

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЗАПОРІЗЬКА ПОЛІТЕХНІКА"

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до самостійної роботи та виконання РГЗ №3
з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки"
"Трифазні електричні кола синусоїдного струму" (ІІІ модуль)
для студентів, які навчаються за спеціальністю
141 – "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка",
всіх форм навчання

Методичні вказівки до самостійної роботи та виконання РГЗ №3 з дисципліни "Теоретичні основи електротехніки" Трифазні електричні кола синусоїдного струму" (III модуль) для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 – "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка", всіх форм навчання /Укл.: В.В. Козлов, О.В. Набокова. - Запоріжжя: НУ "Запорізька політехніка", 2020. - 58 с.

Укладачі: В.В. Козлов, доцент, к.т.н.
О.В. Набокова, доцент

Рецензент: С.М. Тиховод, доцент, д.т.н.

Відповідальний за випуск: В.В. Козлов, доцент, к.т.н.

Затверджено
на засіданні кафедри ТЗЕ
Протокол №6
від "04" березня 2020 року

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол №6
від "04" квітня 2020 року

ЗМІСТ

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ	4
1 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	5
1.1 Основні поняття про багатofазні кола	5
1.2 Основні схеми з'єднання трифазних електричних кіл	8
1.2.1 Незв'язана система трифазних електричних кіл	8
1.2.2 Основні схеми з'єднання обмоток генератора	10
1.2.3 Схеми з'єднання навантаження	12
1.3 Несиметричний режим трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка з нейтральним проводом, опором якого не можна зневажити	14
1.4 Несиметричний режим трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка з нейтральним проводом, опором якого можна зневажити	18
1.5 Симетричний режим трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка	19
1.6 Аварійні режими трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка	20
1.7 Призначення нейтрального проводу	27
1.8 Розрахунок трифазного кола при з'єднанні навантаження за схемою трикутник	28
1.9 Аварійні режими трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-трикутник	34
1.10 Потужність трифазного кола	38
2 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ	40
3 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ	42
4 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ Й ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКО- ВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ	45
ЛІТЕРАТУРА	58

ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

Одним з найбільш важливих етапів самостійної роботи студентів при вивченні ТОЕ є виконання розрахунково-графічних робіт, які допомагають засвоєнню матеріалу курсу.

Перш ніж приступити до виконання даної розрахунково-графічної роботи, необхідно твердо засвоїти основні визначення електричних величин, а також поняття й закони, якими встановлюється зв'язок між ними.

Варто повторити необхідні розділи теоретичного курсу за конспектом лекцій, даними методичним вказівкам і рекомендованою літературою, і пригадати з курсу математики матричну форму запису системи лінійних алгебраїчних рівнянь і прийоми її розрахунку.

При виконанні й оформленні розрахунково-графічної роботи необхідно дотримуватися наступних основних вимог:

- роботу оформляють на стандартних аркушах паперу формату А4, що скріплені між собою;
- обкладинкою служить титульний аркуш, на якому вказують навчальний заклад і кафедра, номер, назву й варіант розрахунково-графічної роботи, номер групи, прізвище студента й прізвище викладача;
- на першій сторінці вказують номер і назву завдання, викреслюється схема електричного кола заданого варіанта, наводять вихідні параметри й перераховують вимоги з розрахунку. Така сторінка передує кожній задачі розрахунково-графічної роботи;
- кожен етап розрахунку повинен мати свій заголовок, обчислення й алгебраїчні перетворення супроводжують короткими поясненнями, біля остаточного результату проставляють розмірність;
- у тексті розрахунково-графічної роботи не допускається скорочення слів, крім загальноприйнятих скорочень, таких як ЕРС, ККД і т.д.;
- графіки виконують з дотриманням загальноприйнятих інженерних вимог. По осях наносять рівномірні масштабні шкали. Наприкінці шкали вказується позначення змінної і її розмірність. Координатні системи для різних функцій, що побудовані від одної змінної, повинні розташовуватися на одній сторінці й бути сполучені по осях абсцис;
- при розв'язанні задач необхідно використовувати міжнародну систему одиниць;
- допускається застосовувати в розрахунках математичні пакети програм і наводити в роботі графіки, що побудовані на комп'ютері з дотриманням відповідних вимог.

1 КОРОТКІ ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Основні поняття про багатофазні кола

Трифазні кола є основним видом електричних кіл, які використовують при виробництві, передачі й розподілу електричної енергії. Вони є окремим випадком симетричних багатофазних кіл.

Багатофазне електричне коло являє собою сукупність декількох однофазних електричних кіл (індуковані в одному джерелі енергії), у яких діють синусоїдні ЕРС однакової частоти, що відрізняються за фазою одна від іншої. Кожне з однофазних кіл, що входить до складу багатофазного, називають *фазою багатофазного кола*.

Таким чином в електротехніці термін "фаза" має два несхожі значення:

- аргумент, що характеризує стадію періодичного процесу;
- найменування однофазного кола, що є складовою частиною багатофазного електричного кола.

Кількість однофазних кіл, які входить до складу багатофазного, називають кількістю його фаз. Залежно від кількості фаз у електричному колі розрізняють двофазні, трифазні, шестифазні, дванадцятифазні кола й т.д.

Багатофазне електричне коло називають незв'язаним, якщо його фази не мають електричного зв'язку (кола такого типу практично не застосовуються внаслідок їхньої неекономічності, яка викликана великою кількістю проводів, що з'єднують джерело енергії й навантаження), і зв'язаним, якщо такий зв'язок існує.

Сукупність ЕРС, струмів і напруг у фазах багатофазного кола називають відповідно *багатофазною системою ЕРС, струмів і напруг*.

Таку систему ЕРС (струмів, напруг) називають *симетричною системою*, якщо амплітуди всіх ЕРС (струмів, напруг) й кути зсуву за фазі між ними є однаковими

$$\begin{aligned} E_{m_k} &= E_{m_{k+1}}; \\ \alpha &= \psi_{k+1} - \psi_k = \frac{2\pi}{m}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де m - кількість фаз; $E_{m_k}, E_{m_{k+1}}$ - амплітуди ЕРС e_k и e_{k+1} ; ψ_k, ψ_{k+1} , - початкові фази ЕРС e_k и e_{k+1} .

Найбільше розповсюдження в сучасній електроенергетиці дістали трифазні електричні кола. Це пояснюється рядом їхніх переваг, як перед іншими багатофазними колами, так і перед однофазними колами синусоїдного струму. Серед цих переваг необхідно зазначити наступні:

- економічність виробництва й передачі енергії на дальні відстані трифазними електричними колами у порівнянні з електричними колами з іншою кількістю фаз та колами постійного струму;
- можливість порівняно простого одержання обертового магнітного поля, яке необхідно для перетворення електричної енергії в механічну в обертових машинах змінного струму;
- можливість одержання в одній електроустановці двох різних (за амплітудою) експлуатаційних напруг без додаткових перетворень;
- властивість незмінності значення миттєвої потужності за період синусоїдного струму, якщо навантаження у всіх трьох фазах генератора однакові;
- простота конструкції трифазних генераторів, двигунів і трансформаторів, що забезпечує їхню високу надійність.

Схематична будова найпростішого трифазного генератора представлено на рис. 1.1, *а*, хвильова діаграма й векторна діаграма симетричних ЕРС трифазного генератора - відповідно на рис. 1.1, *б* і рис. 1.1, *в*.

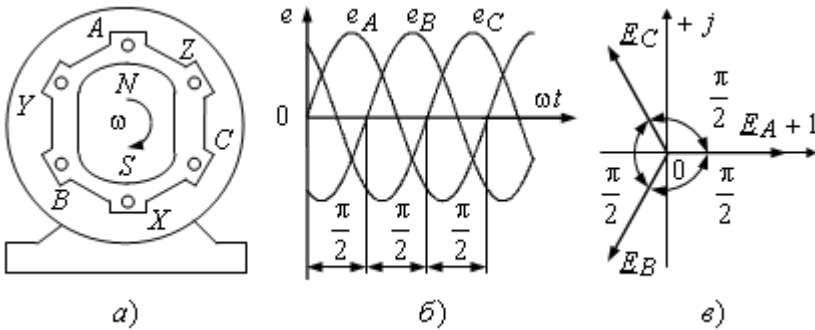


Рисунок 1.1

Не має значення, яку із трьох фаз іменувати літерою *A*, *B* або *C*, істотним є лише їхній порядок проходження одна за одною у часі. Послідовність проходження ЕРС через однакові стани (наприклад, через амплітудні значення або нульові значення) називають *послідовністю чергування фаз*.

Послідовність чергування фаз ЕРС, що представлена на рис. 1.1, б - A, B, C, A . Її називають *прямою послідовністю чергування фаз*. У симетричній трифазній системі друга ЕРС (яку називають фаза B) відстає за фазою від ЕРС фази A на $1/3$ періоду, третя ЕРС (яку називають фаза C) відстає за фазою від ЕРС фази B на $1/3$ періоду або що теж саме випереджає за фазою ЕРС фази A на $1/3$ періоду.

При побудові хвильової й векторної діаграм (рис. 1.1) прийнято за початок відліку часу початок періоду ЕРС у першій обмотці (у фазі A).

З обліком цього миттєві значення ЕРС трифазного генератора

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin \left(\omega \left(t - \frac{T}{3} \right) \right) = E_m \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right); \\ e_C &= E_m \sin \left(\omega \left(t + \frac{T}{3} \right) \right) = E_m \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right). \end{aligned} \quad (1.2)$$

Якщо порядок проходження фаз через однакові стани буде зворотним (C, B, A, C), то дістанемо *зворотну послідовність чергування фаз*.

Послідовність чергування фаз визначає напрямок обертання трифазних двигунів, її також необхідно враховувати при вмиканні трифазних генераторів на паралельну роботу.

Для прямої послідовності ЕРС симетричної системи в комплексній формі мають вигляд

$$\begin{aligned} \underline{E}_A &= E e^{j0}; \\ \underline{E}_B &= \underline{E}_A e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E e^{-j\frac{2\pi}{3}} = E e^{-j120^\circ}; \\ \underline{E}_C &= \underline{E}_A e^{+j\frac{2\pi}{3}} = E e^{+j\frac{2\pi}{3}} = E e^{+j120^\circ}. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Як впливає з векторної діаграми (рис. 1.1, в) для симетричної трифазної системи геометрична сума векторів ЕРС всіх фаз дорівнює нулю:

$$\begin{aligned} \underline{E}_A + \underline{E}_B + \underline{E}_C &= \underline{E} + \underline{E}a^2 + \underline{E}a = \underline{E}(1 + a^2 + a) = \\ &= \underline{E} + \underline{E} \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) + \underline{E} \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (1.4)$$

У нормально функціонуючих трифазних генераторах система ЕРС завжди є симетричною, оскільки виконуються всі умови симетрії (5.1). Забезпечення симетричності системи є необхідною умовою її ефективної роботи. Якщо хоча б одна із цих умов буде порушена (тобто ЕРС будуть різними за амплітудою або зсунені між собою за фазою на різні кути), система стане несиметричною.

У більшості випадків, якщо спеціально не обумовлено, при аналізі трифазних електричних кіл приймають пряму послідовність чергування фазних ЕРС трифазних джерел.

1.2 Основні схеми з'єднання трифазних електричних кіл

1.2.1 Незв'язана система трифазних електричних кіл

Приймачі, які вмикають у трифазне коло, можуть бути як однофазними, так і трифазними. Початки й кінці фаз приймачів позначають відповідно латинськими літерами a, b, c, x, y, z .

Кожну обмотку трифазного генератора можна з'єднати з окремим однофазним приймачем двома проводами, як представлено на рис. 1.2.

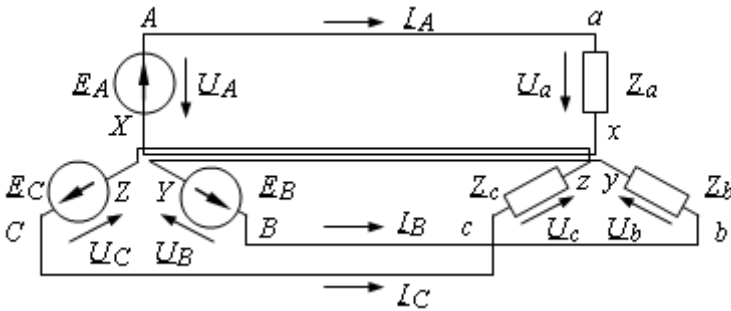


Рисунок 1.2

У цьому випадку утворюється незв'язана система трифазних кіл із шістьма проводами, що являє собою три незалежні однофазні електричні кола. У такому колі три фази з'єднані між собою тільки конструктивно трифазним джерелом і не мають між собою електричного зв'язку.

У цьому випадку розрахунок кожної фази виконують незалежно від інших з використанням методів розрахунку кіл однофазного синусоїдного струму.

Напругу між початками (A, B, C) і кінцями (X, Y, Z) обмоток генератора й напругу між початками (a, b, c) і кінцями (x, y, z) фаз навантаження називають *фазними напругами* відповідно генератора й навантаження.

Якщо внутрішніми опорами обмоток генератора й опорами злучних проводів можна зневажити, то фазні напруги генератора й навантаження чисельно дорівнюють ЕРС

$$\underline{U}_A = \underline{U}_a = \underline{E}_A; \quad \underline{U}_B = \underline{U}_b = \underline{E}_B; \quad \underline{U}_C = \underline{U}_c = \underline{E}_C. \quad (1.5)$$

Струми в фазах електричного кола

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_A}{\underline{Z}_A}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{E}_B}{\underline{Z}_B}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{E}_C}{\underline{Z}_C}. \quad (1.6)$$

Симетричним називають навантаження, комплексні повні опори фаз якого збігаються між собою

$$\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = Ze^{j\varphi}. \quad (1.7)$$

Якщо ця умова не виконується, то навантаження називають *несиметричним*. При цьому навантаження може бути *рівномірним*, якщо $Z_a = Z_b = Z_c = Z$, але $\varphi_a \neq \varphi_b \neq \varphi_c$ або *однорідним*, якщо $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi$, але $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$.

Якщо система ЕРС генератора є симетричною й навантаженні є симетричним, то фазні струми також утворюють симетричну систему. Дійсно, всі вони будуть однакові за амплітудою й зсунені щодо відповідних ЕРС на однакові кути. А тому що вектори ЕРС зсунені відносно один одного на однакові кути $2\pi/3$, то й вектора струму також будуть зсунені друга щодо друга на однакові кути.

Режим, при якому як система ЕРС, так і навантаження є симетричними (а відповідно симетричними є системи фазних струмів й напруг) називають *симетричним режимом трифазного електричного кола*.

Незв'язані трифазні електричні кола не мають ніяких переваг перед однофазними (двопровідними). Вони неекономічні й тому їх практично не застосовують.

1.2.2 Основні схеми з'єднання обмоток генератора

Більш економічними є зв'язані кола, у яких обмотки генератора електрично з'єднані між собою. З'єднання обмоток генератора зіркою або трикутником дозволяє зменшити кількість проводів, які з'єднують генератор з навантаженням, із шести до чотирьох або до трьох.

При з'єднанні фаз обмотки генератора зіркою їхні кінці X, Y, Z з'єднують в один спільний вузол N , який називають *нейтральною точкою генератора* (або *нейтраллю генератора*). Схема трифазного генератора, обмотки якого з'єднані зіркою, представлена на рис. 1.3.

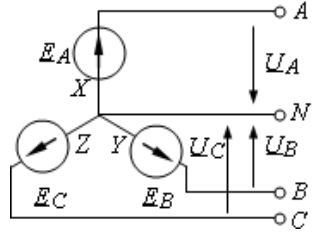


Рисунок 1.3

До початків обмоток генератора A, B, C підмикають проводи, за допомогою яких генератор з'єднують із навантаженням. Ці проводи називають *лінійними*.

