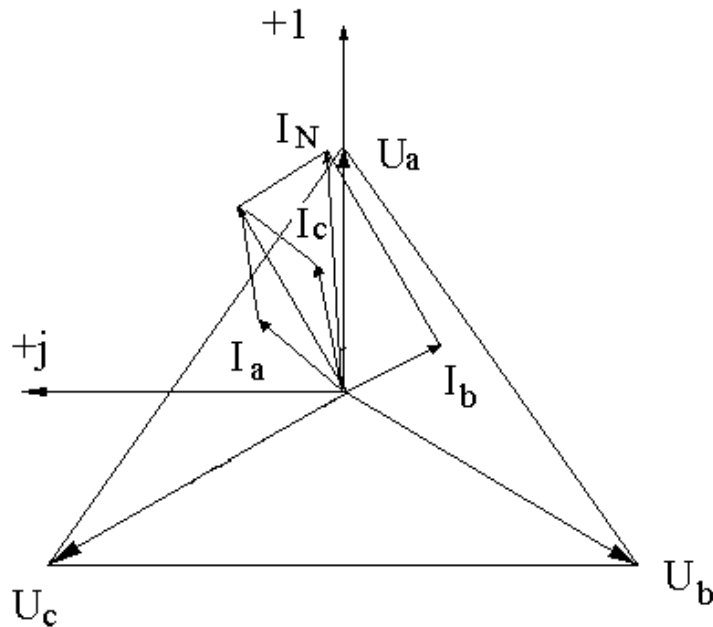
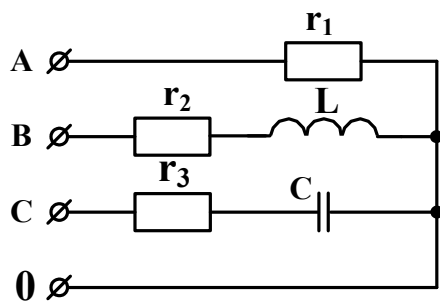


Рисунок 2.9 - Векторна діаграма

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 2.1 До трифазного джерела з лінійною напругою U_L підключено коло (рисунок 2.10). Визначити струми в лінійних і нейтральному проводах. Побудувати

векторну діаграму.

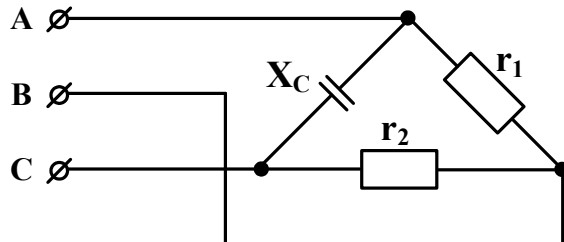


Дано:

$f = 50 \text{ Гц}; U_{\text{л}} = 220 \text{ В}; r_1 = 6 \text{ Ом};$
 $r_2 = 6 \text{ Ом}; L = 10 \text{ мГн}; r_3 = 30 \text{ Ом};$
 $C = 5 \text{ мкФ}.$

Рисунок 2.10 - Схема для розрахунку

Задача 2.2 До трифазного джерела з лінійною напругою $U_{\text{л}}$ підключено коло (рисунок 2.11). Визначити лінійні і фазні струми. Побудувати векторну діаграму.



Дано:

$U_{\text{л}} = 127 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц};$
 $X_{\text{c}} = 7 \text{ Ом}; r_1 = 100 \text{ Ом};$
 $r_2 = 4 \text{ Ом}.$

Рисунок 2.11 - Схема для розрахунку

Задача 2.3 До трифазної мережі з лінійною напругою $U_{\text{а}} = 380 \text{ В}$ підключено два споживачі, один з яких з'єднано «зіркою», а другий «трикутником» (рисунок 2.12). Параметри елементів споживачів такі: $R = X_L = X_C = 22 \text{ Ом}$. Визначити показання амперметрів (струми $I_{\text{А}}, I_{\text{N}}$).

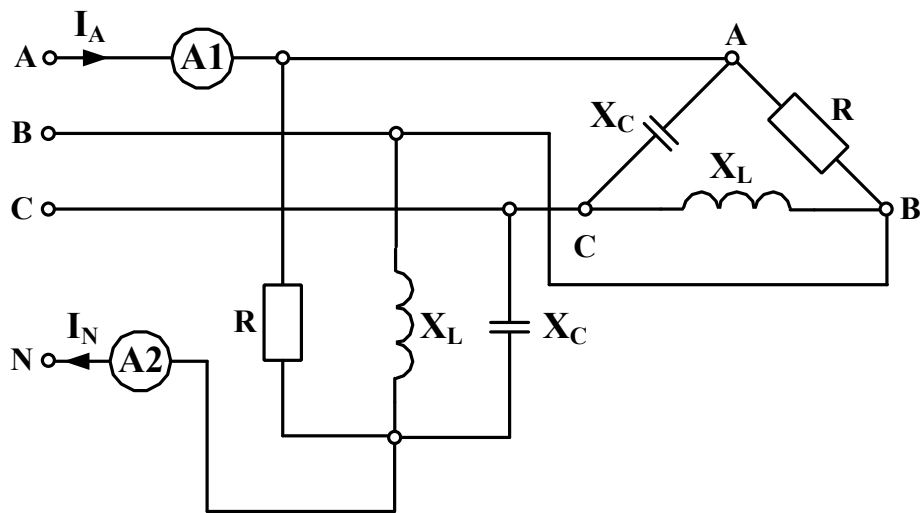


Рисунок 2.12 - Схема для розрахунку

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 3

Аналіз аварійних режимів

Несиметричні режими в найбільш характерних випадках (коротке замикання і холостий хід) можуть бути проаналізовані на основі побудови векторних діаграм. Розглянемо режими обриву і короткого замикання фази при з'єднанні в «зірку» для три- і чотирьохпроводної систем.

При цьому проводитимемо порівняння із симетричним режимом роботи кола, фазна напруга і струми в якій будуть базовими.

Для кола (рисунок 3.1) надана векторна діаграма струмів та напруги (задається, що навантаження носить активно-індуктивний характер).

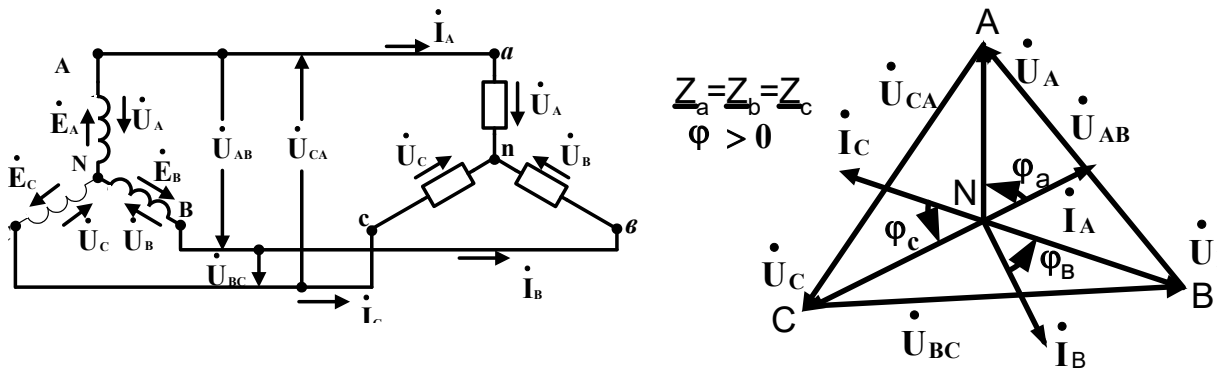


Рисунок 3.1 - Схема ввімкнення приймача за схемою «зірка» та векторна діаграма напруги та струмів

Для цього випадку:

$$\dot{I}_A = \frac{U_\phi}{Z} e^{-j\varphi} = I_\phi e^{-j\varphi}; \quad \dot{I}_B = I_\phi e^{-j(120^\circ + \varphi)}; \quad \dot{I}_C = I_\phi e^{-j(\varphi - 120^\circ)};$$

Істотна несиметрія струмів у чотириввідному трифазному колі виникає при обриві одного з лінійних проводів, при перегорянні запобіжника в ньому. Наприклад, при обриві лінійного проводу фази А (рисунок 3.2,а) струм $\dot{I}_A = 0$ (лампи, увімкнені в цю фазу, гаснуть). Струм у нейтральному проводі для цього випадку $\dot{I}_N = \dot{I}_B + \dot{I}_C$. На рисунку 3.2,б наведена векторна діаграма для цього режиму роботи трифазного кола, коли $\dot{I}_B = \dot{I}_C$ ($R_B = R_C$).

