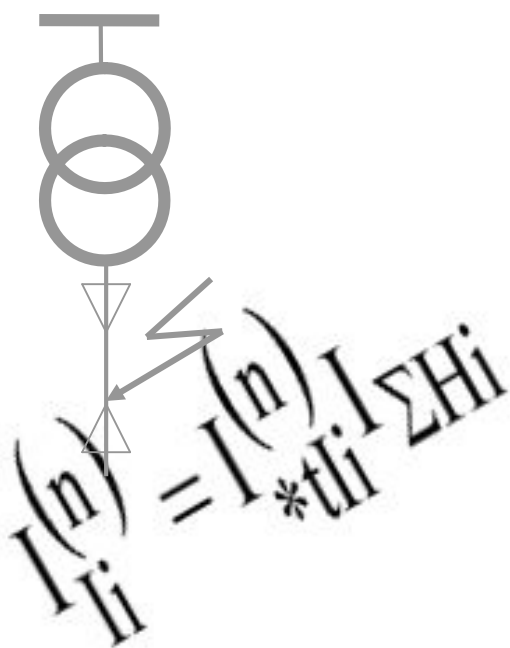


*ПЕРЕШКЕВИЧ Л.Б*

*ДЕМОВ О.Д*

*ІВАНКОВ В.О.*

# ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

Терешкевич Л.Б., Демов О.Д., Іванков В.О.

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В СИСТЕМАХ  
ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ**

Затверджено Вченою радою Вінницького національного технічного університету як навчальний посібник для студентів енергетичних спеціальностей. Протокол № 6 від 25 січня 2006 р.

Вінниця ВНТУ 2007

УДК 621.311  
Т 35

*Рецензенти:*

**Б.С.Рогальський**, доктор технічних наук професор

**В.М.Кутін**, доктор технічних наук професор

**В.І.Нагул**, кандидат технічних наук доцент

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України

**Терешкевич Л.Б., Демов О.Д., Іванков В.О.**

Т35 **Електромагнітні перехідні процеси в системах електроживлення.** Навчальний посібник – Вінниця: ВНТУ, 2007. - 61 с.

В навчальному посібнику містяться основні відомості, які необхідні для розрахунків електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах.

Приведені та продемонстровані на прикладах алгоритми розрахунків аварійних режимів.

Навчальний посібник призначений для студентів електротехнічних спеціальностей і може бути використаний ними в процесі виконання курсових та дипломних проектів.

УДК 621.311

© Л.Терешкевич, О.Демов, В.Іванков, 2007

## Зміст

Вступ .....	4
I ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ .....	5
1.1 Розрахункові умови .....	5
1.2 Про точне і наближене приведення параметрів режиму й елементів системи .....	6
1.3 Системи одиниць, які застосовуються в розрахунках .....	7
1.4 Врахування індивідуальної зміни струмів короткого замикання окремих генерувальних віток .....	7
1.5 Врахування аперіодичної складової струму короткого замикання .....	12
2 РОЗРАХУВАННЯ РЕЖИМІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ .....	13
2.1 Порядок розрахування режимів методом розрахункових кривих .....	13
2.2 Розрахування короткого замикання методом типових кривих .....	17
2.3 Розрахування аварійного режиму аналітичним методом ..	19
2.4 Порядок розрахування короткого замикання методом спрямлених характеристик .....	21
2.5 Врахування навантажень при трифазних пошкодженнях у мережі .....	23
2.6 Розрахування струму короткого замикання в розподільних мережах 0,4 кВ .....	23
3 РОЗРАХУВАННЯ РЕЖИМІВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ .....	25
3.1. Порядок розрахування несиметричного короткого замикання методом розрахункових кривих .....	25
3.2 Порядок розрахування несиметричного аварійного режиму аналітичним методом .....	28
3.3 Обчислення струмів короткого замикання в окремих вітках схеми .....	29
3.5 Обчислення напруг у різних точках схеми .....	30
Додаток А .....	32
Додаток Б .....	56
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ .....	59

## Вступ

Навчальний посібник призначений для студентів, які опановують техніку практичних розрахунків аварійних режимів при однократних поперечних пошкодженнях.

Розрахунки аварійних режимів завжди необхідні для прийняття рішень щодо підвищення надійності електричних систем і місцевих систем електропостачання.

Варто особливо підкреслити, що при проектуванні електричних систем ведеться одночасний розгляд режимів короткого замикання, умов стійкості і нормальних режимів. При цьому може виявитися необхідним врахування суперечливих вимог. Так, вимоги підвищення стійкості системи виявляються більш істотними, ніж задача обмеження величини струмів короткого замикання з метою забезпечення умов роботи електрообладнання розподільних пристроїв. Зокрема, для забезпечення термічної і електродинамічної стійкості елементів систем електроспоживання, потрібно збільшувати реактивні опори зв'язків у системі, але, з метою підвищення запасу стійкості (а виходить, і надійності системи), іноді йдуть на істотне зменшення цих опорів, що, до того ж, дозволяє підвищити і якість електричної енергії в системі при нормальних режимах.

Можна привести ще цілий ряд подібних прикладів. Так, збільшення швидкості і межі підйому збудження синхронних генераторів (сильне регулювання) є ефективним заходом підвищення стійкості роботи енергосистем, хоча і призводить до росту величин струмів короткого замикання. З тією ж метою на довгих електропередачах застосовуються все більш швидкодіючі вимикачі, що призводить до ускладнення умов роботи самих вимикачів, у зв'язку з великими значеннями аперіодичної складової струму короткого замикання в момент вимкнення.

Разом з тим, у вирішенні ряду технічних задач розрахунки струмів короткого замикання мають і самостійне значення.

Навчальний посібник має за мету допомогти студенту при виконанні розрахунків аварійних режимів в електричній мережі при симетричних та несиметричних коротких замиканнях.

Творче оволодіння прийомами практичних розрахунків аварійних режимів немислиме без необхідних знань загальної теорії перехідних процесів. Тому, пропонований посібник не підмінює відповідних підручників чи лекційного матеріалу.

Автори щиро вдячні професору Аввакумову В.Г., автору методичних вказівок до виконання курсових та контрольних робіт з електромагнітних перехідних процесів, які використані при написанні даного навчального посібника, а також студентці групи ЕМ-02 О.Закревській за технічну допомогу в комп'ютерному наборі рукопису.

## Розділ I ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ

Однією з умов отримання правильних результатів розрахунку аварійних режимів, що дозволить, наприклад, вибрати необхідне електрообладнання, є правильне формулювання вихідних умов для розрахувань. Крім цього етапу розрахувань, є етапи складання схем заміщення, розрахування їх параметрів та перетворення до необхідного вигляду.

### 1.1 Розрахункові умови

Розрахунки аварійних режимів при коротких замиканнях необхідні для розв'язання конкретних інженерних задач. При цьому дуже важливим вихідним моментом є чітке визначення розрахункових умов.

*Розрахункові умови - це сукупність умов, на основі яких здійснюється аналіз короткого замикання і які визначаються поставленою метою розрахунку.* До них належать:

**розрахункова схема** - повинна включати всі елементи, які визначають параметри режиму короткого замикання;

**розрахунковий режим**, що передує короткому замиканню, значною мірою впливає на величини струмів аварійного режиму. Так, якщо розрахунок виконується для перевірки апаратури, розрахунковий режим повинен бути таким, при якому струми короткого замикання були б найбільшими. Для цього часто враховують не тільки реальну, але і перспективну потужність та наявність автоматичного регулювання збудження (АРЗ) на всіх генераторах. Для оцінки чутливості релейних захистів потрібно, навпаки, знайти мінімальні, але практично можливі величини струмів короткого замикання.

Отже, для одержання максимальних чи мінімальних величин струмів короткого замикання приймається, відповідно, максимальний чи мінімальний режим роботи системи.

Максимальний режим характеризується такими умовами.

1. Увімкнені всі джерела, що живлять мережу, у якій розглядається коротке замикання.

2. При розрахуванні коротких замикань на землю увімкнені всі трансформатори й автотрансформатори, що нормально працюють із заземленою нейтраллю.

3. Схема ділянки мережі, яка безпосередньо примикає до місця короткого замикання, така, при якій по елементу схеми, що вибирається, проходить максимальний струм.

Мінімальний режим системи характеризується умовами, протилежними максимальному режиму. При цьому приймається вимкнення максимально можливої частини джерел живлення, а схема з'єднання приймається така, при якій по елементу проходить мінімальний струм короткого замикання.

**Розрахункова точка** вибирається так, щоб струм короткого замикання проходив по тих вітках схеми, для яких перевіряється апаратура чи розраховуються параметри релейного захисту. Розрахункова точка повинна забезпечувати, наприклад, для вибору апаратури чи струмопровідних частин, найбільш важкі умови.

**Розрахунковий вид** короткого замикання приймається таким, щоб він забезпечував найбільші чи найменші значення струмів короткого замикання в залежності від поставленої мети розрахунку. Наприклад, для перевірки комутаційних апаратів, трансформаторів струму, струмопровідних частин і т.д. на електродинамічну стійкість приймається, як правило, трифазне коротке замикання. Перевірку елементів на термічну стійкість зазвичай роблять трифазним чи двофазним коротким замиканням в залежності від того, при якому з цих видів ушкодження теплова дія струму короткого замикання найбільша. В окремих випадках струм однофазного короткого замикання може виявитися найбільшим із усіх можливих ушкоджень, і тоді визначальним, при виборі апаратури й інших елементів, буде саме однофазне коротке замикання; оцінку чутливості релейних захистів, як правило, виконують за двофазним коротким замиканням.

**Розрахунковий час** процесу короткого замикання вибирається таким, щоб він якнайбільше відображував дійсний режим роботи елемента, який вибирається, в умовах поставленої задачі. Так, перевірка електродинамічної стійкості елементів проводиться для  $t=0$ , а перевірка вимикачів на струм чи потужність вимкнення, практично, для  $t = 0,1-0,2$  с.

## **1.2 Про точне і наближене приведення параметрів режиму й елементів системи**

У практиці розрахунків струмів короткого замикання, в залежності від необхідної точності, використовуються два підходи при визначенні параметрів елементів і режиму.

Перший з них ґрунтується на використанні середніх напруг окремих ступенів трансформації вихідної схеми. Ряд середніх лінійних напруг, що діють у нас в країні, кВ: 750; 515; 330; 230; 154; 115; 37; 25; 20; 15,75; 13,8; 10,5; 6,3; 3,15; 0,63; 0,525; 0,4.

При цьому зазвичай припускають, що номінальні напруги всіх елементів, які знаходяться на одному ступені, однакові і дорівнюють

відповідним значенням за зазначеною шкалою. Останнє не відноситься до реакторів, які іноді використовуються в установках напругою меншою, ніж їх номінальна напруга. Використання середніх напруг вносить деяку похибку у розрахунок і тому часто іменується розрахунком за наближеним приведенням.

Другий підхід ґрунтується на дійсних напругах, що обумовлюються положенням РПН силових трансформаторів електричної мережі. Оцінка реактивностей елементів у цьому випадку виходить більш точною, у зв'язку з цим сам розрахунок називається розрахунком за точним приведенням.