У чотирипровідних трифазних колах до нейтралі генератора підмикають *нейтральний провід*. У трипровідних він відсутній.

Напруги між однойменними затискачами генератора (між початками лінійних проводів) називають *лінійними напругами* u_{AB}, u_{BC}, u_{CA} . Додатний напрямок лінійних напруг указують порядком запису індексів.

Миттєві значення фазних напруг дорівнюють різницям миттєвих значень потенціалів початків і кінців відповідних обмоток

$$u_A = \varphi_A - \varphi_X; \quad u_B = \varphi_B - \varphi_Y; \quad u_C = \varphi_C - \varphi_Z. \quad (1.8)$$

Миттєві значення лінійних напруг дорівнюють різницям миттєвих значень потенціалів начал відповідних обмоток

$$u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B; \quad u_{BC} = \varphi_B - \varphi_C; \quad u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A. \quad (1.9)$$

Так як кінці обмоток з'єднані в один вузол, то їхні потенціали дорівнюють один одному $\varphi_X = \varphi_Y = \varphi_Z = \varphi_N$. Тоді миттєві значення лінійних напруг

$$\begin{aligned} u_{AB} &= \varphi_A - \varphi_B = (u_A + \varphi_X) - (u_B + \varphi_Y) = u_A - u_B; \\ u_{BC} &= \varphi_B - \varphi_C = (u_B + \varphi_Y) - (u_C + \varphi_Z) = u_B - u_C; \\ u_{CA} &= \varphi_C - \varphi_A = (u_C + \varphi_Z) - (u_A + \varphi_X) = u_C - u_A. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Комплекси лінійних напруг пов'язані з комплексами фазних напруг наступними співвідношеннями

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A. \quad (1.11)$$

Якщо внутрішніми опорами обмоток генератора можна зневажити, то фазні напруги генератора чисельно дорівнюють фазним ЕРС

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A; \quad \underline{U}_B = \underline{E}_B; \quad \underline{U}_C = \underline{E}_C. \quad (1.12)$$

Відповідно до рівнянь (1.12) побудована векторна топографічна діаграма фазних і лінійних напруг, що представлена на рис. 1.4.

З векторної діаграми видно що, для симетричної системи напруг:

- діючі значення фазних напруг дорівнюють одне одному

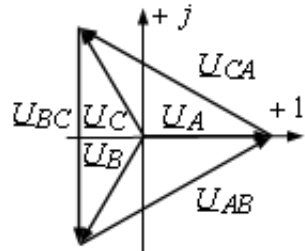


Рисунок 1.4

$$U_A = U_B = U_C = U_\phi; \quad (1.13)$$

- діючі значення лінійних напруг дорівнюють одне одному

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_L; \quad (1.14)$$

- лінійні напруги більше фазних напруг у $\sqrt{3}$ разів

$$U_L = \sqrt{3}U_\phi; \quad (1.15)$$

- вектори лінійних напруг $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$ зсунені за фазою відносно одне одного на кут $2\pi/3$ і випереджають за фазою відповідні й вектори фазних напруг $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ на кути $\pi/6$;

- сума комплексних діючих значень лінійних напруг завжди дорівнює нулю

$$\underline{U}_{AB} + \underline{U}_{BC} + \underline{U}_{CA} = 0. \quad (1.16)$$

Якщо кінець першої обмотки трифазного генератора з'єднаний з початком другої обмотки, кінець другої обмотки з початком третьої й кінець третьої з початком першої, то обмотки генератора з'єднані трикутником (рис. 1.5).

Лінійні проводи приєднують до початків обмоток генератора А, В, С (або, що теж саме до кінців відповідних обмоток генератора Z, X, Y). Фазні ЕРС генератора виявляються з'єднаними з початками фаз: А й В, В й С, С й А. Тому фазні ЕРС у цьому випадку позначають подвійними індексами: $\underline{E}_{AB}$, $\underline{E}_{BC}$, $\underline{E}_{CA}$.

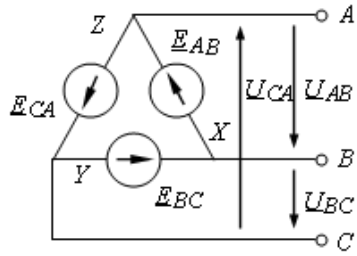


Рисунок 1.5

Обмотки генератора, які з'єднані трикутником, утворюють замкнутий контур із малим опором, у якому діє сума трьох ЕРС $\underline{E}_{AB}$, $\underline{E}_{BC}$, $\underline{E}_{CA}$. Щоб у контурі при відсутності навантаження не виник струм, сума цих ЕРС у будь-який момент часу повинна дорівнювати нулю. Цій умові задовольняє симетрична система ЕРС

$$\underline{E}_{AB} + \underline{E}_{BC} + \underline{E}_{CA} = 0. \quad (1.17)$$

Як впливає зі схеми (рис. 1.5) для з'єднання трикутник лінійні напруги є одночасно й фазними.

Якщо внутрішніми опорами обмоток генератора можна зневажити, то фазні напруги (лінійні) генератора чисельно дорівнюють фазним (лінійним) ЕРС

$$\underline{U}_{AB} = \underline{E}_{AB}; \quad \underline{U}_{BC} = \underline{E}_{BC}; \quad \underline{U}_{CA} = \underline{E}_{CA}. \quad (1.18)$$

У випадку симетричної системи напруг

$$U_L = U_\phi. \quad (1.19)$$

На практиці трифазні генератори переважно з'єднують зіркою. У цьому випадку зберігається можливість створити для живлення приймачів як трипровідну, так і чотирипровідну мережу, яка є більш універсальною, оскільки містить у своєму складі не тільки систему лінійних напруг, але й систему фазних.

1.2.3 Схеми з'єднання навантаження

Приймачі, які приєднують до трифазного кола, можуть бути як однофазними, так і трифазними. Однофазні приймачі, як правило, малопотужні. До них належать освітлювальні прилади, однофазні двигуни, електроінструменти, малопотужні нагрівальні пристрої й мікрод-

вигуни, блоки живлення керуючих автоматів, пристрої інформаційних технологій - персональні комп'ютери, і принтери, побутові прилади.

У паспорті однофазних приймачів указують номінальну напругу U_{nom} . У відповідності зі значенням цього параметра однофазні приймачі в трифазне електричне коло можна увімкнути двома способами:

- між двома лінійними проводами;
- між лінійним проводом і нейтральною точкою генератора.

Для трифазних мереж однофазні приймачі є несиметричним навантаженням.

До трифазних приймачів належать трифазні синхронні й асинхронні двигуни, індукційні печі й інші силові установки. Вони мають три фази, які повністю конструктивно ідентичні. Як правило, трифазні пристрої характеризуються досить великою потужністю. У паспорті трифазних приймачів указують номінальну лінійну напругу U_{nom} . У трифазній мережі трифазні приймачі підмикають до лінійних проводів $U_{nom} = U_L$. При цьому їхні фази можуть бути з'єднані як трикутником так і зіркою. Для трифазних мереж трифазні приймачі як правило є симетричним навантаженням.

В електроенергетиці діючі значення лінійні напруги низьковольтних трифазних кіл мають стандартні значення, що відрізняються друг від друга в $\sqrt{3}$ разів: 127, 220, 380, 660 В. Це дозволяє той самий трифазний приймач експлуатувати на двох суміжних лінійних напругах.

Фази навантаження також можуть з'єднуватися як зіркою, так і трикутником.

Спосіб з'єднання фаз генератора не визначає способу з'єднання фаз трифазного навантаження.

При з'єднанні фаз навантаження зіркою їхні кінці x , y , z з'єднують в один спільний вузол n , що називають *нейтральною точкою навантаження* (або *нейтраллю навантаження*).

При з'єднанні фаз навантаження трикутником кінець першої фази навантаження з'єднаний з початком другої фази, кінець другої фази з початком третьої й кінець третьої з початком першої.

До початків фаз навантаження приєднують лінійні проводи. У чотирипровідних трифазних колах до нейтралей навантаження та ге-

нератора підмикають нейтральний провід. У трипровідних він відсутній.

Існує п'ять найпростіших способів з'єднання трифазного генератора із трифазним навантаженням: зірка - зірка з нейтральним проводом (чотирипровідна зірка), зірка - зірка без нейтрального проводу (трипровідна зірка), зірка - трикутник, трикутник - зірка, трикутник - трикутник.

1.3 Несиметричний режим трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка з нейтральним проводом, опором якого не можна зневажити

Чотирипровідна зірка утворюється після заміни трьох зворотних проводів незв'язаної системи трифазних кіл (рис. 5.4) одним спільним проводом. Цей провід, що з'єднує нейтральну точку генератора N і нейтральну точку навантаження n називають *нейтральним проводом* (рис. 1.6).

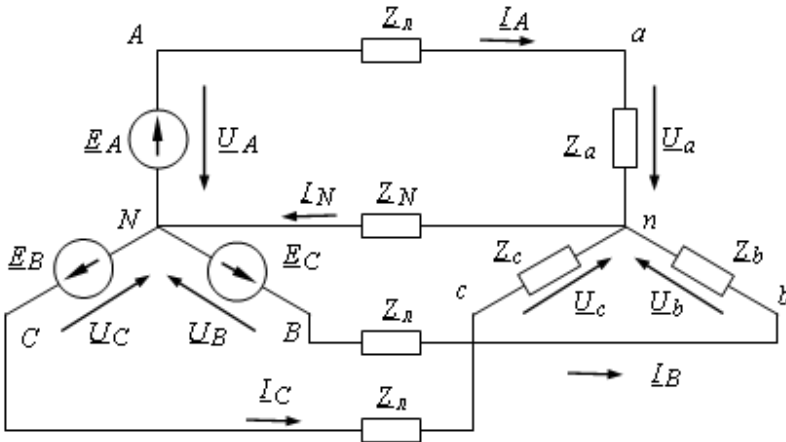


Рисунок 1.6

За додатний напрямок струмів у лінійних проводах (їх називають *лінійні струми*) $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$, прийнято напрямок від генератора до навантаження, а струму в нейтральному проводі $\underline{I}_N$ – від навантаження до генератора. Відповідно до першого закону Кірхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (1.20)$$

Тому що лінійні проводи з'єднані послідовно з фазами генератора й навантаження, лінійні струми при з'єднанні зірка-зірка дорівнюють відповідним фазним струмам.

Опори фаз генератора можуть бути враховані зміною відповідних опорів лінійних проводів.

Розрахунок трифазного кола при наявності в колі тільки статичного навантаження виконують звичайно в символічній формі тими ж методами, які застосовують для розрахунку розгалужених електричних кіл з декількома ЕРС.

Несиметричне трифазне коло, яке представлено на рис. 1.6, може розглядатися як триконтурне коло із трьома ЕРС. Таке коло може бути розрахована шляхом безпосереднього застосування законів Кірхгофа, методом контурних струмів й іншими. Оскільки в схемі є тільки два вузли, найбільш доцільно в цьому випадку застосувати метод вузлових потенціалів (або точніше метод двох вузлів). Уважаючи, що потенціал нейтральної точки генератора дорівнює нулю $\varphi_N = 0$, маємо

$$\varphi_n (\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N) = \underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C, \quad (1.21)$$

де $\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_l}$; $\underline{Y}_B = \frac{1}{\underline{Z}_b + \underline{Z}_l}$; $\underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_l}$ - комплекси провідностей фаз; $\underline{Y}_N = \frac{1}{\underline{Z}_N}$ - провідність нейтрального проводу.

З рівняння (1.21) маємо

$$\varphi_n = \varphi_n - \varphi_N = \underline{U}_{nN} = \underline{U}_N = \frac{\underline{E}_A \underline{Y}_A + \underline{E}_B \underline{Y}_B + \underline{E}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}. \quad (1.22)$$

Напругу $\underline{U}_N$ називають *напругою зсуву нейтральної точки (напругою зсуву нейтралі)*. Вона показує на скільки потенціал нейтральної точки навантаження відрізняється від потенціалу нейтральної точки джерела.

Якщо внутрішніми опорами обмоток генератора можна зневажити, то фазні напруги генератора чисельно дорівнюють фазним ЕРС: $\underline{U}_A = \underline{E}_A$; $\underline{U}_B = \underline{E}_B$; $\underline{U}_C = \underline{E}_C$ (1.12). Тоді

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}. \quad (1.23)$$

Лінійні струми у відповідності з законом Ома

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= (\underline{U}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_A = \underline{U}_{An} \underline{Y}_A; \\ \underline{I}_B &= (\underline{U}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B = \underline{U}_{Bn} \underline{Y}_B; \\ \underline{I}_C &= (\underline{U}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_C = \underline{U}_{Cn} \underline{Y}_C.\end{aligned}\quad (1.24)$$

Струм в нейтральному проводі можна визначити, використовуючи закон Ома або перший закон Кірхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{U}_N \underline{Y}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (1.25)$$

При відсутності нейтрального проводу або його розірві, електричне коло з'єднане трипроводною зіркою ($\underline{Z}_N = \infty$ або $\underline{Y}_N = 0$).

Тоді

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}. \quad (1.26)$$

Формули для розрахунку фазних струмів залишаються без змін, але відповідно до першого закону Кірхгофа

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (1.27)$$

Фазні напруги навантаження

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= \underline{U}_{an} = \underline{I}_A \underline{Z}_a; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{bn} = \underline{I}_B \underline{Z}_b; \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{cn} = \underline{I}_C \underline{Z}_c.\end{aligned}\quad (1.28)$$

Якщо прийняти, що опори лінійних проводів і внутрішні опори генератора дорівнюють нулю, фазні напруги навантаження

$$\begin{aligned}\underline{U}_a &= \underline{U}_{An} = \underline{U}_A - \underline{U}_N = \underline{E}_A - \underline{U}_N; \\ \underline{U}_b &= \underline{U}_{Bn} = \underline{U}_B - \underline{U}_N = \underline{E}_B - \underline{U}_N; \\ \underline{U}_c &= \underline{U}_{Cn} = \underline{U}_C - \underline{U}_N = \underline{E}_C - \underline{U}_N.\end{aligned}\quad (1.29)$$

З отриманих співвідношень випливає, що не слід плутати фазні напруги генератора й фазні напруги навантаження.

Вирази для напруги зсуву й струмів показують, що $\underline{U}_N$ буде змінюватися при зміні навантаження в будь-якій фазі, а, отже, будуть змінюватися й всі фазні струми й напруги навантаження.

Таким чином, трифазні електричні кола, що з'єднані за схемою зірка-зірка без нульового проводу, а також за схемою зірка-зірка з нульовим проводом, опором якого не можна зневажити, не забезпечують незалежність роботи фаз.

Топографічна векторна діаграма напруг для випадку наявності напруги зсуву нейтралі представлена на рис. 1.7.

