

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

до самостійної роботи

з навчальної дисципліни

**«ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВКАХ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ»**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності*

*141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2025

Методичні рекомендації до самостійної роботи з навчальної дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетичних установках з відновлюваними джерелами» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. Б. Єгоров, М. Л. Глєбова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. – 39 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глєбова

Рецензент

Я. Б. Форкун, кандидат технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 5 від 19.11.2024.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Модуль 1 Визначення параметрів режиму електричної системи у початковий момент трифазного короткого замикання.....	5
1.1 Мета та зміст самостійної роботи.....	5
1.2 Рівняння трифазного короткого замикання в електричній системі.....	5
1.3 Підготовка до розрахунку	7
1.4 Порядок виконання самостійної роботи	7
1.5 Методичні рекомендації до розрахунків.....	8
Контрольні запитання.....	12
2 Модуль 2 Визначення параметрів режиму електричної системи у початковий момент несиметричного короткого замикання.....	14
2.1 Мета та зміст самостійної роботи	14
2.2 Рівняння несиметричного короткого замикання в електричній системі.....	14
2.3 Завдання на підготовчу роботу.....	18
2.4 Порядок виконання самостійної роботи	18
2.5 Методичні рекомендації до розрахунків.....	19
Контрольні запитання.....	21
3 Модуль 3 Визначення фазних значень струму, напруги та потужності за відомими симетричними складовими.....	22
3.1 Мета та зміст самостійної роботи.....	22
3.2 Основні рівняння методу симетричних складових	22
3.3 Завдання на підготовчу роботу.....	24
3.4 Порядок виконання самостійної роботи.....	24
3.5 Методичні рекомендації до розрахунків.....	25
Контрольні запитання.....	26
Список рекомендованої літератури.....	27
ДОДАТКИ.....	28

ВСТУП

Безперервний розвиток енергетики, що іде шляхом створення потужних енергооб'єднань і на їх основі єдиної електроенергетичної системи країни, зумовлює необхідність вирішення ряду складних завдань, пов'язаних із підвищенням надійності, рівня стійкості, якості електричної енергії та інших техніко-економічних показників роботи електроенергетичних систем. Ці задачі в значній мірі зводяться до удосконалення способів боротьби з цілою низкою небажаних явищ, якими супроводжується протікання в електричних системах різних перехідних процесів. Вивчення фізичної суті перехідних процесів, методів їхнього аналізу і розрахунку, і частково способів керування цими процесами є основним завданням курсу «Перехідні процеси в електроенергетичних установках з відновлюваними джерелами». У цьому курсі вивчаються питання, що пов'язані переважно з протіканням струмів коротких замикань (надалі – к. з.) і методами їхнього розрахунку.

Цей курс має прикладний характер. У зв'язку з цим особливо важливо отримати чітке уявлення про інженерний підхід до розв'язання задачі розрахунку струмів к. з., вивчити основні методи їхнього розрахунку, запам'ятати числові значення найхарактерніших величин і найважливіших співвідношень.

МОДУЛЬ 1

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ У ПОЧАТКОВИЙ МОМЕНТ ТРИФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

1.1 Мета та зміст самостійної роботи

Метою самостійної роботи є вивчення математичної моделі та алгоритму розрахунку струмів трифазного короткого замикання у схемі електричної системи довільної конфігурації. У процесі виконання самостійної роботи визначаються початкове значення періодичної складової та ударний струм у місці пошкодження, а також залишкові напруги у вузлах та розподіл періодичної складової струму по гілках схеми. Під час виконання роботи параметри аварійного режиму проводяться двома способами: у системі іменованих одиниць й у системі відносних одиниць.

1.2 Рівняння трифазного короткого замикання в електричній системі

Для розрахунку струмів трифазного короткого замикання в схемі довільної конфігурації доцільно застосувати рівняння вузлових напруг і записати їх для вихідного та аварійного режимів електричної системи (принцип накладання двох режимів). Визначається розрахункова схема електричної системи. За розрахунковою схемою складається схема заміщення системи. Лінії та трансформатори є пасивними гілками з комплексними опорами, джерела живлення та навантаження споживачів – активними гілками з електрорушійними силами (ЕРС), включеними за комплексними опорами. У вихідній схемі заміщення системи активні гілки з опорами та ЕРС замінюються пасивними гілками з тими самими опорами та еквівалентними джерелами струму. Значення струму еквівалентного джерела визначається виразом

$$\dot{J}_i = \frac{\dot{E}_i}{Z_i}, \quad (1)$$

де \dot{E}_i – комплексна ЕРС гілки, підключеної до вузла i ; Z_i – комплексний опір гілки.

До появи короткого замикання режим системи можна описати рівняннями вузлових напруг.

$$\mathbf{U} = \mathbf{Z}_y \mathbf{J}, \quad (2)$$

де \mathbf{Z}_y – матриця вузлових опорів; \mathbf{J} – матриця вузлових (задавальних) струмів; \mathbf{U} – матриця напруги вузлів у вихідному режимі системи.

Матриця вузлових опорів може бути знайдена зверненням матриці вузлових провідностей, що складається за схемою заміщення системи.

Для вузлів підключення ЕРС J_i дорівнює струму еквівалентного джерела, інших вузлів схеми – дорівнює нулю.

У разі виникнення трифазного короткого замикання у вузлі k схеми системи напруга у цьому вузлі $\dot{U}_k = 0$. У вузлі k з'являється додатковий вузловий струм із напрямом від вузла i рівний струму на місці пошкодження I_k . Режим системи при трифазному короткому замиканні у вузлі k схеми за аналогією з (2) можна описати системою лінійних рівнянь алгебри:

$$\mathbf{U}_{\text{ост}} = \mathbf{U} - \mathbf{Z}_{ik} I_k, \quad (3)$$

де $\mathbf{U}_{\text{ост}}$ – матриця залишкових напруг у вузлах; Z_{ik} – взаємний опір i -го і k -го вузлів; $i = 1, 2, \dots, n$; n – кількість незалежних вузлів.

Оскільки у вузлі k залишкова напруга дорівнює нулю, то з останнього виразу випливає, що

$$\dot{I}_k = \frac{\dot{U}_k}{Z_{kk}}, \quad (4)$$

де \dot{U}_k – напруга у вузлі k у вихідному доаварійному режимі; Z_{kk} – власний опір k -го вузла.

Знаючи залишкові напруги у вузлах схеми, знаходять струми у гілках у режимі короткого замикання:

– струми у пасивних гілках

$$\dot{I}_{ij} = (\dot{U}_i - \dot{U}_j)Y_{ij}, \quad (5)$$

де Y_{ij} – провідність гілки, включеної між вузлами i та j ;

– струм, що створюється джерелом

$$I_{0i} = (\dot{E}_i - \dot{U}_i)Y_{0i}, \quad (6)$$

де Y_{0i} – провідність активної гілки, включеної між вузлами 0 та i .

Цей підхід реалізовано у навчальній програмі розрахунку трифазних струмів короткого замикання (програма tk 3).

1.3 Підготовка до розрахунку

1. Для заданого варіанта схеми електричної системи скласти її схему заміщення.
2. Підготувати каталожні дані елементів системи для визначення параметрів схеми заміщення.
3. Ознайомитися з розрахунковими виразами визначення параметрів схем заміщення в іменованих і відносних одиницях.
4. Відповісти на контрольні запитання, що містяться в описі роботи.

1.4 Порядок виконання самостійної роботи

Визначити параметри схеми заміщення для заданого варіанта електричної системи у відносних та іменованих одиницях.