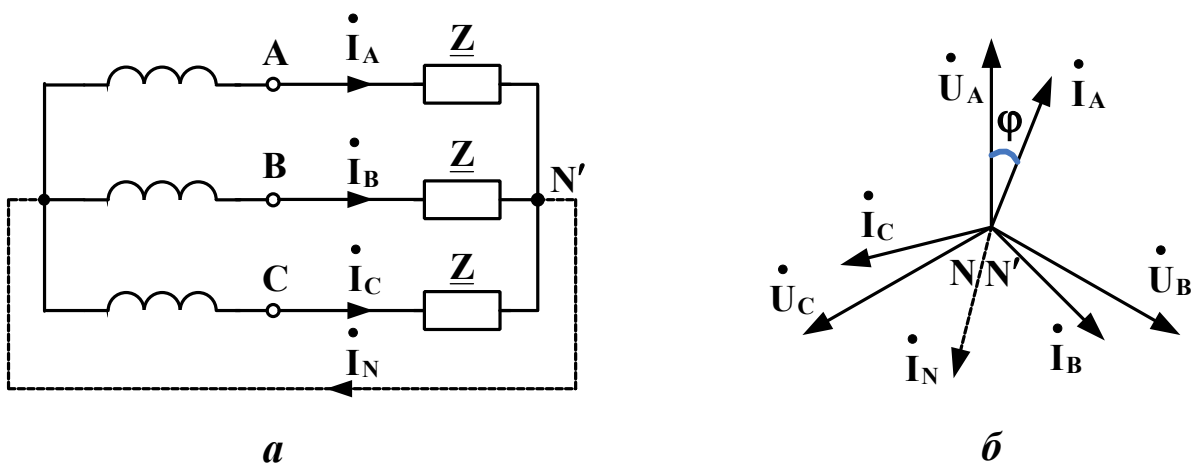


Рисунок 3.2 - Обрив фази А та векторна діаграма При пошкодженні фази А у схемі без нейтрального

проводу будується векторна діаграма, яка показана на рисунку 3.3.

У цьому випадку

$$\dot{I}_A = 0; \quad \dot{U}_{BN'} = -\dot{U}_{CN'} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_\phi e^{-j90^\circ}; \quad \dot{I}_B = -\dot{I}_C = \frac{\sqrt{3}}{2} I_\phi e^{-j(90^\circ+\varphi)}.$$

При короткому замиканні фази **A** (трипровідна система) має місце векторна діаграма (рисунок 3.4). З неї випливає:

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

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

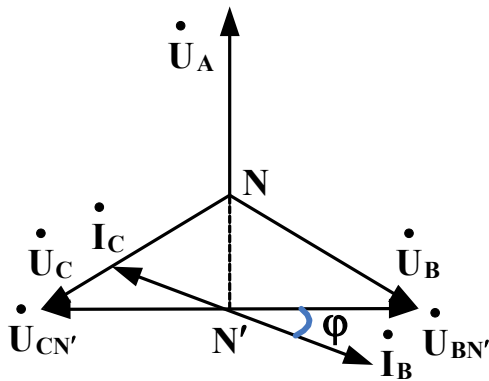


Рисунок 3.3

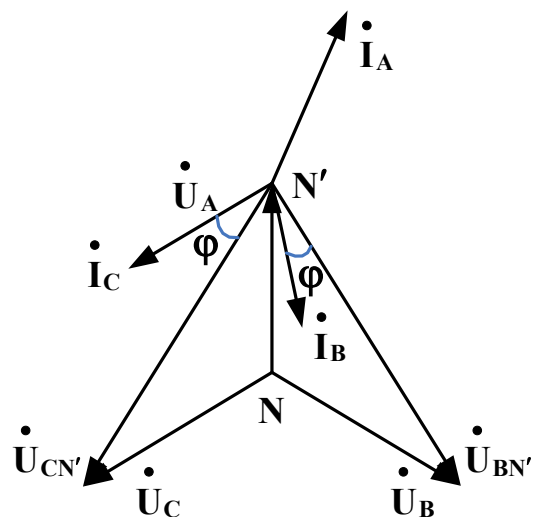


Рисунок 3.4

Симетричне трифазне навантаження з'єднане в трикутник та відповідні цьому випадку векторні діаграми напруг і струмів наведені на рисунку 3.5.

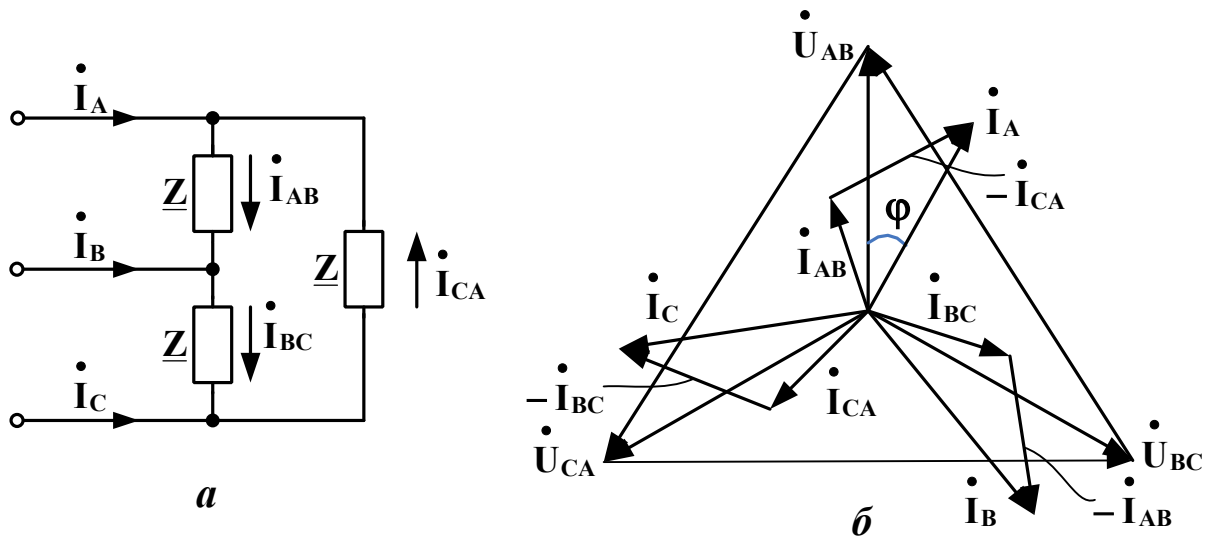


Рисунок 3.5

У цьому випадку, якщо фази генератора такого ж способу з'єднання, одержуємо:

$$\dot{I}_{AB} = \sqrt{3} I_{\phi} e^{j(30^{\circ} - \varphi)}, \quad \dot{I}_{BC} = \sqrt{3} I_{\phi} e^{-j(90^{\circ} + \varphi)}, \quad \dot{I}_{CA} = \sqrt{3} I_{\phi} e^{j(150^{\circ} - \varphi)},$$

$$\dot{I}_A = 3 I_{\phi} e^{-j\varphi}, \quad \dot{I}_B = 3 I_{\phi} e^{-j(120^{\circ} + \varphi)}, \quad \dot{I}_C = 3 I_{\phi} e^{-j(\varphi - 120^{\circ})}.$$

При обриві проводу у фазі АВ, як це видно з схеми на рисунку 3.6.