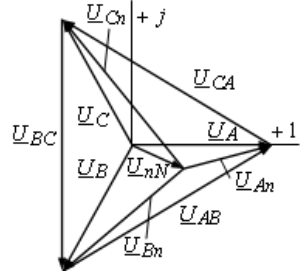


Рисунок 1.7

Можна безпосередньо визначати напругу $\underline{U}_{An}$, без обчислення напруги зсуву нейтралі $\underline{U}_N$. Круговою заміною індексів (із прямим порядком проходження $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ і т.д.) одержимо вирази для напруг $\underline{U}_{Bn}$ й $\underline{U}_{Cn}$.

$$\begin{aligned}\underline{U}_{An} &= \underline{U}_A - \underline{U}_N = \underline{U}_A - \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} = \\ &= \frac{(\underline{U}_A - \underline{U}_B) \underline{Y}_B - (\underline{U}_C - \underline{U}_A) \underline{Y}_C + \underline{U}_A \underline{Y}_N}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} = \\ &= \frac{\underline{U}_{AB} \underline{Y}_B - \underline{U}_{CA} \underline{Y}_C + \underline{U}_A \underline{Y}_N}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N};\end{aligned}\quad (1.30)$$

$$\underline{U}_{Bn} = \frac{\underline{U}_{BC} \underline{Y}_C - \underline{U}_{AB} \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_N}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N};$$

$$\underline{U}_{Cn} = \frac{\underline{U}_{CA} \underline{Y}_A - \underline{U}_{BC} \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_N}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}.$$

Якщо нейтральний провід є відсутнім ($\underline{Y}_N = 0$), то ці напруги можна визначити через лінійні напруги джерела

$$\begin{aligned}\underline{U}_{An} &= \frac{\underline{U}_{AB} \underline{Y}_B - \underline{U}_{CA} \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}; \\ \underline{U}_{Bn} &= \frac{\underline{U}_{BC} \underline{Y}_C - \underline{U}_{AB} \underline{Y}_A}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}; \\ \underline{U}_{Cn} &= \frac{\underline{U}_{CA} \underline{Y}_A - \underline{U}_{BC} \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}.\end{aligned}\quad (1.31)$$

1.4 Несиметричний режим трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка з нейтральним проводом, опором якого можна зневажити

У більшості випадків опір нейтрального проводу значно менше опорів фаз, а отже його провідність значно більше провідностей фаз. Тому відповідно до формул (1.22) і (1.23) потенціал вузла n прагне до нуля, тобто практично дорівнює потенціалу вузла N . Тому при розрахунку вузли N й n можна об'єднати в один спільний вузол.

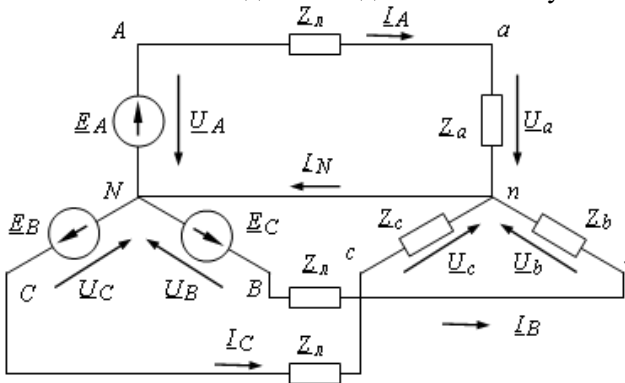


Рисунок 1.8

При цьому в розрахунковій схемі утворюються три незалежні контури, струми в яких

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_л}; \\ \underline{I}_B &= \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_b + \underline{Z}_л}; \\ \underline{I}_C &= \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_л}. \end{aligned} \quad (1.32)$$

Струм у нейтральному проводі відповідно до першого закону Кірхгофа

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C. \quad (1.33)$$

Трифазні електричні кола, що з'єднані за схемою зірка-зірка з нульовим проводом, опором якого можна зневажити, забезпечують незалежність роботи фаз.

1.5 Симетричний режим трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка

Як говорилося раніше, при симетричному режимі фазні напруги джерела утворюють симетричну систему, а комплексні повні опори (провідності) всіх трьох фаз збігаються

$$\begin{aligned}\underline{Z}_a + \underline{Z}_l &= \underline{Z}_b + \underline{Z}_l = \underline{Z}_c + \underline{Z}_l = \underline{Z} = Ze^{j\varphi}; \\ \underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C &= \frac{1}{\underline{Z}_A + \underline{Z}_l} = Ye^{-j\varphi}.\end{aligned}\quad (1.34)$$

Тоді

$$\underline{U}_N = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} = \frac{\underline{Y}_A (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C)}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N} = 0. \quad (1.35)$$

Таким чином, при симетричному режимі потенціали нейтральних точок генератора й навантаження однакові. Тому, не порушуючи режиму роботи, їх можна об'єднати в один вузол. При цьому в схемі утворюються три незалежних контури, струми в яких

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_l}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_b + \underline{Z}_l}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_l}. \quad (1.36)$$

З урахуванням співвідношеннями між фазними напругами генератора і того, що комплексні повні опори фаз збігаються

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_l} = \frac{U_\phi}{Ze^{j\varphi}} = I_\phi e^{-j\varphi}; \\ \underline{I}_B &= \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_b + \underline{Z}_l} = \frac{U_A e^{-j\frac{2\pi}{3}}}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_l} = I_A e^{-j\frac{2\pi}{3}} = I_\phi e^{-j\left(\varphi + \frac{2\pi}{3}\right)}; \\ \underline{I}_C &= \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c + \underline{Z}_l} = \frac{U_A e^{j\frac{2\pi}{3}}}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_l} = I_A e^{j\frac{2\pi}{3}} = I_\phi e^{-j\left(\varphi - \frac{2\pi}{3}\right)}.\end{aligned}\quad (1.37)$$

де $I_\phi = \frac{U_\phi}{Z}$ - фазний (лінійний) струм.

Таким чином, діючі значення фазних (лінійних) струмів однакові, а самі струми зсунені відносно один одного за фазою на однакові кути $\pm 2\pi/3$. Як було показано раніше, сума трьох векторів, які утво-

рюють симетричну трійку дорівнює нулю. Тому струм у нейтральному проводі є відсутнім

$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0. \quad (1.38)$$

Отже, при симетричному режимі в трифазному колі, що з'єднане за схемою "чотирипровідна зірка", нейтральний провід не впливає на роботу кола й може бути відімкненим. Тому чотирипровідну зірку можна замінити трипровідною без зміни режиму.

На рис. 1.9 представлена суміщена векторна діаграма струмів і напруг для симетричного режиму якщо характер навантаження активно-індуктивний ($\varphi > 0$).

З діаграми видно, що в цьому режимі роботи досить розрахувати струми тільки в одній з фаз кола (наприклад, у фазі А). Діючі значення струмів інших фаз будуть такими самими, але самі струми зсунені за фазою щодо струму фази А на кути $\pm 120^\circ$.

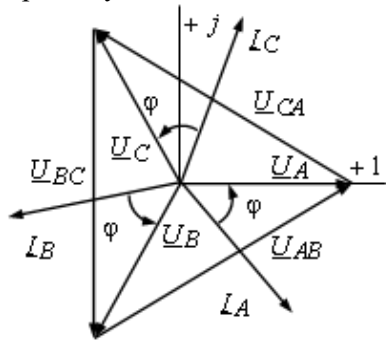


Рисунок 1.9

1.6 Аварійні режими трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-зірка

У трифазних колах, як й у будь-яких електричних колах, у процесі роботи виникають різні аварійні режими, причинами яких є різні пошкодження: короткі замикання й розриви віток. У цьому підрозділі розглядаються деякі типові випадки, які можливі в трифазному колі при з'єднанні зірка-зірка. Для наочності аварійні режими зіставляються із симетричним режимом.

Приклад 1.1. Трифазне електричне коло (рис. 1.10) складається з генератора й трифазного навантаження, які з'єднані за схемою зірка-зірка з нейтральним проводом. Генератор виробляє симетричну систему ЕРС із діючим значенням $E = 380 \text{ В}$. Опір кожної фази симетричного навантаження $\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = 30 + j40 = 50e^{j53^\circ} \text{ Ом}$. Вимикачі Q1 й Q2 замкнуті, вимикач Q3 розімкнено. Потрібно розрахувати струми у всіх лінійних проводах й у нейтральному проводі, а також побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

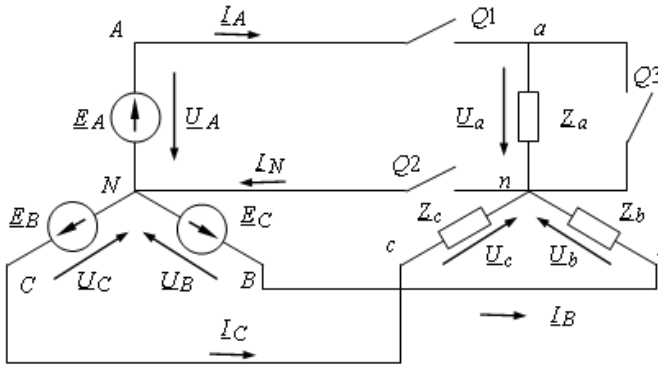


Рисунок 1.10

Розв'язання. Всі розрахунки виконуємо в символічному методі.

Визначаємо фазні ЕРС генератора. Приймаємо, що початкова фаза ЕРС фази А дорівнює нулю.

$$\underline{E}_A = 380e^{j0^\circ} = (380 + j0) \text{ В}; \quad \underline{E}_B = 380e^{-j120^\circ} = (-190 - j329) \text{ В};$$

$$\underline{E}_C = 220e^{j120^\circ} = (-190 + j329) \text{ В}.$$

Приймаємо, що опори обмоток генератора дорівнюють нулю. Тоді фазні напруги генератора

$$\underline{U}_A = \underline{E}_A = 380e^{j0^\circ} = (380 + j0) \text{ В};$$

$$\underline{U}_B = \underline{E}_B = 380e^{-j120^\circ} = (-190 - j329) \text{ В};$$

$$\underline{U}_C = \underline{E}_C = 380e^{j120^\circ} = (-190 + j329) \text{ В}.$$

Обчислюємо лінійні напруги генератора

$$\begin{aligned} \underline{U}_{AB} &= \underline{U}_A - \underline{U}_B = (380 + j0) - (-190 - j329) = \\ &= 570 + j329 = 658e^{j30^\circ} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{BC} &= \underline{U}_B - \underline{U}_C = (-190 - j329) - (-190 + j329) = \\ &= 0 - j658 = 658e^{-j90^\circ} \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{U}_{CA} &= \underline{U}_C - \underline{U}_A = (-190 + j329) - (380 + j0) = \\ &= -570 + j190 = 658e^{j150^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Визначаємо напругу зсуву нейтралі. Відповідно до формул (1.22) і (1.23) $\underline{U}_N \rightarrow 0$, тому що в цьому випадку $\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C = \underline{Y}_A (\underline{U}_A + \underline{U}_B + \underline{U}_C) = 0$.

Визначаємо фазні (лінійні) струми навантаження, використовуючи формулу закону Ома

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_a} = \frac{380e^{j30^\circ}}{50e^{j53^\circ}} = 7,60e^{-j23^\circ} = (7,00 - j2,97) \text{ A};$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_b} = \frac{380e^{-j90^\circ}}{50e^{j53^\circ}} = 7,60e^{-j143^\circ} = (-6,07 - j4,57) \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c} = \frac{380e^{j150^\circ}}{50e^{j53^\circ}} = 7,60e^{j97^\circ} = (-0,93 + j7,54) \text{ A}.$$

Діючі значення фазних струмів у всіх трьох фазах кола однакові й становлять $I_\phi = 7,6 \text{ A}$. Комплексні діючі значення цих струмів утворюють симетричну систему й тому струм у нейтральному проводі відповідно до формули (1.38) дорівнює нулю

$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = (7,00 - j2,97) + (-6,07 - j4,57) + \\ &+ (-0,93 + j7,54) = 0 \text{ A}. \end{aligned}$$

Векторна діаграма досліджуваного трифазного кола представлена на рис. 1.11. Дана діаграма підтверджує формули (1.37) відповідно до яких досить розрахувати струм тільки в одній з фаз (наприклад, у фазі А). Струми у двох інших фазах будуть такими ж за діючим значенням, але зсуненими щодо фази А по фазі на кути $\pm 120^\circ$.

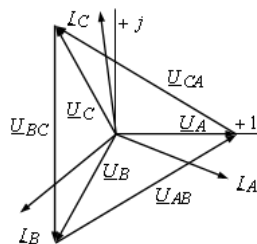


Рисунок 1.11

Приклад 1.2. У трифазному електричному колі (рис. 1.10) відбулася розірва лінійного проводу фази А. Вимикач Q2 замкнутий, вимикачі Q1 й Q3 розімкнуті. Параметри генератора й опори фаз залишилися без зміни (як у прикладі 1.1). Потрібно розрахувати струми у всіх лінійних проводах й у нейтральному проводі, а також побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

Розв'язання. Фазні й лінійні напруги генератора залишилися без змін в порівнянні із прикладом 1.1.

Визначаємо напругу зсуву нейтралі. Відповідно до формул (1.22) і (1.23) $\underline{U}_N \rightarrow 0$, тому що в цьому випадку $\underline{Z}_N \rightarrow 0$ (а, отже, $\underline{Y}_N \rightarrow \infty$).

Опори лінійних проводів фаз *B* й *C* дорівнюють нулю, а через розриву опір лінійного проводу фази *A* прагне до нескінченності. Тому фазні напруги фаз *B* й *C* навантаження збігаються з відповідними фазними напругами генератора, але фазна напруга фази *A* навантаження дорівнює нулю (спад напруги припадає на розриву).

Визначаємо фазні (лінійні) струми навантаження, використовуючи формулу закону Ома

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{0}{50e^{j53^\circ}} = 0 \text{ A};$$

$$\underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_b} = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{380e^{-j90^\circ}}{50e^{j53^\circ}} = 7,60e^{-j143^\circ} = (-6,07 - j4,57) \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_c} = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{380e^{j150^\circ}}{50e^{j53^\circ}} = 7,60e^{j97^\circ} = (-0,93 + j7,54) \text{ A}.$$

Струм в нейтральному проводі в відповідності з формулою (1.25) дорівнює нулю

$$\begin{aligned} \underline{I}_N &= \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \\ &= 0 + (-6,07 - j4,57) + (-0,93 + j7,54) = \\ &= -7,00 + 2,97 = 7,60e^{j157^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

Векторна діаграма досліджуваного трифазного кола представлена на рис. 1.12.

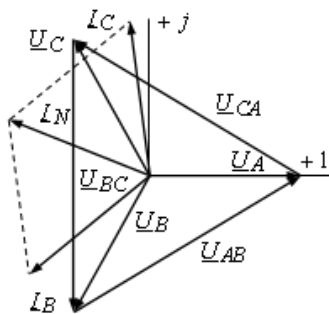


Рисунок 1.12

Приклад 1.3. У трифазному електричному колі (рис. 5.10) при відсутності нейтрального проводу відбулася розрива лінійного проводу фази *A*. Вимикачі *Q1*, *Q2* й *Q3* розімкнуті. Параметри генератора й опори неущоджених фаз залишилися без зміни (як у прикладі 1.1).

Потрібно розрахувати струми у всіх лінійних проводах, а також побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

Розв'язання. Фазні й лінійні напруги генератора залишилися без зміни в порівнянні з прикладом 1.1.

Провідність фази А дорівнює нулю $\underline{Y}_A = 0$ Сим (фаза А обірвана), провідності фаз В й С дорівнюють одна одній

$$\underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \frac{1}{\underline{Z}_\phi} = \frac{1}{30 + j40} = 0,012 - j0,016 = 0,02e^{-j53^\circ} \text{ Сим}.$$

Визначаємо напругу зсуву нейтралі

$$\begin{aligned} \underline{U}_N &= \frac{\underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \frac{\underline{Y}_B (\underline{U}_B + \underline{U}_C)}{2 \underline{Y}_B} = \frac{\underline{U}_B + \underline{U}_C}{2} = \\ &= -\frac{\underline{U}_A}{2} = -\frac{380}{2} = -190 = 190e^{j180^\circ} \text{ Сим}. \end{aligned}$$

Визначаємо фазні (лінійні) струми навантаження, використовуючи формулу закону Ома

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= (\underline{U}_A - \underline{U}_N) \underline{Y}_A = (380 - (-190)) \cdot 0 = 0 \text{ А}; \\ \underline{I}_B &= (\underline{U}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B = (-190 - j329 - (-190))(0,012 - j0,016) = \\ &= -5,26 - j3,95 = 6,58e^{-j143^\circ} \text{ А}; \\ \underline{I}_C &= (\underline{U}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_B = (-190 + j329 - (-190))(0,012 - j0,016) = \\ &= 5,26 + j3,95 = 6,58e^{j37^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Із цих розрахунків випливає, що лінійні струми $\underline{I}_B$ й $\underline{I}_C$ це фактично той самий струм у контурі $NBbncCN$ (фаза А обірвана). Тому струм $\underline{I}_C$ має знак протилежний до знаку струму $\underline{I}_B$.