Аналіз похибок наближеного приведення дозволяє зробити висновок про те, що в сучасних системах, насичених трансформаторами з глибоким регулюванням коефіцієнта трансформації, варто прагнути виконувати розрахунок за точним приведенням.

Рекомендується, виконуючи практичний розрахунок аварійного режиму, відразу обумовлювати прийнятий спосіб визначення параметрів схеми і режиму.

### **1.3 Системи одиниць, які застосовуються в розрахунках**

Найбільшого поширення при практичному виконанні розрахунків короткого замикання набули система відносних одиниць і система іменованих одиниць. Кожна з них має свої безсумнівні переваги, тому студенту необхідно їх засвоїти.

Розрахунки в системі відносних (безрозмірних) одиниць дозволяють представити розв'язання в узагальненому вигляді, додати величинам, які розраховуються, наочності і порівнянності, а також одержати ряд додаткових спрощень обчислювального характеру.

Розрахунки в системі іменованих одиниць добре відображають фізичну сторону явищ та легше сприймаються.

В табл.1.1 та 1.2 показані формули приведення параметрів режиму і елементів енергосистем у найбільш поширених системах одиниць. Приклад розрахування параметрів схеми заміщення наведений в додатку А (приклад А1).

### **1.4 Врахування індивідуальної зміни струмів короткого замикання окремих генерувальних віток**

У процесі розрахування струмів короткого замикання часто всі генератори можуть бути об'єднані в одне еквівалентне джерело живлення (у зв'язку з малим розходженням в дальності щодо місця ушкодження). Такий спосіб називають розрахунком за загальною зміною. При цьому властивості



окремих генераторів, які з'єднуються в еквівалентне джерело, усереднюються. Встановлено, що умови роботи такого "усередненого" генератора завжди визначаються потужним генератором.

Таблиця 1.1 – Формули приведення параметрів режиму

В системі відносних одиниць	В системі іменованих одиниць
За середніми коефіцієнтами трансформації	
$E_{*(\delta)} = \frac{E}{U_{cp(\delta)}} = E_{*(H)}$ $U_{*(\delta)} = \frac{U}{U_{cp(\delta)}} = U_{*(H)}$ $I_{*(\delta)} = \frac{I}{I_{\delta}}$ $S_{*(\delta)} = \frac{S}{S_{\delta}} = \frac{I}{I_{\delta}} = I_{*(\delta)}$ <p>при умові, що <math>U_{cp(\delta)} = U_{cp(H)}</math></p>	$E^{\circ} = E \left( \frac{U_{cp(\delta)}}{U_{cp}} \right), \text{кВ}$ $U^{\circ} = U \left( \frac{U_{cp(\delta)}}{U_{cp}} \right), \text{кВ}$ $I^{\circ} = I \left( \frac{U_{cp(\delta)}}{U_{cp}} \right), \text{кА}$ $S^{\circ} = S, \text{МВА}$ <p>де <math>U_{cp(\delta)}</math> і <math>U_{cp}</math> - середня номінальна напруга базисного ступеня і та, з якої проводиться перерахунок</p>
За дійсними коефіцієнтами трансформації	
$E_{*(\delta)} = \frac{E}{U_{\delta}} = E_{*(H)} \frac{U_H}{U_{\delta}}$ $U_{*(\delta)} = \frac{U}{U_{\delta}} = U_{*(H)} \frac{U_H}{U_{\delta}}$ $I_{*(\delta)} = \frac{I}{I_{\delta}} = I_{*(H)} \frac{I_H}{I_{\delta}}$ $U_{*(\delta)} = \frac{U_{*\delta}}{k_1 \cdot k_2 \dots k_n}$ $S_{*(\delta)} = \frac{S}{S_{\delta}} = S_{*(H)} \frac{S_H}{S_{\delta}}$ <p>де <math>U_{\delta}</math> і <math>I_{\delta}</math> - базисні напруги і струм того ступеня, на якому знаходяться величини, що підлягають приведенню</p>	$E^{\circ} = E(k_1 \cdot k_2 \dots k_n), \text{кВ}$ $U^{\circ} = U(k_1 \cdot k_2 \dots k_n), \text{кВ}$ $I^{\circ} = \frac{I}{k_1 \cdot k_2 \dots k_n}, \text{кА}$ $S^{\circ} = S, \text{МВА}$ <p>де <math>k_1; k_2; k_n</math> - коефіцієнти трансформації в напрямку від базисного ступеня до того, елементи якого підлягають приведенню</p>

Таблиця 1.2 – Формули приведення параметрів схеми

Відносні базисні		
Елемент мережі	Наближене приведення	Точне приведення
Генератор	$x^{*(б)} = x^{*(н)} \frac{S_б}{S_н}$	$x^{*(б)} = x^{*(н)} \frac{S_б}{S_н} \left( \frac{U_н}{U_б} \right)^2$
Трансформатор Автотрансформатор	$x^{*(б)} = \frac{e_к \% S_б}{100 S_н}$	$x^{*(б)} = \frac{e_к \% S_б}{100 S_н} \left( \frac{U_н}{U_б} \right)^2$
Лінія	$x^{*(б)} = x_{o1} \frac{S_б}{U_б^2}$	$x^{*(б)} = x_{o1} \frac{S_б}{U_б^2}$
Реактор	$x^{*(б)} = \frac{x_к \% I_б}{100 I_н} \frac{U_{н.р}}{U_б}$	$x^{*(б)} = \frac{x_к \% I_б}{100 I_н} \frac{U_{н.р}}{U_б}$
Навантаження	$x^{*(б)} = x^{*(н)} \frac{S_б}{S_н}$	$x^{*(б)} = x^{*(н)} \frac{S_б}{S_н} \left( \frac{U_н}{U_б} \right)^2$
Іменовані, Ом		
Елемент мережі	Наближене приведення	Точне приведення
Генератор	$x = x^{*(н)} \frac{U_б^2}{S_н}$	$x = x^{*(н)} \frac{U_н^2}{S_н} \left( \frac{U_б}{U} \right)^2$
Трансформатор Автотрансформатор	$x = \frac{e_к \% U_б^2}{100 S_н}$	$x = \frac{e_к \% U_н^2}{100 S_н} \left( \frac{U_б}{U} \right)^2$
Лінія	$x = x_{o1} \left( \frac{U_б}{U_н} \right)^2$	$x = x_{o1} \left( \frac{U_б}{U} \right)^2$
Реактор	$x = \frac{x_к \% U_{н.р}}{100 \sqrt{3} \cdot I_н} \left( \frac{U_б}{U_н} \right)^2$	$x^{*(б)} = \frac{x_к \% U_{н.р}}{100 \sqrt{3} \cdot I_н} \left( \frac{U_б}{U} \right)$
Навантаження	$x = x^{*(н)} \frac{U_б^2}{S_н}$	$x = x^{*(н)} \frac{U_н^2}{S_н} \left( \frac{U_б}{U} \right)^2$

Якщо потужний генератор має велику електричну віддаленість від точки пошкодження, то його участь в створенні струму короткого замикання може бути значно меншою, ніж участь генератора, що знаходиться поблизу точки короткого замикання. Вказана обставина не має

належного відображення в розрахунку по загальній зміні. Тому, у випадках, коли генерувальні джерела знаходяться в різних умовах щодо місця короткого замикання, розрахунок виконується з урахуванням індивідуальної зміни. Для цього всі джерела живлення поділяються на кілька груп. Доцільно виділити джерела живлення, безпосередньо зв'язані з місцем пошкодження, в одну групу. Іншу групу можуть скласти джерела, що знаходяться, приблизно, в однакових умовах щодо місця короткого замикання.

Джерело великої потужності (система незмінної напруги) завжди виділяється в самостійну групу. Надалі вважається, що струм від кожної зведеної групи джерел живлення до місця короткого замикання незалежний.

Взаємні опори виділених джерел живлення, щодо точки короткого замикання, вираховуються за допомогою коефіцієнтів розподілу  $C_i$ , що виражають частку участі кожної групи джерел живлення в загальному струмі короткого замикання, прийнятому за одиницю. Технічна процедура визначення взаємних опорів (незалежно від вибраної системи одиниць) може бути легко засвоєна з наступного прикладу.

**Приклад 1.1.** В заданій схемі енергосистеми, рис.1.1,а необхідно зробити розрахування коефіцієнтів струморозподілу для всіх джерел живлення (обчислити частки участі окремих джерел у створенні сумарного струму короткого замикання).

Для цього складається схема заміщення електричної системи, рис.1.1,б, і визначається її результуючий опір.

$$x_{рез} = (x_1 \parallel x_2 + x_3) \parallel x_4 + x_5.$$

Схема заміщення приводиться до вигляду, показаному на рис.1.1,г, а опори визначаються як

$$x_6 = x_1 \parallel x_2 + x_3.$$

Розрахування коефіцієнтів струморозподілу:

$$C_{6,5} = \frac{x_e}{x_6}; \quad C_{4,5} = \frac{x_e}{x_4},$$

$$\text{де } x_e = x_6 \parallel x_4.$$

При цьому  $C_{6,5} + C_{4,5} = 1$ . Знайдемо  $C_{1,3}$  і  $C_{2,3}$ .

$$C_{1,3} = \frac{x_1 \parallel x_2}{x_1}; \quad C_{2,3} = \frac{x_1 \parallel x_2}{x_2}; \quad C_{1,3} + C_{2,3} = 1.$$

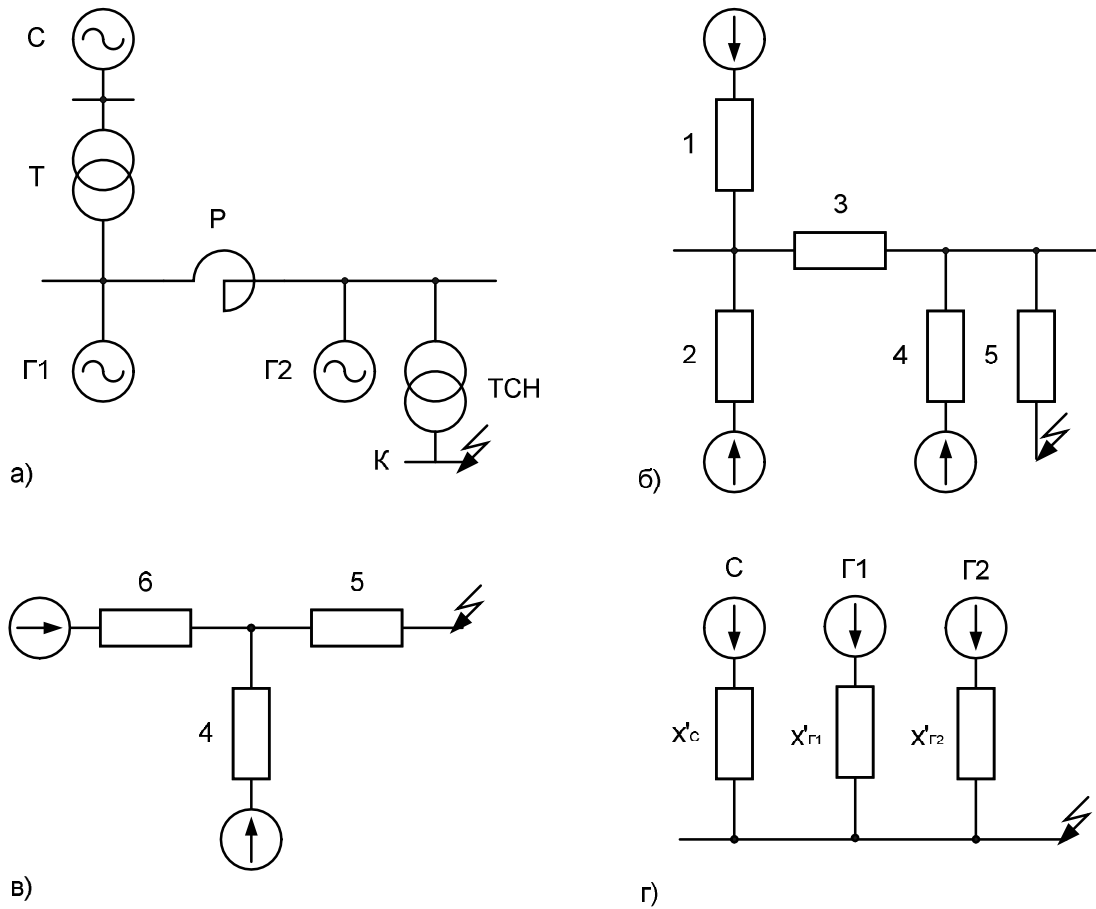


Рисунок 1.1 – Перетворення схеми заміщення для визначення взаємного опору кожної ЕРС відносно точки пошкодження

