

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Український державний університет
науки і технологій**

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

**ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В
ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ**

Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту

Електронний аналог
друкованого видання

Укладачі:

Д. О. Босий, Д. Р. Земський

Експерти:

голов. інж. проекту *Д. М. Яценко* («Дніпрозалізничпроект»)

канд. техн. наук, доц. *О. І. Бондар* (УДУНТ)

Рекомендовано МКФ «УЕП» (протокол № 2 від 15 листопада 2022).

Зареєстровано НМВ УДУНТ (підстава № 614 від 18.05.2023 р.)

П 27 Перехідні процеси в електроенергетичних системах : методичні рекомендації до виконання курсового проєкту / уклад. Д. О. Босий, Д. Р. Земський ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : УДУНТ, 2023. – 26 с.

Методичні рекомендації розраховані на виконання курсового проєкту студентами денної та безвідривної форм навчання. Приведено вихідні дані для розрахунку та порядок виконання курсового проєкту. Надані формули, схеми і графіки, а також довідкові дані, необхідні при розрахунках.

Іл. 21. Табл. 1. Бібліогр.: 9 назв.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1. ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЄКТ.....	5
2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ	8
2.1. Загальні положення розрахунку несиметричних струмів короткого замикання.....	8
2.1.1. Метод симетричних складових	8
2.1.2. Алгоритм розрахунку несиметричних режимів методом симетричних складових.....	9
2.2. Види несиметрії.....	10
2.4. Розрахунок кола з поперечною несиметрією	15
3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ	21
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	25

ВСТУП

Перехідні процеси в електроенергетичних системах виникають як в нормальних умовах, так і в аварійних режимах. При увімкненні або вимкненні навантаження, джерел живлення чи окремих мереж, а також при обриві однієї чи двох навантажених фаз, різноманітних коротких замиканнях та при виході машини з синхронізму виникають перехідні процеси, які необхідно передбачити, вміти розрахувати і вжити заходи для їх оптимізації. Особливої уваги вимагають аварійні режими, які найнебезпечніші. Вони призводять до виникнення струмів коротких замикань, що в десятки разів перевищують їх номінальні значення, викликаючи перегрівання струмопровідних частин і можуть бути причиною їх механічних пошкоджень внаслідок електродинамічної дії. Виникнення струмів короткого замикання, в свою чергу, викликає недопустимі зниження напруги і аварійні вимкнення електрообладнання. Тому такі аварійні режими потрібно вміти розраховувати, визначати їх зміну за часом. Це потрібно для вибору автоматичних вимикачів за комутаційною здатністю, перевірки обладнання на термічну та динамічну стійкість і можливість самозапуску відповідальних електроприводів під час зниження напруги.

Дисципліна «Перехідні процеси в електроенергетичних системах» відноситься до вибірових компонентів освітньої програми «Електротехнічні системи електроспоживання».

Метою навчально-методичного видання в цьому контексті є сприяння у досягненні, через здобуття досвіду розрахунку задач з використанням теоретичних відомостей та прикладів розрахунку, наступних результатів навчання:

- будувати векторні діаграми, криві спаду струму короткого замикання та епюри напруги;
- обчислити електромагнітні перехідні процеси, передусім струми короткого замикання, з використанням ЕОМ;
- аналізувати отримані результати та давати їм відповідну фізичну інтерпретацію.

ЗАВДАННЯ НА КУРСОВИЙ ПРОЄКТ

Для схеми електропостачання при пошкодженні на лінії, тип якого вказано у варіанті, визначити фазні струми та напруги несиметричної ділянки та побудувати векторні діаграми знайдених струмів та напруг.

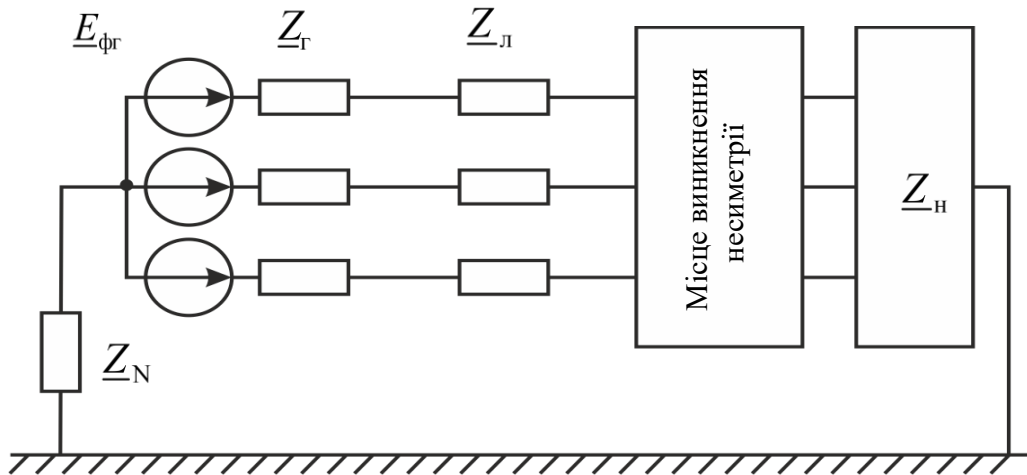


Рис. 1. Схема електропостачання

Вхідні дані, варіант 1

Вид пошкодження		розрив фаз А та В		
Схема з'єднання навантаження		Y_0		
Фазна напруга генератора, В		$E_{\phi r} = 380$		
Опір нейтралі генератора, Ом		$Z_{N1} = 10$		
Опір прямої, зворотної, нульової послідовності відповідно для	генератора, Ом	$Z_{\Gamma 1} = 20j$	$Z_{\Gamma 2} = 15j$	$Z_{\Gamma 0} = 5j$
	лінії, Ом	$Z_{л1} = 8+j$	$Z_{л2} = 2+j$	$Z_{л0} = 2+3j$
	навантаження, Ом	$Z_{н1} = 49+77j$	$Z_{н2} = 17+49j$	$Z_{н0} = 18+6j$

Примітка. Вхідні дані для розрахунку беруться з таблиці 1. Остаточна розрахункова схема, значення параметрів та кількість пошкоджень, що досліджуються у роботі, визначаються викладачем.

Дата видачі завдання:

«___» _____ 20__ р.

Термін подання студентом закінченої роботи:

«___» _____ 20__ р.