Визначаємо фазні напруги навантаження в неушкоджених фазах В й С, використовуючи формулу закону Ома

$$\begin{aligned} \underline{U}_b &= \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_\phi = (-5,26 - j3,95)(30 + j40) = \\ &= 0,2 - j328,9 = 329e^{-j90^\circ} \text{ В}; \\ \underline{U}_c &= \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_\phi = (5,26 + j3,95)(30 + j40) = \\ &= -0,2 + j328,9 = 329e^{j90^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Так само як і струми, фазні напруги $\underline{U}_b$ й $\underline{U}_c$ навантаження спрямовані в протилежні сторони. Діючі значення цих напруг однакові й кожне з них дорівнює половині діючого значення лінійної напруги U_{BC} . Цей результат перебуває в повній відповідності з конфігурацією електричного кола при розриві лінійного проводу фази A і відсутності нейтрального проводу. Дійсно струм, що протікає по колу в цьому випадку, проходить через два однакових опори $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi = 30 + j40 = 50e^{j53^\circ} \text{ Ом}$. Ці опори з'єднані послідовно і до них прикладена лінійної напруги $U_{BC} = U_\lambda = \sqrt{3}U_\phi = \sqrt{3} \cdot 380 = 658 \text{ В}$. Тому на кожне з них припадає половина цієї напруги ($U_b = U_c = 329 \text{ В}$).

Фазна напруга навантаження на обірваній фазі A $\underline{U}_a = \underline{U}_{an} = 0 \text{ В}$, тому що струм через ділянку кола an не протікає. Напругу $\underline{U}_{An}$ із закону Ома знайти неможливо, тому що $\underline{I}_A = 0 \text{ А}$, а опір фази A у результаті розриву лінійного проводу дорівнює нескінченності $\underline{Z}_A = \infty \text{ Ом}$. Її визначимо з розгляду контуру $NAanN$ кола, для якого у відповідності із другим законом Кірхгофа маємо $\underline{E}_A = \underline{U}_{An} + \underline{U}_N$. Звідси

$$\underline{U}_{An} = \underline{E}_A - \underline{U}_N = 380 - (-190) = 570 + j0 = 570e^{j0^\circ} \text{ В}.$$

Суміщена векторна діаграма досліджуваного трифазного кола представлена на рис. 1.13.

Приклад 1.4. У трифазному електричному колі (рис. 1.10) при відсутності нейтрального проводу відбулося коротке замикання у фазі A. Вимикач Q2 розімкнено, вимикачі Q1 й Q3 замкнуті. Параметри генератора й опори неушкоджених фаз залишилися без зміни (як у прикладі 5.1).

Потрібно розрахувати струми у всіх лінійних проводах, а також побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

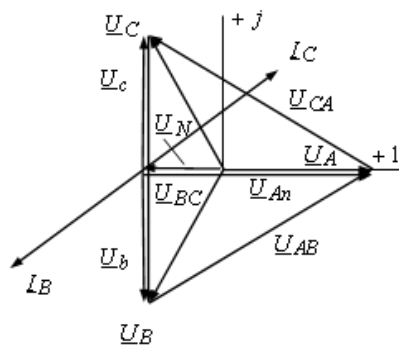


Рисунок 1.13

Розв'язання. Фазні й лінійні напруги генератора залишилися без зміни.

Провідність фази А дорівнює нескінченності $\underline{Y}_A = \infty$ Сим (у фазі А коротке замикання). Формула (1.26) для визначення в цьому випадку не підходить, тому що приводить до невизначеності виду $\frac{\infty}{\infty}$. Напругу зсуву нейтралі визначимо з розгляду контуру $NAanN$ кола, для якого у відповідності із другим законом Кірхгофа маємо $\underline{E}_A = \underline{U}_a + \underline{U}_N$. Звідси з обліком того, що при короткому замиканні $\underline{U}_a = 0$, одержимо

$$\underline{U}_N = \underline{E}_A - \underline{U}_a = 380 - 0 = 380 + j0 = 380e^{j0^\circ} \text{ В.}$$

Визначаємо фазні (лінійні) струми навантаження в неушкоджених фазах В й С, використовуючи формулу закону Ома

$$\underline{I}_B = (\underline{U}_B - \underline{U}_N) \underline{Y}_B = (-190 - j329 - 380)(0,012 - j0,016) =$$

$$= -12,10 + j5,17 = 13,16e^{j157^\circ} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_C = (\underline{U}_C - \underline{U}_N) \underline{Y}_B = (-190 + j329 - 380)(0,012 - j0,016) =$$

$$= -1,58 + j13,07 = 13,16e^{j97^\circ} \text{ А.}$$

Визначаємо фазний (лінійний) струм навантаження в ушкодженій фазі А, використовуючи перший закон Кірхгофа

$$\underline{I}_A = -(\underline{I}_B + \underline{I}_C) = -(-12,10 + j5,17 - 1,58 + j13,07) =$$

$$= 13,68 - j18,24 = 22,8e^{-j53^\circ} \text{ В.}$$

Визначаємо фазні напруги навантаження в неушкоджених фазах В й С (в ушкодженій фазі А $\underline{U}_a = 0$), використовуючи формулу закону Ома

$$\underline{U}_b = \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_\phi = (-12,10 + j5,17)(30 + j40) =$$

$$= -569,8 - j328,9 = 658e^{-j150^\circ} \text{ В;}$$

$$\underline{U}_c = \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_\phi = (-1,58 + j13,07)(30 + j40) =$$

$$= -570,2 + j328,9 = 658e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

Суміщена векторна діаграма досліджуваного трифазного кола представлена на рис. 1.14.

Аналіз розрахунку й векторної діаграми показує, що при короткому замиканні однієї з фаз навантаження в трипровідному колі, що з'єднане за схемою зірка-зірка, діючі значення фазних напруг навантаження неушкоджених фаз дорівнюють діючому значенню лінійної напруги.

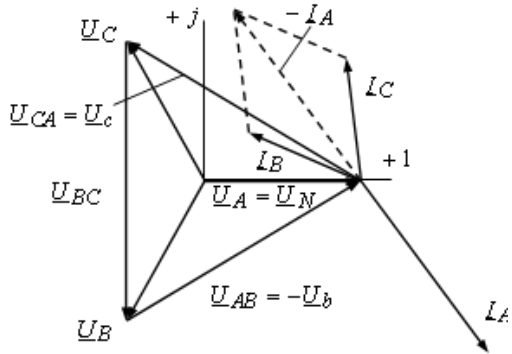


Рисунок 1.14

Коротке замикання однієї з фаз навантаження в чотирипровідному колі, що з'єднане за схемою зірка-зірка, неприпустимо, тому що приводить до короткого замикання відповідної фазної обмотки генератора.

1.7 Призначення нейтрального проводу

При симетричному режимі електричного кола, що з'єднано за схемою зіркою, нейтральний провід не впливає на роботу кола. Тому його можна видалити.

Несиметричне навантаження викликає напругу зсуву нейтралі й несиметрію фазних напруг навантаження. Значення напруги зсуву нейтралі й його початкова фаза залежить від характеру навантаження й послідовності чергування фаз. При вмиканні й вимиканні однофазних приймачів провідності фаз змінюються довільним чином. Це приводить до довільної зміни напруги зсуву нейтралі й всіх фазних напруг навантаження. Наявність нейтрального проводу дозволяє зменшити значення напруги зсуву при несиметричному режимі (в ідеалі до нуля) і вирівняти фазні напруги навантаження.

Практично струм у нейтральному проводі рідко досягає значення струмів у лінійних проводах, тому що навіть при відносно різко вираженій несиметрії фазних струмів, їхня геометрична сума, що дорівнює току в нейтральному проводі, значно менше струму в кожному з лінійних проводів. Тому в трифазних мережах нейтральний провід має площу поперечного переріза в 2...3 рази менше, ніж площа поперечного переріза лінійного проводу.

У нейтральному проводі заборонена установка запобіжників або вимикачів, тому що відімкнені нейтрального проводу при несиметри-

чному навантаженні викличе зміну фазних напруг приймачів. Це призведе до порушення режимів роботи приймачів. Наприклад, при освітлювальним навантаженні зниження фазної напруги викликає недостатнє розжарення ламп, підвищення фазної напруги приведе до перегару й швидкого виходу з ладу ламп.

Енергетики прагнуть вмикати однофазні приймачі енергії таким чином, щоб навантаження кожної з фаз було однаковою. При великій кількості приймачів, що статистично в "середньому" забезпечує приблизно симетричне навантаження фаз, незважаючи на вмикання або вимикання окремих приймачів, значення напруги зсуву нейтралі є незначним. Це дозволяє використовувати з'єднання зірка без нульового проводу для потужних ліній електропередачі. Можлива несиметрія в лініях електропередачі компенсується нейтральним проводом, у якості якого використовують землю (система із заземленою нейтраллю).

Ще одна причина застосування в низьковольтних мережах нейтрального проводу полягає в тім, що це дає можливість підмикати однофазні приймачі з номінальною напругою U_{nom} в $\sqrt{3}$ разів менше номінальної лінійної напруги трифазного кола U_L .

1.8 Розрахунок трифазного кола при з'єднанні навантаження за схемою трикутник

При з'єднанні приймачів за схемою трикутник обмотки генератор можна з'єднувати як за схемою трикутник (рис. 1.15) так і за схемою зірка (рис. 1.16). В обох випадках нейтральний провід є відсутнім.

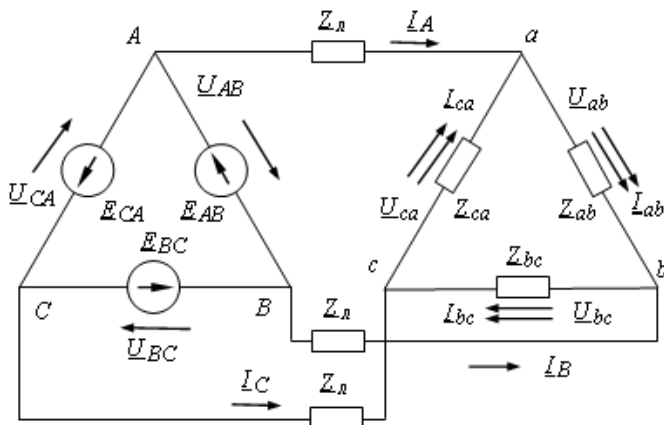


Рисунок 1.15

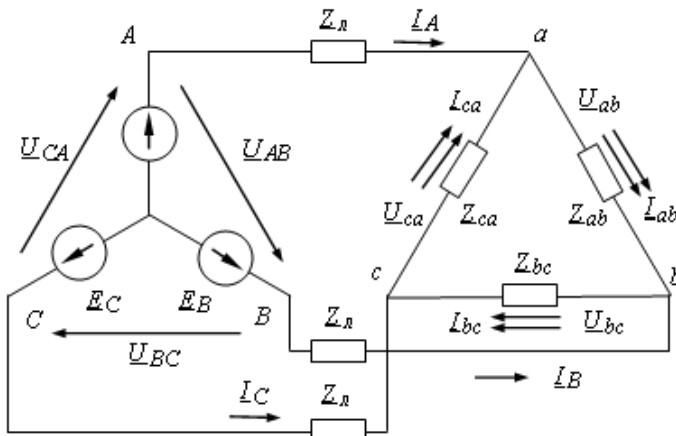


Рисунок 1.16

При з'єднанні обмоток генератора за схемою трикутник і симетричній системі фазних ЕРС додаткового струму в обмотках не виникне (тому що алгебраїчна сума ЕРС у будь-який момент часу дорівнює нулю). Але якщо фазні ЕРС відрізняються від синусоїдних, то алгебраїчна сума ЕРС може й не дорівнювати нулю. Це призведе до появи додаткового струму в обмотках генератора. Це є однією із причин того, що обмотки генератора в основному з'єднують за схемою зірка.

За додатні напрямки лінійних струмів приймають напрямки від генератора до навантаження. За додатні напрямки фазних струмів у навантаженні приймають напрямки від вузла a до вузла b , від b до c і від c до a . Це вказують порядком літер в індексах, наприклад $\underline{I}_{ab}$ - це струм у фазі ab , що спрямований від вузла a до вузла b . У цьому випадку фазні струми відрізняються від лінійних. Фазні напруги навантаження одночасно є й лінійними напругами.

Трифазне коло при з'єднанні навантаження трикутником і будь-якій схемі з'єднання фаз генератора є розгалуженим багатоконтурним. Розрахунок такого кола виконують одним з відомих методів з урахуванням складу її елементів і схеми з'єднання.

Розрахунок такого кола значно спрощується, якщо опорами лінійних проводів можна зневажити. У цьому випадку лінійні напруги генератора $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$ дорівнюють відповідним лінійним (фаз-

ним) напругам навантаження $\underline{U}_{ab}$, $\underline{U}_{bc}$, $\underline{U}_{ca}$. Тоді фазні струми навантаження за законом Ома

$$\begin{aligned}\underline{I}_{ab} &= \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \\ \underline{I}_{bc} &= \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \\ \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}.\end{aligned}\tag{1.39}$$

Лінійні струми розраховують на підставі першого закону Кірхгофа для відповідних вузлів навантаження

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc}.\end{aligned}\tag{1.40}$$

Якщо генератор з'єднаний за схемою зірка й задані його фазні напруги $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$, то лінійні напруги $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$ обчислюють як різниці відповідних фазних напруг за формулою (1.11). У результаті задача зводиться до розглянутого раніше випадку.

Перевагою з'єднання навантаження за схемою трикутник у порівнянні зі з'єднанням навантаження за схемою зірка без нейтрального проводу є взаємна незалежність фазних струмів.

Приклад 1.5. Трифазне електричне коло (рис. 1.17) складається з генератора й трифазного навантаження, які з'єднані за схемою зірка-трикутник. Діюче значення напруги на обмотках симетричного генератора $U_\phi = 220 \text{ В}$. Навантаження рівномірне, неоднорідне. Опори фаз навантаження $\underline{Z}_{ab} = R = 10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{bc} = jX_L = j10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{ca} = -X_C = -j10 \text{ Ом}$.