Розділивши  $C_{6,5}$  пропорційно  $C_{1,3}$  і  $C_{2,3}$  знаходимо:

$$C_{1,5} = C_{6,5} \cdot C_{1,3}; \quad C_{2,5} = C_{6,5} \cdot C_{2,3}.$$

При цьому

$$C_{1,5} + C_{2,5} = C_{6,5}.$$

Знайдені коефіцієнти використовуються для розрахування шуканих взаємних опорів, рис. 1.1,г:

$$x'_c = \frac{x_{рез}}{C_{1,6}}; \quad x'_{Г1} = \frac{x_{рез}}{C_{2,5}}; \quad x'_{Г2} = \frac{x_{рез}}{C_{4,5}}.$$

Коефіцієнт  $C_{ij}$  – коефіцієнт струморозподілу; визначає частку струму генерувальної вітки і струм, який протікає по вітці мережі  $j$ .

## 1.5 Врахування аперіодичної складової струму короткого замикання

Аперіодична складова струму короткого замикання для довільного моменту часу  $t$  обчислюється за виразом:

$$I_{at} = \sqrt{2}I'' e^{-\frac{t}{T_a}} = \sqrt{2}I'' \alpha_t,$$

де  $I''$  - надперехідний струм короткого замикання;

$T_a$  - постійна часу згасання аперіодичного струму короткого замикання, с;

$\alpha_t$  - коефіцієнт згасання аперіодичного струму короткого замикання.

У практичних розрахунках постійна часу:

$$T_a = \frac{X_\Sigma}{\omega r_\Sigma},$$

де  $X_\Sigma$  - сумарний індуктивний опір схеми, знайдений при відсутності всіх активних опорів;

$r_\Sigma$  - сумарний активний опір схеми при відсутності всіх індуктивних опорів.

Коефіцієнт згасання  $\alpha_t$  можна розраховувати або визначати зі спеціального графіка  $\alpha_t = f(T_a, t)$ . Іноді  $T_a$  не розраховують, а приймають такими  $T_a = 0.045 \dots 0.05 \dots 0.05$ , що є характерним для електричної системи високої напруги.

У практичних розрахунках необхідно пам'ятати про швидке згасання аперіодичної складової (0,15...0,2 с), для більш пізніх моментів часу її підрахунок втрачає сенс.

## Розділ 2 РОЗРАХУВАННЯ РЕЖИМІВ ПРИ ТРИФАЗНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ

Розрахування аварійних режимів при симетричних коротких замиканнях виконують методами типових та розрахункових кривих, аналітичним методом і методом спрямлених характеристик. Для кожного з цих методів можна сформулювати порядок розрахування. Нагадаємо, що для розрахування трифазних коротких замикань елементи енергосистеми включаються в схему заміщення своїми опорами і ЕРС прямої послідовності, що відповідають моменту часу перехідного процесу, для якого необхідно визначити параметри аварійного режиму.

При виконанні розрахувань потрібно вільно володіти технікою перетворення схем заміщення до найпростішого виду.

Часто розрахування аварійного режиму при трифазних коротких замиканнях ускладнюється під'єднанням до окремих вузлів електричної мережі джерел живлення нескінченної потужності та узагальненого навантаження або окремих потужних електродвигунів.

### 2.1 Порядок розрахування режимів методом розрахункових кривих

Розрахункові криві є залежністю відносного номінального періодичного струму короткого замикання для різних моментів часу перехідного процесу від розрахункового опору. При практичному користуванні розрахунковими кривими, рис. 2.1 та 2.2 варто мати на увазі особливості їхнього застосування для розрахувань за загальною та індивідуальною змінами. Розрахування за індивідуальною зміною рекомендується виконувати в такому порядку.

1. Складається схема заміщення надперехідного режиму.
2. Вибирається спосіб розрахування – за точним чи за наближеним приведенням.
3. Визначаються довільні базисні умови  $S_6$  (МВА) і  $U_6$  (кВ) і обчислюються приведені базисні напруги окремих ступенів трансформації відповідно до табл. 1.1.
4. Опори всіх елементів схеми заміщення розраховуються у відносних базисних одиницях відповідно до табл. 1.2.
5. Перетворенням схеми заміщення визначається її результуючий опір  $X_{*(6)\Sigma}$ .
6. Вираховується розрахунковий (відносний номінальний) опір схеми заміщення за виразом:

$$X_{\text{розр}} = X_{*(6)\Sigma} \frac{S_{H\Sigma}}{S_6},$$

де  $S_{H\Sigma}$  - сумарна номінальна потужність генераторів, які живлять точку пошкодження, МВА.

7. Для знайденого  $X_{розр}$  і моменту часу, для якого необхідно виконати розрахунок, за розрахунковими кривими визначається відносне значення періодичної складової струму короткого замикання  $I_{*nt}$ .

8. Якщо  $X_{розр} > 3$ , то розрахунковими кривими не користуються, а відносний періодичний струм вважається незмінним у часі і визначається за виразом:

$$I_{*nt} = \frac{1}{X_{розр}}.$$

9. Значення періодичного струму короткого замикання в іменованих одиницях визначається з врахуванням сумарного номінального струму всіх джерел живлення  $I_{H\Sigma}$ :

$$I_{nt} = I_{*nt} \cdot I_{H\Sigma}, \text{ кА},$$

$$\text{де } I_{H\Sigma} = \frac{S_{H\Sigma}}{\sqrt{3}U_{ср.н.}}, \text{ кА};$$

$U_{ср.н.}$  - середня номінальна (міжфазна) напруга того ступеня трансформації, на якому знаходиться точка короткого замикання.

10. При необхідності враховується аперіодична складова струму короткого замикання для відповідного моменту часу -  $I_{at}$ .

11. Повний струм короткого замикання для відповідного моменту часу визначається за виразом:

$$I_{к.з.т} = \sqrt{I_n^2 + I_{at}^2}, \text{ кА},$$

(для часу  $t > 0,2$  с повний струм короткого замикання можна прийняти рівним його періодичній складовій).

При розрахуванні за індивідуальною зміною порядок дій за першими п'яти пунктами залишається таким самим, а подальша послідовність розрахувань така.

6. Визначаються коефіцієнти розподілу окремих джерел живлення (див. приклад 1.1).

7. Обчислюються відносні базисні взаємні опори окремих генерувальних джерел  $X_{*(\sigma)i}$  під'єднаних, безпосередньо, до точки короткого замикання (як у розглянутому прикладі 1.1).

8. Визначаються розрахункові опори окремих генерувальних віток, (крім вітки системи) за виразом:

$$X_{розр i} = X_{*(\sigma)i}^i \frac{S_{H\Sigma i}}{S_{\sigma}},$$

де  $S_{н\Sigma i}$  - сумарна номінальна потужність генераторів  $i$ -ої вітки.

9. Для знайдених  $X_{розр}$  і окремих джерел (крім системи) для відповідного моменту часу за розрахунковими кривими визначаються відносні періодичні струми кожного джерела окремо.