Керівник курсової роботи

(підпис)

(прізвище)

Завдання прийняв (ла) до виконання

(підпис)

(прізвище)

Таблиця 1

Варіанти завдань

Варіант	Вид пошкодження	Схема з'єднання навантаження	Опір генератора, Ω			Опір лінія, Ω			Опір навантаження, Ω		
			$\underline{Z}_{r1}$	$\underline{Z}_{r2}$	$\underline{Z}_{r0}$	$\underline{Z}_{л1}$	$\underline{Z}_{л2}$	$\underline{Z}_{л0}$	$\underline{Z}_{н1}$	$\underline{Z}_{н2}$	$\underline{Z}_{н0}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	розрив фаз А та В	Y_0	$20j$	$15j$	$5j$	$8+j$	$2+j$	$2+3j$	$49+77j$	$17+49j$	$18+6j$
2	к.з. фази А	Y	$22j$	$17j$	$7j$	$3+7j$	$3+j$	$4+2j$	$78+52j$	$42+18j$	$10+24j$
3	к.з. фази В	Y	$24j$	$19j$	$9j$	$9+7j$	$2+5j$	$4+2j$	$22+27j$	$50+78j$	$5+15j$
4	к.з. фази С	Y	$26j$	$21j$	$11j$	$5+3j$	$4+j$	$5+j$	$37+25j$	$79+63j$	$17+3j$
5	розрив фаз А та С	D	$28j$	$23j$	$13j$	$6+3j$	$4+2j$	$4+2j$	$24+78j$	$66+17j$	$15+16j$
6	розрив фаз А	Y_0	$30j$	$25j$	$15j$	$2+3j$	$6+5j$	$3+4j$	$40+27j$	$38+19j$	$11+20j$
7	розрив фаз В	Y	$32j$	$27j$	$17j$	$6+3j$	$4+2j$	$3+3j$	$52+36j$	$88+86j$	$15+16j$
8	розрив фаз С	Y	$34j$	$29j$	$19j$	$4+j$	$2+2j$	$1+4j$	$29+36j$	$30+23j$	$15+19j$
9	к.з. фази А та В на землю	Y	$36j$	$31j$	$21j$	$3+6j$	$3+3j$	$2+2j$	$83+45j$	$37+64j$	$19+16j$
10	к.з. фази А та С на землю	D	$38j$	$33j$	$23j$	$7+3j$	$7+j$	$3+5j$	$42+77j$	$31+85j$	$15+23j$
11	к.з. фази А та С (без землі)	Y	$40j$	$35j$	$25j$	$9+4j$	$3+3j$	$5+5j$	$16+21j$	$86+87j$	$17+6j$

Продовження табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
12	к.з. фази В та С (без землі)	Y	42j	37j	27j	9+j	1+6j	5+5j	89+15j	59+36j	10+23j
13	розрив у фазі А	Y	44j	39j	29j	6+j	7+5j	2+2j	41+88j	17+34j	18+5j
14	розрив у фазі В	Y ₀	46j	41j	31j	5+7j	6+2j	4+2j	87+88j	44+30j	2+6j
15	розрив у фазі С	Y	48j	43j	33j	8+4j	2+2j	1+j	35+56j	58+76j	9+16j
16	к.з. фази А та В (без землі)	D	50j	45j	35j	4+7j	4+3j	3+2j	41+44j	13+21j	15+11j
17	розрив фаз А та В	Y	52j	47j	37j	9+6j	7+5j	1+j	24+42j	57+17j	8+19j
18	к.з. фази А	D	54j	49j	39j	5+6j	5+2j	5+2j	73+24j	52+64j	6+4j
19	к.з. фази В	Y	56j	51j	41j	5+j	7+j	5+3j	83+19j	81+61j	16+13j
20	розрив фаз В	Y	58j	53j	43j	6+7j	4+2j	5+j	42+70j	40+18j	20+13j
21	розрив фаз С	Y	60j	55j	45j	5+5j	6+5j	3+3j	55+38j	33+12j	20+5j
22	к.з. фази А та В на землю	Y ₀	62j	57j	47j	3+7j	5+5j	2+2j	19+42j	44+45j	13+23j
23	к.з. фази А та С на землю	Y	64j	59j	49j	8+2j	2+3j	4+5j	64+15j	51+90j	11+j
24	к.з. фази А та С (без землі)	Y	66j	61j	51j	6+j	5+2j	2+5j	45+79j	68+51j	8+7j
25	к.з. фази В та С (без землі)	D	68j	63j	53j	3+3j	6+5j	5+4j	63+10j	21+16j	17+21j

Примітка. Y₀ — схема зірка з заземленою нейтральною точкою, Y — схема зірка без заземлення нейтральної точки, D — схема трикутник.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1. Загальні положення розрахунку несиметричних струмів короткого замикання

2.1.1. Метод симетричних складових

Метод симетричних складових отримав широке розповсюдження при аналізі несиметричних режимів роботи електричних мереж. Відповідно до методу будь-яку несиметричну систему з векторів, наприклад, $\underline{N}_A, \underline{N}_B, \underline{N}_C$ можливо розкласти на три симетричні системи векторів прямої $\underline{N}_{A1}, \underline{N}_{B1}, \underline{N}_{C1}$, зворотної $\underline{N}_{A2}, \underline{N}_{B2}, \underline{N}_{C2}$ та нульової $\underline{N}_{A0}, \underline{N}_{B0}, \underline{N}_{C0}$ послідовності.

Система з векторів $\underline{N}_{A1}, \underline{N}_{B1}, \underline{N}_{C1}$ та система з $\underline{N}_{A2}, \underline{N}_{B2}, \underline{N}_{C2}$ — зрівноважена, їх геометрична сума дорівнює нулю. Система векторів нульової послідовності незрівноважена, їх сума дорівнює потроєному значенню одного вектору нульової послідовності.

Для зручності опису положення векторів трифазної системи використовують оператор повороту « a », що дозволяє будь-який вектор однієї фази трифазної системи виразити однойменним вектором іншої фази, використавши при цьому систему комплексних координат. У симетричній трифазній системі векторів кожен з них можна подати:

$$a = e^{j120^\circ}; \quad (2.1)$$

$$\underline{N}_A = a \underline{N}_B = a^2 \underline{N}_C; \quad (2.2)$$

$$\underline{N}_B = a \underline{N}_C = a^2 \underline{N}_A; \quad (2.3)$$

$$\underline{N}_C = a \underline{N}_A = a^2 \underline{N}_B. \quad (2.4)$$

Тобто множення на оператор повороту збільшує фазу вектору на 120 градусів.

За складовими (векторами прямої, зворотної та нульової послідовностей) можна відновити первинну несиметричну систему векторів:

$$\underline{N}_A = \underline{N}_{A1} + \underline{N}_{A2} + \underline{N}_{A0}; \quad (2.5)$$

$$\underline{N}_B = \underline{N}_{B1} + \underline{N}_{B2} + \underline{N}_{B0}; \quad (2.6)$$

$$\underline{N}_C = \underline{N}_{C1} + \underline{N}_{C2} + \underline{N}_{C0}. \quad (2.7)$$

Праву частину рівнянь (2.6) та (2.7) виразимо через симетричні складові вектора $\underline{N}_A$:

$$\underline{N}_B = a^2 \underline{N}_{A1} + a \underline{N}_{A2} + \underline{N}_{A0}; \quad (2.8)$$

$$\underline{N}_C = a \underline{N}_{A1} + a^2 \underline{N}_{A2} + \underline{N}_{A0}. \quad (2.9)$$

Особливою фазою називають фазу, яка знаходиться у відмінних від інших умовах. На практиці через її симетричні складові визначають вектори симетричних складових напруг та струмів інших фаз.