Отримати файл вихідних даних для розрахунку трифазних струмів короткого замикання, використовуючи програму vtk.

Виконати розрахунок режиму трифазного короткого замикання, використовуючи програму tk 3 спочатку у відносних, а потім в іменованих одиницях.

Вивести на друк таблиці результатів розрахунку та вихідних даних.

Зобразити на діаграмі вектори струмів та залишкової напруги для одного з режимів короткого замикання.

Визначити значення дійсних струмів і залишкових напруг, порівняти їхні значення, отримані при розрахунках у відносних та іменованих одиницях.

Дослідити вплив активних опорів елементів схеми заміщення параметри режиму короткого замикання.

Дати аналіз одержаних результатів.

1.5 Методичні рекомендації до розрахунків

Приклад варіанта схеми електричної системи подано у додатку А.

У схемі заміщення електричної системи мають бути представлені всі елементи розрахункової схеми. Генератори, синхронні компенсатори, електродвигуни та узагальнені навантаження вузлів повинні бути введені у схему заміщення надперехідними ЕРС та надперехідними комплексними опорами. Всі інші елементи вихідної розрахункової схеми мають бути представлені у схемі заміщення комплексними опорами прямої послідовності. Триобмотувальні трансформатори, автотрансформатори та трансформатори з розщепленою обмоткою нижчої напруги, а також здвоєні реактори повинні бути представлені своїми схемами заміщення. Ці схеми, а також розрахункові вирази для визначення їхніх параметрів наведені в додатку Б. Втрати потужності сталі трансформаторів і зарядні потужності ліній номінальною напругою до 220 кВ не враховують. Допустимо прийняти, що до короткого замикання генератор працював у номінальному режимі. Отже, значення струму та напруги генератора у відносних одиницях дорівнюють одиниці.

Опір гілок і електрорушійні сили приводяться до одного ступеня напруги, прийнятої за основну, або виражаються у відносних одиницях.

При визначенні параметрів елементів схеми заміщення в іменованих одиницях наведені значення ЕРС джерел енергії та опору різних елементів схеми необхідно визначати за формулами:

$$\overset{\circ}{E} = E n_1 n_2 \dots n_m, \quad (7)$$

$$\overset{\circ}{Z} = Z n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2, \quad (8)$$

де E і Z – справжні значення ЕРС джерела енергії та опору будь-якого елемента вихідної розрахункової схеми; $\overset{\circ}{E}$ та $\overset{\circ}{Z}$ – їхні наведені значення; n_1, n_2, \dots, n_m – коефіцієнти трансформації трансформаторів або автотрансформаторів, включених каскадно між ступенем напруги мережі, де знаходяться елементи які підлягають приведенню ЕРС.

Якщо ЕРС джерела енергії та опір будь-якого елемента розрахункової схеми виражено у відносних одиницях при номінальних умовах (тобто ЕРС при номінальній напрузі $U_{НОМ}$, а опір при номінальній напрузі та номінальній потужності $S_{НОМ}$), то значення відповідної ЕРС та опору, наведені до основного ступеня напруги мережі потрібно визначати за формулами:

$$\overset{\circ}{E} = \underset{*}{E}_{(H)} U_{НОМ} n_1 n_2 \dots n_m, \quad (9)$$

$$\overset{\circ}{Z} = \underset{*}{Z}_{(H)} \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}} n_1^2 n_2^2 \dots n_m^2, \quad (10)$$

де $\underset{*}{E}_{(H)}$ і $\underset{*}{Z}_{(H)}$ – значення ЕРС та опору елемента розрахункової схеми у

відносних одиницях за номінальних умов.

Тут і далі під коефіцієнтом трансформації трансформатора (автотрансформатора) розуміється відношення напруги холостого ходу та його обмотки, зверненої у бік обраного основного ступеня напруги мережі, до напруги холостого ходу іншої обмотки.

Формули додатка Б справедливі для розрахунку параметрів елементів, розташованих на основному ступені напруги. Якщо елементи знаходяться не на основному ступені напруги, то при використанні формул додатка Б варто враховувати коефіцієнти трансформації трансформаторів відповідно до співвідношення (7)–(10).

При визначенні параметрів елементів схеми заміщення у відносних одиницях із приведенням параметрів різних елементів вихідної розрахункової схеми до базисних умов необхідно:

1) задатися базисною потужністю S_B і для одного з ступенів напруги розрахункової схеми, що приймається за основну, вибрати базисну напругу $U_{B.ОСН}$;

2) визначити базисну напругу інших ступенів напруги розрахункової схеми, використовуючи формулу

$$U_{Bi} = U_{B.ОСН} \frac{1}{n_1 n_2 \dots n_m}, \quad (11)$$

де $n_1 n_2 \dots n_m$ – коефіцієнти трансформації трансформаторів і автотрансформаторів, включених каскадно між основною і i -ю ступенями напруги;

3) знайти потрібне значення ЕРС джерел енергії та опорів всіх елементів схеми заміщення у відносних одиницях за вибраних базисних умов, використовуючи формули

$$E_{* (B)} = \frac{E}{U_{Bi}} \quad (12)$$

або

$$E_{* (A)} = E_{* (I)} \frac{U_{\hat{I}i}}{U_{Ai}}; \quad (13)$$

$$Z_{* (B)} = Z \frac{S_B}{U_{Bi}^2} \quad (14)$$

або

$$Z_* (B) = Z_* (H) \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМi}}{U_{Bi}} \right)^2, \quad (15)$$

де U_{Bi} – базисна напруга того ступеня напруги вихідної розрахункової схеми, на якій знаходиться елемент, що підлягає приведенню.

Формули (12) і (14) варто використовувати в тих випадках, коли значення ЕРС джерела енергії та опір задані в іменованих одиницях, а формули (13) і (15) – коли значення цих величин задані у відносних одиницях за номінальних умов.

Вузли схеми заміщення системи позначаються номерами $i = 1, 2, \dots, n$ (включаючи номери середніх точок схем заміщення триобмотувального трансформатора, автотрансформатора або здвоєного реактора). Вузлу нульового потенціалу надається номер 0. Схема заміщення електричної системи, розрахункова схема якої подана на рисунку А.1, наведена на рисунку А.2 (див. дод. А).

Програма формування файлу даних викликається командою `vtk`. Для роботи програми необхідно ввести таку інформацію про електричну систему: ознака варіанта розрахунку; кількість незалежних вузлів і кількість гілок схеми заміщення; номери вузлів початку та кінця кожної гілки, дійсну та уявну частини її комплексного опору та комплексної електрорушійної сили (якщо у гілки відсутня ЕРС, то її речова та уявна частини приймаються рівними нулю); номери вузлів, де розглядається коротке замикання. Після виконання програми дані розміщуються у файл `dtk 3`.

Програма розрахунку струмів трифазного короткого замикання викликається командою `tk 3`. Після виконання програми дані розміщуються у файл `rtk 3`, який після перевірки може бути виведений на друк.

Порівняльний аналіз розрахунків струмів короткого замикання та залишкових напруг у відносних та іменованих одиницях виконати, відповідно, за формою таблиці 1 та таблиці 2.

