

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України

Національний технічний університет
'Харківський політехнічний інститут'

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

РОЗРАХУНОК НЕСИМЕТРИЧНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАНЬ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ МЕТОДОМ СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДОВИХ

до лабораторних, практичних, самостійних та курсових робіт з
навчальних дисциплін "Електромагнітні перехідні процеси в електричних
системах", Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах",
«Математичні задачі енергетики» для студентів денної, заочної та
дистанційної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Затверджено
редакційно-видавничим
порадою університету,
протокол № 2 від 27. 06.2024.

Харків
НТУ «ХПІ»
2024

Методичні вказівки. Розрахунок несиметричних коротких замикань в електричних мережах методом симетричних складових до лабораторних, практичних, самостійних та курсових робіт з навчальних дисциплін «Електромагнітні перехідні процеси в електричних системах», «Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах», «Математичні задачі енергетики» для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/ Уклад.: Веприк Ю. М., Загайнова О.А., Сердюкова Г.М. – Харків: НТУ «ХПІ», 2024. – с. 25.

Укладачі: Ю. М. Веприк
О.А. Загайнова
Г.М. Сердюкова

Рецензент С.І Дривецький

Кафедра передачі електричної енергії

ВСТУП

Необхідність у розрахунках несиметричних аварійних режимів виникає під час вирішення завдань релейного захисту, автоматики та стійкості енергосистем. Розрахунки несиметричних аварійних режимів виконують також при виборі схем з'єднання електричних мереж і підстанцій, виборі апаратів та інших елементів струмів короткого замикання, проектуванні та налаштуванні релейного захисту. Розрахунки струмів несиметричних коротких замикань вимагають великих обсягів обчислювальної роботи, оскільки пов'язані зі складанням і рішенням систем рівнянь у симетричних складових або фазних величинах, порядок яких визначається розміром електричної мережі, і для складних енергосистем може бути досить високим. Тому за виконання таких розрахунків доцільно застосовувати засоби обчислювальної техніки.

У цих методичних вказівках представлено програму розрахунку аварійних режимів електричних мереж при несиметричних коротких замиканнях. Основними елементами програми є обчислювальні процедури, що забезпечують формування вузлових рівнянь у формі балансу струмів методом симетричних складових, їх вирішення методом Гаусса-Жордана з блочним винятком змінних та розрахунок розподілу симетричних складових струмів та напруги при короткому замиканні в мережі. Програма складена алгоритмічною мовою DELPHI для ПЕОМ і дозволяє виконувати розрахунки аварійних несиметричних режимів електричної мережі довільної конфігурації з трансформаторами як з приведенням, так і без приведення до одного ступеня трансформації.

Методичні вказівки можуть бути використані студентами денної, заочної та дистанційної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» при курсовому та дипломному проектуванні, при виконанні лабораторних, практичних робіт, НДРС з курсів «Електромагнітні перехідні процеси в електричних системах» та «Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах», «Математичні задачі енергетики».

1. Математичне моделювання електричних систем аварійних режимах при несиметричних коротких замиканнях

До несиметричних відносяться режими, у яких одна з трьох фаз виявляється в особливих умовах, відмінних від інших (прості несиметричні режими), або всі три фази виявляються в різних умовах (складні несиметричні режими). Несиметрія може бути викликана різницею поперечних (поперечна несиметрія) або поздовжніх (поздовжня несиметрія) параметрів фаз окремих елементів. Приклади простої поперечної несиметрії – однофазні, двофазні та двофазні на землю короткі замикання; приклад простої поздовжньої несиметрії - обрив однієї або двох (фаз. Приклад складної несиметрії - трифазні короткі замикання через нерівні опори, несиметричні короткі замикання з обривами фаз і т.д. Наявність несиметрії струмів і напруг несприятливо позначається на роботі всіх елементів основного , трансформаторів, двигунів), викликаючи додаткові механічні зусилля та нагрівання.

У несиметричних режимах симетрія параметрів системи та параметрів режиму не зберігається. Перехід до однофазного еквіваленту трифазної мережі способом, що застосовується для симетричних режимів, виявляється неможливим. Тому для моделювання несиметричних режимів принципово можливі і знаходять застосування у розрахунковій практиці два види математичних моделей:

- Рівняння у фазних координатах [2,3], що складаються (на основі законів Кірхгофа) для кожної з трьох фаз і вирішуються одночасно для всіх фаз;
- рівняння у симетричних складових, що ґрунтуються на розкладанні трифазної системи на незалежні складові [1]. Математичні моделі, засновані на рівняннях у фазних величинах, більш універсальні (застосовні для аналізу як простий, і складної несиметрії), але вимагають великих трудовитрат з їхньої створення. Математичні моделі, засновані на рівняннях у симетричних складових, простіші у реалізації, проте орієнтовані моделювання несиметричних режимів із простою (одноразовою) несиметрією. Водночас відповідно до чинних

нормативних документів [2] при виборі та перевірці обладнання в аварійних режимах слід обмежуватися розглядом простої несиметрії (однофазні або двофазні на землю КЗ). Цим і зумовлено переважне застосування для вирішення цих задач моделей, заснованих на рівняннях у симетричних складових.

Усі елементи трифазних електричних мереж, зазвичай, симетричні. З іншого боку, вживаються особливі заходи (транспозиція, симетрування, та інших.) у тому, щоб забезпечити їх симетричність у межах, необхідних ГОСТ якості електроенергії. У разі, коли елементи мережі характеризуються симетрією параметрів:

$$Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} , Z_{ab} = Z_{ac} = Z_{bc} ,$$

трудомісткість моделювання простих несиметричних режимів можна зменшити, переходячи від фазних величин до симетричних складових [1,5]. Основні положення методу симетричних складових:

1) будь-яку несиметричну систему струмів та напруг фаз трифазної гілки

$$[I]_{ij}^F = \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix}_{ij} \quad [\dot{U}]_{ij}^F = \begin{bmatrix} \dot{U}_A \\ \dot{U}_B \\ \dot{U}_C \end{bmatrix}_{ij}$$

можна однозначно подати у вигляді суми трьох симетричних трифазних систем векторів: прямої, зворотної та нульової послідовності:

$$[I]_{ij}^F = \begin{bmatrix} I_A^{(1)} \\ I_B^{(1)} \\ I_C^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_A^{(2)} \\ I_B^{(2)} \\ I_C^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_A^{(0)} \\ I_B^{(0)} \\ I_C^{(0)} \end{bmatrix} \quad [U]_{ij}^F = \begin{bmatrix} U_A^{(1)} \\ U_B^{(1)} \\ U_C^{(1)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_A^{(2)} \\ U_B^{(2)} \\ U_C^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_A^{(0)} \\ U_B^{(0)} \\ U_C^{(0)} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Якщо врахувати, що

$$\begin{aligned} \dot{I}_B^{(1)} &= a^2 I_A^{(1)}, \dot{I}_B^{(2)} = a I_A^{(2)}, \dot{I}_B^{(0)} = I_A^{(0)}. \\ \dot{I}_C^{(1)} &= a I_A^{(1)}, \dot{I}_C^{(2)} = a^2 I_A^{(2)}, \dot{I}_C^{(0)} = I_A^{(0)} \end{aligned}$$