Рівняння (2.5), (2.8) та (2.9), часто представляють у матричній формі

$$\begin{bmatrix} \underline{N}_A \\ \underline{N}_B \\ \underline{N}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{N}_{A1} \\ \underline{N}_{A2} \\ \underline{N}_{A0} \end{bmatrix}. \quad (2.10)$$

Отриману матрицю розмірністю 3×3 у (2.10) називають «матрицею Фортеस्क'ю», далі будемо її позначати літерою F .

Використовуючи властивості множення матриць, вираз для знаходження симетричних складових особливої фази за відомою (несиметричною, хоча не обов'язково) системою векторів матиме вигляд:

$$\begin{bmatrix} \underline{N}_{A1} \\ \underline{N}_{A2} \\ \underline{N}_{A0} \end{bmatrix} = F^{-1} \begin{bmatrix} \underline{N}_A \\ \underline{N}_B \\ \underline{N}_C \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

2.1.2. Алгоритм розрахунку несиметричних режимів методом симетричних складових

Розрахунок несиметричного режиму методом симетричних складових, як правило, містить такі основні етапи:

- запис несиметричних систем напруг, струмів та ЕРС сумою їх симетричних складових;
- заміна трифазної заступної схеми електричного кола, трьома схемами заміщення: прямої, зворотної та нульової послідовності, що знаходяться у симетричних режимах;
- розрахунок цих симетричних схем заміщення для однієї фази та визначення симетричних складових струмів та напруг;
- розрахунок струмів та напруг за симетричними складовими.

2.2. Види несиметрії

Розрізняють два види несиметрії: поперечну та поздовжню.

Поперечна несиметрія виникає у випадках, коли між фазами і нейтраллю (землею), чи між окремими фазами включаються нерівні опору. Найбільш поширені випадки поперечної несиметрії в електроустановках — це несиметрія, обумовлена коротким замиканням однієї чи двох фаз на землю чи фаз між собою. Міжфазні короткі замикання (к.з.). (двофазні та трифазні) виникають у мережах, як із заземленою, так і із ізольованою нейтраллю. Однофазні к.з. можуть відбуватися лише у мережах із заземленою нейтраллю.

Поздовжня несиметрія виникає у тому випадку, коли у розрив фаз лінії включаються нерівні опори. До поздовжньої несиметрії відноситься обрив однієї або двох фаз без замикання на іншу фазу або землю. Наприклад, із трьох полюсів вимикача спрацював на розмикання лише один.

Під час розрахунку несиметрична пасивна ділянка кола, як правило, за теоремою компенсації замінюється джерелом ЕРС, що генерує в місці несиметрії несиметричну систему напруг. Напруги та струми у місці несиметрії пов'язані між собою певними співвідношеннями. Ці співвідношення можна назвати граничними умовами у місці несиметрії.

Рівняння при поперечній несиметрії записуються для напруг та струмів фаз у місці несиметрії відносно землі. Якщо між фазою і землею включено опір, то напруга і струм на ньому пов'язані між собою за законом Ома. При короткому замиканні фази на землю напруга між фазою та землею дорівнює нулю. Якщо фаза немає з'єднання із землею, то нулю дорівнюватиме струм між фазою і землею. Враховуючи це, визначимо граничні умови для напруг і струмів у місці несиметрії для деяких найпоширеніших випадків поперечної несиметрії.

Якщо опір між фазою та землею (рис. 2), то можна записати такі граничні умови:

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_A \underline{I}_A, \quad (2.12)$$

$$\underline{I}_B = 0, \quad (2.13)$$

$$\underline{I}_C = 0. \quad (2.14)$$

У разі, коли опір між фазою та землею дорівнює нулю, можна записати замість (2.12):

$$\underline{U}_A = 0. \quad (2.15)$$

Під час двофазного короткого замикання на землю фаз А та С (рис. 3), спостерігаються наступні умови

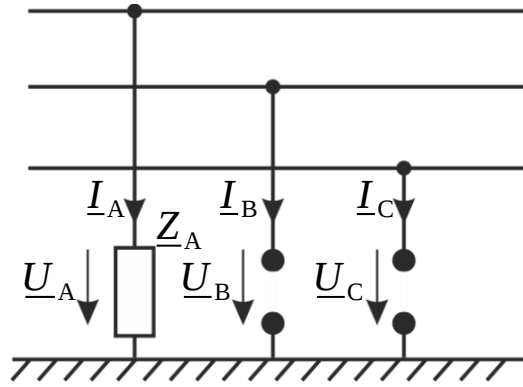


Рис. 2. Опір між однією фазою та землею

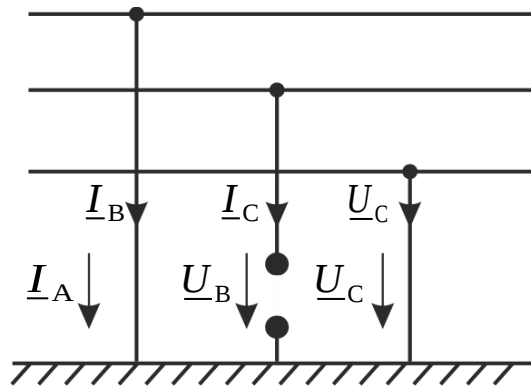


Рис. 3. Двофазне замикання на землю

$$\underline{U}_A = 0, \quad (2.16)$$

$$\underline{I}_B = 0, \quad (2.17)$$

$$\underline{U}_C = 0. \quad (2.18)$$

Фази А та В замкнуті та відносно землі мають один потенціал, фаза С зв'язку з землею не має (рис. 4), відповідно

$$\underline{U}_A = \underline{U}_B, \quad (2.19)$$

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_B, \quad (2.20)$$

$$\underline{I}_C = 0. \quad (2.21)$$

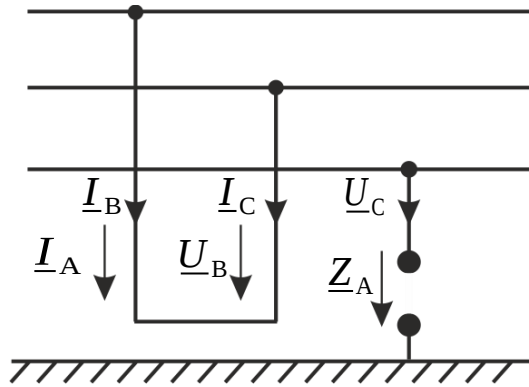


Рис. 4. Двофазне замикання

Рівняння для різних випадків поздовжньої несиметрії записуються для напруг і струмів фаз у місці несиметрії. Якщо у розрив фази включено опір, то напруга і струм на ньому пов'язані між собою за законом Ома. При обриві фази струм цієї фази дорівнюватиме нулю. При відсутності обриву дорівнює нулю напруга у місці несиметрії.

Враховуючи це, запишемо граничні умови для напруг і струмів у місці несиметрії для деяких випадків поздовжньої несиметрії.