Розв'язання. Приймаємо, що початкова фаза фазної напруги генератора фази А дорівнює нулю. Тоді комплексні діючі значення фазних напруг генератора

$$\begin{aligned}\underline{U}_A &= U_\phi e^{j0^\circ} = 220 e^{j0^\circ} \text{ В}; \\ \underline{U}_B &= U_\phi e^{-j120^\circ} = 220 e^{-j120^\circ} \text{ В}; \\ \underline{U}_C &= U_\phi e^{j120^\circ} = 220 e^{j120^\circ} \text{ В}.\end{aligned}$$

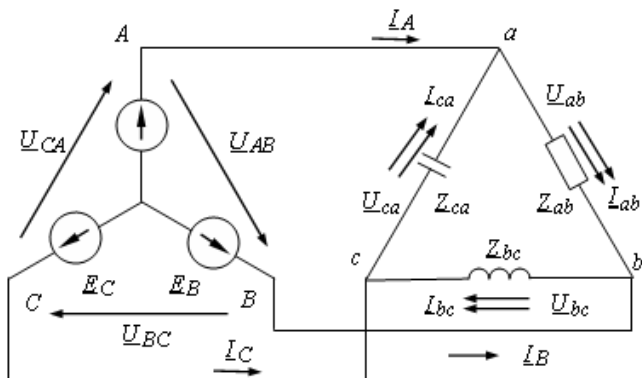


Рисунок 1.17

Лінійна напруга генератора $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 220 \approx 380 \text{ В}$. Тоді комплексні діючі значення лінійних напруг

$$\underline{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = 380 e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BC} = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = 380 e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{CA} = U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = 380 e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Фазні струми навантаження

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{380 e^{j30^\circ}}{10} = 38 e^{j30^\circ} = (32,9 + j19,0) \text{ А};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{380 e^{-j90^\circ}}{j10} = 38 e^{-j180^\circ} = (-38,0 + j0,0) \text{ А};$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ca} &= \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{380 e^{j150^\circ}}{-j10} = 38 e^{j240^\circ} = \\ &= 38 e^{-j120^\circ} = (-19,0 - j32,9) \text{ А} \end{aligned}$$

Лінійні струми

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = (32,9 + j19,0) - (-19,0 - j32,9) = \\ &= 51,9 + j51,9 = 73,4 e^{j45^\circ} \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = (-38,0 + j0,0) - (32,9 + j19,0) =$$

$$= -70,9 - j19,0 = 73,4 \cdot e^{-j165^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = (-19,0 - j32,9) - (-38,0 + j0,0) =$$

$$= 19,0 - j32,9 = 38,0 e^{-j60^\circ} \text{ A}.$$

Векторна діаграма для випадку з'єднання навантаження трикутником представлена на рис. 1.18 в двох рівноцінних варіантах

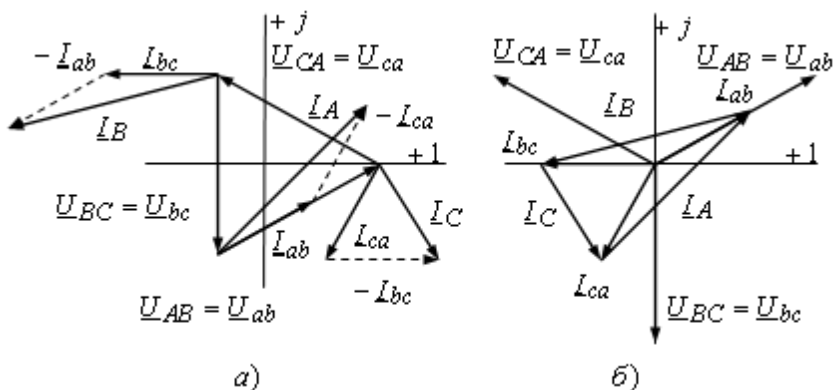


Рисунок 1.18

У випадку симетричного режиму трифазного кола (тобто коли система лінійних напруг джерела є симетричною и комплекси опорів фаз навантаження однакові $\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z} = Ze^{j\varphi}$) фазні струми

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}} = \frac{U_{\text{л}} e^{j30^\circ}}{Ze^{j\varphi}} = I_{\phi} e^{j(30^\circ - \varphi)};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}} = \frac{U_{\text{л}} e^{-j90^\circ}}{Ze^{j\varphi}} = I_{\phi} e^{j(-90^\circ - \varphi)} = I_{ab} e^{-j120^\circ}; \quad (1.41)$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}} = \frac{U_{\text{л}} e^{j150^\circ}}{Ze^{j\varphi}} = I_{\phi} e^{j(150^\circ - \varphi)} = I_{ab} e^{j120^\circ}.$$

утворюють симетричну систему. Діючі значення струмів однакові, а за фазою струми зсунені друг щодо друга на кути 120° .

На рис. 1.19 представлена суміщена векторна діаграма струмів і напруг для випадку активно-ємнісного навантаження ($\varphi < 0$).

З діаграми видно, що вектори лінійних струмів при симетричному режимі утворюють рівносторонній трикутник. З геометричних міркувань дістаємо $I_L = \sqrt{3}I_\phi$.

З діаграми також видно, що кожний лінійний струм відстає за фазою від відповідного фазного струму на кут 30° .

Якщо опорами лінійних проводів зневажити неможливо (рис. 1.16), то розрахунок доцільно здійснювати, попередньо виконавши перетворення трикутника опорів навантаження в еквівалентну зірку

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \frac{\underline{Z}_{ab}\underline{Z}_{ca}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; \\ \underline{Z}_b &= \frac{\underline{Z}_{bc}\underline{Z}_{ab}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}; \\ \underline{Z}_c &= \frac{\underline{Z}_{ca}\underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}} \end{aligned} \quad (1.42)$$

Використовуючи методи, які розглядалися в попередніх підрозділах, обчислюють струми в лінійних проводах $\underline{I}_A, \underline{I}_B, \underline{I}_C$. Потім обчислюють фазні напруги на опорах еквівалентної зірки

$$\underline{U}_a = \underline{I}_A \underline{Z}_a; \quad \underline{U}_b = \underline{I}_B \underline{Z}_b; \quad \underline{U}_c = \underline{I}_C \underline{Z}_c, \quad (1.43)$$

після чого розраховують лінійні напруги на фазах навантаження

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b; \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c; \quad \underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a. \quad (1.44)$$

и фазні струми навантаження, що з'єднано трикутником

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \quad \underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \quad \underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (1.45)$$

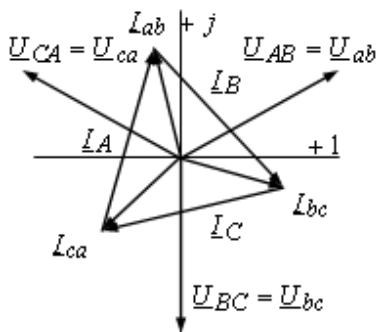


Рисунок 1.19

1.9 Аварійні режими трифазного кола, що з'єднане за схемою зірка-трикутник

У цьому підрозділі розглядаються деякі типові випадки, які можливі в трифазному колі, що з'єднане за схемою зірка-трикутник. Для наочності аварійні режими зіставляються із симетричним режимом.

Приклад 1.6. Трифазне електричне коло (рис. 1.20) складається з генератора й трифазного навантаження, які з'єднані за схемою зірка-трикутник. Генератор виробляє симетричну систему ЕРС із діючим значенням $E = 380 \text{ В}$. Опір кожної фази симетричного навантаження

$\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca} = \underline{Z}_{\phi} = 30 + j40 = 50e^{j53^\circ} \text{ Ом}$. Вимикачі Q1 й Q2 замкнуті. Потрібно розрахувати всі струми у лінійних проводах і фазні струми навантаження, а також побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

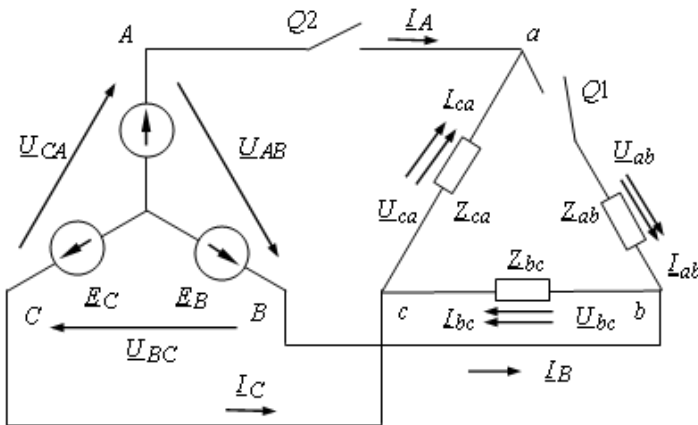


Рисунок 1.20

Розв'язання. Приймаємо, що початкова фаза фазної напруги генератора фази A дорівнює нулю. Тоді комплекси фазних напруг генератора

$$\underline{U}_A = U_{\phi} e^{j0^\circ} = 380 e^{j0^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_B = U_{\phi} e^{-j120^\circ} = 380 e^{-j120^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_C = U_{\phi} e^{j120^\circ} = 380 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Лінійна напруга генератора $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 380 \approx 660 \text{ В}$. Тоді комплексні діючі значення лінійних напруг

$$\underline{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j30^\circ} = 660 e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BC} = U_{\text{л}} e^{-j90^\circ} = 660 e^{-j90^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_{CA} = U_{\text{л}} e^{j150^\circ} = 660 e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Фазні струми навантаження

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{\phi}} = \frac{660 e^{j30^\circ}}{50 e^{j53^\circ}} = 13,2 e^{-j23^\circ} = (12,15 - j5,16) \text{ А};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{\phi}} = \frac{660 e^{-j90^\circ}}{50 e^{j53^\circ}} = 13,2 e^{-j143^\circ} = (-10,54 - j7,94) \text{ А};$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{\phi}} = \frac{660 e^{j150^\circ}}{50 e^{j53^\circ}} = 13,2 e^{j97^\circ} = (-1,61 + j13,10) \text{ А}$$

Лінійні струми

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = (12,15 - j5,16) - (-1,61 + j13,10) = \\ &= 13,76 - j18,26 = 22,9 e^{-j53^\circ} \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = (-10,54 - j7,94) - (12,15 - j5,16) = \\ &= -22,69 - j2,78 = 22,9 e^{-j173^\circ} \text{ А}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = (-1,61 + j13,10) - (-10,54 - j7,94) = \\ &= 8,93 + j21,04 = 22,9 e^{j67^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Векторна діаграма досліджуваного трифазного кола представлена на рис. 1.21.

З векторної діаграми випливає, що при симетричному режимі роботи достатньо розрахувати фазний струм тільки однієї з фаз (наприклад, фази ab). Діючі значення фазних струмів інших фаз дорівнюють діючому значенню цього струму, але самі струми зсунені щодо струму $\underline{I}_{ab}$ за фазою на третину періоду $\pm \frac{2\pi}{3}$.

З діаграми також випливає, що лінійні струми відстають за фазою від відповідних фазних струмів на кути 30° , а діючі значення лінійних струмів у $\sqrt{3}$ разів більше діючих значень фазних.

Вектора лінійних і фазних струмів утворюють симетричні системи.

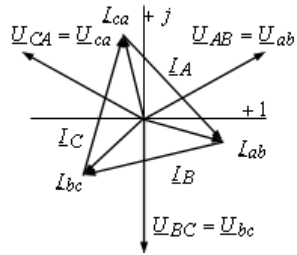


Рисунок 1.21

Приклад 1.6. У трифазному електричному колі (рис. 1.20) відбулася розрива фази ab . Вимикач $Q1$ розімкнений, вимикач $Q2$ замкнений. Параметри генератора й опори неушкоджених фаз залишилися без зміни (як у прикладі 1.5). Потрібно розрахувати струми у всіх лінійних проводах і фазні струми навантаження, а також побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

Розв'язання. Фазні й лінійні напруги генератора, фазні напруги навантаження й струми неушкоджених фаз навантаження залишилися без змін. Струм uszkodженої фази ab змінився до нуля $I_{ab} = 0$ А.

Струми в лінійних проводах

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 0,0 - (-1,61 + j13,10) = \\ &= 1,61 - j13,10 = 13,2e^{j83^\circ} \text{ А}; \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = (-10,54 - j7,94) - 0,0 = \\ &= -10,54 - j7,94 = 13,2e^{-j37^\circ} \text{ А}; \\ \underline{I}_C &= \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = (-1,61 + j13,10) - (-10,54 - j7,94) = \\ &= 8,93 + j21,04 = 22,9e^{j67^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Векторна діаграма досліджуваного трифазного кола представлена на рис. 1.22.

З векторної діаграми видно, що для знаходження діючих значень фазних і лінійних струмів немає необхідності застосовувати символічний метод. Дійсно безпосередньо з розгляду схеми електричного кола (рис. 1.20) і векторної діаграми випливає, що $I_{ab} = 0$ А, $I_A = I_B = I_{bc} = I_{ca} = 13,2$ А, $I_C = \sqrt{3}I_{bc} = \sqrt{3} \cdot 13,2 = 22,9$ А.

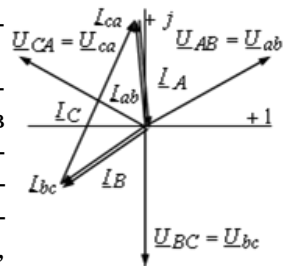


Рисунок 1.22

Приклад 1.7. У трифазному електричному колі (рис. 1.20) відбулася розірва лінійного проводу Aa . Вимикач $Q2$ розімкнутий, вимикач $Q1$ замкнутий. Параметри генератора й опори неущкоджених фаз залишилися без зміни (як у прикладі 1.5). Потрібно розрахувати струми у лінійних проводах і фазні струми навантаження, а також побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

Розв'язання. Фазні й лінійні напруги генератора залишилися без змін. Фазна напруга $\underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC} = 660e^{-j90^\circ}$ В також залишилася без змін. Фазні напруги навантаження $\underline{U}_{ab}$ й $\underline{U}_{ca}$ змінилися.

Визначаємо фазні струми навантаження. Струм у фазі bc залишився таким самим, як і у симетричному режимі

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_\phi} = \frac{660e^{-j90^\circ}}{50e^{j53^\circ}} = 13,2e^{-j143^\circ} = (-10,54 - j7,94) \text{ А.}$$

При розриві лінійного проводу Aa опори $\underline{Z}_{ab}$ й $\underline{Z}_{ca}$ навантаження опиняються з'єднаними між собою послідовно. Тому фазні струми $\underline{I}_{ab}$ й $\underline{I}_{ca}$ однакові. З огляду на те, що напрямок цих струмів є протилежним до напрямку фазної напруги $\underline{U}_{bc}$ дістанемо

$$\underline{I}_{ab} = \underline{I}_{ca} = -\frac{\underline{U}_{bc}}{2\underline{Z}_\phi} = -\frac{660e^{-j90^\circ}}{2 \cdot 50e^{j53^\circ}} = 6,6e^{j37^\circ} = (5,27 + j3,97) \text{ А.}$$

Тоді фазні напруги $\underline{U}_{ab}$ и $\underline{U}_{ca}$ навантаження

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{ca} = \underline{I}_{bc} \underline{Z}_\phi = 6,6e^{j37^\circ} \cdot 50e^{j53^\circ} = 330e^{j90^\circ} = (0 + j330) \text{ В.}$$

Лінійні струми

$$\underline{I}_A = 0 \text{ А;}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = (-10,54 - j7,94) - (5,27 + j3,97) =$$

$$= -15,81 - j11,91 = 19,8e^{-j143^\circ} \text{ А;}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = (5,27 + j3,97) - (-10,54 - j7,94) =$$

$$= +15,81 + j11,91 = 19,8e^{j37^\circ} \text{ А.}$$

Суміщена векторна діаграма струмів і напруг досліджуваного трифазного кола представлена на рис. 1.23.

З векторної діаграми видно, що для знаходження діючих значень фазних і лінійних струмів немає необхідності застосовувати символічний метод.

Дійсно безпосередньо з розгляду схеми електричного кола (рис. 1.20) і векторної діаграми випливає, що $I_A = 0$ А.