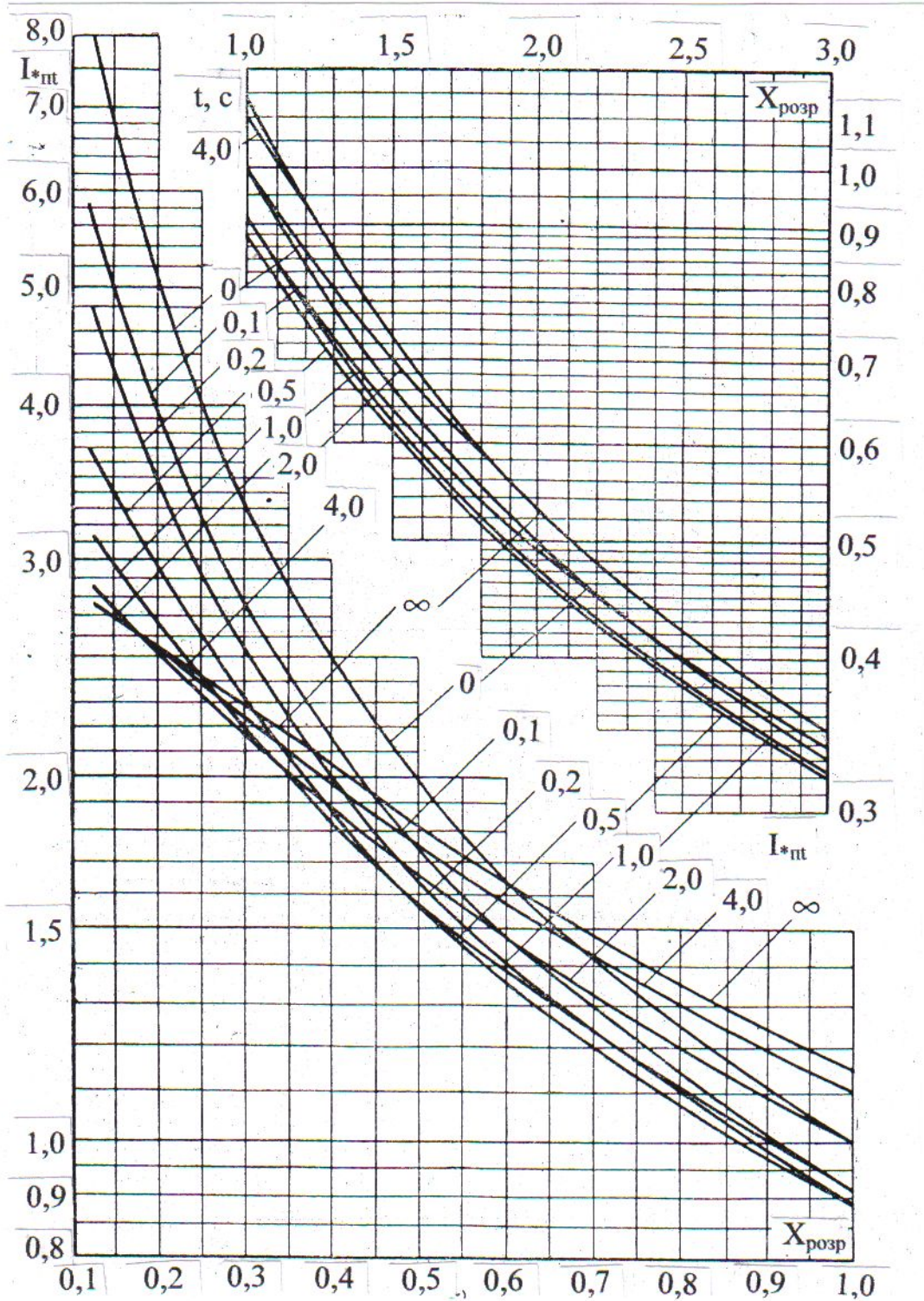


Рисунок 2.1 – Розрахункові криві для турбогенератора середньої потужності



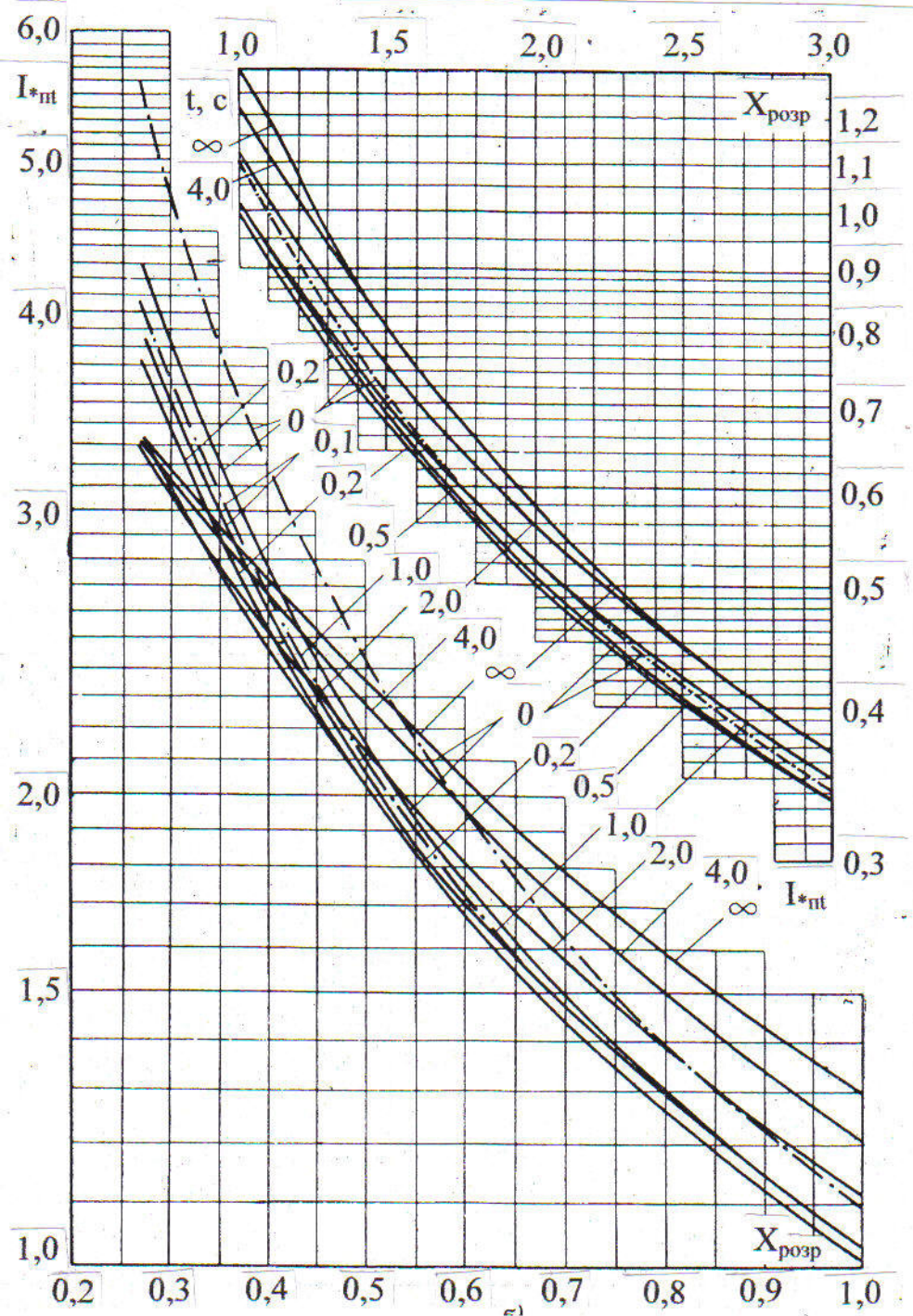


Рисунок 2.2 – Розрахункові криві для гідрогенератора середньої потужності (для генераторів з демпферними обмотками  $X_{розр}$  має бути збільшеним на 0,07; при цьому для  $t \leq 0,1c$  слід користуватися штрихпунктирними кривими)

10. Визначаються значення періодичного струму окремих джерел в іменованих одиницях:

$$I_{nti} = I_{*nti} I_{H\Sigma i},$$

де  $I_{H\Sigma i} = \frac{S_{H\Sigma i}}{\sqrt{3}U_{cp,n}}$  сумарний номінальний струм  $i$ -ої генерувальної

вітки.

11. Для системи періодичний струм в іменованих одиницях (незмінний у часі) розраховується за виразом:

$$I_{п.сист} = \frac{I_б}{X_{*(б)с}}, \text{ кА,}$$

де  $I_б$  - базисний струм на тому ступені трансформації, де знаходиться місце короткого замикання, кА;

$X_{*(б)с}$  - відносний базисний опір вітки схеми, де генерувальне джерело – система.

12. Визначається сумарний періодичний струм короткого замикання як арифметична сума складових окремих джерел для відповідного моменту часу.

13. При необхідності враховується аперіодичний струм і оцінюється повний струм короткого замикання так само, як і при розрахуванні за загальною зміною.

В розглянутих розрахунках методом розрахункових кривих була використана система відносних одиниць. Однак, розрахункові криві можуть бути використані при представленні параметрів системи і в інших системах одиниць.

## 2.2 Розрахування короткого замикання методом типових кривих

Типові криві, рис. 2.3, використовуються для визначення діючого значення періодичної складової струму короткого замикання для моментів

часу  $t$ ,  $t \leq 3с$ , і є сімейством залежностей  $\frac{I_{пт}}{I_Г''} = f(t)$  при  $\frac{I_Г''}{I_{Г.ном}} = var$ , а

також додаткових залежностей  $\frac{I_{пт\Sigma}}{I_Г''} = f\left(\frac{I_{пт}}{I_Г''}\right)$  при  $\frac{I_Г''}{I_Г''} = var$ , де  $I_Г''$ ,  $I_{пт}$  -

надперехідний струм і періодична складова струму для моменту часу  $t$  генерувальної вітки;  $I_{Г.ном}$  - номінальний струм джерела, приведений до

напруги ступеня короткого замикання,  $I_{Г.ном} = \frac{S_{Г.ном}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}}$ . Такими

залежностями користуються при розрахуванні схем з двостороннім

живленням короткого замикання (від генератора або групи генераторів, синхронного компенсатора або двигуна і електричної системи). Віддаленість точки короткого замикання від джерела оцінюється відношенням  $\frac{I_{\Gamma}''}{I_{\Gamma.\text{НОМ}}}$  (при  $\frac{I_{\Gamma}''}{I_{\Gamma.\text{НОМ}}} \leq 1$   $I_{\Gamma}'' = I_{\text{пт}} = I_{\infty}$ ).

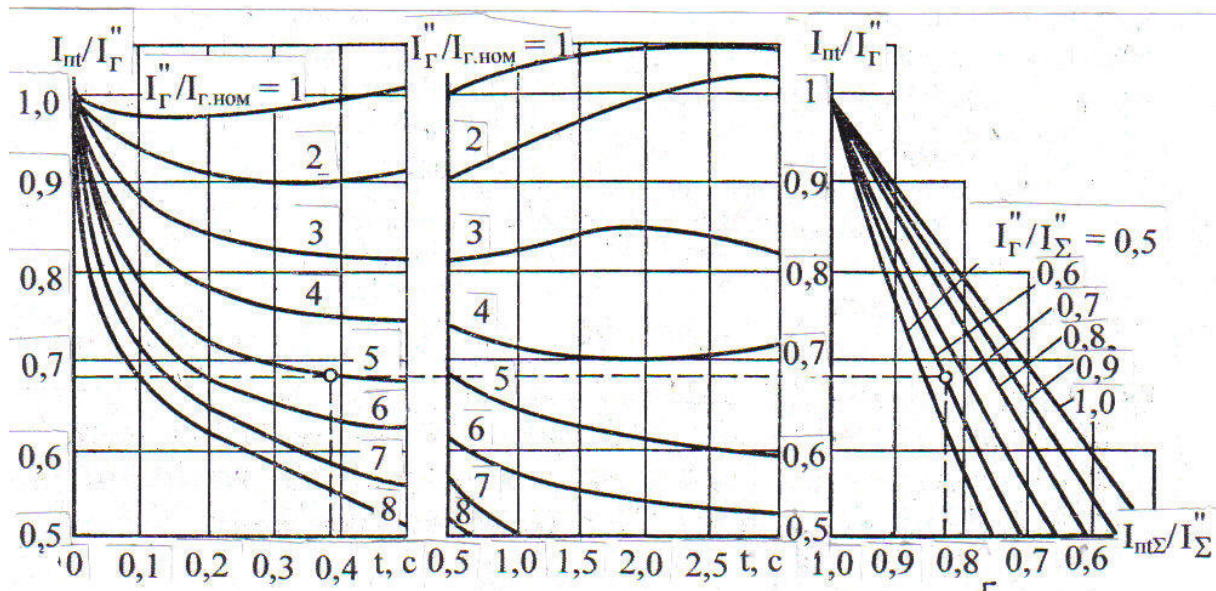


Рисунок 2.3 – Типові криві для потужних синхронних машин

Для генерувальної вітки незалежного живлення точки короткого замикання періодичну складову струму визначають в такій послідовності (для випадків, коли розрахування проводиться як в іменованих, так і відносних одиницях):

1. Складається схема заміщення короткозамкнутого кола.
2. Розраховується результуючий опір  $X_{\Sigma}$  або  $X_{*\Sigma}$  до точки короткого замикання.
3. Визначається надперехідний струм  $I_{\Gamma}''$  в точці короткого замикання від синхронної машини:

$$I_{\Gamma}'' = \frac{E_{\Sigma}''}{\sqrt{3} \cdot X_{\Sigma}} ; \quad I_{\Gamma}'' = \frac{E_{*\Sigma}''}{\sqrt{3} \cdot X_{*\Sigma}} I_{\text{б}}, \text{ кА.}$$

4. Оцінюється електрична віддаленість точки короткого замикання,  $\frac{I_{\Gamma}''}{I_{\Gamma.\text{НОМ}}}$ .