У разі обриву фази, наприклад, А (рис. 5) маємо:

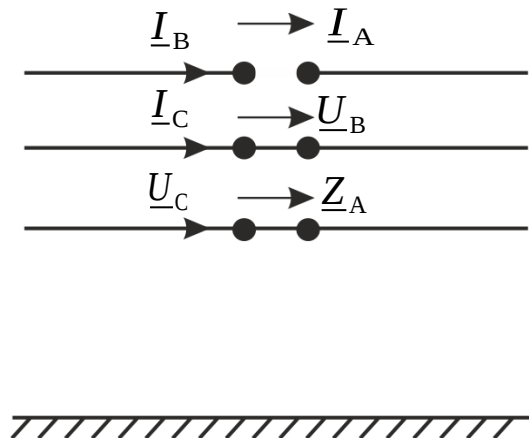


Рис. 5. Обрив однієї фази

$$\underline{I}_A = 0. \quad (2.22)$$

$$\underline{U}_B = 0, \quad (2.23)$$

$$\underline{U}_C = 0. \quad (2.24)$$

При роз'єднаній фази А та В (рис. 6) отримаємо:

$$\underline{I}_A = 0. \quad (2.25)$$

$$\underline{I}_B = 0, \quad (2.26)$$

$$\underline{U}_C = 0. \quad (2.27)$$

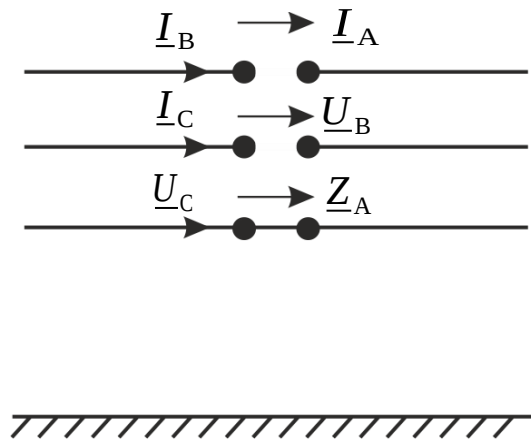


Рис. 6. Обрыв двух фаз

Для випадку, коли у фазі присутній зосереджений опір (рис. 7):

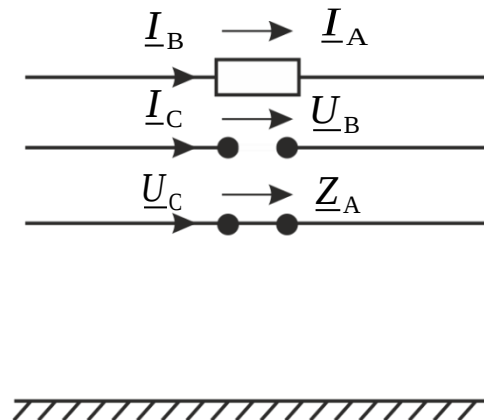


Рис. 7. Включення опору в розсічення фази

$$\underline{U}_A = \underline{Z}_A \underline{I}_A. \quad (2.28)$$

$$\underline{U}_B = 0, \quad (2.29)$$

$$\underline{U}_C = 0. \quad (2.30)$$

2.3. Розрахунок методом симетричних складових кола з несиметричною ділянкою

Розглянемо трифазне коло із симетричним генератором та навантаженням, з несиметричною ділянкою (наприклад, обрив чи коротке замикання).

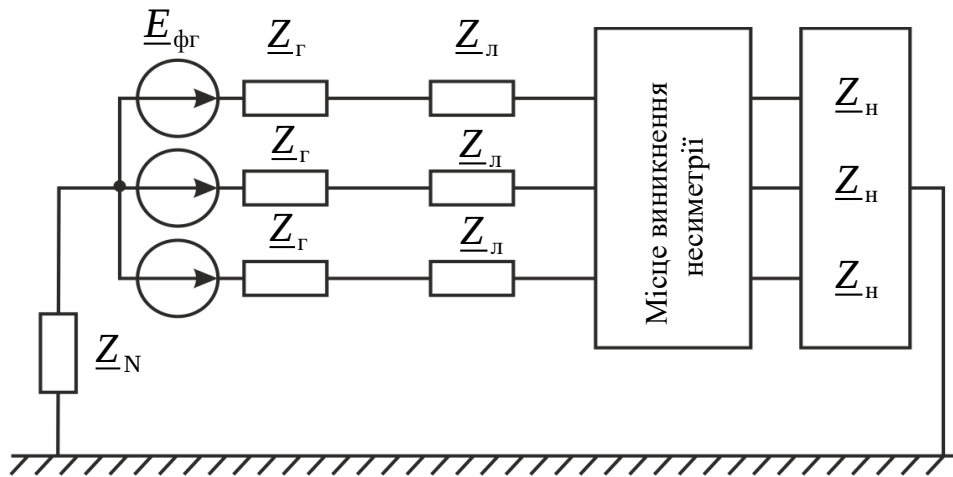


Рис. 8 Коло з несиметричною ділянкою

На рис. 8 $E_{\phi\Gamma}$ — фазне ЕРС генератора, Z_{Γ} , $Z_{\text{л}}$, $Z_{\text{н}}$, $Z_{\text{Н}}$ — опір генератора, лінії, навантаження, нульового проводу, відповідно.

Етапи розрахунку фазних струмів та напруг будуть однакові для будь-якого виду несиметрії.

- складають розрахункову схему, в якій несиметричну ділянку лінії за принципом компенсації замінюють еквівалентним джерелом з несиметричною системою напруг у місці несиметрії. При поперечній несиметрії це джерело включене між фазами і землею, при поздовжній несиметрії — у розсічення фаз;

- трифазні несиметричні системи напруг, струмів, ЕРС, діючі в ланцюзі, представляють як суму складових прямої, зворотної та нульової послідовності;

- задану трифазну схему замінюють трьома схемами для однієї фази, у кожній з яких представлені опори, струми, напруги та ЕРС відповідної послідовності;

- однофазні схеми заміщення перетворюють до найпростішого вигляду, складають рівняння за балансом напруги та ЕРС;

- записують граничні умови у місці несиметрії, виразивши напруги та струми в них через симетричні складові;

- вирішуючи систему рівнянь, розраховують симетричні складові струмів та напруг;

- після розрахунку симетричних складових визначають шукані струми та напруги.

При побудові схем заміщення слід враховувати:

- якщо навантаження з'єднане у трикутник, то його попередньо потрібно перетворити у зірку;

- якщо система ЕРС генератора симетрична, то фазна напруга генератора буде лише у схемі прямої послідовності;

- несиметричну систему напруг розкладають на симетричні складові та включають до схеми заміщення кожної послідовності;
- схеми прямої та зворотної послідовності не будуть містити опору нейтрального проводу;
- складання схеми заміщення нульової послідовності слід розпочинати від точки, де виникла несиметрія. Щоб вийшло замкнене коло для проходження струмів нульової послідовності, у схемі має бути хоча б одна заземлена нейтраль;
- опір нейтрального проводу у схемі нульової послідовності вводиться збільшеним утричі.

2.4. Розрахунок кола з поперечною несиметрією

Розглянемо трифазне коло з симетричним генератором і симетричним навантаженням (рис. 9), у якому відбулося коротке замикання фази А на землю.