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз розрахунків струмів короткого замикання

Елемент схеми	Познач.	Результати розрахунку				Розбіжність результатів, %
		у системі відносних одиниць		у системі іменованих одиниць		
		Струм, від. од.	Справжній струм, ка	Наведений струм, ка	Справжній струм, ка	
Генератор	G1					
Трансформатор	T1					
Трансформатор	T3					
обмотка ВН	-					
обмотка СН	-					
обмотка ПН	-					
Лінія	W1					
Реактор	LR					
Навантаження	H1					
...	K1					
Місце КЗ						

Таблиця 2 – Порівняльний аналіз розрахунків залишкової напруги

Номер вузла	Результати розрахунку				Розбіжність результатів, %
	у системі відносних одиниць		у системі іменованих одиниць		
	Напруга, від. од.	Дійсна напруга, кВ	Наведена напруга, кВ	Дійсна напруга, кВ	
1					
2					
...					
N					

Контрольні запитання

1. Як вибираються базові умови для різних ступенів напруги електричної системи?
2. Яким виразом визначається періодична складова початкового струму короткого замикання у місці ушкодження?
3. Як вводяться у схему заміщення електричної системи джерела енергії, електродвигуни та узагальнені навантаження?

4. Як видаються у схемі заміщення електричної системи лінії електропередачі, трансформатори та реактори?

5. У яких системах одиниць можуть визначатись параметри схеми заміщення електричної системи?

6. Як визначається коефіцієнт трансформації трансформатора щодо базисних напруг і приведення ЕРС і опорів до основного ступеня?

МОДУЛЬ 2

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЖИМУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СИСТЕМИ У ПОЧАТКОВИЙ МОМЕНТ НЕСИМЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

2.1 Мета та зміст самостійної роботи

Метою самостійної роботи є вивчення математичних моделей та алгоритмів розрахунку струмів несиметричних коротких замикань у схемі електричної системи довільної конфігурації. У процесі виконання самостійної роботи визначаються початкові значення симетричних складових струму та напруги в місці пошкодження та їхні фазні значення, а також симетричні складові залишкових напруг у вузлах та розподіл симетричних складових струму по гілках схеми. Під час виконання роботи параметри аварійного режиму проводяться у системі іменованих чи системі відносних одиниць.

2.2 Рівняння несиметричного короткого замикання в електричній системі

Для досліджень режимів коротких несиметричних замикань застосовують метод симетричних складових, ідея якого полягає в тому, що будь-який несиметричний режим лінійної системи може бути отриманий накладенням симетричних складових режимів прямої, зворотної і нульової послідовностей. Розрахунки несиметричних режимів можна проводити при завданні у вузлах, де включені джерела комплексних ЕРС прямої послідовності, що визначаються з попереднього нормального симетричного режиму. Параметри несиметричного режиму знаходяться спільним рішенням рівнянь вузлових напруг, що складаються для схем прямої, зворотної та нульової послідовностей. Ці рівняння пов'язані в єдину систему співвідношеннями між струмами та напругами різних послідовностей, які визначаються рівняннями граничних умов у місці ушкодження при конкретному вигляді несиметричного короткого замикання.

Рівняння граничних умов у місці пошкодження мають вигляд:

– при двофазному короткому замиканні фаз і С

$$\dot{I}_A = 0; \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0; \dot{U}_B = \dot{U}_C; \quad (1)$$

– при двофазному короткому замиканні на землю фаз і С

$$\dot{I}_A = 0; \dot{U}_B = 0; \dot{U}_C = 0; \quad (2)$$

– при однофазному короткому замиканні фази А

$$\dot{I}_A = 0; \dot{I}_B = 0; \dot{I}_C = 0; \dot{U}_A = 0, \quad (3)$$

де $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ – фазні струми у місці ушкодження; $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ – фазні напруги в місці пошкодження.

Відповідно до методу симетричних складових

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}, \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_{1A} + a \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}, \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_{1A} + a^2 \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}, \\ \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_{1A} + a \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}, \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_{1A} + a^2 \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де $\dot{I}_{1A}, \dot{I}_{2A}, \dot{I}_{0A}$ – симетричні складові струму фази А у місці ушкодження;

$\dot{U}_{1A}, \dot{U}_{2A}, \dot{U}_{0A}$ – симетричні складові напруги фази А у місці ушкодження;

$a = e^{j120}$ – оператор повороту.

В аварійному режимі кожна з послідовностей описується самостійною системою рівнянь вузлових напруг, розв'язання яких щодо симетричних складових напруг у вузлах має вигляд:

$$\dot{U}_1 = \dot{U} - Z_1 J_1; \quad (6)$$

$$\dot{U}_2 = -Z_2 J_2; \quad (7)$$

$$\dot{U}_0 = -Z_0 J_0, \quad (8)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ – матриці напруг у вузлах прямої, зворотної та нульової послідовностей; Z_1, Z_2, Z_0 – матриці вузлових опорів, що визначаються за схемами заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей; J_1, J_2, J_0 – матриці вузлових (задавальних) струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей.

Матриці вузлових опорів Z_1, Z_2, Z_0 розраховуються шляхом обігу матриць вузлових провідностей.

У матрицях J_1, J_2, J_0 не рівні нулю струми вузла, в якому відбулося коротке замикання. Через цей вузол здійснюється зв'язок між схемами прямої, зворотної та нульової послідовностей.

При короткому замиканні у вузлі k напруга у цьому вузлі у схемі кожної з послідовностей знаходять із рівнянь (6), (7) та (8):

$$\dot{U}_{1k} = \dot{U}_k - Z_{1kk} \dot{I}_{1k}; \quad (9)$$

$$\dot{U}_{2k} = -Z_{2kk} \dot{I}_{2k}; \quad (10)$$

$$\dot{U}_{0k} = -Z_{0kk} \dot{I}_{0k}, \quad (11)$$

де \dot{U}_k – напруга у вузлі k у вихідному до аварійного режимі; $Z_{1kk}, Z_{2kk}, Z_{0kk}$ – власні опори вузла k прямої, зворотної та нульової послідовностей; $\dot{I}_{1k}, \dot{I}_{2k}, \dot{I}_{0k}$ – симетричні складові струму в місці пошкодження.

Спільне рішення рівнянь (1), (2) або (3) з рівняннями (4), (5), (9), (10) та (11) дає формули для визначення симетричних складових струму в місці пошкодження:

– при двофазному короткому замиканні фаз В та С

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1k} &= \frac{\dot{U}_k}{Z_{1kk} + Z_{2kk}}; \\ \dot{I}_{2k} &= -\dot{I}_{1k}; \\ \dot{I}_{0k} &= 0; \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

– при двофазному короткому замиканні на землю фаз В та С

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1k} &= \frac{\dot{U}_k}{Z_{1kk} + Z_{2kk}Z_{0kk}/(Z_{2kk} + Z_{0kk})}; \\ \dot{I}_{2k} &= -\frac{Z_{0kk}}{Z_{2kk} + Z_{0kk}}\dot{I}_{1k}; \\ \dot{I}_{0k} &= -\frac{Z_{2kk}}{Z_{2kk} + Z_{0kk}}\dot{I}_{1k}; \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

– при однофазному короткому замиканні фази А

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{1k} &= \frac{\dot{U}_k}{Z_{1kk} + Z_{2kk} + Z_{0kk}}; \\ \dot{I}_{2k} &= \dot{I}_{1k}; \\ \dot{I}_{0k} &= \dot{I}_{1k}. \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Фазні значення струму та напруги в місці пошкодження за відомими симетричними складовими знаходять за рівняннями (2), (3). Симетричні складові залишкових напруг вузлів схеми при короткому замиканні у вузлі k визначаються за рівняннями (6), (7) та (8).

Розрахунок струмів гілок кожної з послідовностей виконується по залишковим напруженням та опорам гілок цієї послідовності відповідно до закону Ома.

