

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра «Електротехніка та електричні машини»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до самостійної роботи з дисципліни

«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»

**для студентів спеціальності «Вагони»
заочної форми навчання**

Харків - 2011

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри “Електротехніка та електричні машини” 11 червня 2010 р., протокол № 10.

Укладачі:
доценти В.С. Блиндюк,
А.А. Прилипко,
О.М. Ананьєва

Рецензент
доц. С.В. Кошевий

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до самостійної роботи з дисципліни
«ЕЛЕКТРОТЕХНІКА»
для студентів спеціальності «Вагони»
заочної форми навчання

Відповідальний за випуск Прилипко А.А.

Редактор Решетилова В.В.

Підписано до друку 30.06.10 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 50. 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.

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ ДО САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Останніми роками, особливо на початку 21 сторіччя, зросла роль електротехніки, електроніки, електрообладнання та електропостачання на залізничному транспорті, а особливо в пасажирських вагонах. На базі цих теоретичних розділів в теперішній час створений пасажирський вагон нового покоління моделі 61-788 („Україна-2”), в конструкції якого знайшли своє відображення нові технічні рішення.

Даний вагон обладнаний:

- централізованою системою енергозабезпечення від високовольтного статичного перетворювача енергії;
- централізованою системою опалення з електричним котлом;
- моноблочною системою кондиціонування повітря;
- вхідними тамбурними дверима з електромеханічним приводом;
- тамбуром із пристроєм підігріву підлоги і вхідних східців;
- інформаційною системою, що дозволяє відображати швидкість руху вагона, відстань від пункту відправлення, відстань до пункту прибуття та ін.;
- купе бізнес-класу додатково обладнано системою трансляції відеопрограм, можливістю прослуховування декількох радіоканалів через головні навушники, можливістю підключення персональних комп'ютерів;
- у чотири- і шестимісних купе реалізована можливість регулювання температури повітря в купе, за бажанням пасажирів.

Вагон обладнаний поїзною автоматизованою інформаційно-діагностичною системою (ПАІДС), що забезпечує оперативний контроль за роботою всіх систем і механізмів поїзда з виведенням результатів на дисплей комп'ютера. Для освоєння таких підсистем студенти повинні одержати відповідну теоретичну підготовку.

При вивченні курсу «Електротехніка» студенти механічного факультету зі спеціальності «Вагони» отримують необхідні знання з основних методів розрахунку та фізичних процесів, з якими доводиться зустрічатись в теорії електричних кіл, електричних вимірювань та електроніки.

Одним з основних видів занять з курсу «Електротехніка» є розв'язання задач на практичних заняттях. Пропоновані у методичних вказівках завдання відповідають новим навчальним програмам. Метою практичних занять є засвоєння студентами відповідних розділів курсу.

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

З кожної теми практичних занять надається приклад розв'язання типової задачі, а потім студенти самостійно розв'язують задачі.

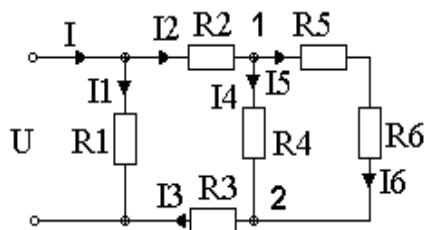
1 ЛІНІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ КОЛА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 При підготовці до розв'язування задач студенти зобов'язані засвоїти такі підрозділи:

- 1 Основні елементи та параметри кола постійного струму. Закон Ома для ділянки кола.
- 2 Закон Ома для повного кола.
- 3 Використання закону Ома при розрахунку та аналізі електричних кіл.
- 4 Закони Кірхгофа для кіл постійного струму.
- 5 Елементи електричного кола постійного струму. Вузол, вітка, контур.
- 6 Приклади використання законів Кірхгофа для розрахунку кіл постійного струму.
- 7 Електричні кола постійного струму з послідовним сполученням кількох опорів. Основні співвідношення.
- 8 Електричні кола постійного струму з паралельним сполученням кількох опорів. Основні співвідношення.

- 9 Провідність. Застосування провідності при аналізі кіл з паралельним сполученням елементів.
- 10 Електричні кола постійного струму з мішаним сполученням кількох опорів. Основні співвідношення.
- 11 Метод еквівалентного опору для розрахунку кіл постійного струму.
- 12 Складні кола постійного струму. Розрахунок методом складання рівнянь за законами Кірхгофа.
- 13 Розрахунок кіл постійного струму методом контурних струмів.
- 14 Розрахунок кіл постійного струму методом суперпозиції (накладання).
- 15 Основні закони електричних кіл постійного струму: закон Ома, закони Кірхгофа, закон Джоуля-Ленца.
- 16 Лінія передач постійного струму. Режим роботи.
- 17 Двопровідна лінія передачі енергії постійного струму. Умова виділення на навантаженні максимальної потужності.

1.2 Приклад розрахунку розгалуженого лінійного електричного кола постійного струму з одним джерелом електричної енергії



Дано:

$$U = 140 \text{ В}; R_1 = 10 \text{ Ом}; R_2 = 12 \text{ Ом}, \\ R_3 = 8 \text{ Ом}; R_4 = 6 \text{ Ом}; R_5 = 13 \text{ Ом}; \\ R_6 = 9 \text{ Ом}.$$

Рисунок 1.1 – Розгалужене електричне коло постійного струму з одним джерелом електричної енергії

Знайти: струми приймачів;
баланс потужностей.

Знайдемо еквівалентний опір

$$1) R_{56} = R_5 + R_6; R_{56} = 22 \text{ Ом}; 2) R_{456} = \frac{R_4 \cdot R_{56}}{R_4 + R_{56}}; R_{456} = 4.714 \text{ Ом};$$

$$3) R_{23456} = R_2 + R_3 + R_{456}; R_{23456} = 24,714 \text{ Ом}; 4) R_{ек} = \frac{R_1 \cdot R_{23456}}{R_1 + R_{23456}}; R_{ек} = 7,119 \text{ Ом}.$$

За законом Ома знайдемо струм джерела

$$I = \frac{U}{R_{ек}}; \quad I = 19,665 \text{ А}, \text{ а також струм } I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_1 = 14 \text{ А}.$$

За першим законом Кірхгофа знаходимо

$$I_2 = I_3 = I - I_1; \quad I_2 = I_3 = 5,665 \text{ А}.$$

Знаходимо падіння напруги

$$U_{12} = I_2 R_{456}; \quad U_{12} = 26,705 \text{ В}$$

За законом Ома,

$$I_4 = \frac{U_{12}}{R_4}; \quad I_4 = 4,451 \text{ А}.$$

А далі знаходимо струми за першим законом Кірхгофа

$$I_5 = I_6 = I_2 - I_4; \quad I_5 = I_6 = 1,214 \text{ А}.$$

Баланс потужностей

$$P_{дж} = UI; \quad P_{дж} = 2753,06 \text{ Вт};$$

$$P_{сп} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3 + I_4^2 R_4 + I_5^2 R_5 + I_6^2 R_6;$$

$$P_{сп} = 2753,06 \text{ Вт}.$$

Струми знайдені правильно.

1.3 Задачі для розв'язування на практичних заняттях

1.3.1 Визначити показання вольтметра (рисунок 1.2).