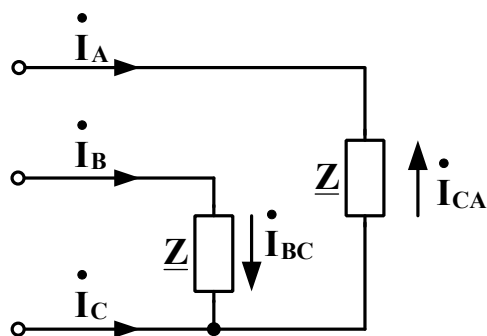


Рисунок 3.6

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC}, \quad \text{при цьому самі струми } \dot{I}_{BC} \text{ та } \dot{I}_{CA}$$

завдяки автономності режиму роботи фаз при з'єднанні навантаження «трикутником» такі ж, як і в колі на рисунку 3.5,а. Таким чином,

$$\dot{I}_A = \sqrt{3} I_\phi e^{-j(\varphi+30^\circ)}; \quad \dot{I}_B = \sqrt{3} I_\phi e^{-j(90^\circ+\varphi)}; \quad \dot{I}_C = 3 I_\phi e^{-j(\varphi-120^\circ)}.$$

Коло при обриві лінійного проводу Аа і відповідна цьому випадку векторна діаграма наведені на рисунку 3.7.

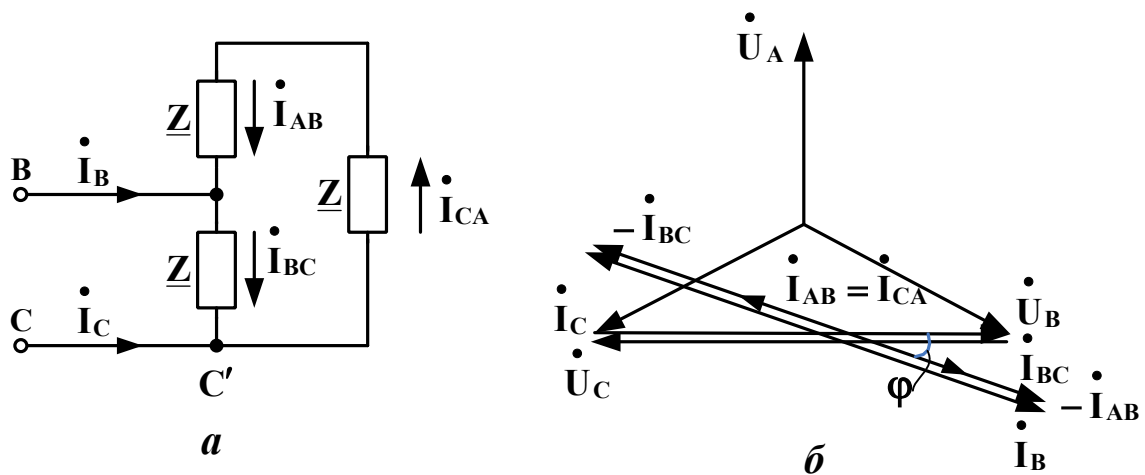


Рисунок 3.7

У цьому випадку

$$\dot{I}_{AB} = \dot{I}_{CA} = \frac{\sqrt{3} U_\phi}{2Z} e^{j(90^\circ-\varphi)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_\phi e^{j(90^\circ-\varphi)},$$

$$\dot{I}_{BC} = \sqrt{3} I_\phi e^{-j(90^\circ+\varphi)},$$

$$\dot{I}_B = -\dot{I}_C = 1,5\sqrt{3} I_\phi e^{-j(90^\circ+\varphi)}.$$

Приклад розрахунку трифазного кола в аварійному режимі

Приклад 3.1

Дано:
обрив нейтралі, а також фази А
трифазної системи (рисунок 3.8),
де $U_{\text{л}}=660\text{В}$; $X_{\text{LB}}=12\ \text{Ом}$;
 $R_{\text{C}}=16\ \text{Ом}$; $X_{\text{CC}}=12\ \text{Ом}$.

Знайти:

показання амперметрів,
а також активну, ре-
активну та повну потуж-
ності, які споживає коло
в такому режимі.

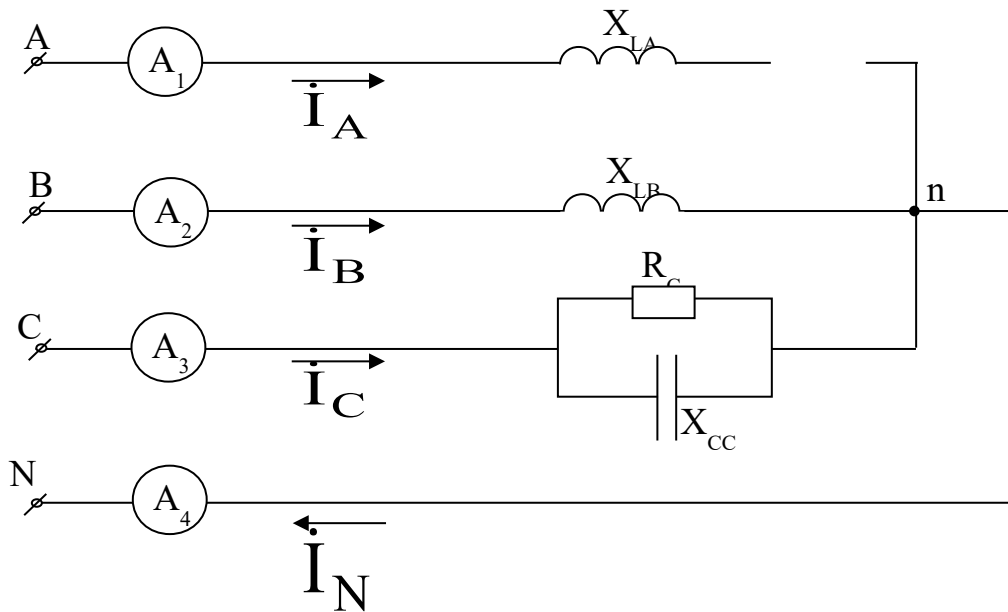


Рисунок 3.8 - Схема для розрахунку

Знаходимо фазну напругу $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381,051\text{В}$.

Фазна напруга джерела трифазної системи. У кожній фазі напруга має однакову амплітуду, але різний зсув фаз, який відрізняється один від одного на 120° :

$$\dot{U}_{\text{A}} = U_{\phi} = 381,051\text{В};$$

$$\dot{U}_{\text{B}} = U_{\phi}e^{-120j} = 381,051e^{-120j} = -190,526 - 330j\text{В};$$

$$\dot{U}_C = U_\phi e^{120j} = 381,051e^{120j} = -190,526 + 330j \text{ В.}$$

Фазні опори кола:

$$\underline{Z}_B = jX_{LB} = 12j = 12e^{90j} \text{ Ом;}$$

$$\underline{Z}_C = \frac{R_C(-jX_{CC})}{R_C - jX_{CC}} = \frac{16 \cdot (-12j)}{16 - 12j} = 5,76 - 7,68j = 9,6e^{-53,13j} \text{ Ом.}$$

Формула знаходження напруги зміщення в нейтралі в загальному випадку має такий вигляд:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} + \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} + \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}}$$

Для нашого випадку, вона має такий вигляд:

$$\dot{U}_{nN} = \frac{\frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} + \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} = \frac{\frac{381,051e^{-120j}}{12e^{90j}} + \frac{381,051e^{120j}}{9,6e^{-53,13j}}}{\frac{1}{12e^{90j}} + \frac{1}{9,6e^{-53,13j}}} = -1070,526 + 330j \text{ В.}$$

Знаходимо струми:

$$\begin{aligned} \dot{I}_B &= \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_B} = \frac{381,051e^{-120j} + 1070,526 - 330j}{12e^{90j}} = \\ &= -55 - 73,333j = 91,667e^{-126,87j} \text{ А;} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_{nN}}{\underline{Z}_C} = \frac{381,051e^{120j} + 1070,526 - 330j}{9,6e^{-53,13j}} = 55 + 73,333j = 91,667e^{53,13j} \text{ А.}$$

Струм у нейтральному проводі та фазі **A**:

$$\dot{I}_A = 0; \quad \dot{I}_N = 0.$$

Знаходимо показання амперметрів (вони вимірюють діючі значення струмів):

$$I_{A1} = 0; \quad I_{A2} = 91,667 \text{ A}; \quad I_{A3} = 91,667 \text{ A}; \quad I_{A4} = 0.$$

Знаходимо активну, реактивну та повну потужності кола:

– активна потужність:

$$\begin{aligned} P &= U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C = \\ &= 381 \cdot 91,667 \cdot \cos 90 + 381 \cdot 91,667 \cdot \cos(-53,13) = 48400 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

– реактивна потужність:

$$\begin{aligned} Q &= U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi_B + U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi_C = \\ &= 381 \cdot 91,667 \cdot \sin 90 + 381 \cdot 91,667 \cdot \sin(-53,13) = 36300 \text{ вар} \end{aligned}$$

– повна потужність кола:

$$S = P + Q \cdot j = 48400 + 36300 j \text{ ВА}.$$

Побудуємо векторну діаграму (рисунок 3.9) напруги та відобразимо на ній вектори струмів.