Фазні значення струмів у гілках та залишкові напруги у вузлах при короткому замиканні у вузлі k знаходять за виразами, аналогічними (2) і (3).

Цей підхід реалізовано у навчальних програмах розрахунку струмів несиметричних коротких замикань у схемі електричної системи (програми tk 1, tk 2 та tk 21).

2.3 Завдання на підготовчу роботу

1. Для заданого варіанта розрахункової схеми електричної системи скласти її схемі заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей.
2. Підготувати каталожні дані елементів системи для визначення параметрів схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей.
3. Ознайомитися з розрахунковими виразами визначення параметрів схем заміщення в іменованих і відносних одиницях.
4. Відповісти на контрольні питання, що містяться в описі роботи.

2.4 Порядок виконання самостійної роботи

Визначити параметри схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей для заданого варіанта електричної системи у відносних чи іменованих одиницях.

Отримати файли вихідних даних для розрахунку струмів двофазного, однофазного та двофазного на землю коротких замикань за допомогою програми vtk.

Виконати розрахунок режимів двофазного, однофазного та двофазного на землю коротких замикань у вузлі k у відносних або іменованих одиницях, використовуючи відповідно програми tk 2, tk 1, tk 21.

Вивести на друк таблиці результатів розрахунку.

Зобразити на діаграмі вектори симетричних складових струмів та напруг.

Визначити фазні значення струмів та залишкових напруг шляхом графічного складання векторів симетричних складових.

Порівняти фазні значення струмів та залишкових напруг, отриманих розрахунковим та графічним шляхом.

Визначити значення дійсних струмів та залишкових напруг фаз.

Дати аналіз одержаних результатів.

2.5 Методичні рекомендації до розрахунку

Розрахунок будь-якого несиметричного режиму починають із складання схем заміщення всіх трьох послідовностей. Схема прямої послідовності містить електрорушійні сили генераторів, синхронних компенсаторів, електродвигунів та узагальнених навантажень вузлів. Струми прямої послідовності протікають під дією цих ЕРС та напруги прямої послідовності, прикладеного в місці пошкодження. Для розрахунку двофазного короткого замикання, крім схеми заміщення прямої послідовності, необхідно скласти схему заміщення зворотної послідовності, а для розрахунку однофазного та двофазного короткого замикання на землю – також схему заміщення нульової послідовності.

Схема заміщення зворотної послідовності конфігурації аналогічна схемою заміщення, тобто у ній мають бути представлені всі елементи розрахункової схеми (схеми прямої послідовності). При цьому електричні машини з ротором, що обертається, узагальнені навантаження і енергосистема повинні бути враховані відповідними опорами зворотної послідовності, а їхні ЕРС прийняті рівними нулю. Індуктивний опір зворотної послідовності синхронних та асинхронних двигунів допустимо приймати чисельно рівними їхнім опорам короткого замикання. Опір зворотної послідовності узагальненого навантаження у відносних одиницях, віднесений до повної потужності та середньої номінальної напруги того ступеня напруги мережі, де це навантаження приєднано, потрібно приймати рівним:

– щодо вузлів мережі 6 ... 10 кВ $Z_2 = 0,18 + j 0,24$;

– щодо вузлів 35 кВ та вище $Z_2 = 0,19 + j 0,36$.

Повний опір зворотної послідовності узагальненого навантаження зазвичай замінюють еквівалентною реактивністю, значення якої у відносних одиницях бувають такими:

– щодо вузлів мережі 6 ... 10 кВ $X_2 = 0,35$;

– щодо вузлів 35 кВ та вище $Z_2 = 0,45$.

Опір зворотної послідовності трансформаторів, ліній і реакторів приймають рівними їхнім опорам прямої послідовності.

Схема заміщення нульової послідовності відповідає шляхам протікання струмів нульової послідовності і також не містить ЕРС. Її конфігурація визначається положенням розрахункової точки короткого замикання і схемами з'єднання обмоток трансформаторів і автотрансформаторів вихідної розрахункової схеми. Для циркуляції струмів нульової послідовності на цьому ступені напруги має бути не менше двох з'єднань із землею.

Для складання схеми заміщення нульової послідовності попередньо варто виявити можливі шляхи циркуляції струмів нульової послідовності на кожному ступені напруги, починаючи з точки короткого замикання.

Опір нульової послідовності системи та трансформаторів, що мають хоча б одну обмотку, з'єднану в трикутник, допустимо приймати рівними опорам прямої послідовності. Індуктивний опір нульової послідовності одноланцюгових ліній приблизно можна прийняти $X_{0W} = kX_{1W}$, активний опір ліній $R_{0W} = R_{1W} + 0,15 \text{ Ом}$. Тут X_{1W} – індуктивний опір нульової послідовності одноланцюгових ліній прямої послідовності лінії; R_{1W} – активний опір прямої послідовності дроту лінії; k – коефіцієнт, що залежить від наявності заземлювального троса та його матеріалу [4].

Після виконання розрахунків необхідно схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей зобразити графічно. Приклади схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей для варіанта розрахункової схеми додатка В (див. рис. В.1).

Порівняльний аналіз струмів короткого замикання та залишкових напруг, отриманих розрахунковим та графічним шляхом у несиметричному режимі, виконати за формою таблиці 3.

Таблиця 3 – Порівняльний аналіз струмів короткого замикання та залишкової напруги

Параметр фази	Наведене значення параметра, отримане розрахунком	Наведене значення параметра, отримане графічно	Розбіжність результатів, %
I_A, A			
I_B, A			
I_C, A			
$U_A, кВ$			
$U_B, кВ$			
$U_C, кВ$			

Контрольні запитання

1. У чому ідея основних положень методу симетричних складових?
2. Навіщо зводиться розрахунок несиметричних режимів за методом симетричних складових?
3. Як складаються схеми заміщення різних послідовностей за розрахунковою схемою електричної системи за несиметричних коротких замикань?
4. Які особливості складання схеми заміщення нульової послідовності електричної системи?

МОДУЛЬ 3

ВИЗНАЧЕННЯ ФАЗНИХ ЗНАЧЕНЬ СТРУМУ, НАПРУГИ ТА ПОТУЖНОСТІ ЗА ВІДОМИМИ СИМЕТРИЧНИМИ СКЛАДОВИМИ

3.1 Мета та зміст самостійної роботи

Метою самостійної роботи є вивчення методики визначення фазних значень струму, напруги та потужності у схемі заміщення електричної системи довільної конфігурації за відомими симетричними складовими струму та напруги, а також методики побудови векторних діаграм за допомогою ЕОМ.

3.2 Основні рівняння методу симетричних складових

Відповідно до методу симетричних складових для будь-якої гілки схеми заміщення електричної системи можна записати:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{1A} + \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \\ \dot{I}_B &= a^2 \dot{I}_{1A} + a \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}; \\ \dot{I}_C &= a \dot{I}_{1A} + a^2 \dot{I}_{2A} + \dot{I}_{0A}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для будь-якого вузла схеми можна записати такі співвідношення:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= \dot{U}_{1A} + \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}; \\ \dot{U}_B &= a^2 \dot{U}_{1A} + a \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}; \\ \dot{U}_C &= a \dot{U}_{1A} + a^2 \dot{U}_{2A} + \dot{U}_{0A}. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Тут позначення змінних відповідають прийнятим у самостійній роботі № 2.