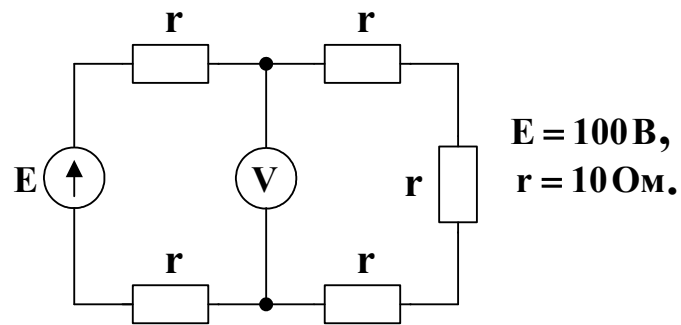


Рисунок 1.2

1.3.2 Визначити усі струми (рисунок 1.3).

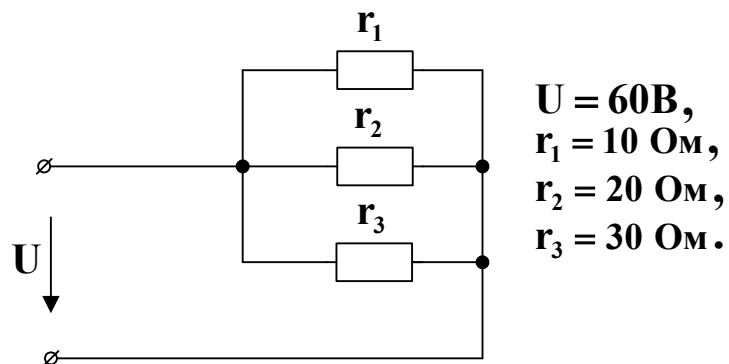


Рисунок 1.3

1.3.3 Визначити вхідний опір (рисунок 1.4).

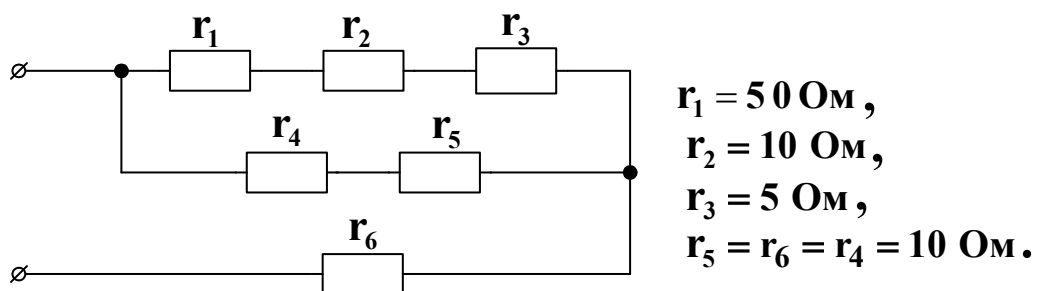


Рисунок 1.4

1.3.4 Визначити вхідний опір (рисунок 1.5).

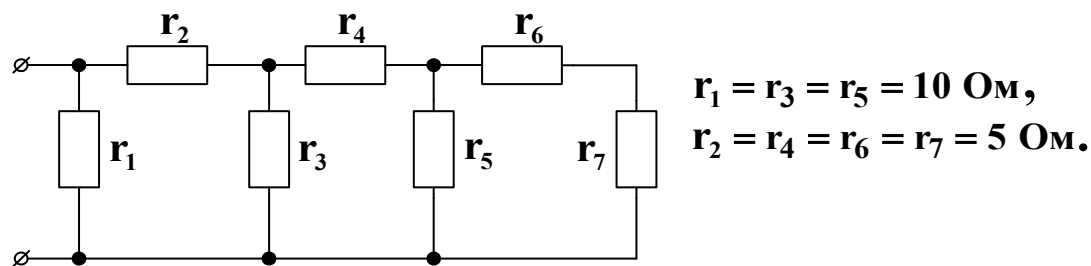


Рисунок 1.5

1.3.5 Визначити вхідний опір (рисунок 1.6).

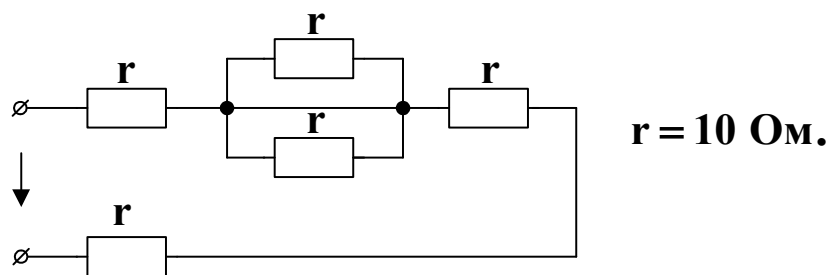


Рисунок 1.6

1.3.6 Як зміниться струм I при замиканні ключа K (рисунок 1.7)?

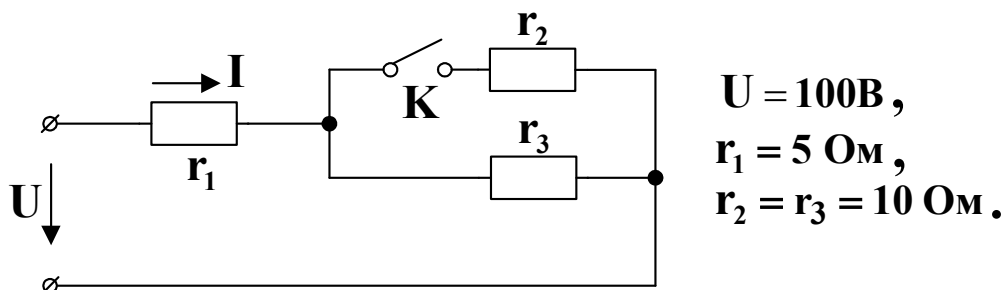


Рисунок 1.7

1.3.7 Визначити напругу U_{ab} (рисунок 1.8).

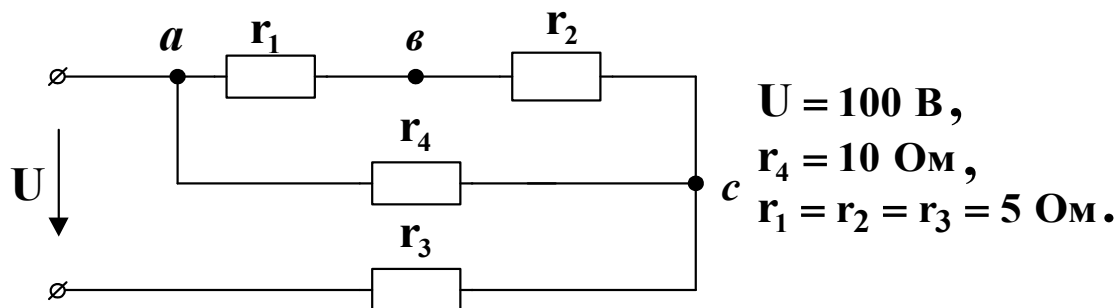


Рисунок 1.8

1.3.8 Визначити усі струми (рисунок 1.9).