де $a = e^{j120}$, $a^2 = e^{j240}$, то вирази (1) можна привести до вигляду

$$[\dot{I}]_{ij}^F = [S][\dot{I}]_{ij}^S, [\dot{U}]_{ij}^F = [S][U]_{ij}^S, \quad (1.2)$$

де

$$[I]_{ij}^S = \begin{bmatrix} I_A^{(1)} \\ I_A^{(2)} \\ I_A^{(0)} \end{bmatrix} [S] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix}.$$

Виразивши (1.2) щодо вектора симетричних складових $[I]_{ij}^S$, отримаємо

$$[I]_{ij}^S = [S]^{-1} [I]_{ij}^F, \quad (1.3)$$

де

$$[S]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Вирази (1.3) для струмів (і аналогічні їм вирази для напруг) відбивають зв'язок між фазними величинами та симетричними складовими.

2. При переході від фазних величин $[I_{ij}]^F$ $[U_{ij}]^F$ до симетричних складових матриці $[Z_{ij}]^F$ і $[Y_{ij}]^F$ симетричні елементи стають діагональними.

Дійсно, помножуючи обидві частини рівності

$$[Z_{ij}]^F [I_{ij}]^F = [U_{ij}]^F$$

На $[S]^{-1}$ з урахуванням (1.2) отримаємо

$$[S]^{-1} [Z_{ij}]^F [S] [I_{ij}]^S = [S]^{-1} [U_{ij}]^F$$

або
$$[Z_{ij}]^S [S] [I_{ij}]^S = [U_{ij}]^S \quad (1.4)$$

де
$$[Z_{ij}]^S = [S]^{-1} [Z_{ij}]^F [S] \quad (1.5)$$

матриця власних та взаємних опорів елементів у симетричних складових.

При симетрії параметрів елементів матриця $[z_{ij}]^S$ виявляється діагональною, тобто.

$$\begin{bmatrix} Z^{(1)} & & \\ & Z^{(2)} & \\ & & Z^{(0)} \end{bmatrix}_{ij} \begin{bmatrix} I^{(1)} \\ I^{(2)} \\ I^{(0)} \end{bmatrix}_{ij} = \begin{bmatrix} U^{(1)} \\ U^{(2)} \\ U^{(0)} \end{bmatrix}_{ij} \quad (1.6)$$

де $Z_{ij}^{(1)}$ - Повний опір елемента для струмів прямої послідовності;

$Z_{ij}^{(2)}$ - для струмів зворотної;

$Z_{ij}^{(0)}$ - Для струмів нульової послідовності.

Рівності (6) виражають незалежність симетричних складових симетричних елементах i , крім того, з них випливає, що кожен елемент трифазної системи має певні значення повних опорів для струмів кожної послідовності, незалежні одне від одного, а також незалежні від характеру та величини несиметрії. Таким чином, компонентні рівняння всіх симетричних елементів відповідно до (1.6) розпадаються на три незалежні.

3. Топологічні рівняння електричної мережі із симетричними елементами в несиметричному режимі також розпадаються на три незалежні. Іншими словами, симетричні складові струмів i напруг в електричній мережі нарізно підпорядковуються першому та другому законам Кірхгофа. У цьому неважко переконатися, помноживши рівняння

$$[I_{ij}]^F = 0, [U_{ij}]^F = 0$$

що виражають перший і другий закони Кірхгофа в трифазній мережі, на матрицю зліва.

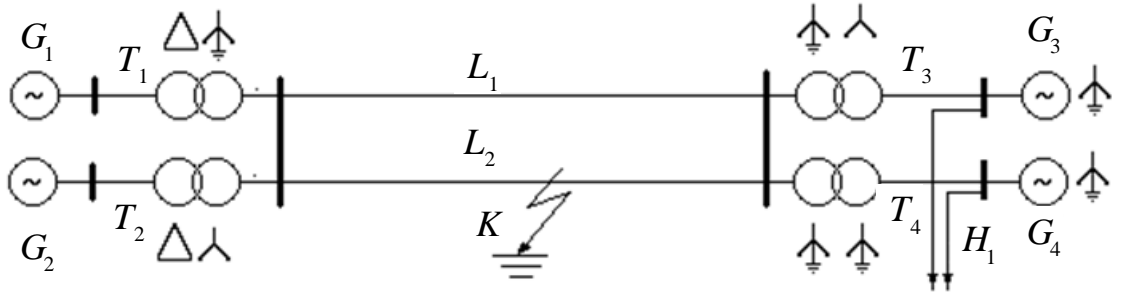
$$[S]^{-1} [I_{ij}]^F = [S]^{-1} [I_{ij}]^F = [I_{ij}]^S \quad (1.7)$$

$$[S]^{-1} [U_{ij}]^F = [S]^{-1} [U_{ij}]^F = [U_{ij}]^S$$

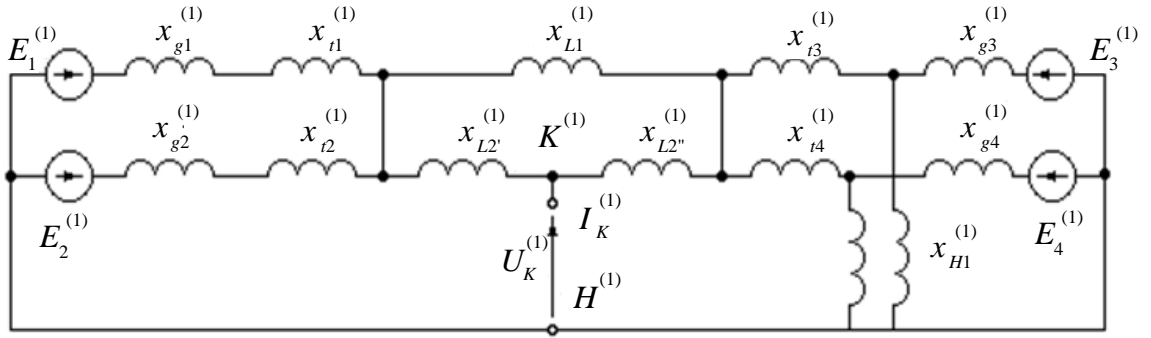
Таким чином, трифазну симетричну мережу в несиметричному режимі можна уявити, що складається з трьох незалежних частин: прямої, зворотної та нульової послідовностей. Приклад складання схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей для простої схеми електричної мережі представлений на рис. 1.1.