З урахуванням рівності опорів у фазах й властивостей послідовного й паралельного з'єднань

$$I_{bc} = 13,2 \text{ А},$$

$$I_{ab} = I_{ca} = 0,5 \cdot 13,2 = 6,6 \text{ А},$$

$$I_B = I_C = 1,5 \cdot 18,2 = 19,8 \text{ А}.$$

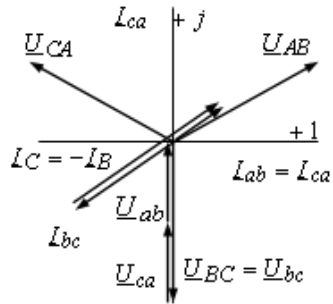


Рисунок 1.23

1.10 Потужність трифазного кола

Миттєва активна потужність трифазного електричного кола дорівнює сумі активних потужностей фаз генератора. У симетричному режимі фазовий зсув між відповідними фазними струмами та напругами однаковий ($\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi$)

$$\begin{aligned} p &= u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C = U_{\phi m} \sin \omega t \cdot I_{\phi m} \sin(\omega t - \varphi) + \\ &+ U_{\phi m} \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot I_{\phi m} \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) + \\ &+ U_{\phi m} \sin(\omega t + 120^\circ) \cdot I_{\phi m} \sin(\omega t + 120^\circ - \varphi) = \\ &= 0,5 U_{\phi m} I_{\phi m} (3 \cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi) - \cos(2\omega t - 240^\circ - \varphi) - \\ &- \cos(2\omega t + 240^\circ - \varphi)) = \frac{3}{2} U_{\phi m} I_{\phi m} \cos \varphi = \\ &= 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = P = \text{const}, \end{aligned} \tag{1.46}$$

де $\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності трифазного кола.

Активна потужність трифазного кола при симетричному режимі може бути виражена через лінійні струми й напруги. Тому що при з'єднанні за схемою зірка $I_{\phi} = I_L$, $U_{\phi} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$, а при з'єднанні за схемою

трикутник $I_\phi = \frac{I_\lambda}{\sqrt{3}}$, $U_\phi = U_\lambda$, то

$$P = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda \cos \phi. \quad (1.47)$$

Реактивна потужність трифазного кола у симетричному режимі

$$Q = 3 U_\phi I_\phi \sin \phi = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda \sin \phi. \quad (1.48)$$

Повна потужність трифазного кола у симетричному режимі

$$S = 3 U_\phi I_\phi = \sqrt{3} U_\lambda I_\lambda. \quad (1.49)$$

У несиметричному режимі миттєва потужність є функцією часу й трифазне коло є неврівноваженим. Потужність кола дорівнює сумі потужностей всіх її елементів. Для трифазного кола, яке з'єднано за схемою чотирипровідна зірка, комплекс повної потужності у несиметричному режимі

$$\underline{S} = \underline{U}_a \underline{I}_A^* + \underline{U}_b \underline{I}_B^* + \underline{U}_c \underline{I}_C^* + \underline{U}_N \underline{I}_N^*. \quad (1.50)$$

З урахуванням того, що $\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C$, маємо

$$\begin{aligned} \underline{S} &= (\underline{U}_a + \underline{U}_N) \underline{I}_A^* + (\underline{U}_b + \underline{U}_N) \underline{I}_B^* + (\underline{U}_c + \underline{U}_N) \underline{I}_C^* = \\ &= \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^*. \end{aligned} \quad (1.51)$$

Формула (1.51) є справедливою й у випадку з'єднання трифазного кола за схемою трипровідна зірка при несиметричному режимі.

Середня активна потужність дорівнює сумі середніх активних потужностей окремих фаз

$$P = U_A I_A \cos \phi_A + U_B I_B \cos \phi_B + U_C I_C \cos \phi_C. \quad (1.52)$$

де ϕ_A , ϕ_B , ϕ_C - кути фазового зсуву між відповідними фазними напругами і фазними струмами.

Аналогічно реактивна потужність

$$Q = U_A I_A \sin \phi_A + U_B I_B \sin \phi_B + U_C I_C \sin \phi_C. \quad (1.53)$$

Комплексна повна потужність у випадку з'єднання трифазного кола за схемою трикутник при несиметричному режимі.

$$\underline{S} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* + Z_\lambda (\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C). \quad (1.54)$$

2 ПИТАННЯ ДЛЯ САМОПЕРЕВІРКИ

1. Дайте визначення трифазного кола й опишіть процес одержання трифазної системи ЕРС.
2. Які переваги мають трифазні кола для енергопостачання.
3. Як утворюються з'єднання обмоток трифазного генератора зірка й трикутник?
4. Що розуміють під фазою трифазного електричного кола?
5. Які напруги й струми називають лінійними?
6. Які напруги й струми називають фазними?
7. Як співвідносяться між собою лінійні й фазні напруги навантаження, що з'єднане за схемою зірка?
8. Як співвідносяться між собою і лінійні й фазні струми навантаження, що з'єднане за схемою зірка?
9. Як співвідносяться між собою і лінійні й фазні напруги навантаження, що з'єднане за схемою трикутник?
10. Як співвідносяться між собою лінійні й фазні струми навантаження, що з'єднане за схемою трикутник?
11. Дайте визначення симетричного, несиметричного, рівномірного й однорідного навантаження. Наведіть приклади.
12. Що таке порядок чергування фаз?
13. Що таке симетрична система ЕРС (напруг, струмів)?
14. Що таке напруга зсуву нейтралі? Як її можна розрахувати теоретично?
15. Як розраховують фазні напруги при наявності напруги зсуву нейтралі?
16. Для чого в трифазному колі використовують нейтральний (нульовий) провід? Як теоретично можна знайти значення струму в нейтральному проводі?
17. При якій умові наявність або відсутність нейтрального проводу не впливає на режим роботи навантаження?
18. Чому перетин нейтрального проводу ліній електропередач менше перетину лінійного проводу?
19. До яких наслідків приводить коротке замикання однієї з фаз навантаження, що з'єднано за схемою зірка без нейтрального проводу при симетричному навантаженні?
20. До яких наслідків призводить коротке замикання однієї з фаз навантаження, що з'єднано за схемою зірка з нейтральним проводом

при симетричному навантаженні?

21. До яких наслідків призводить розірва лінійного проводу електричного кола, що з'єднано за схемою зірка без нейтрального проводу?
22. До яких наслідків приводить розірва лінійного проводу електричного кола, що з'єднано за схемою трикутник при рівномірному навантаженні?
23. До яких наслідків приводить розірва фазного проводу навантаження, що з'єднано за схемою трикутник при рівномірному навантаженні?
24. Як визначити повну потужність кола при симетричному навантаженні?
25. Як визначається повна потужність кола при несиметричному навантаженні?
26. Яка умова виконується для активної й реактивної потужності трифазного електричного кола й не виконується для повної?
27. Якими величинами потрібно скористатися для обчислення потужності, щоб вирази не залежали від схеми з'єднання симетричного навантаження?

3 ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ

Номер варіанту для студентів денного відділення співпадає з порядковим номером студента у журналі навчальної групи, для студентів заочного відділення - з номером, який утворюють дві останні цифри номера залікової книжки.

Розрахунок та аналіз електричних кіл трифазного струму

Частина 1.

Задано несиметричне трифазне коло, яке з'єднано за схемою "трипровідна зірка", як представлено на рис. 3.1,а. Параметри елементів кола, визначаються у відповідності з варіантом та номером групи.

Вважаючи, що джерело живлення симетричне, потрібно розглянути наступні режими роботи електричного кола:

- номінальний режим;
- коротке замикання у одній з фаз;
- розірва лінійного проводу однієї з фаз.

Для кожного режиму потрібно розрахувати фазні струми й фазні напруги навантаження, скласти баланс потужностей й побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

Частина 2.

Задано несиметричне трифазне коло, яке з'єднано за схемою "зірка-трикутник", як представлено на рис. 3.1,а. Параметри елементів кола, визначаються у відповідності з варіантом та номером групи.

Вважаючи, що джерело живлення симетричне, потрібно розглянути наступні режими роботи електричного кола:

- номінальний режим;
- розірва лінійного проводу однієї з фаз;
- розірва фазного проводу однієї з фаз.

Для кожного режиму потрібно розрахувати фазні струми й фазні напруги навантаження, скласти баланс потужностей й побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

$$Z_a = Z_{ab} = 3 \cdot (a + 2 \cdot v) + j \cdot (2 \cdot b + 3 \cdot c - v) \text{ Ом};$$

$$Z_b = Z_{bc} = 2 \cdot (3 \cdot b + v) + j \cdot (6 \cdot b + c - v) \text{ Ом};$$

$$Z_c = Z_{ca} = 2 \cdot (2 \cdot c + v) + j \cdot (3 \cdot b - 10 \cdot a - v) \text{ Ом},$$

де v - номер варіанта, a, b, c - відповідно перша, друга та третя цифра номера групи.

Лінійна напруга електричного кола та назви ушкоджених фаз наведені у таблиці 3.1.

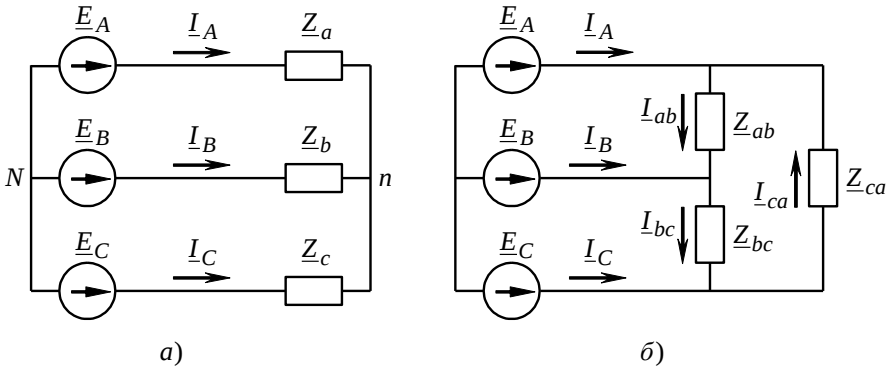


Рисунок 3.1

Таблиця 3.1 - Лінійна напруга електричного кола та назви ушкоджених фаз

№ варіанта	$U_{л},$ В	Аварійні режими для 1 частини		Аварійні режими для 2 частини	
		К.з. у фазі	Обрив лінійного проводу	Обрив лінійного проводу	Обрив фазного проводу
1	380	A	Сс	Вв	ав
2	220	B	Aa	Сс	вс
3	660	C	Вв	Aa	са
4	1000	A	Сс	Вв	ав
5	380	B	Aa	Сс	вс
6	220	C	Вв	Aa	са
7	660	A	Сс	Вв	ав
8	1000	B	Aa	Сс	вс
9	380	C	Вв	Aa	са
10	220	A	Сс	Вв	ав
11	660	B	Aa	Сс	вс
12	1000	C	Вв	Aa	са
13	380	A	Сс	Вв	ав
14	220	B	Aa	Сс	вс
15	660	C	Вв	Aa	са
16	1000	A	Сс	Вв	ав
17	380	B	Aa	Сс	вс
18	220	C	Вв	Aa	са

№ варіанта	$U_{л},$ В	Аварійні режими для 1 частини		Аварійні режими для 2 частини	
		К.з. у фазі	Обрив лінійного проводу	Обрив лінійного проводу	Обрив фазного проводу
19	660	А	Сс	Вв	ав
20	1000	В	Аа	Сс	вс
21	380	С	Вв	Аа	са
22	220	А	Сс	Вв	ав
23	660	В	Аа	Сс	вс
24	1000	С	Вв	Аа	са
25	380	А	Сс	Вв	ав
26	220	В	Аа	Сс	вс
27	660	С	Вв	Аа	са
28	1000	А	Сс	Вв	ав
29	380	В	Аа	Сс	вс
30	220	С	Вв	Аа	са
31	660	А	Сс	Вв	ав
32	1000	В	Аа	Сс	вс
33	380	С	Вв	Аа	са
34	220	А	Сс	Вв	ав
35	660	В	Аа	Сс	вс
36	1000	С	Вв	Аа	са
37	380	А	Сс	Вв	ав
38	220	В	Аа	Сс	вс
39	660	С	Вв	Аа	са
40	1000	А	Сс	Вв	ав
41	380	В	Аа	Сс	вс
42	220	С	Вв	Аа	са
43	660	А	Сс	Вв	ав
44	1000	В	Аа	Сс	вс
45	380	С	Вв	Аа	са
46	220	А	Сс	Вв	ав
47	660	В	Аа	Сс	вс
48	1000	С	Вв	Аа	са
49	380	А	Сс	Вв	ав
50	220	В	Аа	Сс	вс

4 ПРИКЛАД ВИКОНАННЯ Й ОФОРМЛЕННЯ РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ

Частина 1

Вихідні дані. Задано несиметричне трифазне коло, яке з'єднано за схемою "трипровідна зірка", як представлено на рис. 4.1. Параметри елементів електричного кола, у відповідності з варіантом №3 та номером групи Е-612 ($\nu=3$, $a=6$, $b=1$, $c=2$).

$$U_{\text{л}} = 660 \text{ В};$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= 3 \cdot (a + 2 \cdot \nu) + j \cdot (2 \cdot b + 3 \cdot c - \nu) = \\ &= 3 \cdot (6 + 2 \cdot 3) + j \cdot (2 \cdot 1 + 3 \cdot 2 - 3) = 36 + j \cdot 5 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_b &= 2 \cdot (3 \cdot b + \nu) + j \cdot (6 \cdot b + c - \nu) = \\ &= 2 \cdot (3 \cdot 1 + 3) + j \cdot (6 \cdot 1 + 2 - 3) = 12 + j \cdot 5 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_c &= 2 \cdot (2 \cdot c + \nu) + j \cdot (3 \cdot b - 10 \cdot a - \nu) = \\ &= 2 \cdot (2 \cdot 2 + 3) + j \cdot (3 \cdot 1 - 10 \cdot 6 - 3) = 14 - j \cdot 60 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Вважаючи, що джерело живлення синусоїдне, потрібно розглянути наступні режими роботи електричного кола:

- номінальний режим;
- коротке замикання у фазі С;
- обрив лінійного проводу Вв.

Для кожного режиму потрібно розрахувати фазні струми й фазні напруги навантаження, скласти баланс потужності й побудувати векторну діаграму.

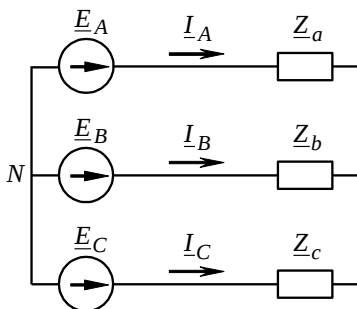


Рисунок 4.1

Розв'язання. Номінальний режим.

Фазні напруги джерела живлення:

$$U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381,1 \text{ В},$$

$$\underline{U}_A = U_\phi \cdot e^{j \cdot 0^\circ} = 381,1 \cdot e^{j \cdot 0^\circ} = 381,1 + j \cdot 0,0 \text{ В};$$

$$\underline{U}_B = U_\phi \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} = 381,1 \cdot e^{-j \cdot 120^\circ} = -190,6 - j \cdot 330,0 \text{ В};$$

$$\underline{U}_C = U_\phi \cdot e^{j \cdot 120^\circ} = 381,1 \cdot e^{j \cdot 120^\circ} = -190,6 + j \cdot 330,0 \text{ В}.$$

Напряга зсуву нейтралі:

$$\begin{aligned} \underline{U}_N &= \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = \frac{\frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A} + \frac{\underline{U}_B}{\underline{Z}_B} + \frac{\underline{U}_C}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} = \\ &= \frac{\frac{361,1}{36 + j \cdot 5} + \frac{-190,6 - j \cdot 330}{12 + j \cdot 5} + \frac{-190,6 - j \cdot 330}{14 - j \cdot 60}}{\frac{1}{36 + j \cdot 5} + \frac{1}{12 + j \cdot 15} + \frac{1}{14 - j \cdot 60}} = \\ &= -144,8 - j \cdot 231,3 = 272,9 \cdot e^{-j \cdot 122^\circ} \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Лінійні (фазні) струми:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_N}{\underline{Z}_a} = \frac{361,1 + j \cdot 0 + 144,8 + j \cdot 231,3}{36 + j \cdot 5} = \\ &= 15,21 + j \cdot 4,31 = 15,81 \cdot e^{j \cdot 16^\circ} \text{ А}; \\ \underline{I}_B &= \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_N}{\underline{Z}_b} = \frac{-190,6 - j \cdot 330 + 144,8 + j \cdot 231,3}{12 + j \cdot 5} = \\ &= -6,17 - j \cdot 5,66 = 8,37 \cdot e^{-j \cdot 137^\circ} \text{ А}; \\ \underline{I}_C &= \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_N}{\underline{Z}_c} = \frac{-190,6 + j \cdot 330 + 144,8 + j \cdot 231,3}{14 - j \cdot 60} = \\ &= -9,04 + j \cdot 1,35 = 9,14 \cdot e^{j \cdot 172^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Перевірка за першим законом Кірхгофа:

$$\underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 15,21 + j \cdot 4,31 - 6,17 - j \cdot 5,66 - 9,04 + j \cdot 1,35 = 0.$$

Фазні напруги навантаження:

$$\underline{U}_a = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a = (15,21 + j \cdot 4,31) \cdot (36 + j \cdot 5) = 525,9 + j \cdot 231,3 = 574,5 \cdot e^{j \cdot 24^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_b = \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_b = (-6,17 - j \cdot 5,66) \cdot (12 + j \cdot 15) = -45,7 - j \cdot 98,7 = 108,8 \cdot e^{-j \cdot 115^\circ} \text{ В};$$

$$\underline{U}_c = \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_c = (-9,04 - j \cdot 1,35) \cdot (14 - j \cdot 60) = -45,7 + j \cdot 561,3 = 563,1 \cdot e^{j \cdot 95^\circ} \text{ В}.$$

Використовуючи комплексні діючі значення напруг і струмів, побудуємо у відповідно вибраних масштабах суміщену векторну діаграму (рис. 4.2).