5. За типовими кривими на основі відомого відношення  $\frac{I_{\Gamma}''}{I_{\Gamma.\text{НОМ}}}$  і моменту часу  $t$  визначається відношення  $\left(\frac{I_{\text{пт}}}{I_{\Gamma}''}\right)_t$ .

6. Визначається періодична складова струму короткого замикання за формулою:

$$I_{\text{пт}} = \left(\frac{I_{\text{пт}}}{I_{\Gamma}''}\right)_t I_{\Gamma}''.$$

### 2.3 Розрахування аварійного режиму аналітичним методом

Розрахунки аналітичним методом можна проводити в будь-якій системі одиниць. Наприклад, при використанні системи іменованих одиниць корисно пам'ятати такий порядок розрахувань.

1. Складається схема заміщення короткозамкнутого кола з урахуванням навантажень.

2. Вибирається спосіб розрахувань за точним чи за наближеним приведенням.

3. Вибирається основний (базисний) ступінь напруги.

4. Відповідно до табл. 1 обчислюються приведені до базисної напруги ЕРС окремих джерел живлення, причому вихідні значення відносних номінальних ЕРС джерел живлення (наприклад, для надперехідного режиму) можна розрахувати за виразом:

$$E_*'' = U_{*(H)} + I_{*(H)} X_d'' \sin \varphi_H,$$

де  $U_{*(H)}$ ;  $I_{*(H)}$  - відповідно, відносна номінальна напруга і струм джерела живлення точки короткого замикання;

$\varphi_H$ - кут між векторами струму і напруги в режимі, що передуює короткому замиканню;

$X_d''$  - надперехідний індуктивний опір синхронного генератора по поздовжній осі.

Іноді в практичних розрахунках ЕРС не розраховують, а користуються даними, наведеними в табл.2.1.

Таблиця 2.1 – Відносні номінальні дані основних джерел живлення точки короткого замикання

Найменування джерел живлення	X"	E"
Узагальнене навантаження	0,35	0,85
Турбогенератори	0,125	1,08
Гідрогенератори із заспокійливими обмотками	0,2	1,13
Гідрогенератори без заспокійливих обмоток	0,27	1,18
Синхронні компенсатори	0,2	1,2
Синхронні електродвигуни	0,2	1,1
Асинхронні електродвигуни	0,2	0,9

5. Відповідно до табл. 1.2 визначаються приведені до базисної напруги опори елементів схеми заміщення в Омах.

6. Обчислюється приведені значення результуючого опору схеми заміщення  $X_{\Sigma}$ .

7. Визначається приведені до базисної напруги значення результуючої ЕРС схеми заміщення  $E_{\Sigma}$ .

8. Розраховується періодичний струм короткого замикання (на основному ступені напруги) за виразом:

$$I = \frac{E_{\Sigma}}{\sqrt{3}X_{\Sigma}}, \text{ кА.}$$

9. При необхідності, враховується аперіодична складова струму короткого замикання.

Аналітичне розрахування струмів короткого замикання в системі відносних одиниць зручно виконувати в такий спосіб.

1. Складається схема заміщення короткозамкнутого кола із врахуванням навантажень.

2. Вибирається спосіб розрахунку - за точним чи за наближеним приведенням.

3. Вибираються довільні базисні умови  $S_6$  та  $U_6$ , обчислюються приведені базисні напруги окремих ступенів схеми.

4. Обчислюються, відповідно до табл.1.1, ЕРС усіх джерел живлення, приведені до базисної напруги.

5. Визначаються відносні базисні опори елементів схеми заміщення.

6. Визначаються результуючі базисні ЕРС і опір схеми заміщення:

$$E_{*(6)\Sigma} \text{ та } X_{*(6)\Sigma}.$$

7. Визначається періодична складова струму короткого замикання у відносних одиницях:

$$I_{*n(\sigma)} = \frac{E_{*(\sigma)\Sigma}}{X_{*(\sigma)\Sigma}}.$$

8. Періодичний струм в іменованих одиницях обчислюється за виразом:

$$I_n = I_{*n(\sigma)} I_\sigma, \text{ кА},$$

де  $I_\sigma$  - базисний струм на тому ступені трансформації, на якому розглядається коротке замикання, кА.

9. При необхідності враховується аперіодична складова струму короткого замикання.

Приклад розрахування режиму короткого замикання аналітичним методом наведено в додатку А (приклад А2).

## **2.4 Порядок розрахування короткого замикання методом спрямлених характеристик**

Метод спрямлених характеристик (метод Ю.К. Баскакова, С.А.Ульянова) заснований на використанні розрахункових параметрів генераторів  $E_t$  і  $X_t$ , що не залежать від зовнішньої реактивності і визначають періодичну складову струму короткого замикання для відповідного моменту часу  $t$ . Ці розрахункові величини визначаються за спеціальними кривими для типових генераторів, рис. 2.4.

Алгоритм обчислень за цим методом такий:

1. Визначаються  $E_t$  і  $X_t$  генераторів без АРЗ, які живлять точку короткого замикання.

2. На основі аналізу схеми попередньо намічаються можливі режими роботи генераторів з АРЗ: режим збільшення збудження або режим номінальної напруги.

3. Визначаються  $E_t$  і  $X_t$  генераторів з АРЗ, що беруть участь у схемі.

4. З врахуванням п.2 складається схема заміщення мережі, причому навантаження вводяться своїми параметрами для сталого режиму.

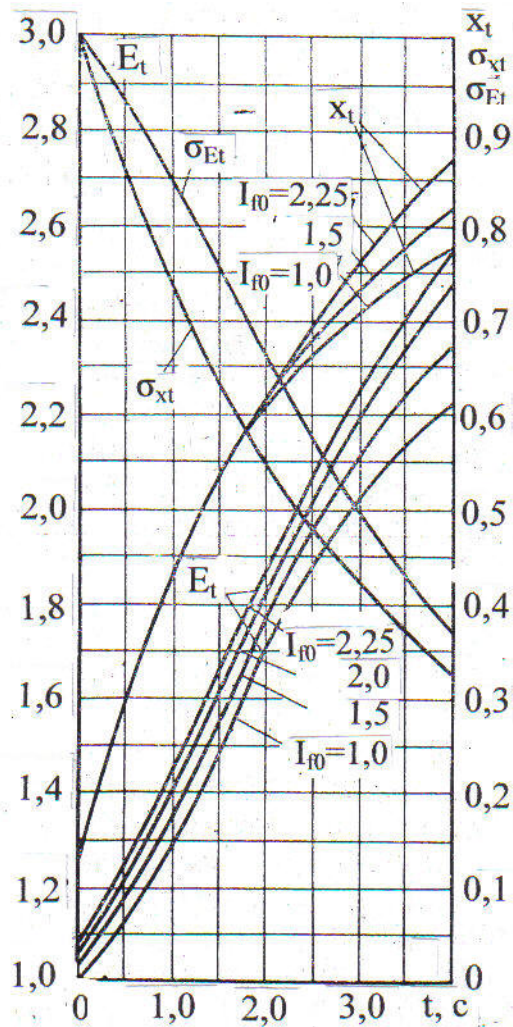
5. Вибираються базисні умови  $S_\sigma$  і  $U_\sigma$ .

6. Виражаються опори і ЕРС схеми заміщення у відносних одиницях при вибраних базисних умовах.

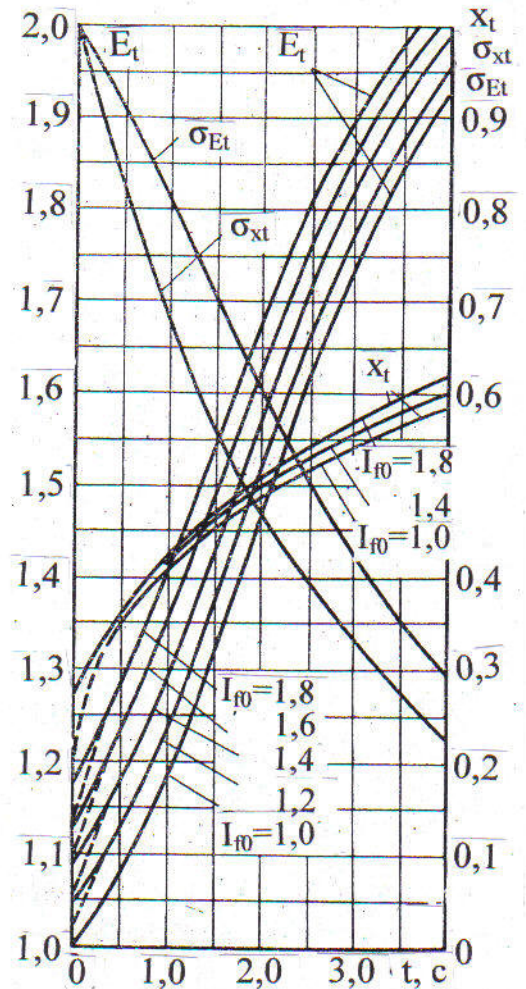
7. Спрощенням схеми знаходяться результуючі ЕРС і опір  $X_{*(\sigma)\Sigma}$  схеми заміщення.

8. Визначається відносний базисний струм короткого замикання для відповідного моменту часу.





а)



б)

Рисунок 2.4 – Криві для визначення розрахункових  $E_t$  та  $X_t$  генераторів середньої потужності з АРЗ:

а – для турбогенератора;

б – для гідрогенератора (при малому часі для гідрогенератора з демпферними обмотками – штрихові лінії)

9. Зворотним розгортанням схеми знаходяться відносні базисні струми у вітках генераторів з АРЗ і напруги у вузлах їх під'єднання.

10. Виявляється правильність прийнятих раніше режимів роботи генераторів з АРЗ за номінальною напругою чи за критичним струмом (для цього попередньо номінальна напруга і критичний струм приводять до базисних умов, або, визначені в п. 9, відносні базисні напруги і струми генераторів переводять у відносні номінальні величини).

11. Якщо намічені на початку розрахування режими генераторів з АРЗ виявилися неправильними, їх необхідно змінити і виконати розрахування заново.

12. Після завершення розрахунку здійснюється перехід від відносних базисних величин до іменованих величин.

## **2.5 Врахування навантажень при трифазних пошкодженнях у мережі**

Вплив навантаження при трифазному короткому замиканні може виявлятися по-різному, в залежності від електричної далекості точки пошкодження, від місця під'єднання навантаження і моменту часу перехідного процесу, для якого виконується розрахунок. За певних умов навантаження може не тільки підживлювати точку короткого замикання, але і розвантажувати її (тобто струм навантаження може входити в результуючий струм короткого замикання зі знаком мінус).

Встановлено, що в початковий момент перехідного процесу узагальнене навантаження можна приблизно характеризувати надперехідною реактивністю і ЕРС, величини яких при повній робочій потужності навантаження (МВА) і середній номінальній напрузі в місці її приєднання складають:

$$X_{\text{нав}}'' = 0,35, \quad E_{\text{нав}}'' = 0,85.$$

Окремі великі асинхронні двигуни варто враховувати відносним номінальним опором  $X''=0,2$ .

Величини відносної ЕРС окремих синхронних двигунів залежать від їх збудження і повинні визначатися кожного разу. У розрахуванні впливу навантаження варто пам'ятати про надзвичайно швидке згасання струму двигунів.