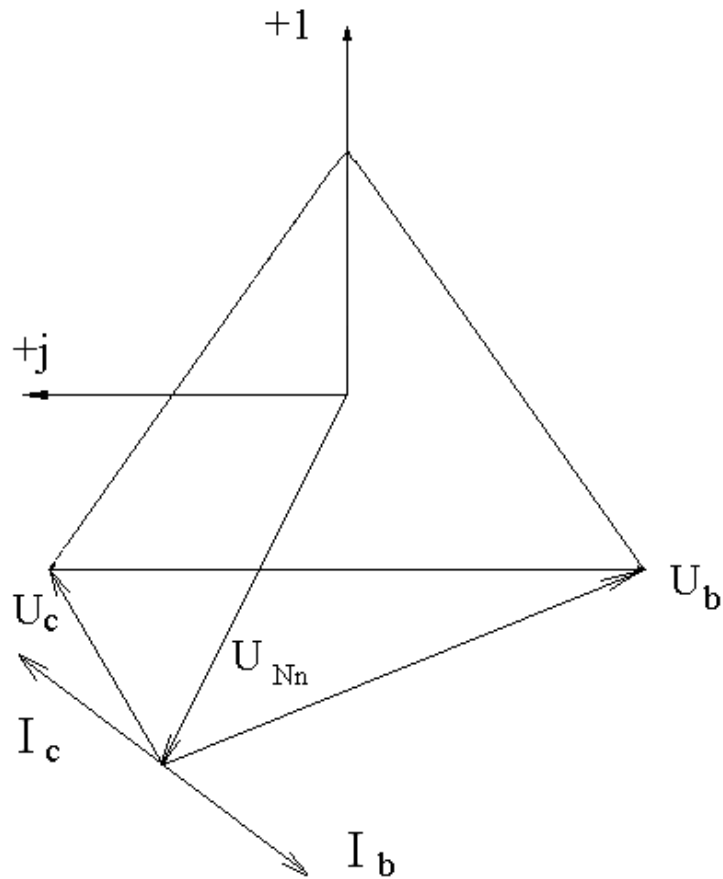


Рисунок 3.9 - Векторна діаграма

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 3.1

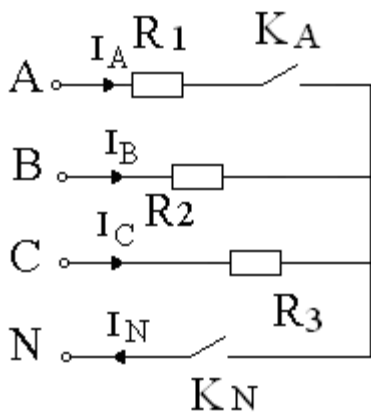


Рисунок 3.10 - Схема для розрахунку

Дано:

$U_{\text{л}} = 220 \text{ В}; R_1 = 4 \text{ Ом};$

$R_2 = 4 \text{ Ом}; R_3 = 4 \text{ Ом}.$

Знайти: струм у фазі В (рисунок 3.10); потужність трифазної системи. Побудувати векторну діаграму для різних положень тумблерів K_A , K_N , якщо: а) K_N замкнутий K_A не замкнутий; б) K_A замкнутий K_N не замкнутий; в) K_A та K_N замкнуті; г) K_A та K_N не замкнуті

Задача 3.2 У симетричному трипровідному колі стався обрив фази. Що покаже вольтметр, увімкнений між нейтральними точками джерела і приймача? $U_{л} = 380 \text{ В}$.

Задача 3.3 Як зміниться потужність у колі на рисунку 3.11 (збільшиться або зменшиться) порівняно з колом на рисунку 3.12 (обрив лінійного проводу С)? Розрахувати за такими даними:

$$Z_{AB} = 8 + j8 \text{ Ом}; \quad Z_{BC} = 4 + j6 \text{ Ом}; \quad Z_{CA} = 9 \text{ Ом}; \quad U_{л} = 220 \text{ В}.$$

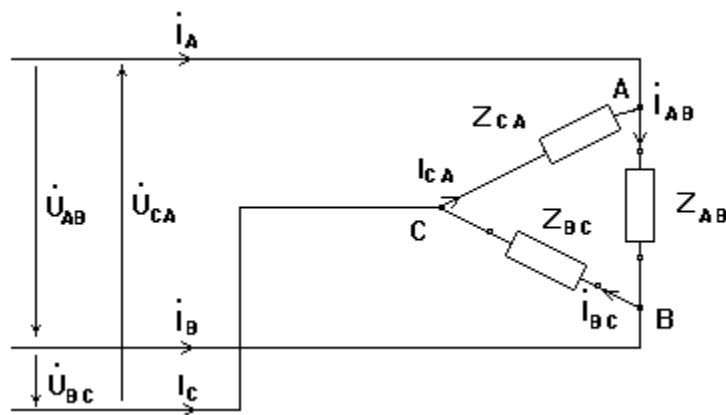


Рисунок 3.11

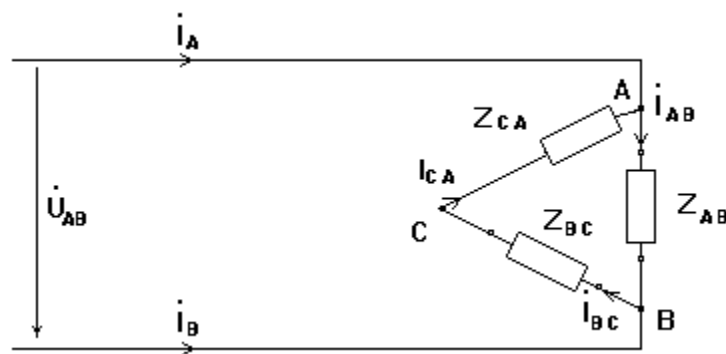


Рисунок 3.12

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 4

Розрахунок електричних мереж напругою до 1 кВ

Електричні мережі напругою до 1 кВ відносяться до мереж внутрішнього електропостачання, які знаходяться в приміщеннях цехів промислових підприємств. При цьому найбільше розповсюджена чотирипровідна трифазна система напруг 380/220 і 660/380 В. Розрахунок електричних мереж звичайно виконується за двома критеріями: по умовах допустимого нагріву тривалим розрахунковим струмом та умовами допустимих втрат напруги. Розрахунковий струм у трифазній лінії визначається із формули

$$P = \sqrt{3} \cdot I_p U_n \cos \varphi ,$$

де I_p – розрахунковий струм у лінії **A**;
 U_n – номінальна лінійна напруга, **кВ**;
 $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності споживача;
 P – потужність споживача, **кВт**.

Втрати напруги в електричних мережах постійного струму розраховують за формулою

$$\Delta U \% = \frac{200 \rho}{\gamma \cdot S_{\text{пр}} U_n} \quad \text{або} \quad \Delta U \% = \frac{200 P_p}{\gamma \cdot S_{\text{пр}} U_n^2}$$

де P_p – розрахункова потужність споживачів, **Вт**;
 U_n – номінальна напруга, **В**;
 I – розрахунковий струм навантаження, **A**;
– довжина лінії, **м**;
 γ – питома провідність проводів лінії або кабелів, **м/Ом·мм²**;
 $S_{\text{пр}}$ – переріз проводів або жил кабелів, **мм²**.