У непошкодженій частині мережі струми та напруги різних послідовностей не взаємодіють один з одним. Однак у точці несиметричного КЗ симетричні складові струмів і напруг повинні задовольняти певним співвідношенням (граничним умовам), що залежать від виду несиметричного пошкодження (напруга фази, що замкнулася на землю, дорівнює нулю; напруги двох фаз, що замкнулися між собою, однакові; струми на землю неушкоджених фаз у точці КЗ дорівнюють нулю).

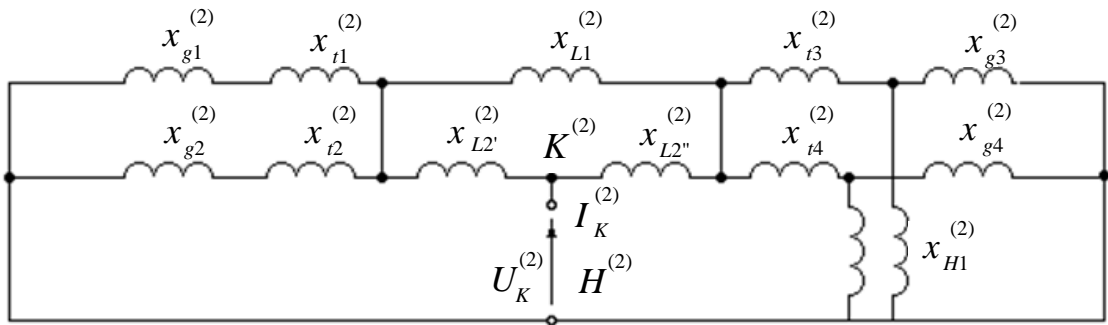
Ці співвідношення, як показує аналіз [1], можуть бути виконані шляхом з'єднання схем окремих послідовностей в ту чи іншу комплексну схему заміщення (рис.1.1), вид якої залежить від виду несиметричного КЗ (замикання однієї або двох фаз на землю, замикання двох фаз між собою).



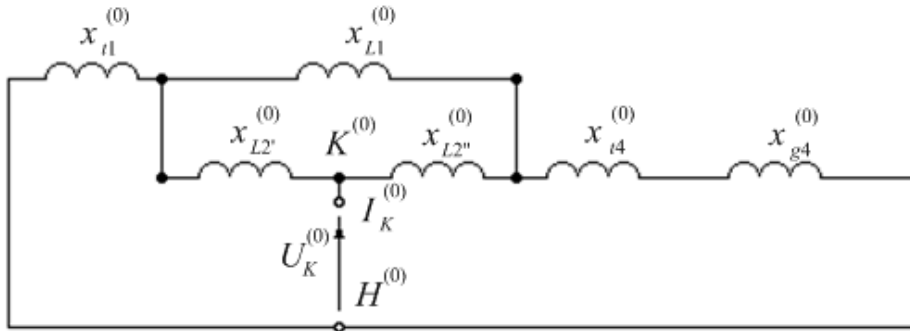
a



б



в



г

Рисунок 1.1 - Схема електричної системи(а), схеми прямої(б), зворотної(в) та нульової(г) послідовності

Якщо в кожній з послідовностей упорядкувати нумерацію вузлів і виділити спочатку генераторні вузли, вузли, пов'язані з пошкодженими елементами і, нарешті, решта всіх вузлів в симетричній частині, то матрицю провідностей вузлових рівнянь мережі в симетричних складових можна представити у вигляді:

$$\begin{bmatrix} Y_{rr}^{(1)} & Y_{rc}^{(1)} & Y_m^{(1)} & I & & & I & & & \\ Y_{cr}^{(1)} & Y_{cc}^{(1)} & Y_{cn}^{(1)} & I & & & I & & & \\ Y_{nr}^{(1)} & Y_{nc}^{(1)} & Y_{nn}^{(1)} & I & & Y_{nn}^{(12)} & I & & Y_{nn}^{(10)} & \\ - & - & - & I & - & - & I & - & - & \\ & & & I & Y_{cc}^{(1)} & Y_{cn}^{(1)} & I & & & \\ & & Y_{nn}^{(21)} & I & Y_{nc}^{(1)} & Y_{nn}^{(1)} & I & & Y_{nn}^{(20)} & \\ - & - & - & I & - & - & I & - & - & \\ & & & I & & & I & Y_{cc}^{(1)} & Y_{cn}^{(1)} & \\ & & Y_{nn}^{(01)} & I & & Y_{nn}^{(02)} & I & Y_{nc}^{(1)} & Y_{nn}^{(1)} & \end{bmatrix}, \quad (1.8)$$

де діагональні блоки відносяться до кожної із послідовностей, а недіагональні – характеризують зв'язки між послідовностями внаслідок наявності несиметричних ушкоджень.

2. Алгоритм та програма розрахунку несиметричних коротких замикань

При розрахунках несиметричних коротких замикань рішення вузлових рівнянь з матрицею (1.8) зазвичай не виконується, оскільки порядок її майже втричі більше, ніж при моделюванні симетричних режимів. Більш економічні алгоритми засновані на тому, що при одноразовому несиметричному пошкодженні трифазну симетричну мережу можна уявити як три незалежні частини – схеми прямої, зворотної та нульової послідовностей, пов'язаних між собою лише граничними умовами в точці КЗ.

У схемі заміщення прямої послідовності (рис.2.1) струм прямої послідовності

$$I_k^{(1)} = \frac{E_{\dot{y}}^{(1)} - U_k^{(1)}}{Z_k^{(1)}}$$

обумовлений різницею між ЕДС генераторів $E_{\dot{y}}^{(1)}$ та напругою $U_k^{(1)}$ прямої послідовності у точці КЗ. У схемах заміщення зворотної та нульової послідовностей симетричні складові струмів зворотної $I_k^{(2)}$ та нульовий $I_k^{(0)}$ послідовностей

$$I_k^{(2)} = \frac{-U_k^{(2)}}{Z_k^{(2)}}, I_k^{(0)} = \frac{-U_k^{(0)}}{Z_k^{(0)}} \quad (2.1)$$

визначається напругами, що виникають у точці КЗ відповідно зворотної і нульової послідовностей і еквівалентними опорами зворотної і нульової послідовностей щодо розглянутої точки схеми.