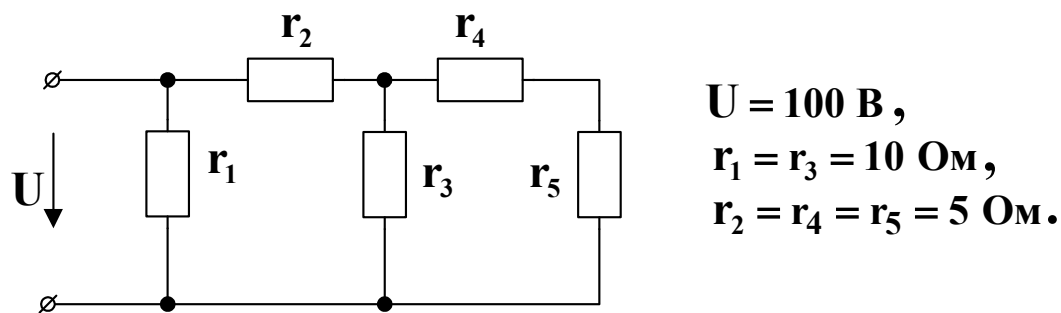


Рисунок 1.9

1.3.9 Визначити потужність, яка витрачається колом (рисунок 1.10).

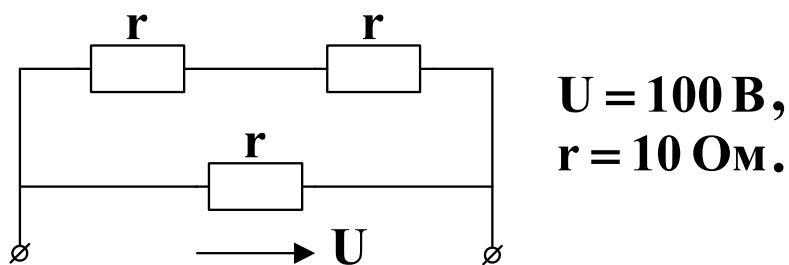


Рисунок 1.10

1.3.10 Визначити показання амперметра (рисунок 1.11).

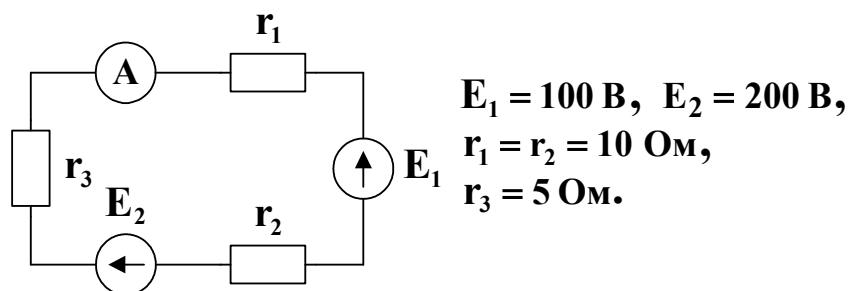


Рисунок 1.11

1.3.11 Скласти рівняння для розв'язання задачі за законами Кірхгофа, за методом контурних струмів, вузлової напруги (рисунок 1.12).

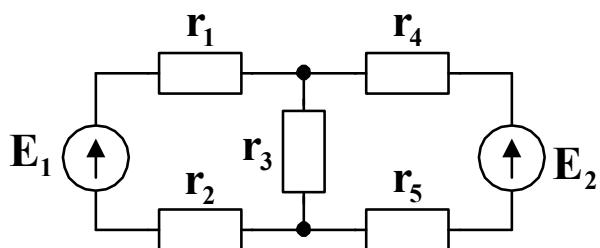


Рисунок 1.12

1.3.12 Для заданого кола скласти рівняння балансу потужності (рисунок 1.13).

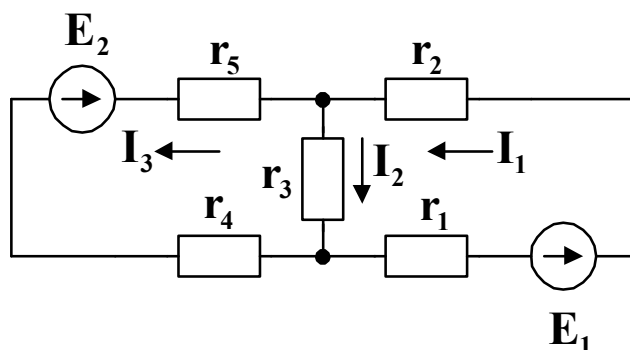


Рисунок 1.13

1.3.13 Двопровідна лінія постійного струму живиться від

джерела потужністю $P_{дж.}=2,5$ кВт. Струм споживання $I=12$ А, опір лінії $R_{л}=2$ Ом.

Визначити потужність навантаження $P_{нав.}$, втрати напруги ΔU та ККД лінії (рисунок 1.14).

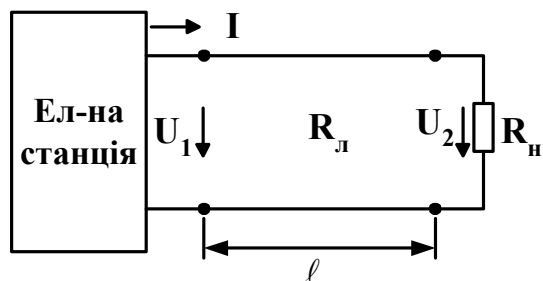


Рисунок 1.14

1.3.14 Як зміниться напруга на ділянках кола при збільшенні $R_1(U=const)$ (рисунок 1.15).

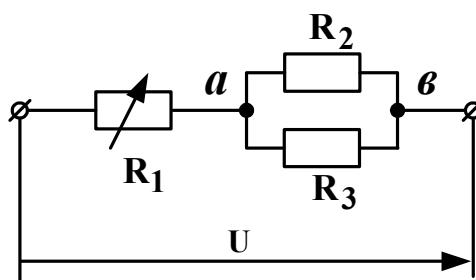


Рисунок 1.15

1.3.15 Записати рівняння, які необхідні для визначення струмів у вітках методом контурних струмів. Знайти дійсні струми у вітках через контурні, якщо $E_1=10$ В, $E_2=8$ В, $R_{01}=R_{02}=5$ Ом, $R_1=R_3=30$ Ом, $R_2=40$ Ом (рисунок 1.16).

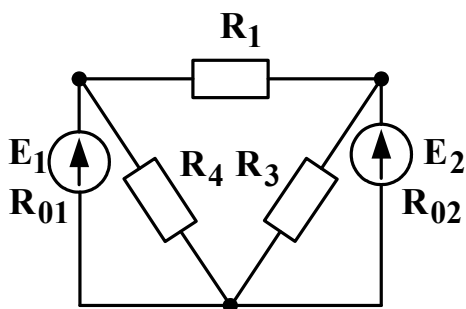


Рисунок 1.16

1.3.16 Напруга на затискачах джерела при холостому ході $U_{xx}=250$ В. Напруга на тих самих затискачах при навантаженому джерелі $U=242$ В. Внутрішній опір джерела $R_0=2,5$ Ом. Визначити струм, опір навантаження R та потужність, яку віддає джерело.

1.3.17 Послідовно включено три резистори R_1 , R_2 , R_3 , потужність, яку споживає коло $P=25$ Вт при струмі навантаження $I=0,2$ А. На ділянці кола, де включені резистори R_1 , R_2 , падіння напруги $U_{12}=55$ В. Опір резистора $R_1=130$ Ом. Визначити R_2 , R_3 та напругу на вході кола.

1.3.18 Джерело напруги має ЕРС $E=4,5$ В та струм короткого замикання $I_{кз}=3,6$ А. Джерело навантажене на резистор з опором $R=5$ Ом. Визначити внутрішній опір джерела, струм навантаження та падіння напруги на джерелі.