Вплив навантаження в сталому режимі враховують його параметрами  $X_{\text{нав}}=1,2$ ;  $E_{\text{нав}}=0$ , причому опір віднесений до повної (МВА) робочої потужності навантаження і середньої номінальної напруги ступеня, де приєднане дане навантаження.

## **2.6 Розрахування струму короткого замикання в розподільних мережах 0,4 кВ**

Розподільні мережі 0,4 кВ характеризуються значною віддаленістю від джерел живлення. При коротких замиканнях періодичну складову струму можна вважати незмінною. Розрахунки проводять виходячи з того, що напруга на шинах ВН понижувальних трансформаторів залишається незмінною.



Розрахування струму короткого замикання в мережах 0,4 кВ прийнято проводити в іменованих одиницях. Параметри схеми і режиму приводяться до напруги 0,4 кВ.

На величину струму трифазного короткого замикання впливають перехідні опори комутаційних апаратів, опори обмоток силових та вимірювальних трансформаторів, збірних шин, магістральних та розподільних шинопроводів. Розрахування струму короткого замикання в розподільчій мережі 0,4 кВ можна виконувати, дотримуючись такого алгоритму.

1. Складається схема заміщення, в яку вводять активні та індуктивні опори всіх елементів, що обмежують струм короткого замикання.

2. Розраховуються параметри схеми в іменованих одиницях, приведених до напруги 0,4 кВ.

3. Перетворюється схема заміщення та визначаються сумарні опори кола короткого замикання -  $R_{\Sigma}$  та  $X_{\Sigma}$ .

4. Визначається повне діюче значення періодичної складової струму трифазного короткого замикання.

$$I'' = \frac{U_{\delta} \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}}, \text{ кА.}$$

5. Оцінюється ударний струм короткого замикання.

$$i_y = k_y \sqrt{2} I''.$$

Приклад із розрахунку струму трифазного короткого замикання в розподільчій мережі 0,4 кВ наведена в додатку А (приклад А4).

### Розділ 3 РОЗРАХУВАННЯ РЕЖИМІВ ПРИ НЕСИМЕТРИЧНИХ КОРОТКИХ ЗАМИКАННЯХ

Режими при несиметричних коротких замиканнях розраховуються тими ж методами (аналітичним, методами розрахункових або типових кривих) і в тих же системах одиниць, що і при трифазних коротких замиканнях. Принциповою відмінністю є те, що розрахування несиметричних аварійних режимів виконуються в координатах симетричних складових, у той час, як розрахунки при трифазних коротких замиканнях ведуться у фазних координатах. У зв'язку з цим, необхідно вільно володіти методом симетричних складових, уміти складати і перетворювати до найпростішого виду схеми заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей.

При обчисленні реактивностей елементів енергосистем у схемах різних послідовностей необхідно пам'ятати, що опори для струмів усіх послідовностей тільки статичних елементів, що не мають значної індуктивності між фазами, можуть бути однакові. До таких елементів можна віднести реактори, групу з однофазних трансформаторів, у яких обмотка тієї напруги, де розглядається коротке замикання, з'єднана зіркою з заземленою нейтраллю, а інша – трикутником. Опори для струмів прямої і зворотної послідовностей однакові тільки в статичних елементах з рівними для усіх фаз власними і взаємними опорами (транспоновані лінії електропередач, трансформатори, автотрансформатори). В електричних машинах, де є частини, що обертаються, опори для струмів усіх послідовностей різні.

Практичне обчислення режимів при несиметричних коротких замиканнях здійснюється на основі правила еквівалентності прямої послідовності, яке полягає в наступному. *Струм прямої послідовності при будь-якому несиметричному замиканні може бути визначеним як струм трифазного пошкодження в точці, що віддалена від дійсної точки короткого замикання на додатковий опір,  $X_{\text{доп}}$ , який не залежить від параметрів схеми прямої послідовності, а визначається лише опорами струмам зворотної та нульової послідовностей.*

#### **3.1. Порядок розрахування несиметричного короткого замикання методом розрахункових кривих**

Якщо розрахування короткого замикання виконується за загальною зміною, то необхідно виконати таку послідовність дій.

1. Складаються схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей, причому схема прямої послідовності повинна відповідати надперехідному режиму.

2. Вибирається спосіб розрахування – за точним чи за наближеним приведенням.

3. Вибираються довільні базисні умови  $S_{\delta}$  (МВА),  $U_{\delta}$  (кВ) і обчислюються приведені базисні напруги окремих ступенів відповідно до табл. 1.1.

4. Опори елементів схем заміщення виражаються у відносних одиницях при обраних базисних умовах відповідно до табл. 1.2.

5. Перетворенням схем заміщення визначаються відносні базисні результуючі опори прямої  $X_{*(\delta)I}$ , зворотної  $X_{*(\delta)II}$  і нульової  $X_{*(\delta)0}$  послідовностей.

6. Визначається розрахунковий опір схеми заміщення прямої послідовності за виразом:

$$X_{\text{розр.I}} = X_{*(\delta)I} \frac{S_{\Sigma H}}{S_{\delta}},$$

де  $S_{\Sigma H}$  - сумарна номінальна потужність генераторів, які живлять точку короткого замикання, МВА.

7. Визначається розрахунковий опір несиметричного короткого замикання за виразом:

$$X_{\text{розр}}^n = X_{\text{розр.I}} \left( 1 + \frac{X_{\text{дод}}^n}{X_{*(\delta)I}} \right),$$

де  $X_{\text{дод}}^{(n)}$  - додатковий опір, що характеризує заданий несиметричний режим і визначається за табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення додаткового опору і коефіцієнта пропорційності для різних видів коротких замикань

Вид короткого замикання	$X_{\text{дод}}^{(n)}$	$m^{(n)}$
Трифазне	0	1
Двофазне	$X_{*(\delta)II}$	$\sqrt{3}$
Однофазне	$X_{*(\delta)II} + X_{*(\delta)0}$	3
Двофазне на землю	$\frac{X_{*(\delta)II} X_{*(\delta)0}}{X_{*(\delta)II} + X_{*(\delta)0}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{*(\delta)II} X_{*(\delta)0}}{(X_{*(\delta)II} + X_{*(\delta)0})^2}}$

8. Для знайденого  $X_{\text{розр}}^{(n)}$  і відповідного моменту часу, наприклад, за розрахунковими кривими, визначається відносно номінальне значення періодичного струму прямої послідовності  $I_{*I}^{(n)}$  заданого несиметричного короткого замикання (якщо  $X_{\text{розр}} > 3$ , то  $I_{*I}^{(n)} = 1 / X_{\text{розр}}^{(n)}$ ).

9. Визначається періодичний струм прямої послідовності для заданого часу  $I_{It}^{(n)}$  в іменованих одиницях за виразом:

$$I_{It}^{(n)} = I_{*I}^{(n)} I_{\Sigma H}, \quad \text{кА},$$

$$\text{де } I_{\Sigma H} = \frac{S_{\Sigma H}}{\sqrt{3} U_{\text{ср.н.}}}, \quad \text{кА}.$$

10. Періодичний струм несиметричного короткого замикання пропорційний струму прямої послідовності і визначається за виразом:

$$I_{nt}^{(n)} = m^{(n)} I_{It}^{(n)},$$

де  $m^{(n)}$  - коефіцієнт пропорційності, який визначається для різних видів короткого замикання за табл. 3.1.

11. При необхідності, аперіодичний струм визначається і враховується, як указано в розд. 1.5.

Розрахування за індивідуальною зміною пп.1-5 такі ж, як і за загальною зміною. Подальші обчислення виконуються в такій послідовності.

6. Розрахувавши коефіцієнти розподілу, визначаються відносні базисні взаємні опори окремих генерувальних віток схеми заміщення прямої послідовності  $X'_{*(6)i}$ .

7. Визначаються розрахункові опори окремих джерел живлення за виразом:

$$X_{\text{розр},i}^{(n)} = \left( X'_{*(6)i} + X_{\text{доп}}^{(n)} \right) \frac{S_{\Sigma H i}}{S_{\delta}},$$

$$\left( \text{для системи } X_{\text{розр.сист}}^{(n)} = X'_{*(6)\text{сист}} + X_{\text{доп}}^{(n)} \right),$$

де  $X'_{*(6)i}$  - взаємний відносний базисний опір і-ої вітки;

$X_{\text{доп}}^{(n)}$  - додатковий опір, визначений для даної групи джерел живлення за табл. 3.1;

$S_{\Sigma H i}$  - сумарна номінальна потужність генераторів і-ої генерувальної вітки, МВА.

8. За знайденими  $X_{\text{розр},i}^{(n)}$  і для відповідних моментів часу за розрахунковими кривими визначаються відносні номінальні значення

періодичного струму прямої послідовності окремих генерувальних віток  $I_{*i}^{(n)}$ . Для віток, у яких  $X_{розр.i}^{(n)} > 3$ ,

$$I_{*i}^{(n)} = \frac{1}{X_{розр.i}^{(n)}}.$$

9. Знайдені відносні номінальні струми прямої послідовності окремих груп переводяться в систему іменованих одиниць за виразом:

$$I_{i}^{(n)} = I_{*i}^{(n)} I_{\Sigma Ni}, \text{ кА},$$

де  $I_{\Sigma Ni}$  - сумарний номінальний струм  $i$ -го джерела, кА.  
Для системи:

$$I_{\text{сист}}^{(n)} = \frac{I_{\text{б}}}{X_{розр.сист}^{(n)}}, \text{ кА},$$

де  $I_{\text{б}}$  - приведений до ступеня пошкодження базисний струм, кА.

10. Визначається сумарний струм прямої послідовності в місці короткого замикання від усіх джерел,  $I_{\text{ит}}^{(n)}$ .

11. Визначається повний періодичний струм несиметричного короткого замикання за виразом:

$$I_{\text{нт}}^{(n)} = m^{(n)} I_{\text{ит}}^{(n)}, \text{ кА},$$

де  $m^{(n)}$  - коефіцієнт пропорційності, який наведений в табл. 3.1.

Приклад розрахування однофазного короткого замикання за розрахунковими кривими наведено в додатку А (приклад А3).

### **3.2 Порядок розрахування несиметричного аварійного режиму аналітичним методом**

Розрахування несиметричного короткого замикання аналітичним методом можна проводити в будь-якій системі одиниць. Приведемо порядок розрахування в системі іменованих одиниць.

1. Складаються схеми заміщення прямої, зворотної і нульової послідовностей.

2. Вибирається спосіб розрахування - за точним чи за наближеним приведенням.

3. Приймається основний (базисний) ступінь напруги.

4. Відповідно до табл. 1.1 розраховуються приведені до базисної напруги ЕРС джерел живлення в схемі заміщення прямої послідовності (визначення дійсних ЕРС для початкового моменту часу див. табл. 2.1).

5. Відповідно до табл. 1.2 визначаються приведені до базисної напруги опори елементів схем заміщення окремих послідовностей.

6. Розраховуються приведені результуючі опори прямої  $X_{I\Sigma}$ , зворотної  $X_{II\Sigma}$  і нульової  $X_{0\Sigma}$  послідовностей.