Тому одним із елементів розрахунку несиметричних КЗ є визначення еквівалентних опорів схем зворотної та нульової послідовності. У програмі їх визначення виконується з урахуванням вузлових рівнянь відповідної схеми. У злові рівняння для схеми заміщення, наприклад, зворотної послідовності, мають вигляд:

$$\begin{bmatrix} y_{11}^{(2)} & y_{12}^{(2)} & \dots & y_{1k}^{(2)} & \dots & y_{1n}^{(2)} \\ y_{21}^{(2)} & y_{22}^{(2)} & \dots & y_{2k}^{(2)} & \dots & y_{2n}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{k1}^{(2)} & y_{k2}^{(2)} & \dots & y_{kk}^{(2)} & \dots & y_{kn}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{n1}^{(2)} & y_{n2}^{(2)} & \dots & y_{nk}^{(2)} & \dots & y_{nn}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1^{(2)} \\ U_2^{(2)} \\ \dots \\ U_k^{(2)} \\ \dots \\ U_n^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ I_k^{(2)} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

де n – число вузлів у схемі заміщення зворотної послідовності,
 k – номер вузла КЗ.

Їх особливістю є те, що при одноразовому несиметричному пошкодженні (несиметричному КЗ в одній точці) напруги $U_k^{(2)}$ та $U_k^{(0)}$ є єдиним "джерелом", що визначає струм відповідно $I_k^{(2)}$ та $I_k^{(0)}$.

Звернувши матрицю вузлових провідностей і виразивши щодо напруги, отримаємо рівняння:

$$\begin{bmatrix} U_1^{(2)} \\ U_2^{(2)} \\ \dots \\ U_k^{(2)} \\ \dots \\ U_n^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11}^{(2)} & z_{12}^{(2)} & \dots & z_{1k}^{(2)} & \dots & z_{1n}^{(2)} \\ z_{21}^{(2)} & z_{22}^{(2)} & \dots & z_{2k}^{(2)} & \dots & z_{2n}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{k1}^{(2)} & z_{k2}^{(2)} & \dots & z_{kk}^{(2)} & \dots & z_{kn}^{(2)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ z_{n1}^{(2)} & z_{n2}^{(2)} & \dots & z_{nk}^{(2)} & \dots & z_{nn}^{(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ I_k^{(2)} \\ \dots \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2.3)$$

з яких випливає, що:

– напруга $U_k^{(2)}$ та струм $I_k^{(2)}$ зворотної послідовності пов'язані співвідношенням

$$U_k^{(2)} = Z_{kk}^{(2)} I_k^{(2)}; \quad (2.4)$$

– напруга зворотної послідовності у будь-якому з вузлів схеми заміщення $U_i^{(2)}$ зворотної послідовності

$$U_i^{(2)} = Z_{ik}^{(2)} I_k^{(2)}; \quad (2.5)$$

– для визначення напруги у вузлах схеми заміщення зворотної послідовності при відомому струмі $I_k^{(2)}$ у точці КЗ необхідно знати лише елементи одного стовпця матриці $[Z]$;

– власний опір $Z_{kk}^{(2)}$ вузла k у матриці $[Z]$ чисельно дорівнює еквівалентному опору $Z_k^{(2)}$ схеми заміщення зворотної послідовності, як це випливає зі зіставлення (10) та (11).

Співвідношення, аналогічні (2.4-2.5) можна отримати і для схеми нульової послідовності. Тому все сказане про схему зворотної послідовності повністю відноситься і до схеми нульової послідовності.

Знайдені значення $Z_k^{(2)}$ і $Z_k^{(0)}$ включаються до схеми заміщення прямої послідовності у вузол КЗ і, відповідно до правила Щедріна Н.Н..

Розрахунок несиметричного КЗ зводиться до розрахунку трифазного КЗ, віддаленого від дійсної точки КЗ за додатковий опір $Z(N)$, яке для кожного виду короткого замикання визначається еквівалентними опорами зворотної та нульової послідовностей щодо точки схеми, що розглядається.

Розрахунки кожної зі схем аналогічні розрахункам при симетричних пошкодженнях, тому їх програмна реалізація виконана тими самими процедурами, що і при трифазних коротких замиканнях [7], так як при несиметричних КЗ відповідні обчислення (розрахунок провідностей елементів мережі, формування матриць Y , визначення еквівалентних опорів) виконуються для трьох схем – прямої, зворотної та нульової послідовностей (рис. 2.1).

Таким чином, при розкладанні на симетричні складові розрахунок однієї трифазної схеми замінюється розрахунком трьох однофазних, причому більшість розрахунків по кожній з трьох схем виконується незалежно від двох інших. Лише визначення симетричних складових струмів та напруг у точці КЗ (блок 8, рис.2.2) виконується з урахуванням параметрів усіх трьох схем відповідно до виду ушкодження. Розрахунок розподілу симетричних складових струмів та напруг (блок 9) знову виконується для кожної зі схем окремо.

А струми та напруги фаз визначаються підсумовуванням симетричних складових відповідних гілок трьох схем.