При визначенні фазних величин за трансформаторами потрібно мати на увазі, що струми і напруги при переході через трансформатор змінюються не тільки за величиною, а й за фазою залежно від з'єднання його обмоток. При переході з боку зірки на бік трикутника трансформатора, обмотки якого з'єднані по групі $Y / \Delta -11$, вектори прямої послідовності повертаються на кут $N \times 30$ за годинниковою стрілкою, а вектори зворотної послідовності – на такий же кут проти годинникової стрілки. Тут N – номер групи. Наприклад, для лінійного струму \dot{I}_A отримаємо

$$\dot{I}_A = (\dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ})k, \quad (3)$$

де k – коефіцієнт трансформації трансформатора.

У формулі (3) відсутній струм нульової послідовності, оскільки цей струм не виходить за межі обмотки, з'єднаної в трикутник.

Знаючи розподіл фазних струмів по гілках схеми та напруги у кожному вузлі схеми, можна визначити фазні значення повної потужності

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_A &= \dot{U}_A^* I_A; \\ \dot{S}_B &= \dot{U}_B^* I_B; \\ \dot{S}_C &= \dot{U}_C^* I_C, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де I_A^* , I_B^* , I_C^* – сполучені комплекси струмів фаз A , B і C .

При відомих симетричних складових струму та напруги симетричні складові фазних значень потужності можуть бути визначені за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \dot{S}_{1A} &= 3\dot{U}_{1A}^* I_{1A}; \\ \dot{S}_{2A} &= 3\dot{U}_{2A}^* I_{2A}; \\ \dot{S}_{0A} &= 3\dot{U}_{0A}^* I_{0A}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де \dot{S}_{1A} , \dot{S}_{2A} , \dot{S}_{0A} , – потужності прямої, зворотної та нульової послідовностей фази А ; I_{1A}^* , I_{2A}^* , I_{0A}^* , – пов’язані комплекси струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей фази А.

У виразах (4), (5) речовинна частина комплексів повної потужності є активною потужністю, а уявна частина – реактивною потужністю.

3.3 Завдання на підготовчу роботу

1. Ознайомитись з основними рівняннями методу симетричних складових.
2. Для заданого варіанта схеми електричної системи визначити значення симетричних складових струмів у гілках та напруги у вузлах схеми.
3. Встановити зміну фазових кутів струмів та напруг прямої та зворотної послідовностей при переході через трансформатори.
4. Відповісти на контрольні питання, що містяться в описі роботи.

3.4 Порядок виконання самостійної роботи

Насамперед необхідно визначити справжні фазні значення струму для зазначеної гілки та напруги для заданого вузла. Якщо розрахунок симетричних складових струму та напруги був виконаний у іменованих одиницях, то необхідно від наведених значень струму та напруги перейти до реальних величин. Якщо симетричні складові струму та напруги визначені у відносних одиницях, то відносні значення варто помножити на відповідні базисні одиниці виміру. Далі варто встановити зміну фазових кутів струмів та напруг прямої та зворотної послідовностей при переході через трансформатори.

Виконати розрахунок фазних значень струму для зазначених гілок та напруги для заданих вузлів і побудувати векторні діаграми цих величин за допомогою *imf*.

Дати аналіз одержаних результатів.

3.5 Методичні рекомендації до розрахунків

Самостійна робота виконується за допомогою програми *imf*. Програма дозволяє за заданими струмами і напругами симетричних складових розрахувати фазні струми і напруги, визначити повну потужність S , активну P і реактивну Q у цих фазах, а також побудувати векторну діаграму. Інтерфейс програми складається з головного меню та двох вікон «Вихідні дані» та «Змінні», у якому містяться результати розрахунку. Перемикання між вікнами здійснюється клавішами F5 або Tab, між головним меню та вікнами – клавішею F10 або Esc. При новому розрахунку необхідно запустити програму, вибрати опцію «Новий» у меню «Файл». У меню «Сервіс» вибрати опцію «Параметри розрахунку/Розрахунок за заданими послідовностями». При цьому в полях, що з'явилися, необхідно задати симетричні стікаючі струмів і напруг, а також їхні фазові кути щодо одного напрямку. Введення кожного нового числа необхідно підтверджувати клавішею Enter. Запропоновані програмою значення полів «Точність по модулю» – 4, «Точність по фазі» – 2 та «Оцінка випадку» – 5 змінювати не рекомендується. Розрахунок величин провадиться після введення останнього рядка вихідних даних після заповнення поля «Інформація про місце пошкодження», що складається з 4 рядків. Результати розрахунку можна переглянути в лівому вікні, якщо воно є активним (клавіші F5, Tab), проте їх не можна редагувати. Перед переглядом векторної діаграми необхідно встановити масштаби для векторів у меню «Сервіс/Параметри діаграми». Є можливість перегляду векторів всіх величин як вихідних і результатів розрахунку. Вектор не буде показаний, якщо модуль дорівнює 0 або його масштаб дорівнює 0. Кожне нове значення масштабу необхідно підтверджувати клавішею Enter. Вихідні дані та результати розрахунку можна зберегти («Файл/Зберегти файл» або F2) у текстовому файлі, який можна редагувати в будь-якій текстовій програмі та виводити на друк. Відкрити раніше збережений файл можна за допомогою команди «Файл/Завантажити». Виведення на друк діаграми здійснюється за допомогою опції «Файл/Друк/Діаграма» або за допомогою клавіші F4.

Контрольні запитання

1. Для трансформатора з'єднання обмоток по групі 11 відомі фазні струми у відносних одиницях на стороні зірки: $\dot{I}_A = 5$, $\dot{I}_B = -5$; $\dot{I}_C = 0$. Визначити фазні струми за трикутника.

2. Для трансформатора з'єднання обмоток по групі 11 відомі фазні струми у відносних одиницях на стороні трикутника: $\dot{I}_A = 5$, $\dot{I}_B = -5$; $\dot{I}_C = 0$. Визначити фазні струми за зірки.

3. Визначити значення фазних струмів, якщо відомі симетричні складові струму фази А: $\dot{I}_{A1} = 300\text{A}$; $\dot{I}_{A2} = -100\text{A}$; $\dot{I}_{A0} = -200\text{A}$.

4. Як зміняться векторні діаграми струмів та напруг на стороні трикутника, якщо обмоток трансформатора з'єднати по групі 3 замість 11?

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник для студ. вищ. навч. закл. / М. М. Черемісін, О. М. Мороз, О. Б. Єгоров, С. В. Швець. – Харків : ТОВ «В справі», 2016. – 260 с.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник для ВНЗ / Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, Л. І. Несен, за ред. Г. Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., випр. та доп. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с.
3. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник / Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен ; за ред. академіка НАН України Г. Г. Півняка. – Вид. 2-е, випр. та доп. – Дніпропетровськ : Видавництво НГА України, 2000. – 597 с.
4. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. / І. А. Курило, В. П. Грудська, Л. Ю. Спінул, М. А. Щерба. – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 289 с.
5. Букович Н. В. Розрахунок струмів короткого замикання : навч. посіб. / Н. В. Букович, Г. Н. Міркевич. – Київ : УМК ВО, 1991. – 224 с.