Втрату лінійної напруги в трифазних електричних мере-

жах визначають із виразу

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} I_p \cdot L}{U_n} (R_0 \cos \varphi + X_0 \sin \varphi),$$

де U_n – номінальна лінійна напруга, **В**;

I_p – розрахунковий струм у лінії, **А**;

R_0 і X_0 – активний та реактивний опір кілометра лінії, **Ом/км**;

$\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності споживача і відповідний йому $\sin \varphi$.

Переріз проводів, одержаних внаслідок розрахунків за нагрівом і допустимих втрат напруги в лінії електропередачі порівнюють з табличними даними [3] і обирають їх найближче більше значення.

Приклади розрахунку електричних мереж

Приклад 4.1 Розрахувати електричну лінію постійного струму, яка живить освітлювальне навантаження потужності **$P = 3,5$ кВт** і номінальної напруги **$U_n = 110$ В**. Довжина лінії **50 м**. Провідники прокладаються в сталевих трубах; проводи з гумовою ізоляцією в бавовняному обплетенні.

Розв'язання

1 Розрахунок за умовами нагріву. Визначаємо розрахунковий струм лінії:

$$I_p = \frac{P}{U_n} = \frac{3500}{110} = 31,8 \text{ А}.$$

Із таблиці допустимих тривалих струмових навантажень на проводи [3] обираємо переріз проводів таким чином, щоб допустимий струм на обраний переріз був

більшим або рівним розрахунковому. Таку умову задовольняє алюмінієвий провід перерізом $S = 6 \text{ мм}^2$, для якого допустимий струм $I_{\text{дон}} = 36 \text{ А}$, таким чином, умова $I_{\text{дон}} \geq I_p$ виконана.

2 Розрахунок за втратами напруги. Так як навантаження лінії освітлювальне, то допустимі втрати напруги складають 2,5 %. Розраховуємо дійсні втрати напруги в лінії для обраного перерізу проводів:

$$\Delta U\% = \frac{200 P \ell}{\gamma \cdot S \cdot U_n^2} = \frac{200 \cdot 3500 \cdot 50}{34 \cdot 6 \cdot 110^2} = 14,2\% ,$$

де для алюмінію $\gamma = 34 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$.

Як видно, одержане ΔU більше допустимого, тому переріз проводів слід збільшити. Для визначення необхідного перерізу перетворимо розрахункову формулу ΔU відносно S_i , підставивши числові значення, знаходимо потрібний переріз:

$$S = \frac{200 P \ell}{\gamma \cdot \Delta U\% \cdot U_n^2} = \frac{200 \cdot 3500 \cdot 50}{34 \cdot 2,5 \cdot 110^2} = 34 \text{ мм}^2$$

Із таблиць перерізів [3] вибираємо найближчий стандартний переріз проводів $S=35 \text{ мм}^2$.

Приклад 4.2 Електрообладнання цеху живиться від трифазної електричної мережі з номінальною лінійною напругою $U_n=220 \text{ В}$. Сумарна розрахункова потужність споживачів $P_p = 40 \text{ кВт}$ при значенні коефіцієнта потужності $\cos \varphi = 0,8$. Визначити переріз кабелю, прокладеного від цехової підстанції до найбільш віддаленого від підстанції споживача. Довжина кабелю $L = 25 \text{ м} = 0,025 \text{ км}$.

Розв'язання

Розрахунковий струм кабелю

$$I_p \frac{P_p}{\sqrt{3} U_n \cdot \cos \varphi_n} = \frac{40 \cdot 10^5}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,8} = 132 \text{ A} .$$

Даному значенню розрахункового струму відповідає трижильний кабель з алюмінієвими жилами перерізом **3×20 мм²** марки **ААБГ 3×70**. При прокладанні в закритому приміщенні кабель допускає тривале навантаження по струму **I_{док}=155 А**.

Перевірка перерізу кабелю за щільністю струму проводиться із умов:

$$I_{\text{док}} > I_p$$

У даному випадку ця умова виконується, так як

$$I_{\text{док}} = 155 \text{ A} > I_p = 132 \text{ A} .$$

Перевірка кабелю за допустимою втратою напруги здійснюється за формулою

$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 I_p L}{U_n} (R_0 \cdot \cos \varphi_n + X_0 \sin \varphi_n) ,$$

де **R₀** – активний опір 1 км кабелю, **Ом/км**;

X₀ – реактивний опір 1 км жили кабелю, **Ом/км**.

Для обраного кабелю приблизно можна прийняти **R₀=0,5 Ом/км**; **X₀ =0,35 Ом/км**.

Розрахуємо втрати напруги

$$\Delta U \% = \frac{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 132 \cdot 0,025}{220} (0,5 \cdot 0,8 + 0,35 \cdot 0,6) = 1,61 \% .$$

Таким чином, $\Delta U \% = 1,61 \% < U_{\text{дон}} = 6 \% .$

Задачі для самостійного розв'язання

Задача 1 Трифазний асинхронний двигун типу **A62-6** має такі номінальні дані:

$P_{\text{ном}}=10\text{кВт}$; $U_{\text{лном}}=380\text{ В}$; $n_{\text{ном}}=970\text{ об/хв}$; $\eta_{\text{ном}}=86\%$;
 $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,82$, кратність пускового струму $K_I=4,5$.

Визначити переріз $S_{\text{пр}}$ алюмінієвих проводів марки **АПР-500**, які живлять двигун. Проводи прокладені в сталевій трубі, довжина лінії $L=80\text{м}$.

Задача 2 Радіальна система розподілення електроенергії силової мережі при номінальній напрузі $U_n=380\text{ В}$ (рисунок 4.1) живить три асинхронних двигуни. Паспортні дані двигунів наведені нижче.

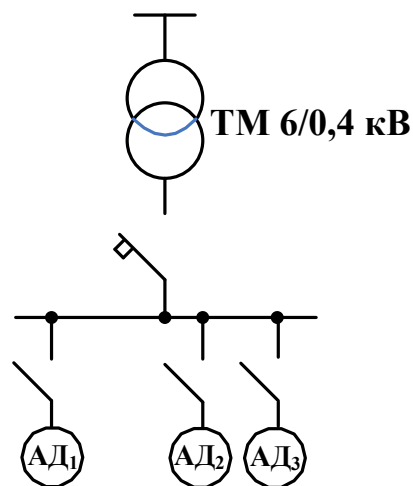


Рисунок 4.1

АД₁ : $P_{\text{ном}}=10\text{ кВт}$; $\eta_{\text{ном}}=86\%$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,82$; кратність пускового струму $K_I = 4,5$; $I_{\text{ном}}=21,5\text{ А}$; пусковий струм **97 А**;

АД₂ : $P_{\text{ном}}=28\text{ кВт}$; $\eta_{\text{ном}}=90\%$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,88$; $K_I = 5,5$;
 $I_{\text{ном}}=54\text{ А}$; $I_{\text{пус}}=297\text{ А}$;

АД₃ : $P_{\text{ном}}=40\text{ кВт}$; $\eta_{\text{ном}}=90\%$; $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,89$; $K_I = 6,0$;
 $I_{\text{ном}}=76\text{ А}$; $I_{\text{пус}}=456\text{ А}$.

Двигуни живляться кабельними лініями з алюмінієвими жилами. Довжина ліній від трансформаторної підстанції

(ТП) до приймачів дорівнює: $I_1=10\text{м}$; $I_2=12\text{м}$; $I_3=15\text{м}$. Визначити переріз жил кабелю та його тип.