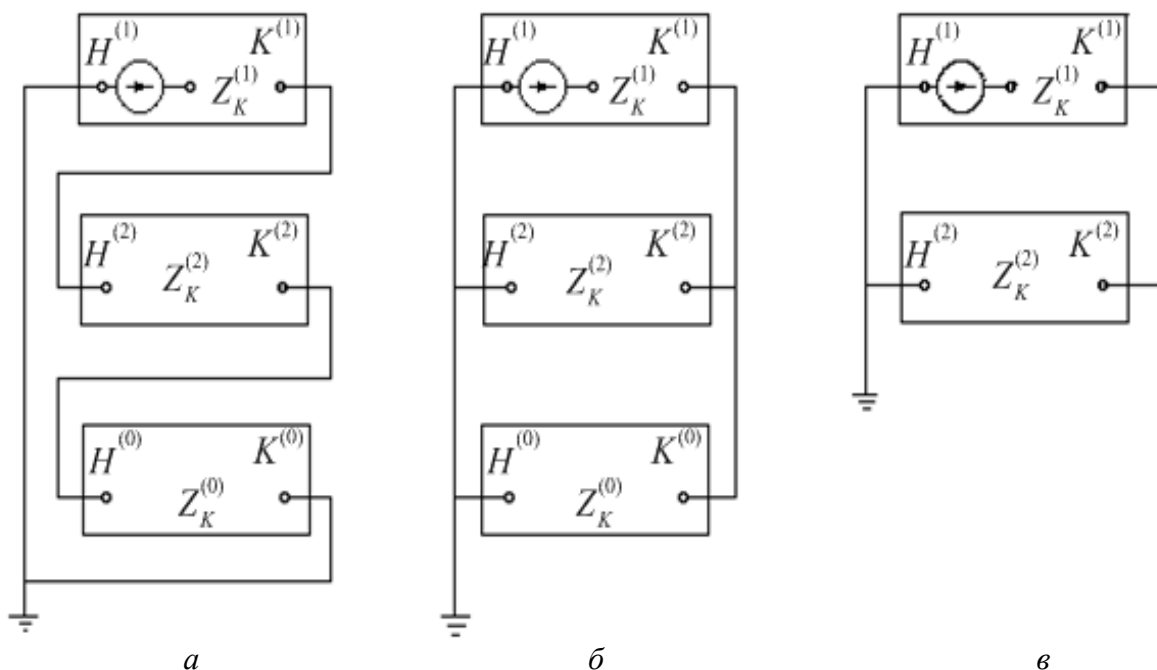
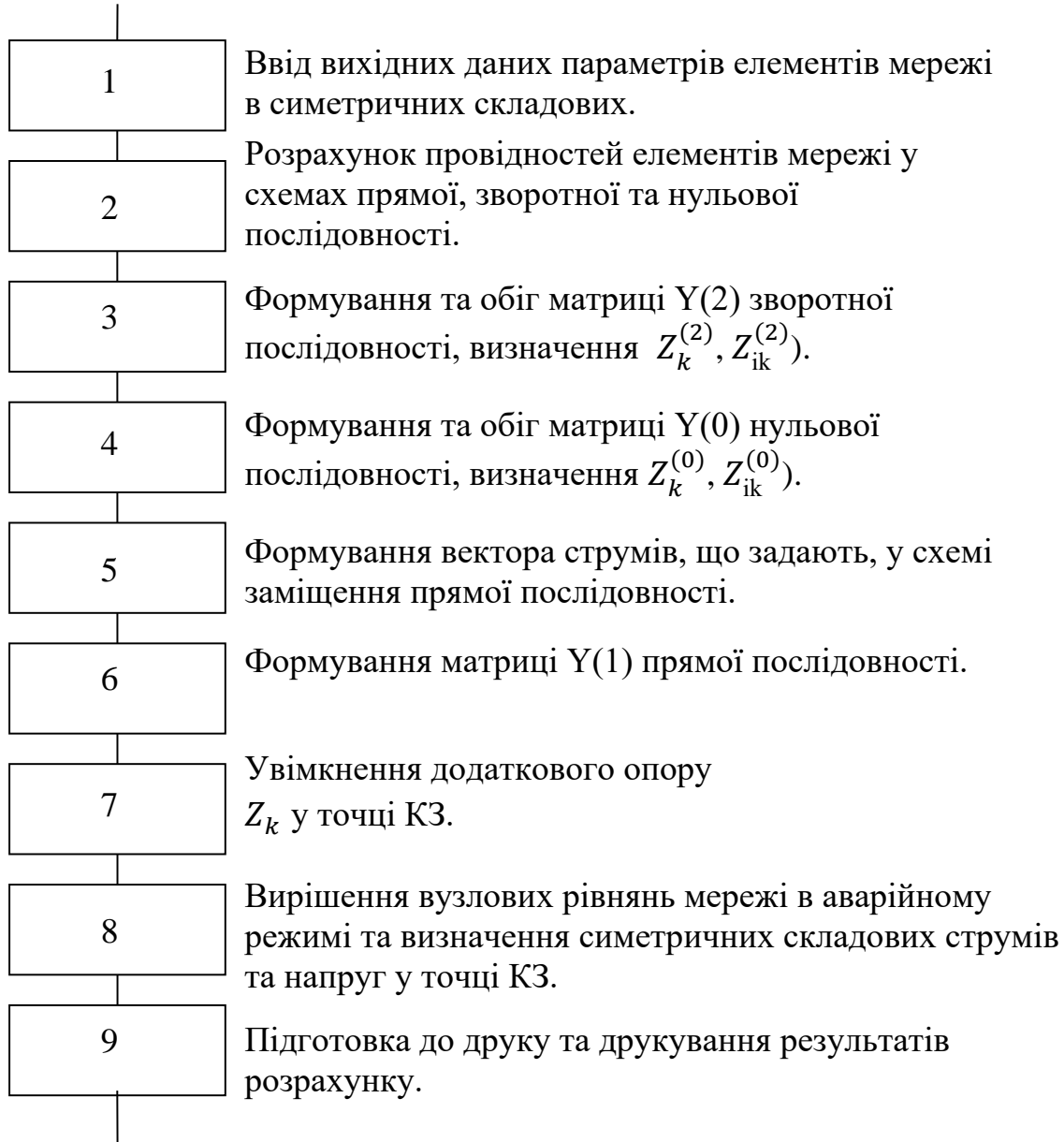


Рисунок 2.1- Комплексні схеми заміщення для розрахунку несиметричних коротких замикань: однофазного на землю (а), двофазного на землю (б) та двофазного (в).

Програма, що реалізує алгоритм, представлений на рис.2.2, складена алгоритмічною мовою DELPHI, зберігається на ВЦ кафедри під ім'ям W_TK32 і призначена для розрахунків будь-яких несиметричних КЗ в мережах як із ізольованою, так і заземленою нейтраллями з числом вузлів $N < 50$ і числом гілок $M < 70$, як із приведенням, так і без приведення до одного ступеня напруги.

початок



кінець

Рисунок 2.2 - Алгоритм розрахунку аварійних режимів при несиметричних КЗ в електричній мережі

3. Інструкція з підготовки даних та роботі з програмою

При підготовці вихідних даних для програми W_TK32 слід пам'ятати таке:

- складання схем заміщення та розрахунків параметрів можуть бути виконані як у іменованих одиницях (з приведенням або без приведення до одного ступеня напруги), так і у відносних;

- Наявність у схемі гілок з рівним нулю повним опором $Z_{ij} = 0$ не допускається;

- активні потужності навантажень та генераторів повинні бути задані позитивними речовими числами. Реактивні потужності навантажувальних і генераторних вузлів вважаються позитивними при відставанні;

- як поперечні провідності для ПЛ задаються активні та ємнісні провідності на всю довжину лінії, для гілки з трансформатором - провідності гілки намагнічування G_T , B_T , приведені до сторони ВН;

- Поперечні реактивні провідності на землю вважаються позитивними при ємнісному характері, і негативними - при індуктивному. Чисельні значення поперечних провідностей записуються помноженими на коефіцієнт 10^6 ;

- Коефіцієнти трансформації трансформаторів можуть бути задані як меншими одиниці ($K_T = U_{нн}/U_{вн}$), так і більшими ($K_T = U_{вн}/U_{нн}$) одиниці.

Для розрахунку несиметричних коротких замикань із застосуванням програми W_TK32 необхідно:

1. Скласти схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей і виконати розрахунок параметрів елементів схем (поздовжні опори та поперечні провідності елементів у схемах заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей).