2 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ СИНУСОЇДАЛЬНОГО СТРУМУ

2.1 Короткий теоретичний матеріал

При розв'язанні задач з цієї теми слід зрозуміти фізичний зміст явищ, які мають місце в колах змінного струму, знати, що являють собою індуктивний і ємнісний опори, а також різницю між омичним опором кола постійного струму і активним опором кола змінного струму. Треба звернути увагу на причини, які приводять до відставання за фазою струму відносно напруги в колі з котушкою індуктивності і випередження в колі з конденсатором. Необхідно вміти виводити кількісні співвідношення між струмом, напругою і опором кола; звернути увагу на визначення понять діючих, миттєвих і амплітудних значень струмів і напруг.

Розрахунок електричних кіл синусоїдного струму значно спрощується при користуванні комплексними числами. Символічний метод дає змогу замінити геометричні дії над векторами на алгебраїчні. При цьому розрахунок кіл змінного струму роблять таким же чином як 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 a – дійсне число, $j\mathbf{b}$ – уявне число. Уявне число є добуток дійсного числа b на уявну одиницю j , де $j = \sqrt{-1}$. Тоді записуємо, що $\underline{E} = a + j\mathbf{b}$. Це алгебраїчна форма запису комплексної величини.

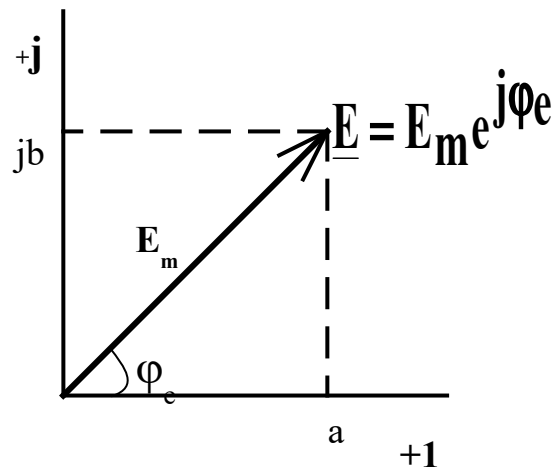


Рисунок 2.1

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: $\underline{E} = E_m e^{j\varphi_e}$ (показникова форма запису).

Аналогічним чином миттєве значення струму $i = I_m \sin(\omega \cdot t + \varphi_i)$ записується в такому вигляді: $\underline{I} = I_m e^{j\varphi_i}$, 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 площині відповідає певне комплексне число, яке може бути записане в показниковій або алгебраїчній формі. Перехід від показникової до алгебраїчної форми запису здійснюється за формулою (2.1)

$$E_m e^{j\varphi_e} = E_m \cos(\varphi_e) + jE_m \sin(\varphi_e) = a + jb. \quad (2.1)$$

Щоб перейти навпаки від алгебраїчної до показникової форми, потрібно спочатку знайти амплітуду

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

При підготовці до розв'язування задач студенти зобов'язані засвоїти такі підрозділи:

- 1 Електричні кола однофазного змінного струму.
- 2 Галузі застосування змінного струму в промисловості та транспорті. Одержання змінного струму.
- 3 Основні параметри миттєвих значень ЕРС та струму: амплітуда, частота, період, зсув фаз, діюче значення.
- 4 Одержання змінного струму. Діюче, миттєве, середнє та амплітудне значення синусоїдних величин.
- 5 Коло змінного струму з активним опором. Основні співвідношення та векторні діаграми.
- 6 Коло змінного струму з індуктивним опором. Основні співвідношення та векторні діаграми.
- 7 Коло змінного струму з ємнісним опором. Основні співвідношення та векторні діаграми.
- 8 Комплексний спосіб розрахунку кіл синусоїдного струму. Зображення синусоїдних струмів та напруг векторами на комплексній площині.
- 9 Закони Кірхгофа в символічній формі запису.
- 10 Індуктивний елемент. Чим відрізняються поняття: чиста індуктивність та реальна котушка індуктивності? Векторна діаграма.

- 11 Коло з активним опором R та індуктивністю L . Основні співвідношення та векторна діаграма для кола, що містить котушку.
- 12 Паралельне з'єднання R, L, C . Резонанс струмів, основні співвідношення та векторні діаграми.
- 13 Коло змінного струму з послідовним з'єднанням R, L, C . Основні співвідношення та векторні діаграми. Резонанс напруг.
- 14 Активна, реактивна та повна потужність у колі змінного струму.
- 15 Послідовне з'єднання R, L, C . Трикутники опорів, напруг та потужності.

2.2 Приклад розрахунку електричних схем змінного струму з застосуванням символічного методу

Приклад 2.2.1

Нехай для електричного кола синусоїдного струму, схема заміщення показана на рисунку 2.2, задано: діюче значення ЕРС джерела $E_0 = 160$ В; опори елементів $R_0 = 3,2$ Ом; $X_L = 5,6$ Ом; $X_{C1} = 20$ Ом; $R_2 = 17,7$ Ом; $X_{C2} = 13,3$ Ом.

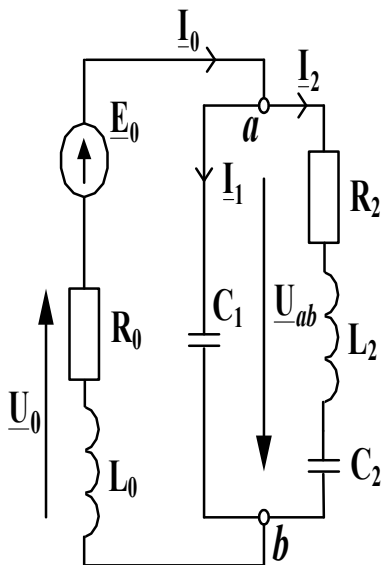


Рисунок 2.2

Визначити струми у вітках кола, напруги на їх елементах, потужності джерела і споживачів, побудувати векторну діаграму.

Розв'язання. Розрахунок будемо виконувати символічним методом. У вітках схеми позначимо комплексні струми \underline{I}_0 , \underline{I}_1 і \underline{I}_2 . Від вхідної схеми (рисунок 2.2) перейдемо до схеми (рисунок 2.3,а). з комплексними опорами Ці опори визначимо в алгебраїчній формі і зразу перейдемо до показової форми:

$$\begin{aligned}\underline{Z}_0 &= R_0 + jX_{L0} = 3,2 + j5,6 = \sqrt{3,2^2 + 5,6^2} e^{j \arctg(5,6/3,2)} = 6,45 e^{j60,3^0} \text{ Ом}; \\ \underline{Z}_1 &= -jX_{C1} = -j20 = 20 e^{-j90^0} \text{ Ом}; \\ \underline{Z}_2 &= R_2 + j(X_{L2} - X_{C2}) = 17 + j40,7 = 44,4 e^{j66,5^0} \text{ Ом}.\end{aligned}$$

Ділянку з паралельним з'єднанням \underline{Z}_1 і \underline{Z}_2 замінимо еквівалентним комплексним опором і отримуємо схему за рисунком 2.3.