Додаток А

Розрахункові схеми для самостійного вирішення

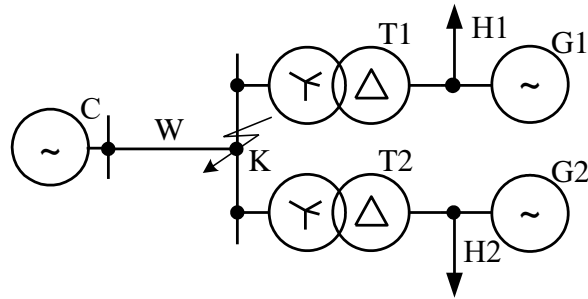


Рисунок А.1 – Розрахункова схема електричної системи

Технічні характеристики елементів схеми:

$$3 : I_K^{(3)} = 10 \text{ кА};$$

G1, G2 : ТВФ-63-2У3;

T1, T2 : ТДЦ-80000/110;

W : 70 км АС-120;

H1, H2: 20 МВ·А.

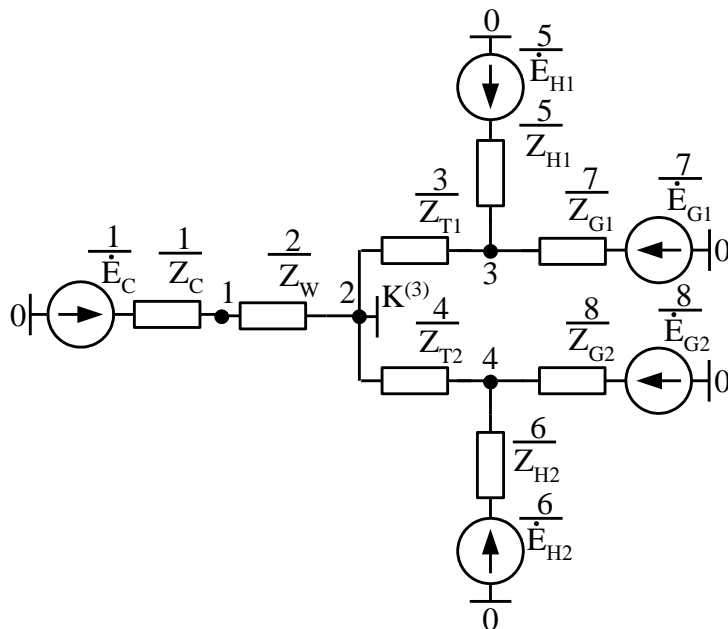

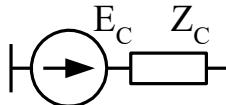
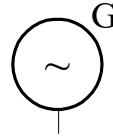
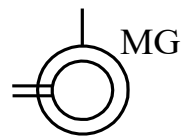
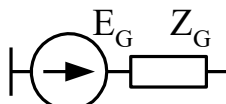
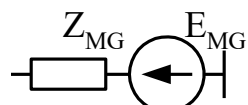


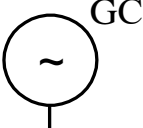
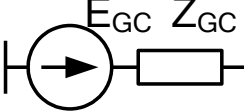

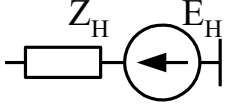

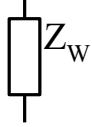
Рисунок А.2 – Схема заміщення електричної системи до розрахунку струмів трифазного короткого замикання

Додаток Б

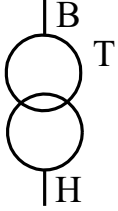
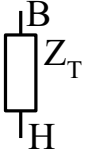
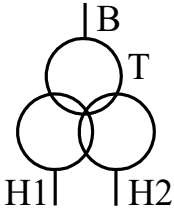
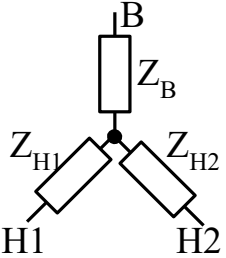
Таблиця Б.1 – Параметри прямої послідовності елементів електричної системи

Елемент системи	Умовне позначення	Схема заміщення	Формули для визначення опорів та ЕРС у схемі заміщення	
			Відносні одиниці	Іменовані одиниці
1	2	3	4	5
Енергосистема			$E_{C(6)} = \frac{U_{CP}}{U_B}$ $X_{C(6)} = \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}I_K^{(3)}} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{C(6)} = \frac{U_{CP}^2}{S_K^{(3)}} \frac{S_B}{U_B^2}$ $R_{C(6)} = \frac{X_{C(6)}}{15}$	$E_c = \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}}$ $X_C = \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}I_K^{(3)}}$ $X_C = \frac{U_{CP}^2}{S_K^{(3)}}$ $R_C = \frac{X_C}{15}$
Генератор синхронний Двигун синхронний одиничний	 	 	$R_{(6)} = \frac{x_{2(H)}}{\omega T_a^{(3)}} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $x''_{(6)} = x''_{d(H)} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $E''_{(6)} = \frac{U_{HOM}}{U_B} E''_{(H)}$ $E''_{(H)} = \sqrt{\left(\frac{U_{(H)}}{*} \pm I_{(H)} x''_{d(H)} \sin \varphi \right)^2 + \left(I_{(H)} x''_{d(H)} \cos \varphi \right)^2}$	$R = \frac{x_{2(H)}}{\omega T_a^{(3)}} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $x''_d = x''_{d(H)} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E'' = \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}} E''_{(H)}$

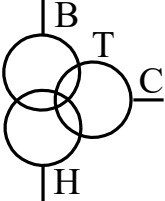
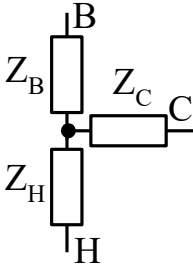
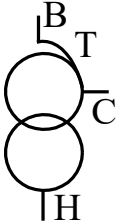
Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
Компенсатор синхронний			$R_{GC(a)}^* = \frac{x_{2(i)}^*}{\omega T_a^{(3)}} \frac{S_A}{S_{\hat{I}\hat{I}}} \left(\frac{U_{\hat{I}\hat{I}}}{U_A} \right)^2$ $x''_{d(6)}^* = x''_{d(H)}^* \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $E''_{(6)}^* = \frac{U_{HOM}}{U_B} (U_{(H)} \pm I_{(H)} x''_{d(H)}^*)$	$R_{GC} = \frac{x_{2(i)}^*}{\omega T_a^{(3)}} \frac{U_{\hat{I}\hat{I}}^2}{S_{\hat{I}\hat{I}}}$ $x''_d = x''_{d(H)}^* \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E'' = \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}} (U_{(H)} \pm I_{(H)} x''_{d(H)}^*)$
Навантаження узагальнене			$R_{H(6)}^* = R_{H(H)}^* \frac{S_B}{S_H} \left(\frac{U_{CP}}{U_B} \right)^2$ $X_{H(6)}^* = X_{H(H)}^* \frac{S_B}{S_H} \left(\frac{U_{CP}}{U_B} \right)^2$ $E_H = 0,85 \frac{U_{CP}}{U_B}$	$R_H = R_{H(H)}^* \frac{U_{CP}^2}{S_H}$ $X_H = X_{H(H)}^* \frac{U_{CP}^2}{S_H}$ $E_H = 0,85 \frac{U_{CP}}{\sqrt{3}}$
Лінія електропередачі повітряна та кабельна			$R_{W(6)}^* = r_{yD} L \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{W(6)}^* = x_{yD} L \frac{S_B}{U_B^2}$	$R_W = r_{yD} L$ $X_W = x_{yD} L$

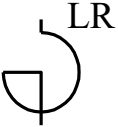
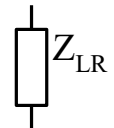
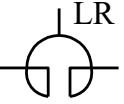
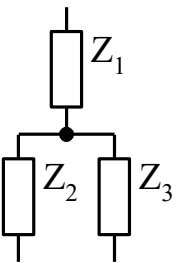