Задача 4.3 Чотири установки з лампами розжарювання мають потужності $P_1=4\text{кВт}$, $P_2=8\text{кВт}$, $P_3=12\text{кВт}$ та $P_4=1\text{кВт}$, відстань від ТП, яка має $U_2=400/230\text{ В}$, відповідно $I_1=60\text{м}$; $I_2=100\text{м}$; $I_3=120\text{м}$; $I_4=130\text{м}$. Визначити переріз жил кабелю для чотирипровідної мережі трифазного струму при допустимих втратах напруги $U_2=3\%$.

Задача 4.4 Прожекторна установка із трьох прожекторів типу ПЗО-45, яка служить для освітлення будівельного майданчика, живиться від фази трифазної мережі напругою $U=380/220\text{ В}$ через двожильний кабель з міцними жилами довжиною $l=85\text{м}$. Визначити переріз жили кабелю, якщо кожний із прожекторів споживає потужність $P=1\text{кВт}$ при нарузі $U_{ном}=220\text{ В}$. Відносні витрати напруги $\Delta U_{\phi}=2,5\%$.

Задача 4.5 Як зміниться переріз жили кабелю, якщо живлення прожекторної установки в задачі 4.4 буде здійснюватися від трифазної лінії трижильним кабелем з мідними жилами (рисунок 4.2)?

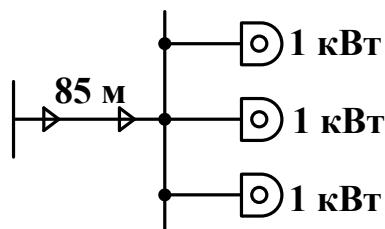


Рисунок 4.2

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 5

Захист електричних мереж від дії струмів короткого

замикання і перенавантаження

Основними причинами аварійних режимів електрообладнання є короткі замикання (КЗ) та перевантаження.

Короткі замикання – це з'єднання між провідниками фаз, провідниками фаз і землею (або нейтральним проводом), а також між різними витками однієї фази обмотки трансформатора чи двигуна. Наслідками КЗ є вихід із ладу обладнання або його окремих частин, а при поганому захисті – займання ізоляції і пожежа.

Перенавантаження частіше за все виникають за рахунок порушення правил експлуатації і неправильного вибору перерізу проводів електричних мереж. Вони приводять до передчасного зносу ізоляції і часто до нового її руйнування й виникнення КЗ.

Для захисту електрообладнання від ненормальних режимів роботи застосовують захисні апарати – запобіжники з плавкими вставками й автоматичні вимикачі максимального струмового захисту. Місця встановлення захисних апаратів регламентуються правилами устаткування електроприймачів (ПУЕ), в мережах низької напруги до 1000В захисні апарати установлюють для захисту:

- а) проводів лінії – на початку лінії;
- б) електроприймачів – безпосередньо перед електроприймачами.

Згідно ПУЕ струм плавкої вставки запобіжника треба вибирати таким чином, щоб виконувалось співвідношення

$$I_{н.вст} / I_{доп} \leq 3,0 ,$$

де $I_{н.вст}$ – струм плавкої вставки;

$I_{доп}$ – допустимий струм для обраного перерізу проводу.

Для струму установки автоматичного вимикача співвід-

ношення набуває такого вигляду:

$$I_{н.вст} / I_{доп} \leq 1,5 .$$

Запобіжниками й автоматами теж можливо захищати електричні мережі від струмів перевантаження. Згідно з ПУЕ освітлювальні мережі і мережі побутових електроприймачів у житлових, громадських і службових будівлях, службово-побутових приміщеннях промислових підприємств, а також в пожежонебезпечних і вибухонебезпечних приміщеннях мають бути захищені від перевантажень. Слід відзначити, що захист запобіжниками від струмів перевантаження вимагає значного підвищення перерізу проводів ліній, що збільшує ціну електромережі, тому при захисті від струмів перевантаження слід по можливості замінити запобіжники автоматичними вимикачами.

Порядок вибору плавких вставок

1 Для мереж, що живлять електроприймачі без пускових струмів:

- а) визначають розрахунковий струм лінії $I_{рас}$;
- б) за розрахунковим струмом (за таблицями тривалих допустимих струмових навантажень [3]) обирають переріз проводу з умови $I_{доп} \geq I_{рас}$;
- в) за розрахунковим струмом обирають найближчу стандартплавку вставку за умови $I_{н.вст} \geq I_{рас}$.

При необхідності захисту проводу від перевантаження за розрахунковим струмом обирають струм плавкої вставки; переріз проводу підбирають за умови $I_{доп} \geq 1,25 I_{н.вст}$,

г) перевіряють, чи захищає обрана плавка вставка переріз проводу від дії струмів короткого замикання.

Перевірку проводять за нерівністю

$$I_{н.вст} / I_{доп} \leq 3 ,$$

де $I_{доп}$, – допустимий струм для даного перерізу проводу.

2 Для мереж, що живлять електроприймачі з пусковими струмами:

- а) визначають розрахунковий струм $I_{рас}$;
- б) за розрахунковим струмом обирають переріз проводів за умовами нагріву;
- в) визначають піковий струм $I_{пик}$ і по ньому обирають плавку вставку за умови

$$I_{н.вст} \geq I_{пик} / \alpha ,$$

де $I_{пик}$ для одиничного асинхронного електродвигуна $I_{пик} = I_{пуск}$ (пусковий струм двигуна), **=2,5** – для двигунів з нормальним пуском; **=1,6 ÷ 2** – для двигунів з важким пуском (ліфти, підйомники і т. ін.).

Піковий струм магістралі з декількома двигунами визначається за формулою

$$I_{пик} \geq \Sigma I_N + I_{пуск.т} ,$$

де ΣI_N – сума номінальних струмів електродвигунів, за винятком номінального струму двигуна з максимальним пусковим струмом;

$I_{пуск.т}$ – максимальний пусковий струм двигуна.

Захист автоматичними вимикачами

Номінальний струм автомата, що служить для захисту проводів електричної лінії від КЗ, повинен задовольняти співвідношення $I_{ном} \leq I_{доп}$ – для автоматів з типовим і комбінованими розчеплювачами, $I_{уст} / I_{доп} \leq 4,5$ – для автоматів з електромагнітними розчеплювачами, де $I_{уст}$ – струм

установки миттєвого спрацювання.

При захисті автоматом ліній з електродвигунами струм установки розчеплювача

$$I_{уст.эм} \geq K_n \cdot I_{пус}$$

де K_n – коефіцієнт надійності (запасу).

Для двигунів постійного струму і фазних двигунів, що пускаються за допомогою реостатів $K_n = 1,3$. Для асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором $K_n = 1,8$.

Номінальний струм теплового розчеплювача обирають з умови

$$I_{номрас.} \geq \alpha I_N,$$

де I_N – номінальний струм електродвигуна;
– коефіцієнт, що залежить від умов пуску.

При нормальних умовах пуску $\alpha = 1$, при важких $\alpha = 1,5$.

Приклади вибору запобіжників і автоматів

Приклад 1 Для приводу вентилятора виробничого приміщення, що розташований на відстані $l = 50$ м від розподільчого щитка, встановлено трифазний асинхронний двигун **4А180S2У3** з такими паспортними даними:

$$P_{ном} = 22 \text{ кВт}; U_{ном} = 220 \text{ В}, \cos \varphi_n = 0,91, \eta_n = 0,885, K_I = \frac{I_{пус}}{I_{ном}} = 7,5.$$

Розрахувати переріз трижильного алюмінієвого кабелю з гумовою ізоляцією, що прокладений в помешканні, і обрати плавку вставку запобіжника. Коефіцієнт завантаження двигуна $K_3=1$.

Розв'язання

Розрахунковий струм двигуна

$$I_p = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{22 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 0,91 \cdot 0,885} = 71,5 \text{ А}.$$

Допустимий струм кабелю $I_{\text{доп}} \geq I_p$, тому з таблиць [3] обираємо переріз жил кабелю $S=25\text{мм}^2$, для якого $I_{\text{доп}} = 75 \text{ А}$.

Для вибору плавкої вставки запобіжника визначаємо піковий струм у жилі кабелю у момент пуску:

$$I_{\text{пик}} = K_1 \cdot I_p = 7,5 \cdot 71,5 = 500 \text{ А}.$$

Для того, щоб плавка вставка не розплавилася за час пуску двигуна, необхідно виконати умову $I_{\text{н.вст}} > I_{\text{пик}} / 2,5$.