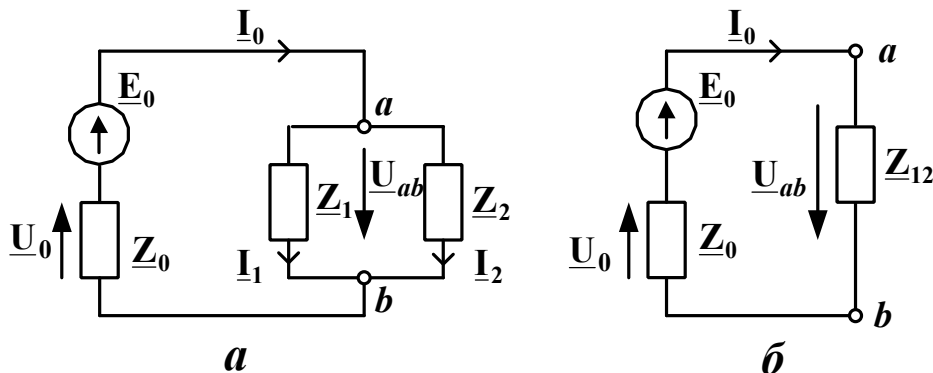


Рисунок 2.3

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{12} &= \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{20 e^{-j90^0} \cdot 44,4 e^{j66,5^0}}{-j20 + 17,7 + j40,7} = \frac{888 e^{-j23,5^0}}{17,7 + j20,7} = \frac{888 e^{-j23,5^0}}{27,2 e^{j45,5^0}} = 32,6 e^{j73^0} = \\ &= 32,6 e^{-j73^0} = 32,6 \text{ cjs}(-73^0) + j32,6 \text{ sin}(-73^0) = (9,5 - j31,2) \text{ Ом}.\end{aligned}$$

Послідовно з'єднані \underline{Z}_0 і \underline{Z}_{12} замінимо опором

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{\text{Ек}} &= \underline{Z}_0 + \underline{Z}_{12} = 3,2 + j5,6 + 9,5 - j31,2 = 12,7 - j25,6 = \\ &= \sqrt{12,7^2 + (-25,6)^2} e^{j \arctg(-25,6/12,7)} = 28 e^{j63,6^0} \text{ Ом}.\end{aligned}$$

Загальний струм кола і джерела, за законом Ома,

$$\begin{aligned}\underline{I}_0 &= \underline{E}_0 / \underline{Z}_{\text{Е}} = 160 / 28,6 e^{-j63,6^0} = 5,59 e^{j63,6^0} = 5,59 \cos 63,6^0 + j5,59 \sin 63,6^0 = \\ &= (2,49 + j5,01) \text{ А},\end{aligned}$$

де $\underline{E}_0 = E_0 e^{j\psi_{e0}} = 160 e^{j0^0} = 160 \text{ В}$, так як прийняли початкову фазу ЕРС довільно ($\psi_{e0} = 0^0$).

Напруги на ділянках кола (рисунок 2.3,б), за законом Ома,

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ab} &= \underline{I}_0 \underline{Z}_{12} = 5,59 e^{j63,6^0} \cdot 32,6 e^{-j73^0} = 182,2 e^{-j9,4^0} = (197,8 - j29,8) \text{ В}; \\ \underline{U}_0 &= \underline{I}_0 \underline{Z}_0 = 5,59 e^{j63,6^0} \cdot 6,45 e^{j60,3^0} = 36 e^{j123,9^0} = (-20 + j29,9) \text{ В}.\end{aligned}$$

Струми у вітках \underline{Z}_1 і \underline{Z}_2 на схемі (рисунок 2.3,а), за законом Ома,

$$\begin{aligned}\underline{I}_1 &= \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_1 = 182,2e^{-j9,4^\circ} / 20e^{-j90^\circ} = 9,11e^{j80,6^\circ} = 1,49 + j8,99 \text{ А}; \\ \underline{I}_2 &= \underline{U}_{ab} / \underline{Z}_2 = 182,2e^{-j9,4^\circ} / 44,4e^{j66,5^\circ} = 4,1e^{-j75,9^\circ} = 1,0 - j3,98 \text{ А}.\end{aligned}$$

Розв'язання можна перевірити за схемою рисунка 2.16 на підставі першого і другого законів Кірхгофа:

$$\begin{aligned}\underline{I}_0 &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 1,49 + j8,99 + 1,0 - j3,98 = (2,49 + j5,01)\text{А}; \\ \underline{E}_0 &= \underline{U}_{ab} + \underline{U}_0 = 179,8 - j29,8 - 20 + j29,9 = (159,8 + j0,18)\text{В},\end{aligned}$$

що практично дорівнює вхідним значенням \underline{I}_0 і \underline{E}_0 .

Використовуючи алгебраїчну форму комплексних значень ЕРС, напруг і струмів, на рисунку 2.4 будується векторна діаграма у вибраних масштабах цих величин. Дійсні частини відкладають по осі абсцис (-1, +1), уявні – по осі ординат (-j, +j). На діаграмі вказані кути початкових фаз Ψ , а також виконана перевірка, за законами Кірхгофа, для векторів.

Діючі значення напруг і струмів отримані як модулі комплексних значень в показовій формі. Зокрема, $U_{ab} = 182,2 \text{ В}$; $U_0 = 36 \text{ В}$; $I_0 = 5,59 \text{ А}$; $I_1 = 9,11 \text{ А}$; $I_2 = 4,1 \text{ А}$.

Початкові фази отримуються звідти ж, як аргументи у показниках:

$$\psi_{U_{ab}} = -9,4^\circ; \quad \psi_{U_0} = 123,9^\circ; \quad \psi_{I_0} = 63,6^\circ; \quad \psi_{I_1} = 80,6^\circ; \quad \psi_{I_2} = -75,9^\circ.$$

Комплексні потужності джерела і віток схеми, В·А:

$$\begin{aligned}\underline{S}_E &= \underline{E}_0 \underline{I}_0^* = 160 \cdot 5,59e^{-j63,6^\circ} = 894,4e^{-63,6^\circ} = 894,4 \cos(-63,6^\circ) + \\ &+ j894,4 \sin(-63,6^\circ) = 397,7 - j801;\end{aligned}$$

$$\underline{S}_0 = \underline{U}_0 \underline{I}_0^* = 36e^{j123,9^\circ} \cdot 5,59e^{-j63,6^\circ} = 201,2e^{j60,3^\circ} = 99,7 + j174,8;$$

$$\underline{S}_1 = \underline{U}_{ab} \underline{I}_1^* = 182,2e^{-j9,4^\circ} \cdot 9,11e^{-j80,6^\circ} = 1659,8e^{-j90^\circ} = -j1659,8;$$

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_{ab} \underline{I}_2^* = 182,2e^{-j9,4^\circ} \cdot 4,1e^{j75,9^\circ} = 747e^{j66,5^\circ} = 297,9 + j685.$$

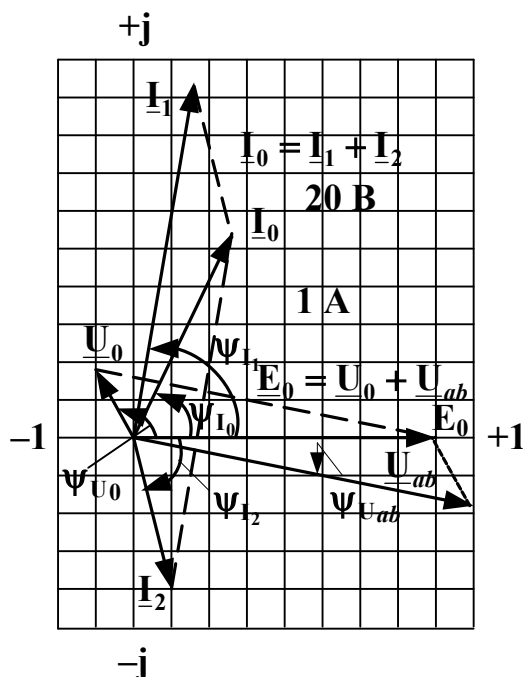


Рисунок 2.4

Активні потужності, Вт: $P_E = 397,7$; $P_0 = 99,7$; $P_1 = 0$;
 $P_2 = 297,9$.