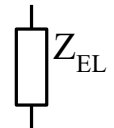

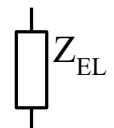
Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
<p>Трансформатор двообмотувальний</p>			$R_{T(6)}^* = \frac{P_K}{S_{HOM}} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $Z_{T(6)}^* = \frac{u_K}{100} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $X_{T(6)}^* = \sqrt{Z_{T(6)*}^2 - R_{T(6)*}^2}$	$R_T = \frac{P_K}{S_{HOM}} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $Z_T = \frac{u_K}{100} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$
<p>Трансформатор із розщепленою обмоткою нижчої напруги</p>			$X_{B(6)}^* = 0,125 \frac{u_{K,B-H}}{100} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $X_{H1(6)}^* = 1,75 \frac{u_{K,B-H}}{100} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $X_{H1(6)}^* = X_{H2(6)}^*$ $R_{B(6)}^* = X_{B(6)}^* \frac{R_{B-H}}{X_{B-H}}$ $R_{H1(6)}^* = R_{H2(6)}^* = X_{H1(6)}^* \frac{R_{B-H}}{X_{B-H}}$ $\frac{R_{B-H}}{X_{B-H}} = \frac{100}{u_{K,B-H}} \frac{P_K}{S_{HOM}}$	$X_B = 0,125 \frac{u_{K,B-H}}{100} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_{H1} = 1,75 \frac{u_{K,B-H}}{100} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_{H1} = X_{H2}$ $R_B = X_B \frac{R_{B-H}}{X_{B-H}}$ $R_{H1} = R_{H2} = X_{H1} \frac{R_{B-H}}{X_{B-H}}$

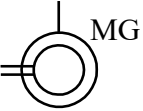
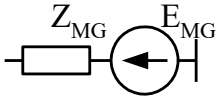
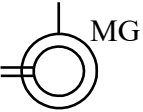
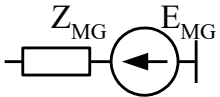
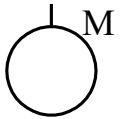
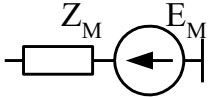
Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
Трансформатор триобмотувальний			$X_{B(6)}^* = \frac{u_{K.B}}{100} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $X_{C(6)}^* = \frac{u_{K.C}}{100} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $X_{H(6)}^* = \frac{u_{K.H}}{100} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM,i}}{U_{B,i}} \right)^2$ $R_{B(6)}^* = X_{B(6)}^* \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_{C(6)}^* = X_{C(6)}^* \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_{H(6)}^* = X_{H(6)}^* \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $\frac{R_{B-C}}{X_{B-C}} = \frac{100}{u_{K.B-C}} \frac{P_{K.B-C}}{S_{HOM}}$	$X_B = \frac{u_{K.B}}{100} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_C = \frac{u_{K.C}}{100} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_H = \frac{u_{K.H}}{100} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $R_B = X_B \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_C = X_C \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $R_H = X_H \frac{R_{B-C}}{X_{B-C}}$ $\frac{R_{B-C}}{X_{B-C}} = \frac{100}{u_{K.B-C}} \frac{P_{K.B-C}}{S_{HOM}}$
Автотрансформатор			$u_{K.B} = 0,5(u_{K.B-C} + u_{K.B-H} - u_{K.C-H}), \%$ $u_{K.C} = 0,5(u_{K.B-C} + u_{K.C-H} - u_{K.B-H}), \%$ $u_{K.H} = 0,5(u_{K.B-H} + u_{K.C-H} - u_{K.B-C}), \%$	

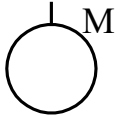
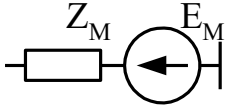
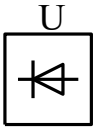
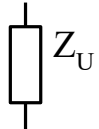
Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
Реактор			$R_{LR(\phi)}^* = \frac{P_{\Phi}}{I_{HOM}^2} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{LR(\phi)}^* = X_{LR} \frac{S_B}{U_B^2}$	$R_{LR} = \frac{P_{\Phi}}{I_{HOM}^2}$ X_{LR}
Реактор здвоєний			$R_{1(\phi)}^* = R_{2(\phi)}^* = R_{3(\phi)}^* = \frac{P_{\Phi}}{2I_{HOM}^2} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{1(\phi)}^* = -K_{CB} X_{LR} \frac{S_B}{U_B^2}$ $X_{2(\phi)}^* = X_{3(\phi)}^* = (1 + K_{CB}) X_{LR} \frac{S_B}{U_B^2}$	$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{P_{\Phi}}{2I_{HOM}^2}$ $X_1 = -K_{CB} X_{LR}$ $X_2 = X_3 = (1 + K_{CB}) X_{LR}$
Лампи розжарювання			$R_{EL(\phi)}^* = \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $X_{EL(\phi)}^* = 0$	$R_{EL} = \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_{EL} = 0$
Газорозрядні джерела світла			$R_{EL(\phi)}^* = 0,85 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $X_{EL(\phi)}^* = 0,53 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$	$R_{EL} = 0,85 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_{EL} = 0,53 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$

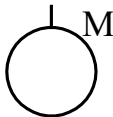
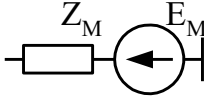
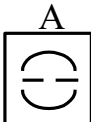
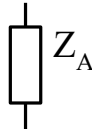
Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
<p>Група синхронних двигунів напругою понад 1 кВ</p>			$R_{*MG(6)} = 0,04 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $x''_{*(6)} = 0,15 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $E''_{*(6)} = 1,074 \frac{U_{HOM}}{U_B}$	$R_{MG} = 0,04 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $x'' = 0,15 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E'' = 1,074 \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}}$
<p>Група синхронних двигунів напругою до 1 кВ</p>			$R_{*MG(6)} = 0,03 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $x''_{*(6)} = 0,16 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $E''_{*(6)} = 1,079 \frac{U_{HOM}}{U_B}$	$R_{MG} = 0,03 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $x'' = 0,16 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E'' = 1,079 \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}}$
<p>Група асинхронних двигунів напругою понад 1 кВ</p>			$R_{*M(6)} = 0,01 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $x''_{*(6)} = 0,17 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_{B2}} \right)^2$ $E''_{*(6)} = 0,93 \frac{U_{HOM}}{U_B}$	$R_M = 0,01 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $x'' = 0,17 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E'' = 0,93 \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}}$

Продовження таблиці Б.1

1	2	3	4	5
<p>Двигун асинхронний одиничний</p>			$R_{*M(6)} = R_{*\Pi(H)} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $x''_{*(6)} = X_{*\Pi(H)} \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_{B2}} \right)^2$ $E''_{*(6)} = \frac{U_{HOM}}{U_B} E''_{*(H)}$ $R_{*\Pi(H)} = \frac{m_{\Pi} \eta_{HOM} \cos \varphi_{HOM}}{k_{\Pi}}$ $X_{*\Pi(H)} = \frac{1}{k_{\Pi}} \sqrt{1 - \frac{(m_{\Pi} \eta_{HOM} \cos \varphi_{HOM})^2}{k_{\Pi}^2}}$ $E''_{*(H)} = \sqrt{\left(U_{*(H)} - I_{*(H)} x''_{*d(H)} \sin \varphi \right)^2 + \left(I_{*(H)} x''_{*d(H)} \cos \varphi \right)^2}$	$R_M = R_{*\Pi(H)} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $x'' = X_{*\Pi(H)} \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $E'' = \frac{U_{HOM}}{\sqrt{3}} E''_{*}$
<p>Перетворювачі</p>			$R_{*U(6)} = 0,9 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$ $X_{*U(6)} = 0,45 \frac{S_B}{S_{HOM}} \left(\frac{U_{HOM}}{U_B} \right)^2$	$R_U = 0,9 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$ $X_U = 0,45 \frac{U_{HOM}^2}{S_{HOM}}$