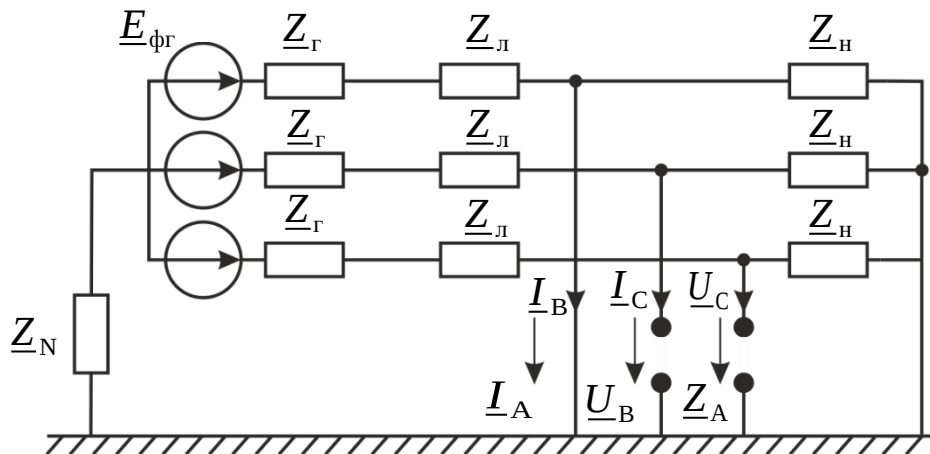


Рис. 9. Коротке замикання фази А на землю

Відомі ЕРС та фазні опори прямої, зворотної та нульової послідовності.

Потрібно методом симетричних складових розрахувати струми та напруги у місці короткого замикання.

Відповідно до алгоритму несиметричну ділянку замінимо еквівалентним джерелом з несиметричною системою напруг, які за методом симетричних складових представимо джерелами ЕРС відомих послідовностей, що розташовані між землею та відповідною фазою кола (рис. 10)

Далі за методом симетричних компонентів замість заданої схеми необхідно розрахувати три трьохфазні схеми: прямої, зворотної та нульової послідовностей. Але так як режими в кожній із цих схем будуть симетричні, розрахунок проводиться тільки для однієї фази. Зазвичай для розрахунку в якості основної фази вибирають фазу А, для скорочення запису індексу «А» в симетричних складових струму та напруги для цієї фази не ставлять.

Складемо три однофазні схеми заміщення, які і будемо використовувати для розрахунку (рис. 11 – 13).

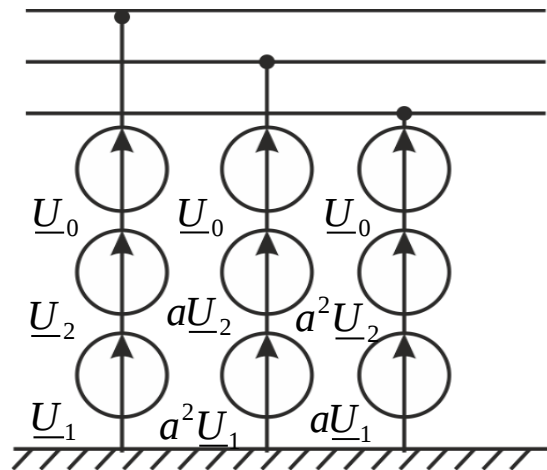


Рис. 10. Заміна несиметричної ділянки еквівалентним джерелом з несиметричною системою напруг (поперечна несиметрія)

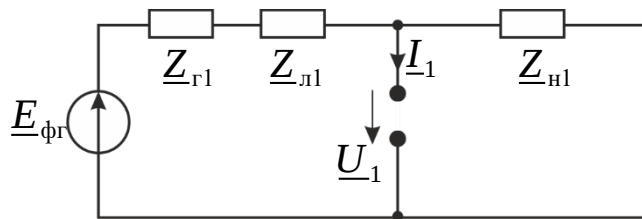


Рис. 11. Схема прямої послідовності

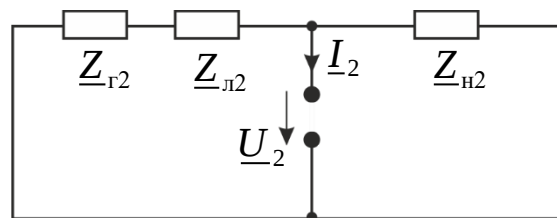


Рис. 12. Схема зворотної послідовності

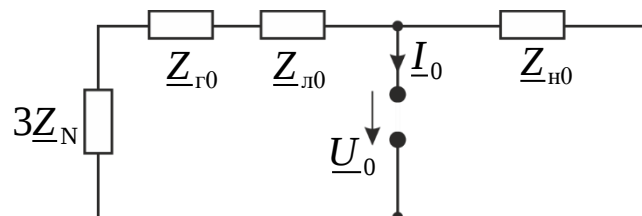


Рис. 13. Схема нульової послідовності

Далі слід зазначити, що в інших випадках схема нульової послідовності може істотно відрізнятися від схем прямої та зворотної. Під час складання схеми для нульової компоненти слід врахувати:

- якщо навантаження не має нульового проводу (схема трикутник або зірка без нульового проводу), то гілки із опором навантаження не буде;
- якщо розглядають міжфазне коротке замикання, то схеми для нульової послідовності не буде.

Після складання схем заміщення перетворюємо їх до одного контуру (рис. 14)

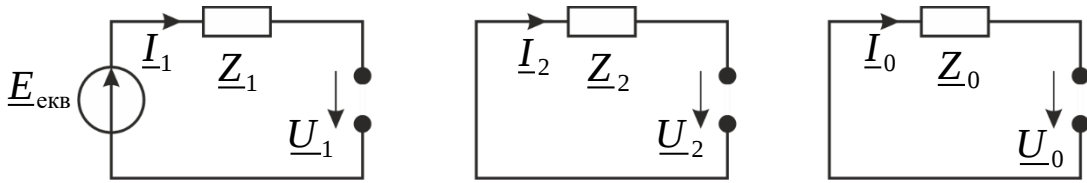


Рис. 14. Перетворені схеми заміщення послідовностей

Визначимо еквівалентну ЕРС $E_{\text{екв}}$ та еквівалентні опори Z_1, Z_2, Z_0 .