Реактивні потужності, вар: $Q_E = -801$; $Q_0 = 174,8$;
 $Q_1 = -1659,8$; $Q_2 = 685$.

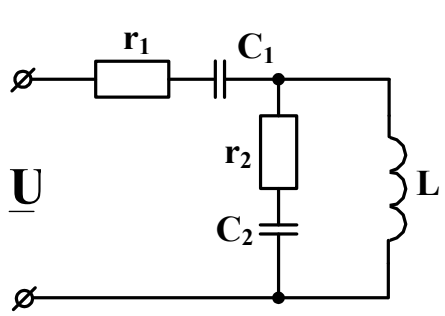
Перевірка розв'язання за балансом потужностей:

$$P_0 + P_1 + P_2 = 397,6 \text{ Вт} \approx P_E;$$

$$Q_0 + Q_1 + Q_2 = 174,8 - 1659,8 + 685 = -800 \text{ вар} \approx Q_E.$$

2.3 Задачі для самостійного розв'язування

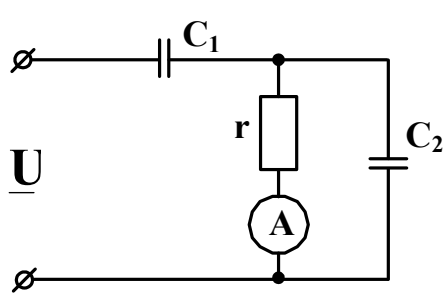
Задача 2.3.1 Для кола (рисунок 2.5) синусоїдного струму задано параметри включених до нього елементів і діючі значення напруги на його затискачах, частота живильної напруги дорівнює $f = 50$ Гц. Визначити діючі значення струмів у вітках і в нерозгалуженій частині кола комплексним методом.



$\underline{U} = 220 \text{ В}; r_1 = 6 \text{ Ом}; C_1 = 900 \text{ мкФ};$
 $r_2 = 4 \text{ Ом}; C_2 = 900 \text{ мкФ}; L = 20$
 мГн.

Рисунок 2.5

Задача 2.3.2 За заданими параметрами елементів і діючим значенням напруги на вході визначити струми комплексним методом у вітках і в нерозгалуженій частині кола, поданого на рисунку 2.6. Побудувати векторну діаграму.



$\underline{U} = 127 \text{ В}; f = 50 \text{ Гц}; r = 10 \text{ Ом};$
 $C_1 = 700 \text{ мкФ}; C_2 = 3500 \text{ мкФ.}$

Рисунок 2.6

3 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ТРИФАЗНИХ КІЛ СИНУСОЇДНОГО СТРУМУ

3.1 Короткий теоретичний матеріал

Трифазне коло є сукупністю трьох електричних кіл, в яких діють синусоїдні ЕДС 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 одна відносно одної на 120° . У фазах генератора індукуються симетрична трифазна система ЕДС, в якій електрорушійні сили однакові за амплітудою та розрізняються за фазою на 120° . Запишемо миттєві значення та комплекси діючих ЕДС.

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

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

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

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

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

3.2 Трифазне коло, з'єднане «зіркою»

Зі схеми на рисунку 3.1 видно, що при з'єднанні приймача зіркою фазні та лінійні струми рівні між собою. При симетричному навантаженні струми у фазах рівні та зсунуті на той самий кут по відношенню до відповідних фазних напруг.

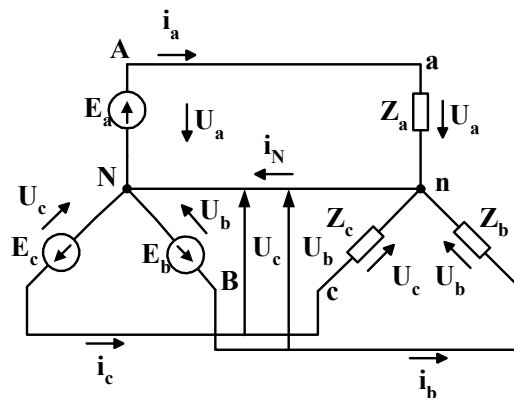


Рисунок 3.1

Векторна діаграма напруги та струмів при симетричному навантаженні зображена на рисунку 3.2.

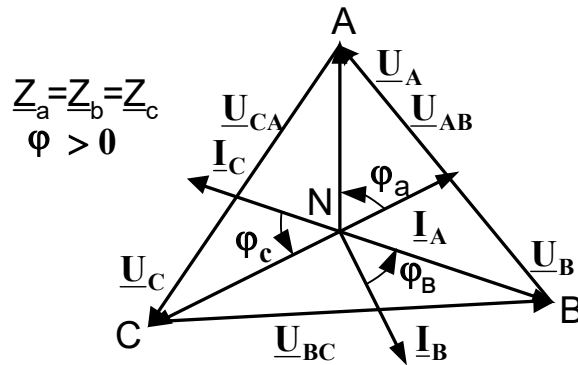


Рисунок 3.2

З діаграми видно, що $I_a + I_b + I_c = 0$, тобто при симетричному навантаженні струм у нейтральному проводі дорівнює нулю та необхідність у цьому проводі відпадає.

Трифазне коло без нейтрального проводу буде трипровідним (рисунок 3.3).

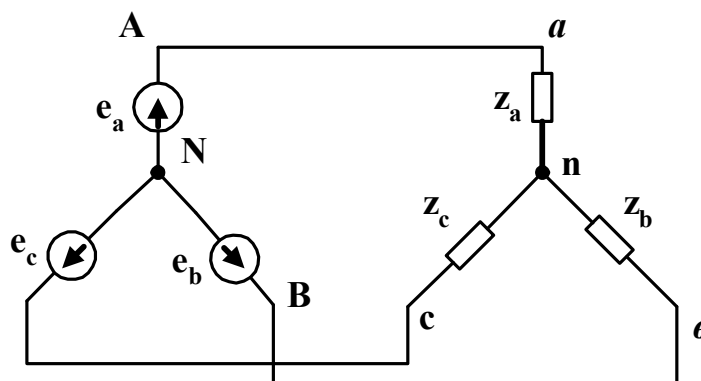


Рисунок 3.3

З векторної діаграми (рисунок 3.2) видно, що при з'єднанні «зіркою» симетричних (трифазних) приймачів

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

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» включаються тільки симетричні трифазні приймачі: електричні двигуни, електричні печі 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 та 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

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

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

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

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 (рисунки 3.4,а та б), завдяки нейтральному проводу, напруги на кожній з фаз приймача будуть незмінними та рівними відповідним фазним напругам джерела живлення як за величиною, так і за фазою.

При цьому струми у фазах будуть різними та через нейтральний провід буде протікати струм $\underline{I}_N \neq 0$. Отже,

нейтральний провід забезпечує симетрію фазних напруг приймача при несиметричних приймачах $I_N = I_A + I_B + I_C$.