7. Визначається приведена результуюча ЕРС схеми заміщення прямої послідовності  $E_{\Sigma}$ , кВ.

8. Періодичний струм прямої послідовності несиметричного короткого замикання визначається за виразом:

$$I_I^{(n)} = \frac{E_{\Sigma}}{\sqrt{3}(X_{I\Sigma} + X_{\text{дод}}^{(n)})}, \text{ кА.}$$

9. Періодичний струм несиметричного короткого замикання розраховується за виразом:

$$I^{(n)} = m^{(n)} I_I^{(n)}, \text{ кА,}$$

де  $m^{(n)}$  - коефіцієнт пропорційності, який визначений в табл. 3.1; при цьому значення  $X_{II}$  і  $X_0$  беруться також у системі іменованих одиниць.

Приклад розрахування однофазного короткого замикання аналітичним методом наведено в додатку А (приклад А3).

### **3.3 Обчислення струмів короткого замикання в окремих вітках схеми**

Для визначення струму короткого замикання в будь-якій вітці схеми необхідно спочатку визначити струми прямої, зворотної і нульової послідовностей, що проходять по цій вітці, в еквівалентних схемах заміщення відповідних послідовностей, а потім їх підсумовувати графічно чи аналітично з урахуванням знаків, відомих з теорії несиметричних коротких замикань.

Струми прямої, зворотної і нульової послідовностей у вітках обчислюються шляхом розподілу струму, який протікає до місця короткого замикання, по відповідних елементах схеми заміщення кожної послідовності на основі коефіцієнтів розподілу. У схемі прямої послідовності розподіл струму прямої послідовності проводиться з врахуванням того, що напруга прямої послідовності  $U_{AI}^k$  у місці короткого замикання не дорівнює нулю.

Струм у вітці, яка містить ЕРС, визначається так:

$$I_{AI}^{(n)} = \frac{E_A^n - U_{AI}^k}{X_I^n},$$

де  $E_A^n$ ,  $I_{AI}^n$  - ЕРС і струм прямої послідовності для вітки  $n$ , опір якої  $X_I^n$ .

У схемах зворотної і нульової послідовностей розподіл струмів відповідних послідовностей у місці пошкодження можна зробити також за виразами:

$$I_{AII}^{(n)} = \frac{0 - U_{AII}^k}{X_{II}^n}, \quad \text{та} \quad I_{A0}^{(n)} = \frac{0 - U_{A0}^k}{X_0^n},$$

де  $I_{AII}^{(n)}$ ,  $I_{A0}^{(n)}$  - струми зворотної і нульової послідовностей у вітках  $X_{II}^n$  і  $X_0^n$ ;

$U_{AII}^k$ ,  $U_{A0}^k$  - напруги зворотної і нульової послідовностей у місці короткого замикання.

Подальший розподіл струмів можна виконувати поступовим розгортанням відповідних схем заміщення, з використанням коефіцієнтів розподілу.

### 3.5 Обчислення напруг у різних точках схеми

Для визначення фазних напруг у будь-якій точці схеми необхідно спочатку визначити напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей для цієї точки в схемах заміщення відповідних послідовностей, а потім їх просумувати графічно з урахуванням знаків, відомих з теорії несиметричних коротких замикань.

Напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей у вузлі, для якого необхідно виконати розрахунок, обчислюються графічно чи аналітично за виразами:

$$\dot{U}_{AI}^N = \dot{U}_{AI}^k + jI_{AI}^{kN} X_I^{kN}$$

$$\dot{U}_{AII}^N = \dot{U}_{AII}^k + jI_{AII}^{kN} X_{II}^{kN}$$

$$\dot{U}_{A0}^N = \dot{U}_{A0}^k + jI_{A0}^{kN} X_0^{kN}$$

де  $\dot{U}_{AI}^N$ ;  $\dot{U}_{AII}^N$ ;  $\dot{U}_{A0}^N$  - напруги окремих послідовностей у вузлі N;  
 $\dot{U}_{AI}^k$ ;  $\dot{U}_{AII}^k$ ;  $\dot{U}_{A0}^k$  - те ж, у точці короткого замикання;  
 $\dot{i}_{AI}^{kN}$ ;  $\dot{i}_{AII}^{kN}$ ;  $\dot{i}_{A0}^{kN}$  - струми окремих послідовностей, які проходять по опорах  $X_I^{kN}$ ,  $X_{II}^{kN}$ ,  $X_0^{kN}$ , між вузлом короткого замикання k і вузлом N.

Якщо в опори  $X_I^{kN}$ ,  $X_{II}^{kN}$ ,  $X_0^{kN}$  входять і реактивності трансформаторів, то потрібно додатково врахувати зміну фази симетричних складових струмів і напруг при їх трансформаціях, що залежить від групи з'єднання обмоток трансформаторів.

Приклад розрахування напруг у вузлах схеми при однофазному короткому замиканні та побудова векторних діаграм наведені в додатку А (приклад А3).



## Додаток А

**Приклад А1.** Скласти схему заміщення мережі, зображеної на рис.А1, і знайти величини опорів її елементів для розрахування струму короткого замикання в точці К.

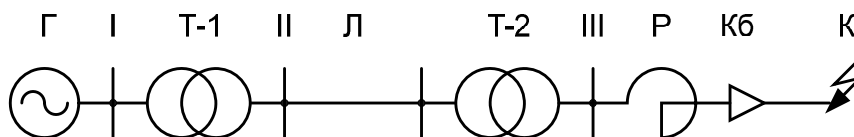


Рисунок А1 – Схема електричної мережі:  
I, II, III – ступені трансформації

Параметри елементів мережі:

Генератор Г: 30 МВА; 10,5 кВ;  $x'd = 0,26$ ;  $E'd = 11$  кВ;  $E_{\phi} = \frac{11}{\sqrt{3}}$  кВ.

Трансформатори Т-1: 31,5 МВА; 10,5/121 кВ;  $e_k \% = 10,5\%$ .

Т-2: 15 МВА; 110/6,6 кВ;  $e_k \% = 10,5\%$ .

Лінія Л:  $l = 80$  км;  $X_0 = 0,4$  Ом/км.

Реактор Р: 6 кВ; 0,3 кА;  $X_p \% = 5\%$ .

Кабельна лінія Кб:  $l = 2,5$  км;  $X_0 = 0,08$  Ом/км.

Розв'язання задачі виконати в іменованих і відносних одиницях за точним і наближеним приведенням.

**Розв'язування.** Схему заміщення мережі можна показати у вигляді послідовності індуктивних опорів, рис. А2. Розрахуємо величини опорів схеми заміщення.

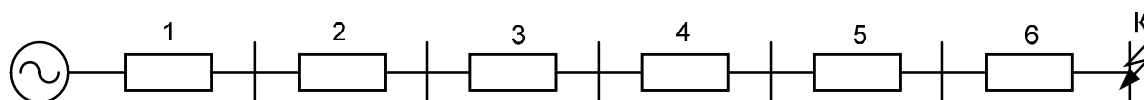


Рисунок А2 – Схема заміщення для розрахування струму короткого замикання

**Розрахування опорів за точним приведенням в іменованих одиницях**

Виберемо за основну ступінь напруги ступінь I, трансформатора Т-2 ( $U_6 = 10,5$  кВ). Тоді опори схеми заміщення будуть такими:

для генератора:

$$X_1 = X_{*(H)} \frac{U_H^2}{S_H} \left( \frac{U_6}{U} \right)^2 = 0,26 \frac{10,5^2}{30} \left( \frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,96 \text{ Ом};$$

для трансформатора Т1:

$$X_2 = \frac{e_k \%}{100} \frac{U_H^2}{S_H} \left( \frac{U_6}{U} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \frac{121^2}{31,5} \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,37 \text{ Ом};$$

для лінії:

$$X_3 = X_0 l \left( \frac{U_6}{U} \right)^2 = 0,4 \cdot 80 \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,24 \text{ Ом};$$

для трансформатора Т2:

$$X_4 = \frac{e_k \%}{100} \frac{U_H^2}{S_H} \left( \frac{U_6}{U} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \frac{110^2}{15} \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,64 \text{ Ом};$$

для реактора:

$$X_5 = \frac{X_p \%}{100} \frac{U_{HP}}{\sqrt{3} I_H} K^2 = \frac{5}{100} \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,3} \left( \frac{10,5 \cdot 110}{121 \cdot 6,6} \right)^2 = 1,21 \text{ Ом};$$

(K – коефіцієнт трансформації між ступенями I і III);

для кабельної лінії:

$$X_6 = X_0 l K^2 = 0,08 \cdot 2,5 \left( \frac{10,5 \cdot 110}{121 \cdot 6,6} \right)^2 = 0,42 \text{ Ом}.$$

### ***Розрахування опорів за наближеним приведенням в іменованих одиницях***

За шкалою середніх номінальних напруг вибираємо  $U_{cp}$  для кожного ступеня: I - 10,5 кВ; II - 115 кВ; III - 6,3 кВ.

За основний ступінь приймаємо перший, тоді:

$$X_1 = X_{*(H)} \frac{U_6^2}{S_H} = 0,26 \frac{10,5^2}{30} = 0,96 \text{ Ом};$$

$$X_2 = \frac{e_k \%}{100} \frac{U_6^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{10,5^2}{31,5} = 0,37 \text{ Ом};$$

$$X_3 = X_0 l \left( \frac{U_6}{U} \right)^2 = 0,4 \cdot 80 \left( \frac{10,5}{115} \right)^2 = 0,27 \text{ Ом};$$

$$X_4 = \frac{e_k \%}{100} \frac{U_6^2}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{10,5^2}{15} = 0,77 \text{ Ом};$$

$$X_5 = \frac{X_p \%}{100} \frac{U_{HP}}{\sqrt{3} I_H} \left( \frac{U_6}{U_H} \right)^2 = \frac{5}{100} \frac{6,3}{\sqrt{3} \cdot 0,3} \left( \frac{10,5}{6,3} \right)^2 = 1,68 \text{ Ом};$$

$$X_6 = X_0 \cdot 1 \left( \frac{U_6}{U_H} \right)^2 = 0,08 \cdot 2,5 \left( \frac{10,5}{6,3} \right)^2 = 0,55 \text{ Ом.}$$

**Розрахування опорів за точним приведенням у відносних базисних одиницях**

Прийемо  $S_6 = 100$  МВА, а за базисну напругу  $U_6 = U_{6I} = 10,5$  кВ. На інших ступенях базисні напруги будуть такими:

$$U_{6II} = 10,5 \frac{121}{10,5} = 121 \text{ кВ}; \quad U_{6III} = 121 \frac{6,6}{110} = 7,26 \text{ кВ.}$$

Базисні струми на кожному ступені:

$$I_{6I} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА};$$

$$I_{6II} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 7,26} = 7,95 \text{ кА};$$

$$I_{6III} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0,48 \text{ кА.}$$

Відносні величини опорів, приведені до базисних умов:

$$X_1 = X_{*(H)} \frac{S_6}{S_H} \left( \frac{U_H}{U_6} \right)^2 = 0,26 \frac{100}{30} \left( \frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,87;$$

$$X_2 = \frac{e_k \%}{100} \frac{S_6}{S_H} \left( \frac{U_H}{U_6} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \frac{100}{31,5} \left( \frac{10,5}{10,5} \right)^2 = 0,33;$$

$$X_3 = X_0 \cdot 1 \frac{S_6}{U_6^2} = 0,4 \cdot 80 \frac{100}{121^2} = 0,58;$$

$$X_4 = \frac{e_k \%}{100} \frac{S_6}{S_H} \left( \frac{U_H}{U_6} \right)^2 = \frac{10,5}{100} \frac{100}{15} \left( \frac{110}{121} \right)^2 = 0,58;$$

$$X_5 = \frac{X_p \%}{100} \frac{I_6}{I_H} \frac{U_{HP}}{U_6} = \frac{5}{100} \frac{7,95}{0,3} \frac{6}{7,26} = 1,09;$$

$$X_6 = X_0 \cdot 1 \frac{S_6}{U_6^2} = 0,08 \cdot 2,5 \frac{100}{7,26^2} = 0,38.$$

**Розрахування опорів за наближеним приведенням у відносних базисних одиницях**

$S_6 = 100$  МВА;  $U_{6I} = 10,5$  кВ.