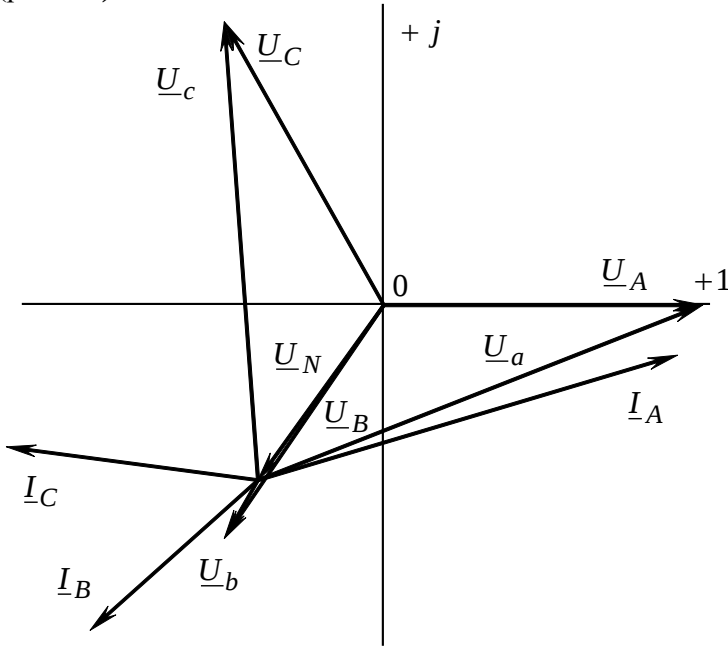


Рисунок 4.2

Комплексна повна потужність джерела живлення:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{дж} &= \underline{U}_A \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \underline{I}_C^* = (381,1 + j \cdot 0) \cdot (15,21 - j \cdot 4,31) + \\ &+ (-190,6 - j \cdot 330) \cdot (-6,17 + j \cdot 5,66) + (-190,6 + j \cdot 330) \cdot (-9,04 - j \cdot 1,35) = \\ &= 1223 - j \cdot 379 = 1280 \cdot e^{-j17^\circ} \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Комплексна повна потужність навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{S}_н &= \underline{I}_A^2 \cdot \underline{Z}_a + \underline{I}_B^2 \cdot \underline{Z}_b + \underline{I}_C^2 \cdot \underline{Z}_c = 15,81^2 \cdot (36 + j \cdot 5) + 8,37^2 \cdot (12 + j \cdot 15) + \\ &+ 9,14^2 \cdot (14 - j \cdot 60) = 1223 - j \cdot 379 = 1280 \cdot e^{-j17^\circ} \text{ ВА.} \end{aligned}$$

Відносна похибка між цими величинами за модулем не перевищує 3%, а абсолютна похибка за кутом не перевищує 1° , тому вважаємо, що розрахунок виконано правильно.

Коротке замикання у фазі C.

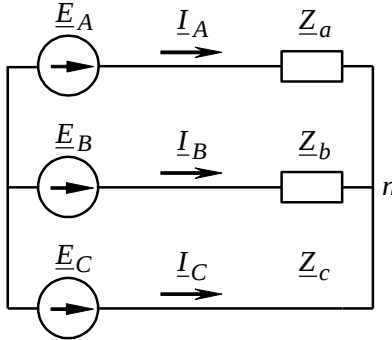


Рисунок 4.3

Оскільки фаза C джерела безпосереднє з'єднана з нейтральною точкою навантаження, то

$$\underline{U}_N = \underline{U}_C = 381,1 \cdot e^{j \cdot 120^\circ} = -190,6 + j \cdot 330,0 \text{ В.}$$

Лінійні (фазні) струми:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A &= \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_N}{\underline{Z}_a} = \frac{361,1 + j \cdot 0 + 190,6 - j \cdot 330,0}{36 + j \cdot 5} = \\ &= 14,33 - j \cdot 11,16 = 18,16 \cdot e^{-j \cdot 38^\circ} \text{ А;} \\ \underline{I}_B &= \frac{\underline{U}_B - \underline{U}_N}{\underline{Z}_b} = \frac{-190,6 - j \cdot 330,0 + 190,6 - j \cdot 330,0}{12 + j \cdot 5} = \\ &= -19,53 - j \cdot 46,86 = 50,77 \cdot e^{-j \cdot 113^\circ} \text{ А;} \\ \underline{I}_C &= -\underline{I}_A - \underline{I}_B = -14,33 + j \cdot 11,16 + 19,53 + j \cdot 46,86 = \\ &= 5,20 + j \cdot 58,02 = 58,25 \cdot e^{j \cdot 85^\circ} \text{ А.} \end{aligned}$$

Фазні напруги навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a = (14,33 - j \cdot 11,16) \cdot (36 + j \cdot 5) = 571,58 - j \cdot 330 = 660 \cdot e^{-j \cdot 30^\circ} \text{ В;} \\ \underline{U}_b &= \underline{I}_B \cdot \underline{Z}_b = (-19,53 - j \cdot 46,86) \cdot (12 + j \cdot 5) = 0 - j \cdot 660 = 660 \cdot e^{-j \cdot 90^\circ} \text{ В;} \\ \underline{U}_c &= 0 \text{ В.} \end{aligned}$$

Використовуючи комплексні діючі значення напруг і струмів, побудуємо у відповідно вибраних масштабах суміщену векторну діаграму (рис. 4.4).

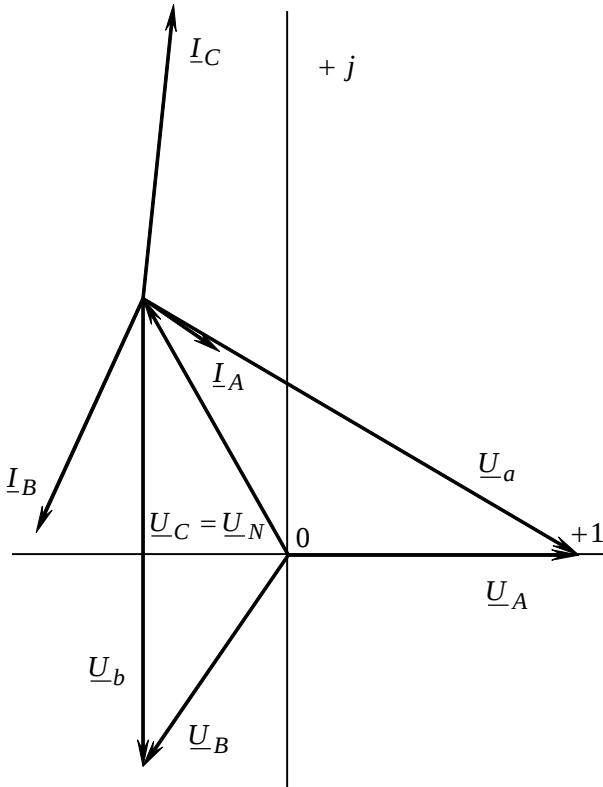


Рисунок 4.4

Комплексна повна потужність джерела живлення:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{\text{джер}} &= \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* = (381,1 + j \cdot 0,0) \cdot (14,33 + j \cdot 11,16) + \\ &+ (-190,6 - j \cdot 330) \cdot (-19,53 + j \cdot 46,86) + (-190,6 + j \cdot 330) \cdot (5,20 - j \cdot 58,02) = \\ &= 42801 + j \cdot 14536 = 45202 \cdot e^{j19^\circ} \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Комплексна повна потужність навантаження:

$$\begin{aligned}\underline{S}_n &= I_A^2 \cdot \underline{Z}_a + I_B^2 \cdot \underline{Z}_b = 18,16^2 \cdot (36 + j \cdot 5) + 50,77^2 \cdot (12 + j \cdot 5) = \\ &= 42801 + j \cdot 14536 = 45202 \cdot e^{j19^\circ} \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Відносна похибка між цими величинами за модулем не перевищує 3%, а абсолютна похибка за кутом не перевищує 1° , тому вважаємо, що розрахунок виконано правильно.

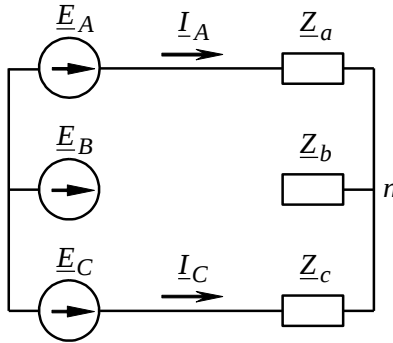
Розірва лінійного проводу Bb

Рисунок 4.5

Оскільки лінійний провід Bb розірвано, то трифазне коло перетвориться в умовно однофазне коло.

Лінійні (фазні) струми:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A - \underline{U}_C}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_c} = \frac{361,1 + j \cdot 0,0 + 190,6 - j \cdot 330,0}{36 + j \cdot 5 + 14 - j \cdot 60} =$$

$$= 8,46 + j \cdot 2,70 = 8,88 \cdot e^{j \cdot 18^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_B = 0 \text{ A};$$

$$\underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C - \underline{U}_A}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_c} = \frac{-190,6 + j \cdot 330,0 - 361,1 - j \cdot 0,0}{36 + j \cdot 5 + 14 - j \cdot 60} =$$

$$= -8,46 - j \cdot 2,70 = 8,88 \cdot e^{-j \cdot 162^\circ} \text{ A}.$$

Фазні напруги навантаження:

$$\underline{U}_a = \underline{I}_A \cdot \underline{Z}_a = (8,46 + j \cdot 2,70) \cdot (36 + j \cdot 5) = 291,0 + j \cdot 139,6 = 322,7 \cdot e^{j \cdot 26^\circ} \text{ B};$$

$$\underline{U}_b = 0 \text{ B};$$

$$\underline{U}_c = \underline{I}_C \cdot \underline{Z}_c = (-8,46 - j \cdot 2,70) \cdot (14 - j \cdot 60) = -280,6 + j \cdot 469,6 = 547,1 \cdot e^{j \cdot 121^\circ} \text{ B}.$$

Напруга зсуву нейтралі

$$\underline{U}_N = \underline{U}_A - \underline{U}_a = 361,1 + j \cdot 0,0 - 291,0 - j \cdot 139,6 = 90,1 - j \cdot 139,6 =$$

$$= 166,2 \cdot e^{-j \cdot 57^\circ} \text{ B}.$$

Використовуюючи комплексні діючі значення напруг і струмів, побудуємо у відповідно вибраних масштабах суміщену векторну діаграму (рис. 4.6).

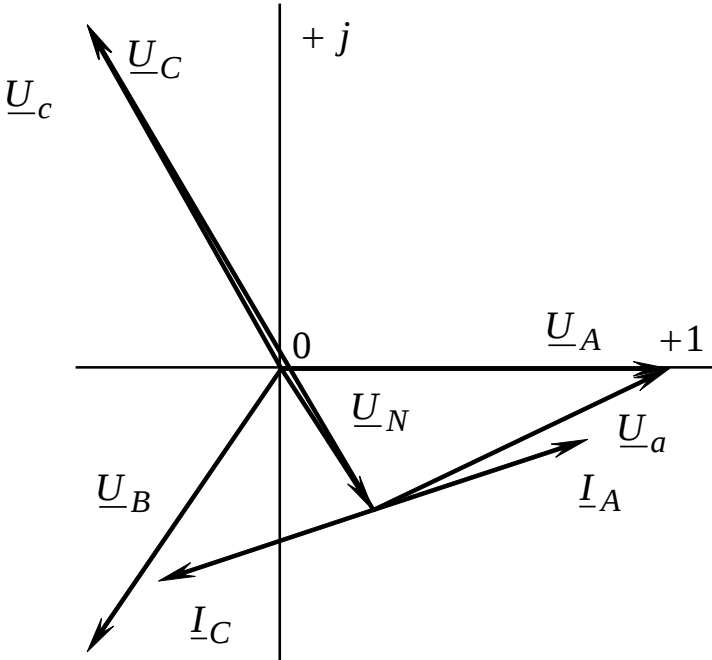


Рисунок 4.6

Комплексна повна потужність джерела живлення:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{дж} &= \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* = (381,1 + j \cdot 0,0) \cdot (8,46 + j \cdot 2,70) + \\ &+ (-190,6 + j \cdot 330,0) \cdot (-8,46 - j \cdot 2,70) = \\ &= 3942 - j \cdot 4336 = 5860 \cdot e^{-j \cdot 48^\circ} \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Комплексна повна потужність навантаження:

$$\begin{aligned}\underline{S}_н &= \underline{I}_A^2 \cdot \underline{Z}_a + \underline{I}_C^2 \cdot \underline{Z}_c = 8,88^2 \cdot (36 + j \cdot 5) + 8,88^2 \cdot (14 - j \cdot 60) = \\ &= 3942 - j \cdot 4336 = 5860 \cdot e^{-j \cdot 48^\circ} \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Відносна похибка між цими величинами за модулем не перевищує 3%, а абсолютна похибка за кутом не перевищує 1° , тому вважаємо, що розрахунок виконано правильно.

Частина 2

Вихідні дані. Задано несиметричне трифазне коло, яке з'єднано за схемою "зірка-трикутник", як представлено на рис. 4.7. Параметри елементів кола, у відповідності з варіантом та номером групи.

$$U_L = 660 \text{ В};$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{ab} &= 3 \cdot (a + 2 \cdot v) + j \cdot (2 \cdot b + 3 \cdot c - v) = \\ &= 3 \cdot (6 + 2 \cdot 3) + j \cdot (2 \cdot 1 + 3 \cdot 2 - 3) = 36 + j \cdot 5 \text{ Ом};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{bc} &= 2 \cdot (3 \cdot b + v) + j \cdot (6 \cdot b + c - v) = \\ &= 2 \cdot (3 \cdot 1 + 3) + j \cdot (6 \cdot 1 + 2 - 3) = 12 + j \cdot 5 \text{ Ом};\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{ca} &= 2 \cdot (2 \cdot c + v) + j \cdot (3 \cdot b - 10 \cdot a - v) = \\ &= 2 \cdot (2 \cdot 2 + 3) + j \cdot (3 \cdot 1 - 10 \cdot 6 - 3) = 14 - j \cdot 60 \text{ Ом}.\end{aligned}$$

Вважаючи, що джерело живлення симетричне, потрібно розглянути наступні режими роботи електричного кола:

- номінальний режим;
- розрив лінійного проводу *Cc*;
- розрив фазного проводу *Ca*.