Закінчення таблиці Б.1

1	2	3	4	5
Група асинхронних двигунів напругою до 1 кВ			$R_{*M(6)} = 0,07 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $x''_{* (6)} = 0,18 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_{Б2}} \right)^2$ $E''_{* (6)} = 0,9 \frac{U_{НОМ}}{U_B}$	$R_M = 0,07 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $x'' = 0,18 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $E'' = 0,9 \frac{U_{НОМ}}{\sqrt{3}}$
Електротермічні установки			$R_{*A(6)} = \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$ $X_{*A(6)} = 0,49 \frac{S_B}{S_{НОМ}} \left(\frac{U_{НОМ}}{U_B} \right)^2$	$R_A = \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$ $X_A = 0,49 \frac{U_{НОМ}^2}{S_{НОМ}}$

Примітки: 1. Прийняті позначення: ω – кутова частота системи; $T_a^{(3)}$ – постійна часу загасання аперіодичної складової струму статора; $r_{уд}, X_{уд}$ – питомі активний та індуктивний опір лінії; L – довжина лінії; R_K – втрати короткого замикання; u_K – напруга короткого замикання; P_Φ – втрати потужності на фазу реактора; $K_{СВ}$ – коефіцієнт зв'язку зведеного реактора; m_Π – кратність пускового моменту; $\eta_{НОМ}$ – коефіцієнт корисної дії; k_Π – кратність пускового струму.

2. У формулах для визначення ЕРС знак «+» відноситься до синхронних машин, які на момент короткого замикання працювали в режимі перезбудження, а знак «-» – до тих, хто працював з недозбудженням.

3. $R_{*H(Н)} = 0,18$; $X_{*H(Н)} = 0,24$ якщо навантаження узагальнено на напрузі (6...10) кВ. $R_{*H(Н)} = 0,19$; $X_{*H(Н)} = 0,36$ якщо навантаження узагальнено на напрузі 35 кВ і вище.

Додаток В

Схеми прямої, зворотної та нульової послідовностей

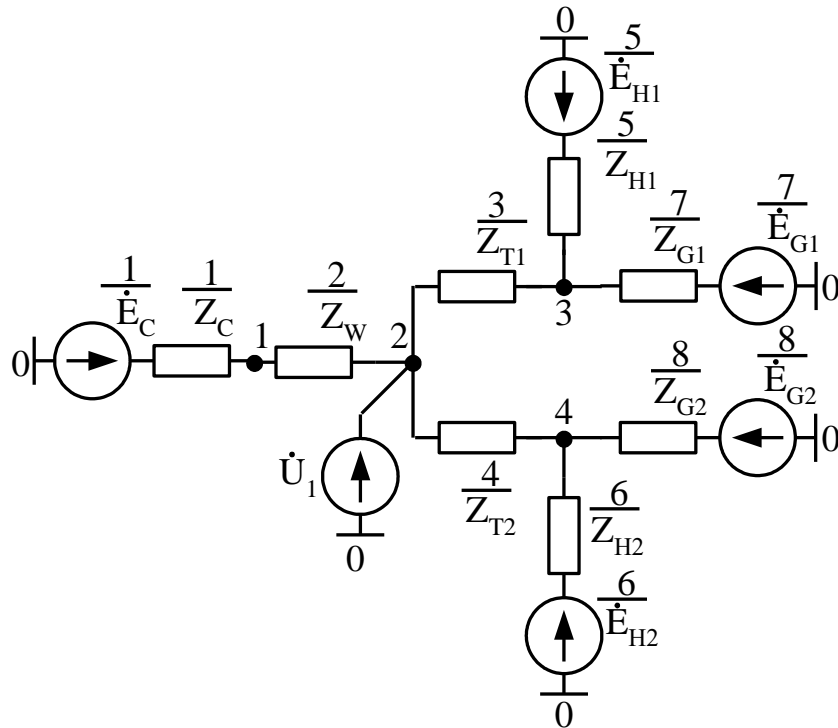


Рисунок В.1 – Схема заміщення прямої послідовності

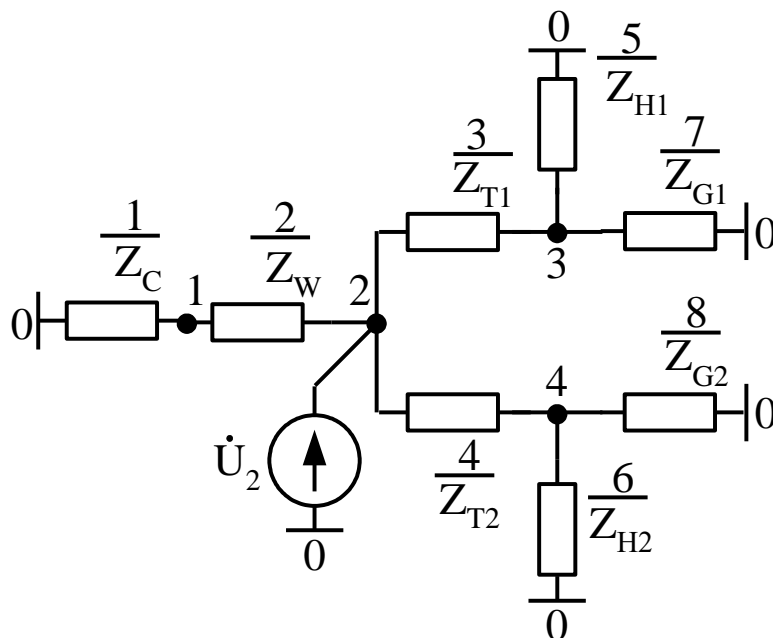


Рисунок В.2 – Схема заміщення зворотної послідовності

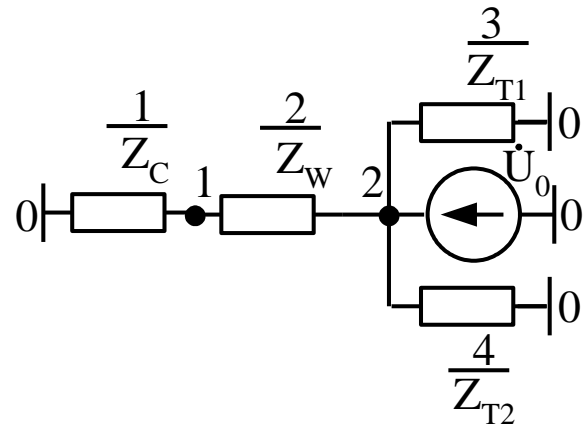


Рисунок В.3 – Схема заміщення нульової послідовності

Електронне навчальне видання

Методичні рекомендації

до самостійної роботи

з навчальної дисципліни

**«ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВКАХ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ»**

*(для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
всіх форм навчання зі спеціальності*

*141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Укладачі: **ЄГОРОВ** Олексій Борисович,
ГЛЄБОВА Марина Леонідівна

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп'ютерне верстання *М. Л. Глєбова*

План 2025, поз. 295М

Підп. до друку 12.02.2025. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 2,3.

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Черноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: office@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.