Так як $I_{\text{пик}} / 2,5 = 500 / 2,5 \text{ А}$, то з довідника [3] обираємо запобіжник зі струмом плавкої вставки **200 КП-200**. Перевіряємо, чи захищає обрана плавка вставка переріз жил від дії струмів короткого замикання:

$$\frac{I_{\text{н.вст}}}{I_{\text{док}}} \leq 3; \quad \frac{200}{75} \leq 3.$$

Отже, умова відповідності захисту виконується.

Приклад 2 Для приводу цехового порталного крана металургійного заводу встановлено електродвигун постійного струму послідовного збудження типу Д-812 з паспортними даними: $P_{\text{ном}}=66\text{кВт}$; $U_{\text{ном}}=220\text{В}$; $n_n=565 \text{ об/хв}$. Визначити переріз кабелю з поліхлорвініловою ізоляцією, що живить двигун. Обрати автоматичний повітряний вими-

кач і струм установки розчеплювача. Двигун працює у повторно-короткочасному режимі роботи. Тривалість ввімкнення $t_p=4$ хв, тривалість паузи **6 хв**.

Розв'язання

При повторно-короткочасному режимі роботи за розрахунковий струм для вибору перерізу жил кабелю за нагріванням приймається розрахунковий струм навантаження I'_p , що приведений до тривалого режиму.

Для алюмінієвих проводів з перерізом більше за **$S=16$ мм²** тривале струмове навантаження I'_p визначається за формулою

$$I'_p = I_p \frac{\sqrt{ПВ}}{0,875},$$

де I'_p – струм навантаження у тривалому режимі;
ПВ – тривалість ввімкнення.

Визначаємо тривалість ввімкнення:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{ц}}; t_{ц} = t_p + t_{пац.} = 4 + 6 = 10 \text{ мин.}$$

Таким чином, **ПВ=4/10=0,4**.

Знаходимо струм навантаження жили кабелю, що приведені до тривалого режиму

$$I_p = I_{ном} = \frac{P_n}{U_n} = \frac{66 \cdot 10^3}{220} = 330 \text{ А}$$

$$I'_p = 300 \frac{\sqrt{0,4}}{0,875} = 217 \text{ А.}$$

З довідкових таблиць [3] обираємо переріз жил кабелю при умові $I_{доп} \geq I'_p$: $S = 95$ мм² з $I_{доп} = 220$ А.

Марка кабелю – **АНРГ-95**.

Автоматичний вимикач обираємо з умови $I_{доп} \geq I_{ном}$.

Обираємо автоматичний вимикач типу **A-3140 с**.

$I_{ном} = 600\text{А}$; $U_{ном} = 220\text{В}$; число полюсів – 2.

Визначаємо струм установки розчеплювача із співвідношення

$$I_{уст} \geq K_n \cdot I_{пуск},$$

де K_n – коефіцієнт надійності, який для двигунів постійного струму дорівнює **1,3**;

$I_{пуск}$ – пусковий струм двигуна, що дорівнює розрахунковому струму I'_p .

$$I_{уст} \geq 1,3 \cdot 217 = 282 \text{ А}.$$

Обираємо струм установки $I_{уст} = 300 \text{ А}$.

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1 У двомашинному агрегаті (асинхронний двигун + генератор постійного струму) встановлено трифазний **АД** типу **4А160S2У3** з такими даними:

$$P_{ном} = 150\text{кВт}, U_n = 380\text{В}, \eta_n = 0,88, \cos \varphi_n = 0,91, K_I = 7,0.$$

Двигун живиться від розподільчого щитка трижильним кабелем марки **АСБГ**, що прокладений у кабельному каналі підлоги. Визначити переріз кабелю та обрати запобіжник для захисту кабелю.

Задача 2 Три трифазних **АД** живляться від трансформаторної підстанції цеху. Паспортні дані двигунів: $P_1 = 17\text{кВт}$; $P_2 = 22\text{кВт}$; $P_3 = 40\text{кВт}$; ККД $\eta_1 = 0,89$, $\eta_2 = 6,9$ и

$\eta_3=0,91$; $\cos\varphi_n=0,9$ для всіх двигунів; кратність пускового струму $K_I=3$. Відстані від електродвигунів до підстанції відповідно дорівнюють: $l=50\text{м}$; $l=80\text{м}$; $l=120\text{м}$. Схема живлення – магістральна. Магістраль захищено автоматом, а живильні лінії – запобіжниками. Накреслити електричну схему живлення двигунів і визначити переріз жил кабелю, що живить двигуни, а також обрати автоматичний вимикач і запобіжники.

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ 6

Компенсація реактивної потужності у системах електропостачання

Споживачі електричної енергії перетворюють активну потужність в інші види енергії і при цьому періодично обмінюються з джерелом енергії реактивною потужністю, що необхідна для роботи окремих елементів кола змінного струму (трансформаторів, електродвигунів, магнітних пускачів, реакторів і т.п.), яка витрачається на створювання змінних магнітних полів. Наявність реактивних струмів у мережах електропостачання викликає додаткові втрати потужності у проводах живильних мереж, які ростуть обернено пропорційно квадрату коефіцієнта потужності ($\cos\varphi$):

$$\Delta P = 3 I_1^2 R_1 = \frac{S^2 \cdot R_1}{U_1^2} = \frac{P^2 \cdot R_1}{U_1^2 \cdot \cos^2\varphi},$$

де I_1 – струм лінії;

P і S – активна і повна потужності споживача;

U_n – лінійна напруга мережі,

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності споживача.

Як впливає з наведеного виразу, для зменшення ΔP необхідно при заданих P , U_n і R_n збільшувати коефіцієнт по-

тужності. Коефіцієнт потужності можна збільшити тільки шляхом зниження реактивної потужності споживачів. Постачальник електроенергії (РЕС) лімітує найбільшу величину реактивної потужності, яку підприємство може отримати у період роботи енергосистеми в режимі найбільшого її активного навантаження. У зв'язку з цим на підприємствах здійснюються заходи для компенсації реактивної потужності. До таких заходів відносяться застосування статичних батарей конденсаторів, синхронних компенсаторів і синхронних трифазних електродвигунів. На промислових підприємствах частіше за все використовуються батареї конденсаторів, які вмикаються паралельно приймачам електричної енергії. Промисловість випускає комплектні батареї конденсаторів (КБК) на різні напруги у трифазному й однофазному виконанні.

При використанні КБК необхідну реактивну потужність визначають виходячи із виразу:

$$Q_{\text{БК}} = Q_{\text{М}} - Q_{\text{Э}} = P_{\text{М}} \cdot \tan \varphi_{\text{Э}} = P_{\text{М}} \cdot (\tan \varphi_{\text{М}} - \tan \varphi_{\text{Э}}),$$

де $Q_{\text{М}}$ – фактично споживана реактивна потужність у години максимуму активного навантаження, кВАр;

$Q_{\text{Э}}$ – реактивна потужність, лімітована енергосистемою, кВАр;

$P_{\text{М}}$ – заявлена споживачем максимальна активна потужність, кВт;

$\tan \varphi_{\text{М}}$ і $\tan \varphi_{\text{Э}}$ – фактичний і заданий енергосистемою «тангенс фі» у години максимуму навантаження енергосистеми.

Ємність трифазної батареї конденсаторів при з'єднанні конденсаторів «зіркою» і «трикутником» визначають за формулами:

$$C = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot Q_{\text{БК}}}{2\pi f U_{\text{Л}}^2} \quad \text{і} \quad C_{\Delta} = \frac{10^3 \cdot Q_{\text{БК}}}{2\pi f U_{\text{Л}}^2}, \text{ МКД.}$$

Найбільш часто конденсатори у батареї з'єднуються за схемою «трикутник», бо при цьому ємність її є у три рази менше, ніж при з'єднанні «зіркою».