Для схеми прямої послідовності

$$E_{\text{екв}} = \frac{\frac{1}{Z_{r1} + Z_{л1}} E_{\text{фг}}}{\frac{1}{Z_{r1} + Z_{л1}} + \frac{1}{Z_{н1}}}, \quad (2.31)$$

$$Z_1 = \frac{(Z_{r1} + Z_{л1})Z_{н1}}{Z_{r1} + Z_{л1} + Z_{н1}}. \quad (2.32)$$

Для схеми зворотної послідовності

$$Z_2 = \frac{(Z_{r2} + Z_{л2})Z_{н2}}{Z_{r2} + Z_{л2} + Z_{н2}}. \quad (2.33)$$

Для схеми нульової послідовності

$$Z_0 = \frac{(Z_{r2} + Z_{л2} + 3Z_N)Z_{н2}}{Z_{r2} + Z_{л2} + 3Z_N + Z_{н2}}. \quad (2.34)$$

Складаємо систему рівнянь з трьох рівнянь за другим законом Кірхгофа та трьох рівнянь за граничними умовами для цього виду несиметрії ($U_A = 0$, $I_B = 0$, $I_C = 0$):

$$\left\{ \begin{array}{l} \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{U}_1 = E_{\text{екв}} \\ \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2 = 0 \\ \underline{Z}_0 \underline{I}_0 + \underline{U}_0 = 0 \\ \underline{U}_A = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_0 = 0 \\ \underline{I}_B = a^2 \underline{I}_1 + a \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \\ \underline{I}_C = a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2 + \underline{I}_0 = 0 \end{array} \right. \quad (2.35)$$

Далі визначаємо симетричні компоненти струмів та напруг, що можливо зробити будь-яким відомим способом. У цих методичних вказівках пропонується метод зворотної матриці, який підходить для будь-яких програмних середовищ комп'ютерної алгебри.

Відповідно, у матричній формі (2.35) можна записати як

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a & a^2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{\text{екв}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.36)$$

У останньому виразі невідомим є вектор вільних членів, виразимо його через зворотну матрицю коефіцієнтів

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ a & a^2 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} E_{\text{екв}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2.37)$$

Визначимо шукані струми та напруги у місці несиметрії через матрицю Фортеск'ю.

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \end{bmatrix}. \quad (2.38)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix}. \quad (2.39)$$

Перевіркою правильності розв'язання буде відповідність розв'язку (2.38) та (2.39) граничним умовам.

Для прикладу візьмемо наступні значення параметрів схеми $\underline{E}_{\text{фг}} = 120 \text{ В}$,
 $\underline{Z}_{\text{r1}} = 5 + j2 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{\text{r2}} = 3 + j3 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{\text{r0}} = 3 + j2 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{\text{л1}} = 3 + j2 \text{ Ом}$,
 $\underline{Z}_{\text{N1}} = 5 \text{ Ом}$.

Відповідно отримаємо за (2.31) – (2.39)

$$\underline{E}_{\text{екв}} = 60,223 + 18,29j \text{ В}$$

$$\underline{Z}_1 = 3,558 + 2,725j \text{ Ом} \quad \underline{Z}_2 = 2,412 + 1,353j \text{ Ом} \quad \underline{Z}_0 = 1,921 + 1,654j \text{ Ом}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6,098 - 2,112j \text{ А} \\ 6,098 - 2,112j \text{ А} \\ 6,098 - 2,112j \text{ А} \\ 32,774 + 9,187j \text{ В} \\ -17,564 - 3,157j \text{ В} \\ -15,21 - 6,03j \text{ В} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 18,294 - 6,335j \text{ А} \\ 0 \text{ А} \\ 0 \text{ А} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \text{ В} \\ -12,125 - 52,639j \text{ В} \\ -33,505 + 34,55j \text{ В} \end{bmatrix}.$$

Векторні діаграми для струмів та напруг у місці несиметрії (рис. 15 та 16)

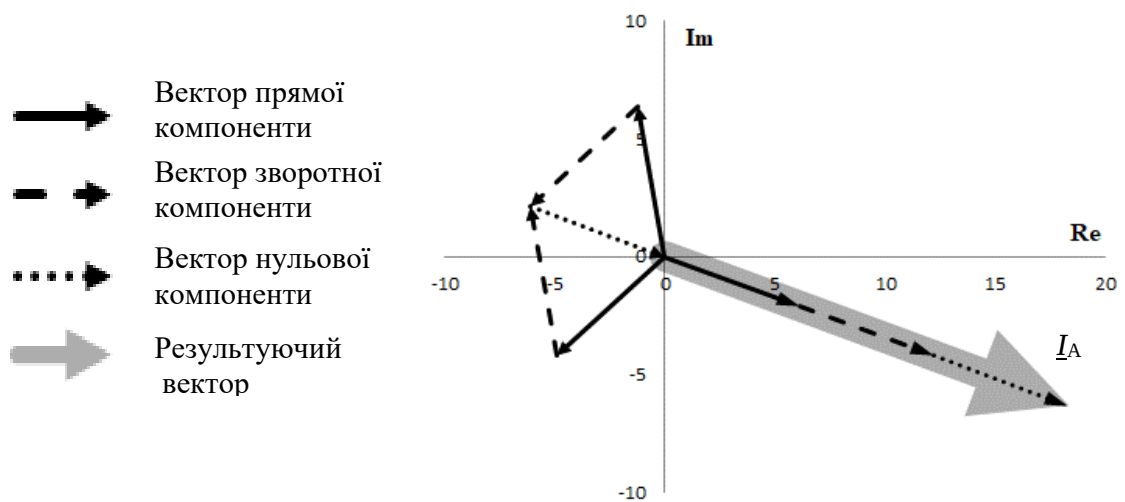


Рис. 15. Векторна діаграма струмів (к.з. фази А)

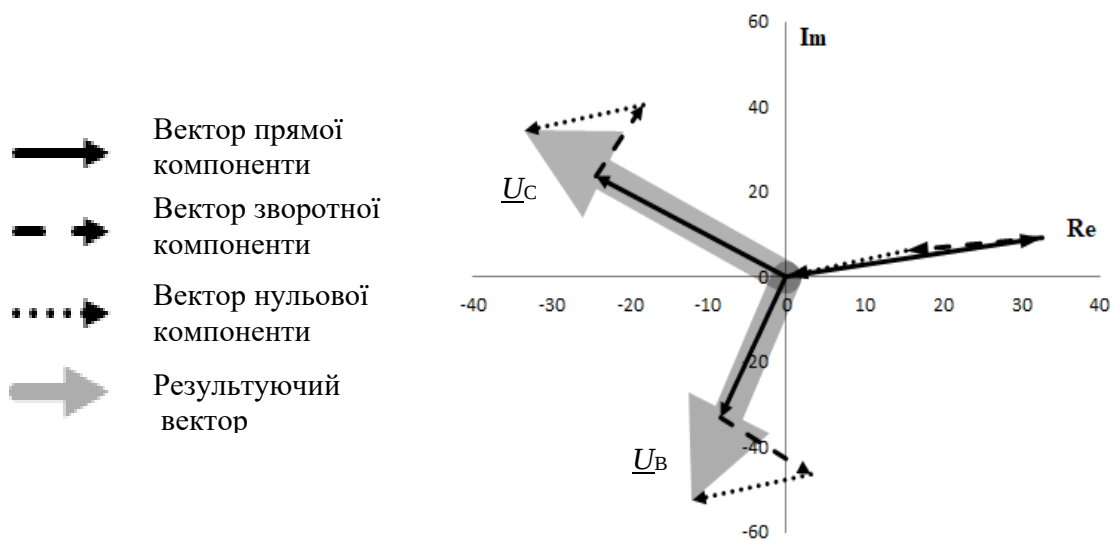


Рис. 16. Векторна діаграма напруги (к.з. фази А)

Запитання для самоперевірки

1. Як представити несиметричну систему струмів у вигляді трьох симетричних?
2. Як складаються розрахункові схеми різних послідовностей короткозамкненого ланцюга при несиметричних замиканнях?
3. Як визначаються результуючі опори послідовностей?

ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

У цьому розділі розглянемо приклад розрахунку для схеми з поздовжньою несиметрією.

У трифазному колі виник розрив у фазі В (рис. 17).

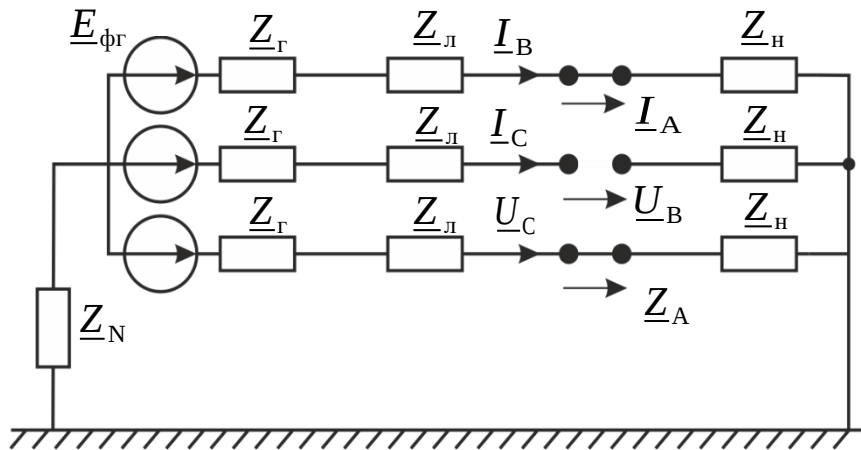


Рис. 17. Коло, що має повздовжню несиметрію

Вхідні дані:

$$\underline{E}_{\phi r} = 120 \text{ В.}$$

$$\underline{Z}_{\Gamma 1} = 5 + j2 \text{ Ом, } \underline{Z}_{\Gamma 2} = 3 + j3 \text{ Ом, } \underline{Z}_{\Gamma 0} = 3 + j2 \text{ Ом, } \underline{Z}_{\text{Л}1} = 3 + j \text{ Ом, } \underline{Z}_{\text{Л}2} = 3 + j \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}_{\text{N}1} = 5 \text{ Ом.}$$

Якщо при поперечній несиметрії джерело включалося між лінією та землею, то при поздовжній несиметрії еквівалентне джерело включають в розрив трифазної лінії (рис. 18).

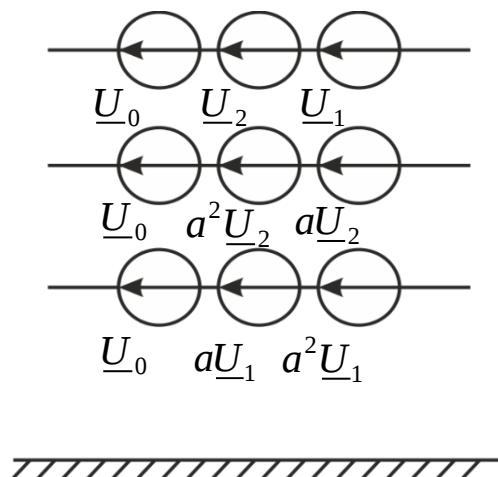


Рис. 18. Заміна несиметричної ділянки еквівалентним джерелом з несиметричною системою напруг (поздовжня несиметрія)

У схемах заміщення, складених для однієї фази, місце несиметрії знаходиться у лінії (рис. 19). В іншому схемі заміщення прямої, зворотної та нульової послідовності повторюють схеми для поперечної несиметрії. Якщо навантаження з'єднане трикутником, його попередньо перетворять у зірку (без нульового проводу).

Після складання послідовно з'єднаних опорів схеми набудуть того ж вигляду, що був і у разі поперечної несиметрії (див. рис. 14).

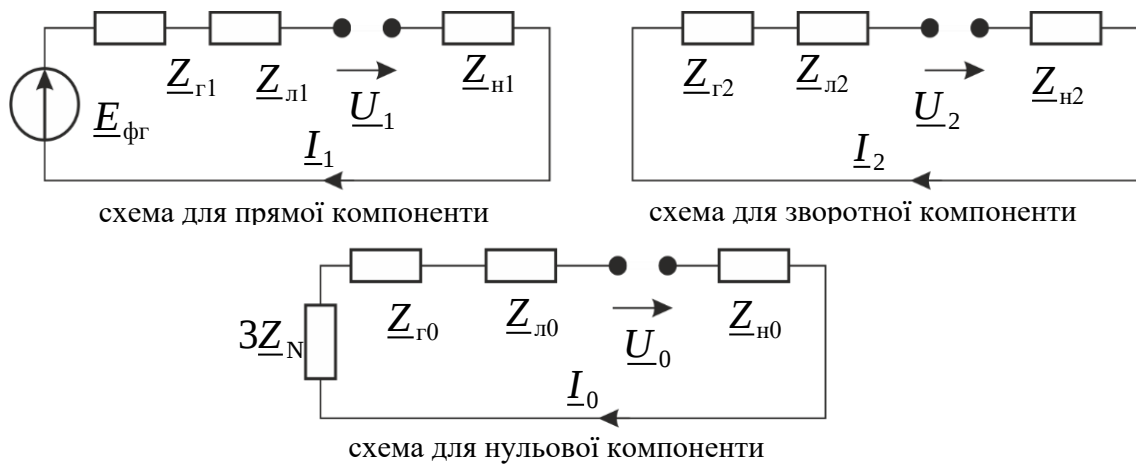


Рис. 19. Схеми зміщення для семеричних компонентів

$$\underline{E}_{\text{екв}} = \underline{E}_{\text{фг}} = 120 \text{ В}$$

$$\underline{Z}_1 = 3,558 + 2,725j \text{ Ом} \quad \underline{Z}_2 = 2,412 + 1,353j \text{ Ом} \quad \underline{Z}_0 = 1,921 + 1,654j \text{ Ом}$$

Граничні умови: $\underline{U}_{\text{А}} = 0$, $\underline{I}_{\text{В}} = 0$, $\underline{U}_{\text{С}} = 0$.