2. Пронумерувати вузли схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей. Нумерація повинна бути виконана наступним чином: спочатку пронумерувати схему заміщення нульової послідовності (у мережах кількох номінальних напруг схема нульової послідовності, як правило, менше двох інших за кількістю вузлів). Потім привласнити відповідним вузлам у схемах прямої та зворотної послідовностей ті ж номери, що і в схемі нульової послідовності, після чого пронумерувати всі вузли, що залишилися (якщо число вузлів у схемах прямої і зворотної послідовностей більше, ніж у нульовій).

При цьому в кожній із трьох схем нумерація вузлів буде впорядкованою, а відповідні вузли схем матимуть однакові номери.

3. Створити на дискеті файл з довільним ім'ям (наприклад, W_TKZ1.dat) і внести в нього дані про мережу і параметри елементів в наступній послідовності:

- перший рядок – число вузлів $N1$ та число гілок $M1$ у схемі заміщення прямої (зворотної) послідовності;

- наступні $N1$ рядків – інформація про вузли. Кожен із рядків відноситься до одного вузла і містить номер вузла, номінальну напругу, активну та реактивну потужності навантажень P_{ni} , Q_{ni} та генераторів P_{gi} , Q_{gi} у вузлі, активний та реактивний опір генераторів R_{gi} , X_{gi} ;

- наступні $M1$ рядків – інформація про гілки мережі. Кожен з $M1$ рядків відноситься до однієї гілки і містить: номери вузлів i, j , до яких примикає гілка, активні та реактивні поздовжні опори R_{ij} , X_{ij} та поперечні провідності G_{ij} , B_{ij} гілки, коефіцієнт трансформації K_t (для гілки з трансформатором);

- дані про опори генераторів у схемі заміщення зворотної послідовності – $N1$ рядків, у кожному з яких записано номер вузла та реактивний опір $x_{gi}^{(2)}$ генератора;

- число вузлів NO та гілок MO у схемі заміщення нульової послідовності;

- інформація про вузли схеми заміщення нульової послідовності Кожен з NO рядків відноситься до одного вузла мережі та містить номер вузла, номінальну напругу та опір генератора $x_{ai}^{(0)}$;

- інформація про гілки схеми заміщення нульової послідовності

Кожен із MO рядків містить: номери вузлів i, j , до яких приєднана гілка, поздовжні активні та реактивні опори $R_{ij}^{(0)}, X_{ij}^{(0)}$ та поперечні активні та реактивні провідності $G_{ij}^{(0)}, X_{ij}^{(0)}$ гілки.

4. Створити файл з ім'ям W_TKZ2.dat (порожній), в якому програмою W_TK32 після запуску її на рахунок будуть виведені результати розрахунку несиметричних КЗ.

5. Запустити програму W_TK32 виконання.

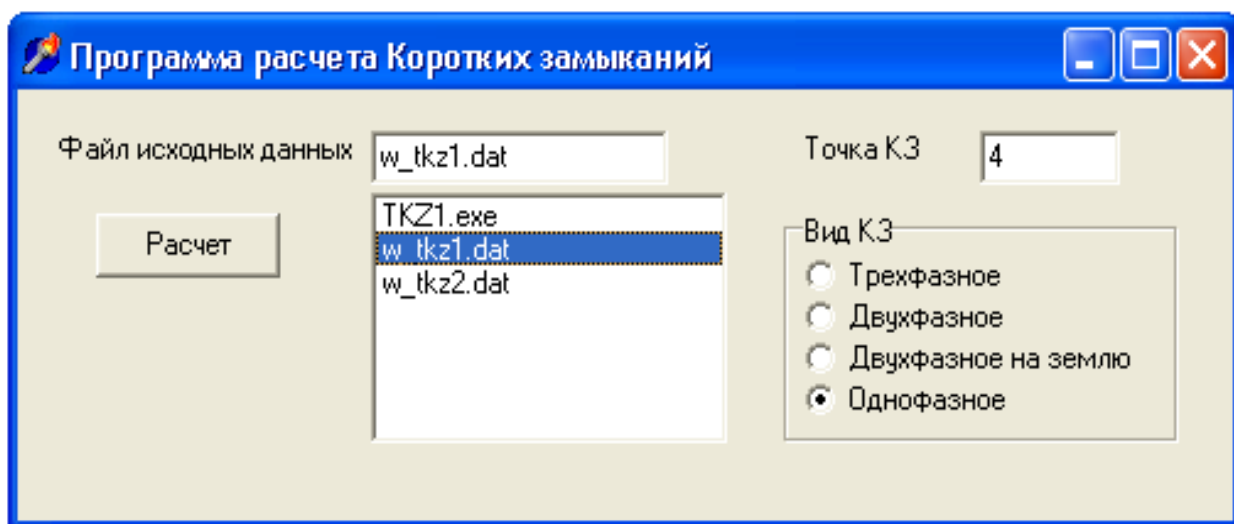


Рисунок 3.1 – Вікно програми W_TK32

Після запуску на екрані дисплея з'являється вікно W_TK31 (рис. 3.1), в якому за допомогою миші потрібно вказати:

- ім'я файлу даних ("Файл вихідних даних"),
 - номер вузла з коротким замиканням ("Вузол КЗ"),
 - вид короткого несиметричного замикання ("Вигляд КЗ"),
- та запустити програму на розрахунок (кнопка "Розрахунок").

Після завершення розрахунку робота програми завершується і результати розрахунку можна переглянути у файлі W_TKZ2.dat.

Приклади підготовки файлу вихідних даних W_TKZ1.dat та друкування результатів розрахунку для схеми, представленої на рис. 3.2 наведені в табл. 3.1.