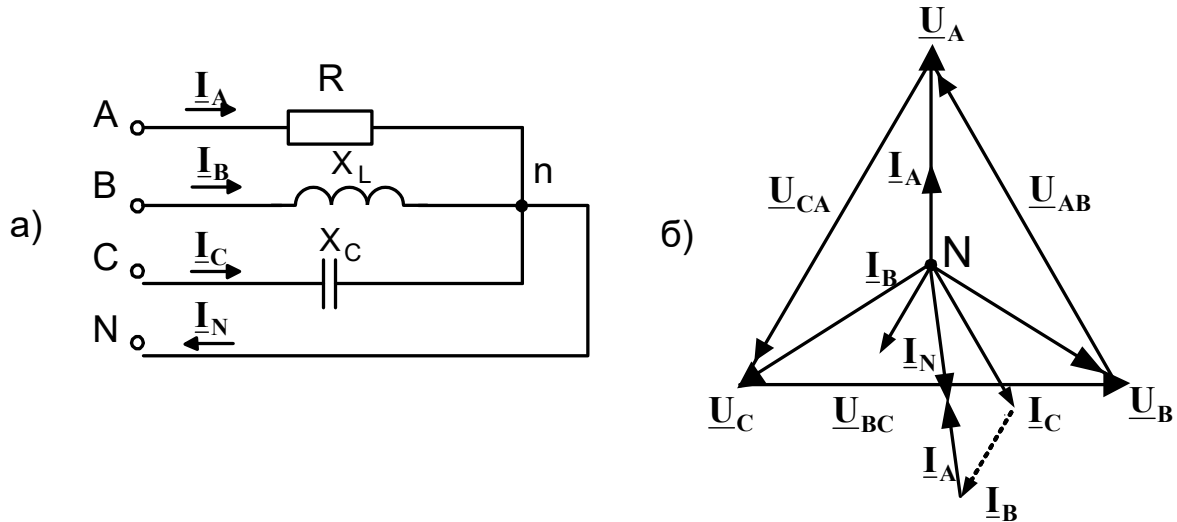


Рисунок 3.4 – Схема ввімкнення несиметричного приймача (а), векторна діаграма напруги та струмів (б)

Тому в чотирипровідну мережу включають однофазні несиметричні приймачі (наприклад, лампи розжарювання) та 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, $I_A = U_A / Z_A$.

У випадку обриву нейтрального проводу та несиметричному навантаженні між нейтральними точками генератора та приймача виникає напруга зсуву нейтралі U_{nN} , що викликає перекіс фазних напруг на приймачах. Тому в нейтральний провід не вмикають ані плавкі запобіжники, ані рубильники, ані 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 та розрахувати струми, які протікають через них.

Фазні напруги та струми приймачів будуть відповідно такими:

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

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

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 та струмів для цього випадку (рисунок 3.5).

Векторна діаграма побудована у випадку активного несиметричного навантаження.

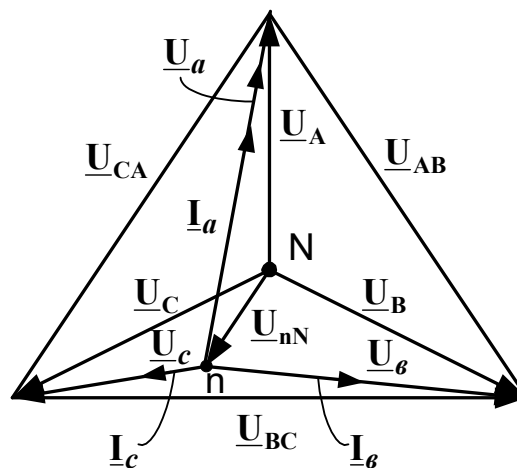


Рисунок 3.5 – Векторна діаграма при зсуві нейтралі

3.3 Трифазне коло, з'єднане «трикутником»

При з'єднанні споживачів «трикутником» (рисунок 3.6) кожен споживач вмикається між двома відповідними лінійними

проводами, внаслідок чого перебуває під лінійною напругою генератора, яка одночасно є фазовою напругою споживача.

Згідно з рисунком 3.6, $U_{AX}=U_{AB}$, $U_{BY}=U_{BC}$ 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 та кут зсуву між фазовим струмом та фазовою напругою визначаються за формулами

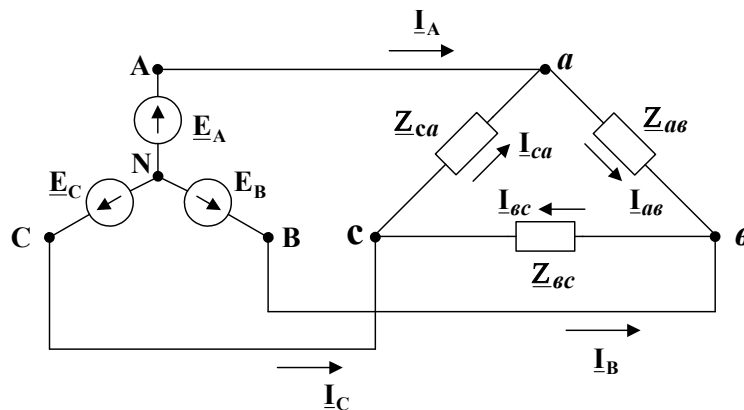


Рисунок 3.6 – Схема з'єднання споживачів «трикутником»

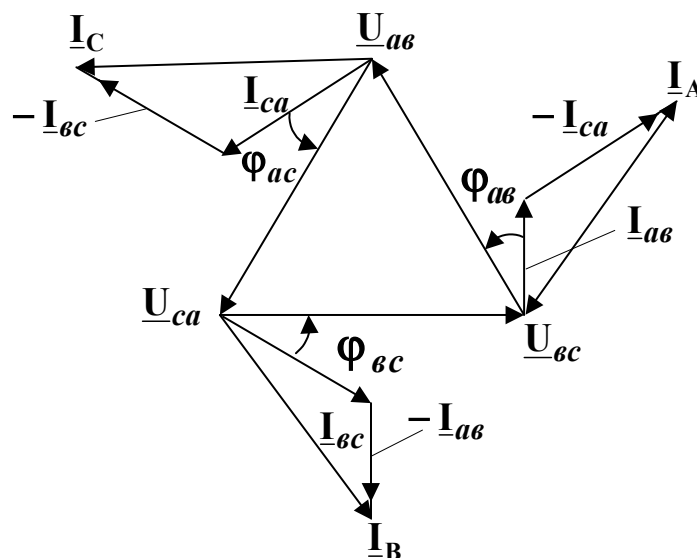


Рисунок 3.7 – Векторна діаграма при з'єднанні споживачів «трикутником»

$$I_{AB} = U_{AB} / Z_{AB}, \quad I_{BC} = U_{BC} / Z_{BC}, \quad I_{CA} = U_{CA} / Z_{CA},$$

тобто

$$I_{\phi} = U_{\phi} / Z_{\phi}, \quad \varphi_{\phi} = \arctg X_{\phi} / Z_{\phi}.$$

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

$$I_A = I_{AB} - I_{CA}, \quad I_B = I_{BC} - I_{AB}, \quad I_C = I_{CA} - I_{BC}.$$

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

$$I_{\pi} = \sqrt{3} I_{\phi}.$$

Векторні діаграми напруги та струмів для симетричного та несиметричного навантажень при з'єднанні споживачів «трикутником» зображені на рисунку 3.7.

При підготовці до розв'язування задач студенти зобов'язані засвоїти такі підрозділи:

- 1 Класифікація підключення обмоток генератора трифазної ЕРС.
- 2 Трифазні кола. Основні поняття. Співвідношення між лінійними та фазними величинами при з'єднанні «трикутником».
- 3 Трифазна напруга. Сполучення приймачів «трикутником», основні співвідношення та векторна діаграма.
- 4 Трифазна напруга. Сполучення приймачів «зіркою», основні співвідношення та векторна діаграма.
- 5 Потужність трифазних систем. Коефіцієнт потужності та його техніко-економічне значення.
- 6 Коефіцієнт потужності та його техніко-економічне значення.
- 7 Симетричне навантаження в трифазних колах. Векторна діаграма.
- 8 Перекіс фаз. Несиметричне навантаження в трифазних колах. Векторна діаграма.