Для кожного режиму потрібно розрахувати фазні струми й фазні напруги навантаження, скласти баланс потужностей й побудувати суміщену векторну діаграму струмів і напруг.

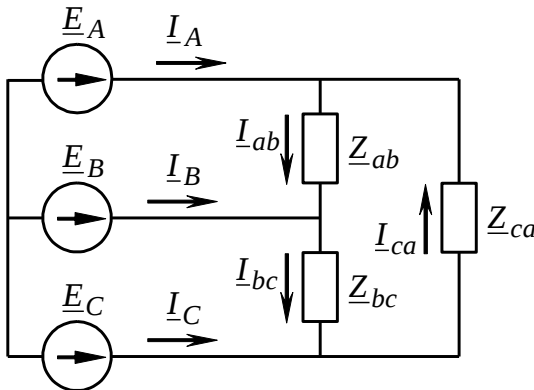


Рисунок 4.7

Розв'язання. Номінальний режим.

Лінійні напруги джерела живлення та навантаження:

$$\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{ab} = U_{\pi} \cdot e^{j \cdot 30^\circ} = 660 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} = 571,6 + j \cdot 330,0 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{BC} = \underline{U}_{bc} = U_{\pi} \cdot e^{-j \cdot 90^\circ} = 660 \cdot e^{-j \cdot 90^\circ} = 0,0 - j \cdot 660,0 \text{ В};$$

$$\underline{U}_{CA} = \underline{U}_{ca} = U_{\pi} \cdot e^{j \cdot 150^\circ} = 660 \cdot e^{j \cdot 150^\circ} = -571,6 + j \cdot 330,0 \text{ В}.$$

Фазні струми навантаження:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{571,6 + j \cdot 330,0}{36 + j \cdot 5} = 16,83 + j \cdot 6,83 = 18,16 \cdot e^{j \cdot 22^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{0,0 + j \cdot 660,0}{12 + j \cdot 5} = -19,53 - j \cdot 46,86 = 50,77 \cdot e^{-j \cdot 113^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}} = \frac{-571,6 + j \cdot 330,0}{14 - j \cdot 60} = -7,32 - j \cdot 7,82 = 10,71 \cdot e^{-j \cdot 133^\circ} \text{ А}.$$

Лінійні струми:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 16,83 + j \cdot 6,83 + 7,32 + j \cdot 7,82 =$$

$$= 24,15 + j \cdot 14,65 = 28,24 \cdot e^{j \cdot 31^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -19,53 - j \cdot 46,86 - 16,83 - j \cdot 6,83 =$$

$$= -36,36 - j \cdot 53,69 = 64,84 \cdot e^{-j \cdot 124^\circ} \text{ А};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = -7,32 - j \cdot 7,82 + 19,53 + j \cdot 46,86 =$$

$$= 12,21 + j \cdot 39,04 = 28,24 \cdot e^{j \cdot 31^\circ} \text{ А}.$$

Комплексна повна потужність джерела живлення:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{джер}} &= \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* = (381,1 + j \cdot 0,0) \cdot (24,15 + j \cdot 14,65) + \\ &+ (-190,6 - j \cdot 330) \cdot (-36,36 + j \cdot 53,69) + (-190,6 + j \cdot 330) \cdot (12,21 - j \cdot 39,04) = \\ &= 44408 + j \cdot 7651 = 45060 \cdot e^{j \cdot 10^\circ} \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Комплексна повна потужність навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{S}_H &= \underline{I}_{ab}^2 \cdot \underline{Z}_{ab} + \underline{I}_{bc}^2 \cdot \underline{Z}_{bc} + \underline{I}_{ca}^2 \cdot \underline{Z}_{ca} = 18,16^2 \cdot (36 + j \cdot 5) + 50,77^2 \cdot (12 + j \cdot 5) + \\ &+ 10,71^2 \cdot (14 - j \cdot 60) = 44408 + j \cdot 7651 = 45060 \cdot e^{j \cdot 10^\circ} \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Відносна похибка між цими величинами за модулем не перевищує 3%, а абсолютна похибка за кутом не перевищує 1° , тому вважаємо, що розрахунок виконано правильно.

Використовуючи комплексні діючі значення напруг і струмів, побудуємо у відповідно вибраних масштабах суміщену векторну діаграму (рис. 4.8).

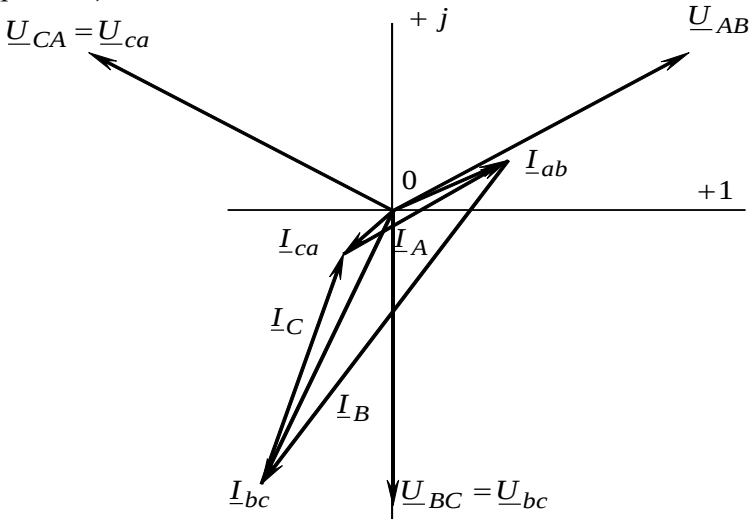


Рисунок 4.8

Розірва лінійного проводу Cc

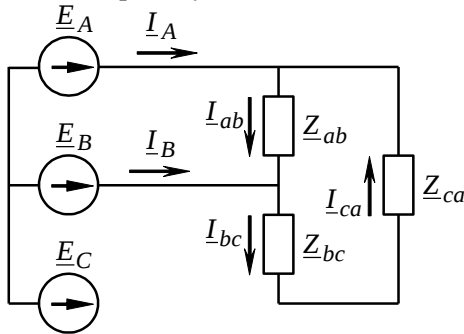


Рисунок 4.9

Фазні струми навантаження:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{571,6 + j \cdot 330,0}{36 + j \cdot 5} = 16,83 + j \cdot 6,83 = 18,16 \cdot e^{j \cdot 22^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{bc} = \underline{I}_{ca} = \frac{-\underline{U}_{BA}}{\underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}} = \frac{-571,6 - j \cdot 330,0}{12 + j \cdot 5 + 14 - j \cdot 60} = 0,89 - j \cdot 10,81 = 10,85 \cdot e^{-j \cdot 85^\circ} \text{ A}.$$

Лінійні струми:

$$\begin{aligned}\underline{I}_A &= \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 16,83 + j \cdot 6,83 - 0,89 + j \cdot 10,81 = \\ &= 15,94 + j \cdot 17,64 = 23,77 \cdot e^{j \cdot 48^\circ} \text{ A;} \\ \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -19,53 - j \cdot 46,86 - 16,83 - j \cdot 6,83 = \\ &= -15,94 - j \cdot 17,64 = 23,77 \cdot e^{-j \cdot 132^\circ} \text{ A;} \\ \underline{I}_C &= 0 \text{ A.}\end{aligned}$$

Комплексна повна потужність джерела живлення:

$$\begin{aligned}\underline{S}_{\text{джер}} &= \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* = (381,1 + j \cdot 0,0) \cdot (15,94 - j \cdot 17,64) + \\ &+ (-190,6 - j \cdot 330,0) \cdot (-15,94 + j \cdot 17,64) = \\ &= 14931 - j \cdot 4825 = 15691 \cdot e^{-j \cdot 18^\circ} \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Комплексна повна потужність навантаження:

$$\begin{aligned}\underline{S}_n &= I_{ab}^2 \cdot \underline{Z}_{ab} + I_{bc}^2 \cdot \underline{Z}_{bc} + I_{ca}^2 \cdot \underline{Z}_{ca} = 18,16^2 \cdot (36 + j \cdot 5) + \\ &+ 10,85^2 \cdot (12 + j \cdot 5) + 10,85^2 \cdot (14 - j \cdot 60) = \\ &= 14931 - j \cdot 4825 = 45060 \cdot e^{-j \cdot 18^\circ} \text{ ВА.}\end{aligned}$$

Відносна похибка між цими величинами за модулем не перевищує 3%, а абсолютна похибка за кутом не перевищує 1° , тому вважаємо, що розрахунок виконано правильно.

Фазні напруги навантаження:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{ab} &= \underline{U}_{AB} = 571,6 + j \cdot 330,0 = 660 \cdot e^{j \cdot 30^\circ} \text{ В;} \\ \underline{U}_{bc} &= \underline{I}_{bc} \cdot \underline{Z}_{bc} = (0,89 - j \cdot 10,81) \cdot (12 + j \cdot 5) = \\ &= 64,73 - j \cdot 125,31 = 141,04 \cdot e^{-j \cdot 63^\circ} \text{ В;} \\ \underline{U}_{ca} &= \underline{I}_{ca} \cdot \underline{Z}_{ca} = (0,89 - j \cdot 10,81) \cdot (14 - j \cdot 60) = \\ &= -635,31 - j \cdot 204,69 = 668,42 \cdot e^{-j \cdot 162^\circ} \text{ В.}\end{aligned}$$

Використовуючи комплексні діючі значення напруг і струмів, побудуємо у відповідно вибраних масштабах суміщену векторну діаграму (рис. 4.10).

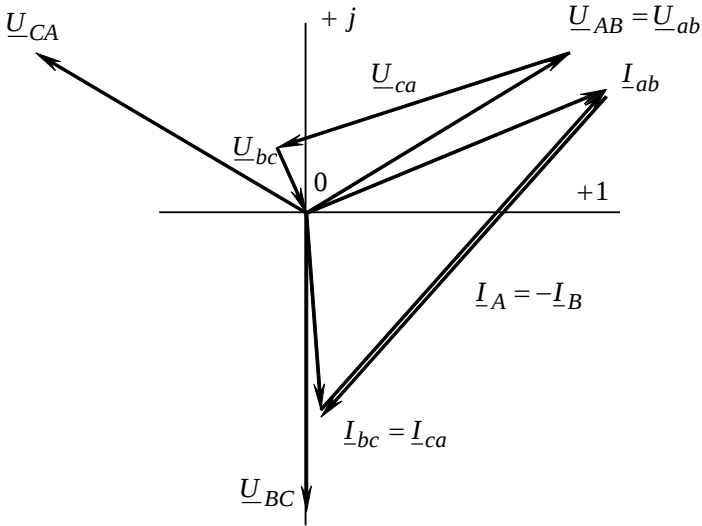


Рисунок 4.10

Розірва фазного проводу ca

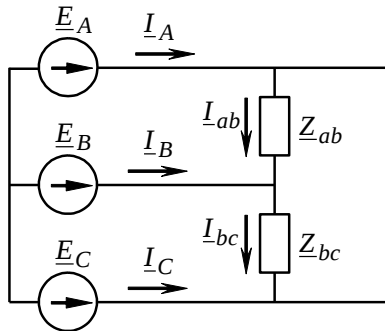


Рисунок 4.11

Фазні струми навантаження:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} = \frac{571,6 + j \cdot 330,0}{36 + j \cdot 5} = 16,83 + j \cdot 6,83 = 18,16 \cdot e^{j \cdot 22^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} = \frac{0,0 + j \cdot 660,0}{12 + j \cdot 5} = -19,53 - j \cdot 46,86 = 50,77 \cdot e^{-j \cdot 113^\circ} \text{ A};$$

$$\underline{I}_{ca} = 0 \text{ A}.$$

Лінійні струми:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} = 16,83 + j \cdot 6,83 = 18,16 \cdot e^{j \cdot 22^\circ} \text{ A};$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_B &= \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = -19,53 - j \cdot 46,86 - 16,83 - j \cdot 6,83 = \\ &= -36,36 - j \cdot 53,69 = 64,84 \cdot e^{-j \cdot 124^\circ} \text{ A}; \end{aligned}$$

$$\underline{I}_C = -\underline{I}_{bc} = 19,53 + j \cdot 46,86 = 50,77 \cdot e^{j \cdot 67^\circ} \text{ A}.$$

Комплексна повна потужність джерела живлення:

$$\begin{aligned} \underline{S}_{\text{джер}} &= \underline{U}_A \cdot \underline{I}_A^* + \underline{U}_B \cdot \underline{I}_B^* + \underline{U}_C \cdot \underline{I}_C^* = (381,1 + j \cdot 0,0) \cdot (16,83 - j \cdot 6,83) + \\ &+ (-190,6 - j \cdot 330) \cdot (-36,36 + j \cdot 53,69) + (-190,6 + j \cdot 330) \cdot (19,21 - j \cdot 46,86) = \\ &= 42801 + j \cdot 14536 = 45202 \cdot e^{j \cdot 19^\circ} \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Комплексна повна потужність навантаження:

$$\begin{aligned} \underline{S}_n &= I_{ab}^2 \cdot \underline{Z}_{ab} + I_{bc}^2 \cdot \underline{Z}_{bc} = 18,16^2 \cdot (36 + j \cdot 5) + 50,77^2 \cdot (12 + j \cdot 5) = \\ &= 42801 + j \cdot 14536 = 45202 \cdot e^{j \cdot 19^\circ} \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Відносна похибка між цими величинами за модулем не перевищує 3%, а абсолютна похибка за кутом не перевищує 1° , тому вважаємо, що розрахунок виконано правильно.

Використовуючи комплексні діючі значення напруг і струмів, побудуємо у відповідно вибраних масштабах суміщену векторну діаграму (рис. 4.12).

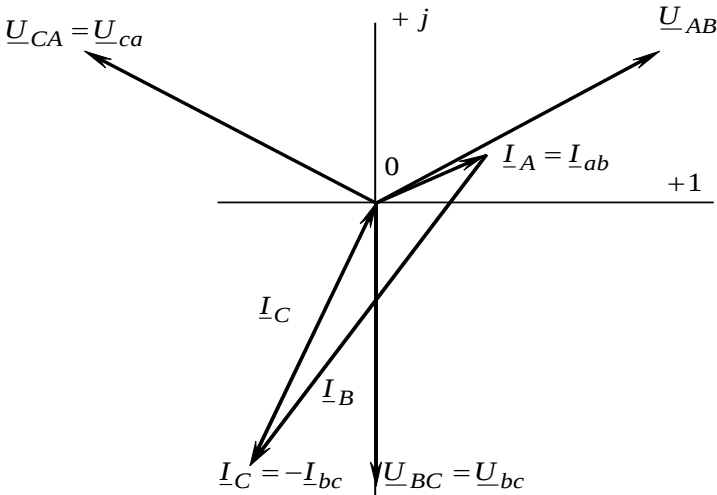


Рисунок 4.12

ЛІТЕРАТУРА

1. Козлов В.В. Теоретичні основи електротехніки. Усталені режими лінійних електричних кіл [Текст] : навчальний посібник / В. В. Козлов, О. В. Набокова. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2016. – 428 с.
2. Качан Ю.Г. Линейная электротехника (теоретические основы) [Текст] : Учеб. пособие для вузов. - Запорожье : ЗГИА, 1995. - 213 с.
3. Паначевский Б.І., Свергун Ю.Ф. Загальна електротехніка: теорія і практикум [Текст] : - К.: Каравела, 2003. – 440 с
4. Мілих В.І. Електротехніка та електромеханіка [Текст] : навч. посіб. для студ. вищ. закладів освіти. – К.: Караван, 2005.– 375 с.