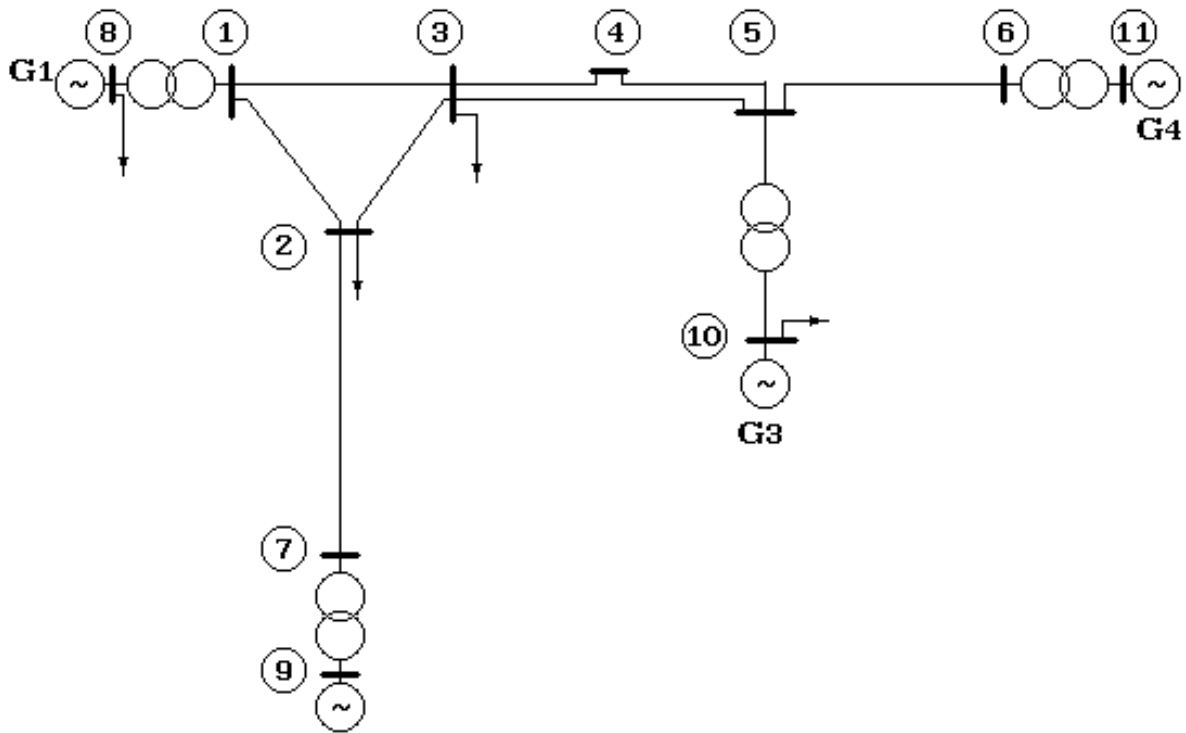


Рисунок 3.2 – Схема електричної мережі

Результати розрахунку виводяться у файл W_TKZ2.dat і містяться у двох таблицях:

1. Вихідні дані про мережу – для контролю інформації, що вводиться користувачем.

2. Результати розрахунку аварійного режиму електричної мережі при несиметричних КЗ – розподіл струмів та напруг у схемі прямої послідовності, симетричні складові струмів та напруг у точці КЗ, струми та напруги фаз у точці КЗ.

Таблиця 3.1. Файл W_TKZ1.dat. Вихідні дані для розрахунку несиметричних КЗ.

11 12 -кількість вузлів і гілок у схемі прямої послідовності

Інформація про вузли

1	110.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	110.0	42.00	22.67	0.00	0.00	0.00	0.00
3	110.0	45.87	27.88	0.00	0.00	0.00	0.00
4	110.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	110.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	110.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	110.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	110.0	28.00	14.00	21.66	22.30	0.00	36.50
9	110.0	0.00	0.00	41.85	21.16	0.00	77.20
10	110.0	15.00	9.30	48.00	36.00	0.00	36.50

11 110.0 0.00 0.00 24.00 18.00 0.00 84.00

Інформація про гілки

1 2 7.13 9.92 0.00 0.00 0.00
1 3 13.95 19.40 0.00 0.00 0.00
2 3 12.40 17.20 0.00 0.00 0.00
2 7 11.43 28.46 0.00 0.00 0.00
3 4 8.35 12.70 0.00 0.00 0.00
3 5 7.65 25.40 0.00 0.00 0.00
4 5 9.45 12.70 0.00 0.00 0.00
5 6 12.43 29.96 0.00 0.00 0.00
1 8 0.00 41.75 0.00 0.00 0.00
7 9 0.00 32.76 0.00 0.00 0.00
5 10 0.00 45.87 0.00 0.00 0.00
6 11 0.00 37.82 0.00 0.00 0.00
1 0.00
2 0.00
3 0.00
4 0.00 Параметри
5 0.00 генераторів
6 0.00 у схемі
7 0.00 заміщення
8 33.20 зворотній
9 70.00 послідовності
10 30.00
11 80.00

Дані про схему нульової послідовності

11 12
1 110.00 0.00
2 110.00 53.80
3 110.00 56.45
4 110.00 0.00
5 110.00 0.00
6 110.00 0.00
7 110.00 0.00
8 110.00 51.34
9 110.00 0.00
10 110.00 58.64
11 110.00 0.00
1 2 7.13 27.56 0.00 0.00
1 3 13.95 57.40 0.00 0.00
2 3 12.40 52.20 0.00 0.00
2 7 11.43 68.46 0.00 0.00
3 4 7.65 36.70 0.00 0.00
3 5 7.65 55.40 0.00 0.00
4 5 7.65 36.70 0.00 0.00
5 6 12.43 79.96 0.00 0.00
1 8 0.00 41.75 0.00 0.00
7 9 0.00 32.76 0.00 0.00
5 10 0.00 45.27 0.00 0.00
6 11 0.00 37.82 0.00 0.00

Таблиця 3.2. Файл W_TKZ2.dat.

Результати розрахунку несиметричного КЗ

Вихідні дані про мережу

Число вузлів 11 Число гілок 12

Інформація про вузли

N VNOM PN QN PG QG RG XG

1	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	110.00	42.00	22.67	0.00	0.00	0.00	0.00
3	110.00	45.87	27.88	0.00	0.00	0.00	0.00
4	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7	110.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	110.00	28.00	14.00	21.66	22.30	0.00	36.50
9	110.00	0.00	0.00	41.85	21.16	0.00	77.20
10	110.00	15.00	9.30	48.00	36.00	0.00	36.50
11	110.00	0.00	0.00	24.00	18.00	0.00	84.00

Інформація про гілки

IJRXGB KT

1	2	7.13	9.92	0.00	0.00	0.00
1	3	13.95	19.40	0.00	0.00	0.00
2	3	12.40	17.20	0.00	0.00	0.00
2	7	11.43	28.46	0.00	0.00	0.00
3	4	8.35	12.70	0.00	0.00	0.00
3	5	7.65	25.40	0.00	0.00	0.00
4	5	9.45	12.70	0.00	0.00	0.00
5	6	12.43	29.96	0.00	0.00	0.00
1	8	0.00	41.75	0.00	0.00	0.00
7	9	0.00	32.76	0.00	0.00	0.00
5	10	0.00	45.87	0.00	0.00	0.00
6	11	0.00	37.82	0.00	0.00	0.00