Приклади розрахунку потужності батареї конденсаторів

Приклад 6.1 Споживачі промислового підприємства споживають сумарну активну потужність $P_{\text{сyc}} = 311,14 \text{ кВт}$, лінійна напруга мережі $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$, розрахункове значення фактичного коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{\text{м}} = 0,76$. Енергосистемою задано лімітований $\cos \varphi_{\text{э}} = 0,92$. Для зменшення реактивної потужності, що споживається з мережі, передбачена її компенсація із застосуванням батареї конденсаторів.

Визначити ємність батареї конденсаторів, необхідну для підвищення коефіцієнта потужності до значення, заданого енергосистемою, скласти електричну схему увімкнення конденсаторів і розрядних опорів. (рисунок 6.1).

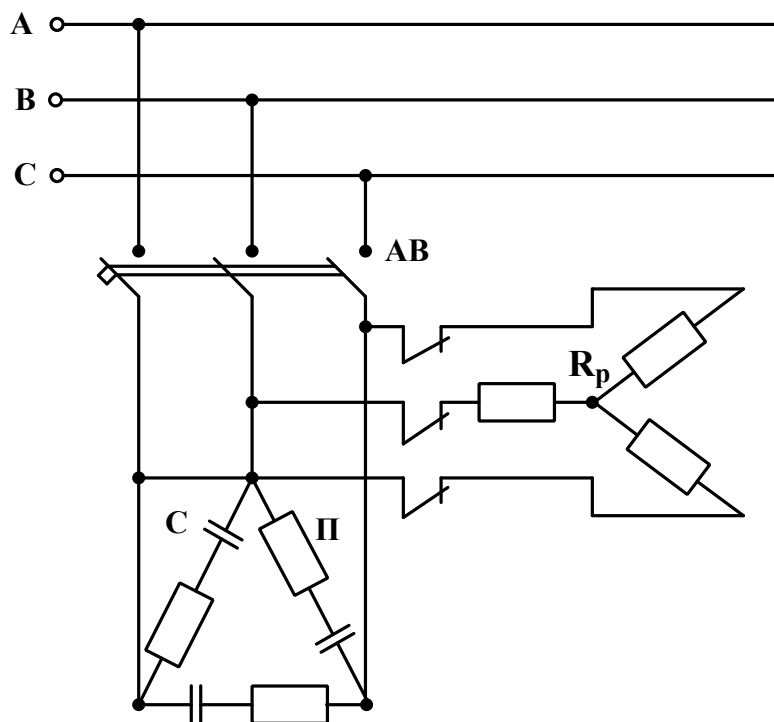


Рисунок 6.1

Розв'язання

Фактична реактивна потужність споживачів електроенергії підприємства:

$$Q_{\phi} = P_{\text{сум}} \cdot \tan \mu_{\phi} = 311,14 \cdot 0,842 = 262 \text{ кВАр},$$

де $\tan \mu_{\phi}$ $\tan \mu_{\phi}$ – фактично «Тангенс фі», що відповідає $\cos \varphi_M$
 $= 0,76$ ($\tan \varphi_M = 0,842$).

Оптимальна реактивна потужність споживачів, виходячи із значення $\tan \mu_{\phi}$, заданого енергосистемою:

$$Q_{\phi} = P_{\text{сум}} \cdot \tan \mu_{\phi} = 311,14 \cdot 0,43 = 134 \text{ Квар} .$$

Реактивна потужність конденсаторів, яка необхідна для підвищення коефіцієнта потужності до заданих меж:

$$Q_{\text{БК}} = Q_{\phi} - Q_{\phi} = 261 - 134 = 128 \text{ Квар} .$$

Для компенсації реактивної потужності у трифазній системі конденсатори у КБК вмикаються за схемою «трикутник», так як при цьому напруга на кожній фазі в $\sqrt{3}$ разів більша, ніж при з'єднанні «зіркою», а необхідна при цьому ємність конденсаторів у 3 рази менша, ніж при з'єднанні «зіркою».

Ємність КБК на три фази при з'єднанні «трикутником»

$$C_{\Delta} = \frac{10^3 \cdot Q_{\text{БК}}}{2\pi f U_{\text{л}}^2} = \frac{10^3 \cdot 128}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,38^2} \cong 2810 \text{ мкФ} ,$$

де f – частота мережі;

$U_{\text{л}}$ – лінійна напруга на батареї конденсаторів, **кВ**;

$Q_{БК}$ – реактивна потужність батареї, кВАр.

За даними розрахунку із довідника [3] обираємо конденсатор типу КТМ5/0,38 ємністю 110 мкФ з $Q_{но} = 5$ кВАр.

Кількість конденсаторів у батареї:

$$N_k = \frac{C_{\Delta}}{C_k} = \frac{2810}{110} \cong 26 \text{ шт.}$$

Кількість конденсаторів у батареї (на три фази) повинна бути кратною 3, тому фактично їх кількість округляємо до $N_{\phi} = 27$ шт.

Фактична потужність батареї:

$$Q_{БКФ} = N_{\phi} \cdot Q_{ном} = 27 \cdot 5 = 135 \text{ кВАр,}$$

де $Q_{ном} = 5$ кВАр – номінальна реактивна потужність одного конденсатора.

Значення розрядного опору конденсаторів на одну фазу при увімкненні опорів «зіркою»

$$R_p = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot U_{\phi}^2}{Q_{БКФ}} = \frac{5 \cdot 10^6 \cdot 0,22^2}{135} \cong 18 \cdot 10^2 \text{ Ом}$$

При увімкненні R_p за схемою «трикутник» значення розрядного опору буде у $\sqrt{3}$ разів більшим. На рисунку 6.1 наведено схему увімкнення КБК.

Задачі для самостійного розв'язування

Задача 1 В однофазну мережу змінного струму увімкнене освітлювальне навантаження і два однофазних асинхронних двигуни Д1 і Д2 (рисунок 6.2).

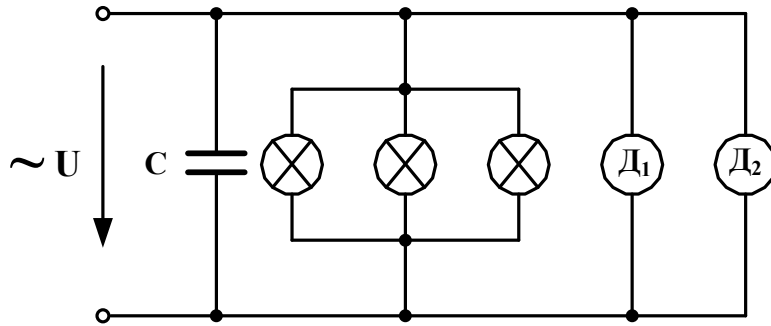


Рисунок 6.2

Номінальна потужність однієї лампи $P_{л}=60$ Вт; число ламп $N_{л}=10$; номінальні дані двигуна;

$$P_{2\text{НОМ}}=0,75 \text{ кВт}; \eta_{\text{НОМ}}=0,75\%; \cos\varphi_{\text{НОМ}}; U_{\text{НОМ}}=220 \text{ В}.$$

Визначити струми у вітках електричного кола і ємність C батареї конденсаторів, яку слід увімкнути, щоб довести коефіцієнт потужності усієї установки до $\cos\varphi_2 = 0,92$.

Задача 2 Асинхронний електродвигун має такі номінальні дані: потужність на валу $P_{2Н}=4,5$ кВт; лінійна напруга $U_{Н}=380$ В; $\eta_{Н}=0,83$, $\cos\varphi_{Н} = 0,76$. Визначити ємність C_{ϕ} однієї фази і сумарну ємність $C_{\text{БК}}$ батареї конденсаторів при з'єднанні її «трикутником», підключеної до затискачів двигуна з метою підвищення його коефіцієнта потужності до значення $\cos\varphi_{Н} = 0,92$.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высш. шк., 2000. – 542 с.

2 Шебес М.Р., Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. – М.: Высш. шк., 1990. – 544 с.

3 Алиев И.И. Электротехнический справочник. –

4-е изд., испр. – М.: ИП РадиоСофт, 2002. – 384 с.