Складемо систему з шести рівнянь у матричній формі

$$\begin{bmatrix} \underline{Z}_1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_2 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{E}_{\text{екв}} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Знаходимо симетричні складові методом зворотної матриці та визначасмо шукані струми та напруги у місці несиметрії

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_0 \\ \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,163 - 2,752j \text{ A} \\ -0,557 - 3,28j \text{ A} \\ 1,346 + 1,071j \text{ A} \\ 38,36 - 5,851j \text{ B} \\ -14,133 + 36,146j \text{ B} \\ -24,247 - 30,295j \text{ B} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_A \\ \underline{I}_B \\ \underline{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4,952 - 4,961j \text{ A} \\ 0 \text{ A} \\ -0,915 + 8,175j \text{ A} \end{bmatrix},$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_A \\ \underline{U}_B \\ \underline{U}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \text{ B} \\ -72,74 - 90,885j \text{ B} \\ 0 \text{ B} \end{bmatrix}.$$

Побудуємо векторні діаграми для напруг та струму у місці несиметрії

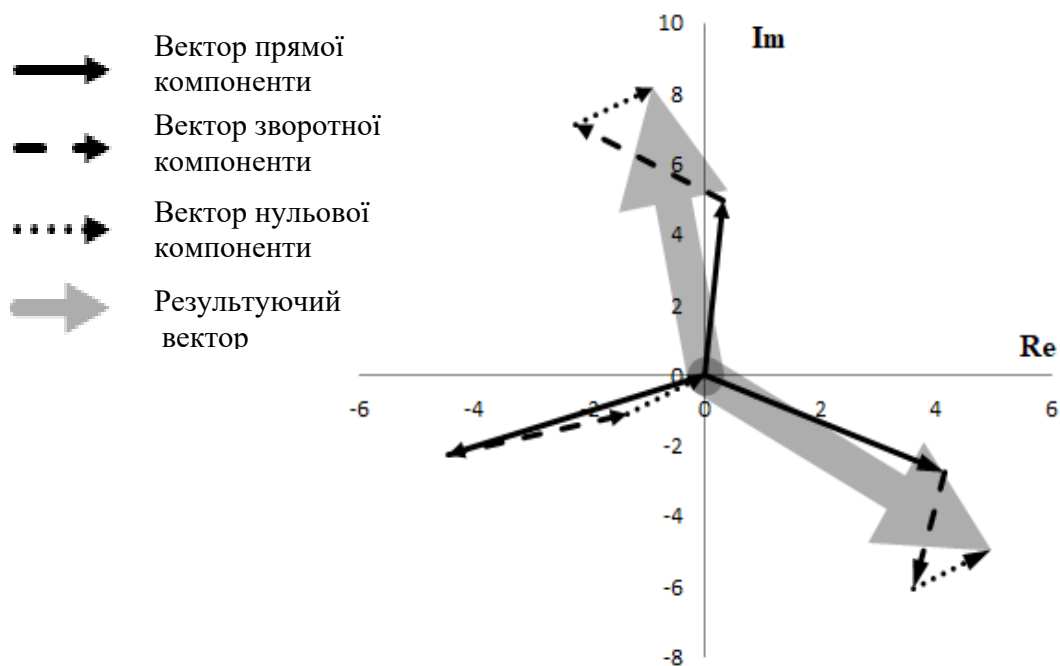


Рис. 20. Векторна діаграма струмів (розрив фази B)

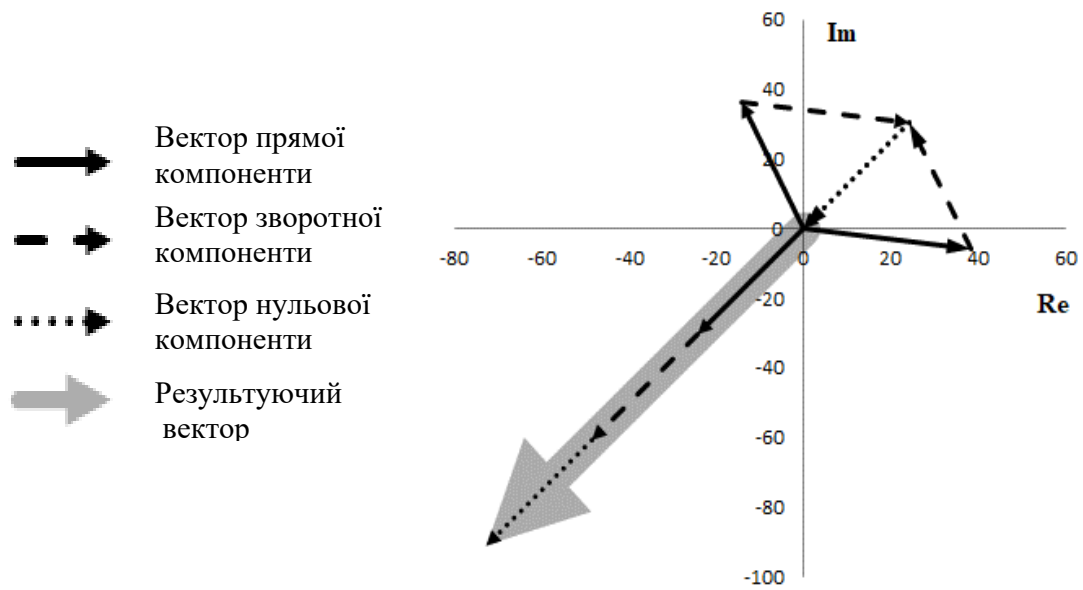


Рис. 21. Векторна діаграма напруги (розрив фази B)

Запитання для самоперевірки

1. Який вигляд будуть мати заступні схеми на рис. 19, якщо у навантаження відсутня нейтраль?
2. Які граничні умови необхідно використати, якщо розрив буде у фазі A?
3. Чому опір нульового проводу має потроєне значення?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Das J. C. Short-Circuits in AC and DC Systems: ANSI, IEEE, and IEC Standards : Handbook. Abingdon : CRC Press Taylor & Francis Group, 2017. vol. 1. 745 p.
2. Аввакумов В. Г., Терешкевич Л. Б., Лисенко Г. Л. Перехідні процеси в системах електропостачання: елементи теорії, програми, ілюстрації : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2015. 244 с.
3. Букович Н. В. Розрахунок струмів короткого замикання електроенергетичних систем : підручник. Львів : Вища шк., 1988. 248 с.
4. Гай О. В., Бодунов В. М. Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах : навч. посіб. Київ : ЦП «Компринт», 2020. 315 с.
5. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник / Черемісін М. М., Мороз О. М., Єгоров О. Б., Швець С. В. Харків : ТОВ «В справі», 2016. 260 с.
6. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник / Півняк Г. Г. та ін.; ред. Г. Г. Півняк. 5-те вид. Дніпро : НГУ, 2016. 599 с.
7. Das J. C. Transients in electrical systems: analysis, recognition, and mitigation. New York : City The McGraw-Hill Companies, Inc., 2010. 736 p.
8. Kasikci I. Short circuits in power systems: A practical guide to IEC 60909-0. 2nd ed. Weinheim : Wiley-VCH, 2018. 294 p.
9. Schlabbach J. Short-Circuit currents. London : IET, 2005. vol. 51. 336 p.

Навчально-методичне видання

Босий Дмитро Олексійович
Земський Денис Романович

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту

Редактор А. В. Безверхня
Комп'ютерна верстка В. В. Бердо

Формат 60x84 $\frac{1}{16}$. Ум. друк. арк. 1,51. Обл.-вид. арк. 0,55.
Зам № 62

Видавець: Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, м. Дніпро, 49010.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010