9 Фазні та лінійні напруги. Місце вимірювання цих напруг за допомогою вольтметра.

3.4 Приклад розрахунку трифазного кола, з'єднаного за схемою «зірка»

Приклад 3.4.1

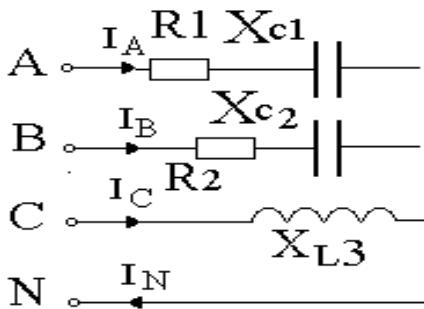


Рисунок 3.8 – Схема для розрахунку

Дано:

$$U_L = 220 \text{ В};$$

$$R_1 = 4 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 7 \text{ Ом};$$

$$X_{C1} = 7 \text{ Ом};$$

$$X_{C2} = 5 \text{ Ом};$$

$$X_{L3} = 9 \text{ Ом}.$$

Знайти: Струми в фазах та в нейтральному проводі (див. Рисунок 3.8); показання приладів; потужність трифазної системи. Побудувати векторну діаграму.

Розв'язання. Фазна напруга $U_\phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}.$

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

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

$$\underline{U}_B = U_\phi e^{-j120^\circ} = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_C = U_\phi e^{j120^\circ} = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Фазні опори кола:

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

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

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

Визначимо фазні струми:

$$\underline{I}_A = \frac{U_A}{\underline{Z}_A} = 15,7e^{j60} \text{ А; } \underline{I}_B = \frac{U_B}{\underline{Z}_B} = 14,8e^{-j84} \text{ А; } \underline{I}_C = \frac{U_C}{\underline{Z}_C} = 14,1e^{j30} \text{ А.}$$

Струм в нейтральному проводі

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

Визначимо, що показують амперметри:

$$I_{A1} = 15,7 \text{ А;}$$

$$I_{A2} = 14,8 \text{ А;}$$

$$I_{A3} = 14,1 \text{ А;}$$

$$I_{A4} = 22,3 \text{ А.}$$

Знаходимо активну та реактивну потужності:
активна потужність:

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

$$P_a = 992,8 \text{ Вт; } P_b = 1526 \text{ Вт; } P_c = 0 \text{ Вт; } P = P_a + P_b + P_c = 2519 \text{ Вт;}$$

реактивна потужність:

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

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

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

повна потужність системи:

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

Побудуємо векторну діаграму напруг разом з векторами струмів (див. рисунок 3.9).

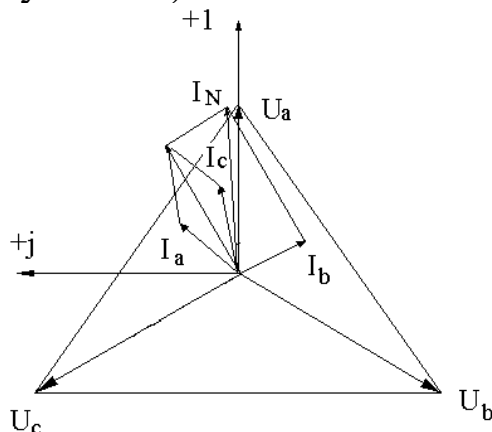
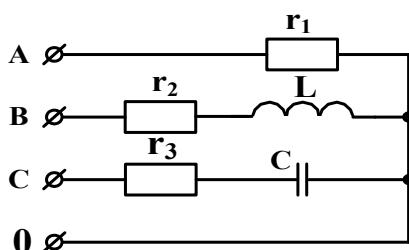


Рисунок 3.9 – Векторна діаграма

3.5 Задачі для самостійного розв'язування

Задача 3.5.1. До трифазного джерела з лінійною напругою U_L підключено коло (див. рисунок 3.10). Визначити струми в лінійних і нейтральному проводах. Побудувати векторну діаграму.

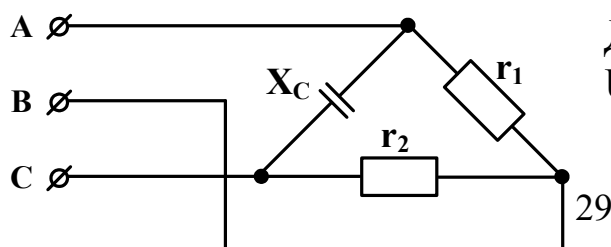


Дано:

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

Рисунок 3.10 – Схема для розрахунку

Задача 3.5.2. До трифазного джерела з лінійною напругою U_L підключено коло (див. рисунок 3.11). Визначити лінійні і фазні струми. Побудувати векторну діаграму.



Дано:

$$U_L = 127 \text{ В}; \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad X_C = 7$$

Ом;
 $r_1 = 100 \text{ Ом}; r_2 = 4 \text{ Ом}.$

Рисунок 3.11 – Схема для
розрахунку

Задача 3.5.3. До трифазної мережі з лінійною напругою $U_a = 380 \text{ В}$ підключено два споживачі, один з яких з'єднано «зіркою», а другий «трикутником» (рисунок 3.12). Параметри елементів споживачів такі: $R=X_L=X_C=22 \text{ Ом}$. Визначити показання амперметрів (струми I_A, I_N).

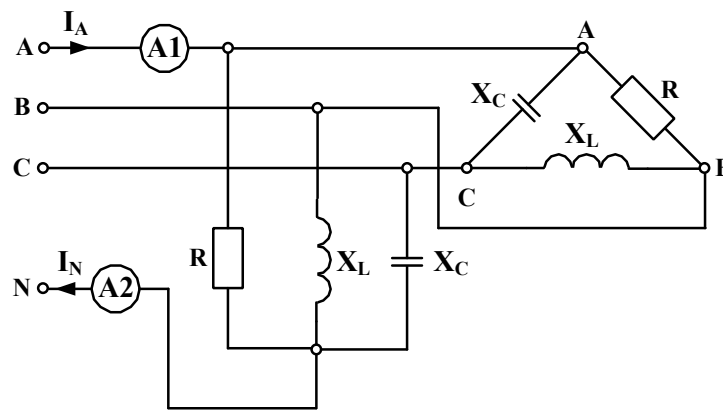


Рисунок 3.12 – Схема для розрахунку

Список літератури

- 1 Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. – М.: Высшая школа, 2000. – 542 с.
- 2 Электротехника /Под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высшая школа, 1993.
- 3 Родзевич В.Е. Загальна електротехніка. – К.: Вища школа, 1993.
- 4 Березкина Т.Ф., Гусев Н.Г., Маслеников В.В.. Задачник по общей электротехнике с основами электроники - М.: Высшая школа, 1991.
- 5 Электротехника / Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1985.

- 6 Орантский П.П. Автоматические измерения и приборы. – 4 – е изд, перераб. и доп. – К.: Высшая школа, 1980.
- 7 Сборник задач по электротехнике и основам электроники / Под ред. В.С. Пантюшина. – М.: Высшая школа, 1979.