Дані про елементи схем зворотної та нульової послідовностей

N XG2 VNOM0 XG0 IJ R0 X0 G0 B0

1	0.00	110.00	0.00	1	2	7.13	27.56	0.00	0.00
2	0.00	110.00	53.80	1	3	13.95	57.40	0.00	0.00
3	0.00	110.00	56.45	2	3	12.40	52.20	0.00	0.00
4	0.00	110.00	0.00	2	7	11.43	68.46	0.00	0.00
5	0.00	110.00	0.00	3	4	7.65	36.70	0.00	0.00
6	0.00	110.00	0.00	3	5	7.65	55.40	0.00	0.00
7	0.00	110.00	0.00	4	5	7.65	36.70	0.00	0.00
8	33.20	110.00	51.34	5	6	12.43	79.96	0.00	0.00
9	70.00	110.00	0.00	1	8	0.00	41.75	0.00	0.00
10	30.00	110.00	58.64	7	9	0.00	32.76	0.00	0.00
11	80.00	110.00	0.00	5	10	0.00	45.27	0.00	0.00

6 11 0.00 37.82 0.00 0.00
Еквівалентні опори схем
зворотної та нульової послідовностей
 $R2 = 12.120$ $X2 = 23.984$
 $R0 = 4.885$ $X0 = 43.375$

РОЗРАХУНОК ОДНОФАЗНОГО КЗ В вузлі 4

IA IR IM ID N
VA VR VM VD IUA IUR
ВУЗОЛ N 1(1)
0.031 -0.120 0.124 -0.769 2(2)
0.069 -0.262 0.271 -0.769 3(3)
-0.100 0.382 0.395 0.769 8(8)
82.966 -8.820 83.433 -1.465 0.000 -0.000
ВУЗОЛ N 2(2)
-0.031 0.120 0.124 0.769 1(1)
0.060 -0.226 0.234 -0.769 3(3)
-0.296 0.288 0.413 0.609 7(7)
81.555 -8.280 81.974 -1.470 -0.268 0.182
ВУЗОЛ N 3(3)
-0.069 0.262 0.271 0.769 1(1)
-0.060 0.226 0.234 0.769 2(2)
-0.034 -0.431 0.433 -0.784 4(4)

-0.114 0.145 0.184 0.666 5(5)
76.921 -6.500 77.195 -1.486 -0.277 0.202
ВУЗОЛ N 4(4)
0.034 0.431 0.433 0.784 3(3)
-0.253 0.578 0.631 0.742 5(5)
71.730 -2.462 71.772 0.000 -0.218 1.010

(Продовження див. на наступній сторінці)

ВУЗОЛ N 5(5)
0.114 -0.145 0.184 -0.666 3(3)
0.253 -0.578 0.631 -0.742 4(4)
-0.173 0.264 0.316 0.696 6(6)
-0.193 0.459 0.498 0.745 10(10)
81.465 -4.719 81.602 -1.513 0.000 -0.000
ВУЗОЛ N 6(6)
0.173 -0.264 0.316 -0.696 5(5)
-0.173 0.264 0.316 0.696 11(11)
91.542 -2.807 91.585 -1.540 0.000 0.000
ВУЗОЛ N 7(7)
0.296 -0.288 0.413 -0.609 2(2)
-0.296 0.288 0.413 0.609 9(9)
93.143 -3.157 93.196 -1.537 -0.000 0.000
ВУЗОЛ N 8(8)
0.100 -0.382 0.395 -0.769 1(1)

-0.324 0.507 0.601 0.700 G
98.901 -4.632 99.009 -1.524 -0.224 0.125
ВУЗОЛ N 9(9)
0.296 -0.288 0.413 -0.609 7(7)
-0.296 0.288 0.413 0.609 G
102.589 6.534 102.797 1.507 0.000 -0.000
ВУЗОЛ N 10(10)
0.193 -0.459 0.498 -0.745 5(5)
-0.323 0.532 0.623 0.707 G
102.510 4.131 102.594 1.531 -0.130 0.074
ВУЗОЛ N 11(11)
0.173 -0.264 0.316 -0.696 6(6)
-0.173 0.264 0.316 0.696 G
101.540 3.754 101.609 1.534 -0.000 0.000

СИМЕТРИЧНІ Складові в вузлі КЗ

НАПРУГИ СТРУМУ

UA UR UM IA IR IM

(1) 71.730 -2.462 71.772 0.218 -1.010 1.033
(2) -26.864 7.001 27.762 0.218 -1.010 1.033
(0) -44.866 -4.539 45.095 0.218 -1.010 1.033

Список літератури

1. 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., доопрац. та допов. – Дніпро : НГУ, 2016. – 600 с
2. Черемісін М.М. Перехідні процеси в системах електропостачання. - Харків: Факт, 2005. - 176 с.
3. Г. Г. Півняк, В. М. Винославський, А. Я. Рибалко, Л. І. Несен. Перехідні процеси в системах електропостачання. Національна гірнична академія України, 2003. - 597 с
4. Перехідні процеси в системах електропостачання: Підручник для вузів. Вид. 2-е, доправ. та доп. / Г.Г. Півняк, В.Н. Винославський, А.Я. Рибалко, Л.И. Несен / За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Вид-во НГА України, 2000. – 597 с.
5. Rudyk A., Semenov A., Kryvinska N., Semenova O. Study of phase and amplitude phase methods for measuring a reactive element quality factor. Measurement, Vol. 187, 2022, 110271, ISSN 0263-2241, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110271>.
6. Semenov, A.; Drevetskyi, V.; Rudyk, A.; Semenova, O.; Komada, P. Developing and Investigating the Analyzers of Kinematic Viscosity and Density of Petroleum Products on Throttle Bridge Transducers. Inventions 2022, 7, 6, ISSN 2411-5134. <https://doi.org/10.3390/inventions7010006>.
7. Теоретичні основи електротехніки. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник / Карпов Ю. О., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В. та ін. під ред. проф. Ю. О. Карпова. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 530 с. Режим доступу: http://publish.vntu.edu.ua/txt/Karpov_TOEPe-?ProtsVLinKolSynLinKilElektTaMagnNelinKola_446-8.pdf
8. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах: навч. посіб. / І.А. Курило, В.П. Грудська, Л.Ю. Спінул, М.А. Щерба. - К.: НТУУ “КПІ”, 2013. – 289 с. Режим доступу: http://toe.fea.kpi.ua/te_sait/posibniki/per_proc.pdf

Навчальне видання

Методичні вказівки

Розрахунок несиметричних коротких замикань в електричних мережах методом симетричних складових до лабораторних, практичних, самостійних робіт та курсових робіт з навчальних дисциплін «Електромагнітні перехідні процеси в електричних системах», «Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах», «Математичні задачі енергетики» для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі:

ВЕПРИК Юрій Миколайович
ЗАГАЙНОВА Олександра Анатоліївна
СЕРДЮКОВА Галина Миколаївна

Відповідальний за випуск Загайнова О. А.
Роботу рекомендував до видання. Борисенко А.М

В авторській редакції

План 2024, поз.409

Підп. до друку _____ Гарнітура Times New Roman

Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.

Електронна версія