Базисні напруги інших ступенів:  $U_{6II} = 115$  кВ ;  $U_{6III} = 6,3$  кВ.

Відповідні базисні струми:  $I_{6II} = 0,5$  кА;  $I_{6III} = 9,2$  кА.

Величини опорів:

$$X_1 = X_{*(H)} \frac{S_{\delta}}{S_H} = 0,26 \frac{100}{30} = 0,87;$$

$$X_2 = \frac{e_k \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{31,5} = 0,33;$$

$$X_3 = X_0 l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} = 0,4 \cdot 80 \frac{100}{115^2} = 0,24;$$

$$X_4 = \frac{e_k \%}{100} \frac{S_{\delta}}{S_H} = \frac{10,5}{100} \frac{100}{15} = 0,7;$$

$$X_5 = \frac{X_p \%}{100} \frac{I_{\delta}}{I_H} \frac{U_{HP}}{U_{\delta}} = \frac{5}{100} \frac{9,2}{0,3} \frac{6}{6,3} = 1,53;$$

$$X_6 = X_0 l \frac{S_{\delta}}{U_{\delta}^2} = 0,08 \cdot 2,5 \frac{100}{6,3^2} = 0,51.$$

**Приклад А2.** Для умов схеми електричної мережі, рис. А3, при трифазному короткому замиканні в точці К визначити при  $t=0$ : значення струмів короткого замикання у всіх генерувальних вітках схеми сумарний струм короткого замикання, величину ударного струму і найбільше діюче значення повного струму короткого замикання. Розрахування виконати аналітичним методом і методом розрахункових кривих за точним і наближеним приведенням.

Параметри елементів мережі

ТГ: 30 МВА; 10,5 кВ;  $X''_d = 0,12$ ;  $X_{II} = 0,147$ .

Т-1: 31,5 МВА; 10,5/121 кВ;  $e_k \% = 10,5\%$ .

Л1:  $l=60$  км;  $X^{\circ} = 0,4$  Ом/км.

С:  $S'' = 100$  МВА.

АТ: 60 МВА; 220/121/38,5;  $e_{BC} = 9,4\%$ ;  $e_{BH} = 35\%$ ;  $e_{CH} = 23\%$ .

Л2:  $l = 20$  км;  $X_0 = 0,4$  Ом/км.

Т2: 40 МВА; 11/115;  $e_k \% = 10,5\%$ .

Н: 20 МВА.

ГГ: 60 МВА; 10,5 кВ;  $X''_d = 0,2$ .

**Розв'язування**

### **Розрахування аварійного режиму аналітичним методом**

Складемо схему заміщення і визначимо величини опорів у відносних базисних одиницях за точним приведенням (див. приклад А1). Результати розрахунку представлено на рис. А4. Опори схеми визначені при параметрах:  $S_{\delta} = 100$  МВА;  $U_{\delta 1} = 230$  кВ.

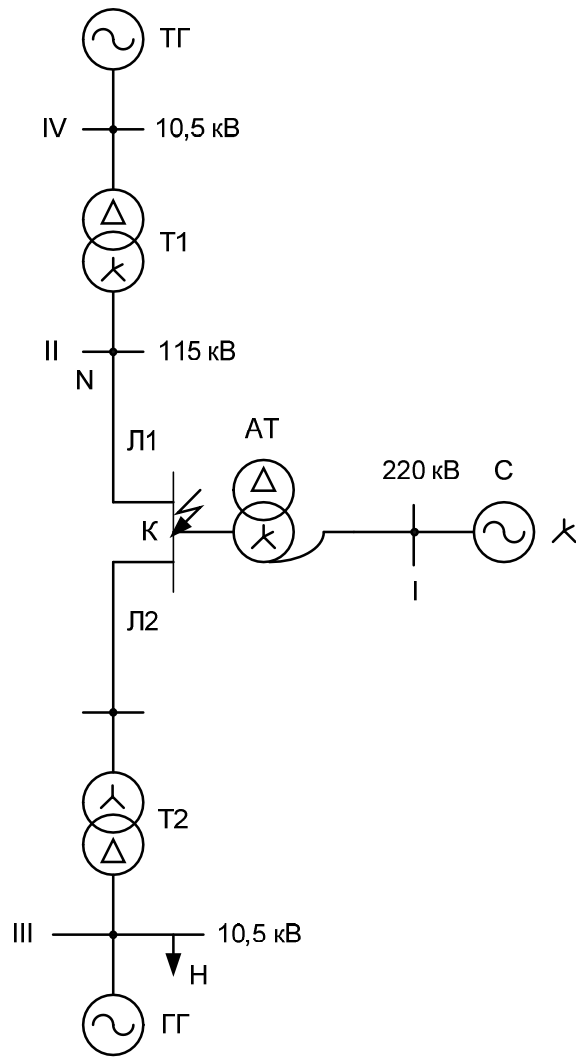


Рисунок А3 – Схема електричної мережі

Опір системи у відносних базисних одиницях:

$$X_{11} = \frac{S_{\text{б}}}{S''} = \frac{100}{100} = 1.$$

Базисні напруги і струми на всіх ступенях:

$$I_{\text{бI}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 230} = 0,25 \text{ кА};$$

$$I_{\text{бII}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 126} = 0,46 \text{ кА};$$

$$I_{\text{бIII}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 12,1} = 4,8 \text{ кА};$$

$$I_{\text{бIV}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,9} = 5,3 \text{ кА}.$$

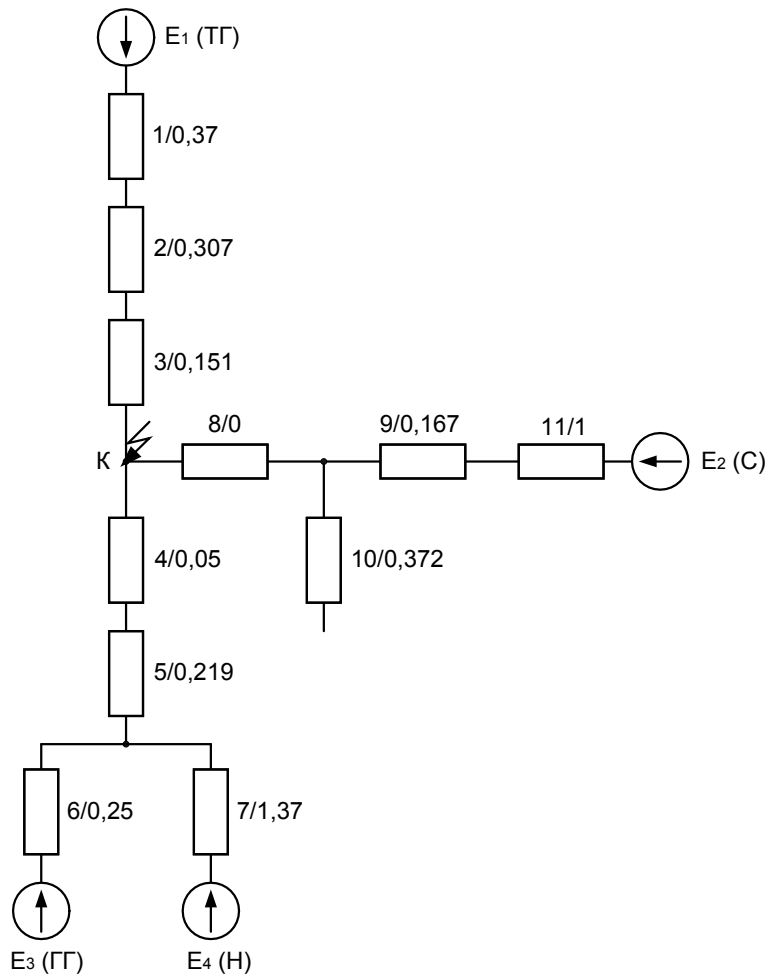


Рисунок А4 – Схема заміщення для розрахунку короткого замикання

Виконаємо перетворення схеми і визначимо відповідні опори:

$$X_{12} = X_1 + X_2 + X_3 = 0,818;$$

$$X_{13} = X_4 + X_5 = 0,269;$$

$$X_{14} = X_8 + X_9 + X_{11} = 1,167.$$

Перетворимо частину А схеми, показаної на рис. А5, з використанням коефіцієнтів струморозподілу. Замінити джерела  $E_3$  і  $E_4$  одним еквівалентним не можна, тому що вони неоднорідні і мають різну електричну віддаленість від точки короткого замикання.

$$X_{\text{рез}} = X_6 // X_7 + X_{13} = 0,479;$$

$$X_3 = X_6 // X_7 = 0,21.$$

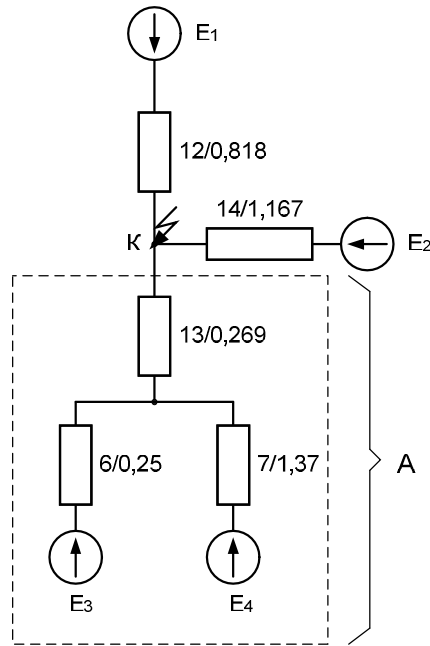


Рисунок А5 – Схема заміщення отримана в результаті перетворень

Коефіцієнти струморозподілу:

$$C_1 = \frac{X_9}{X_6} = \frac{0,21}{0,25} = 0,84; \quad C_2 = \frac{X_9}{X_7} = \frac{0,21}{0,31} = 0,16.$$

Тоді,

$$X_{15} = \frac{X_{рез}}{C_1} = \frac{0,479}{0,84} = 0,56;$$

$$X_{16} = \frac{X_{рез}}{C_2} = \frac{0,479}{0,16} = 2,94.$$

У результаті отримана умовно-радіальна схема, рис. А6.

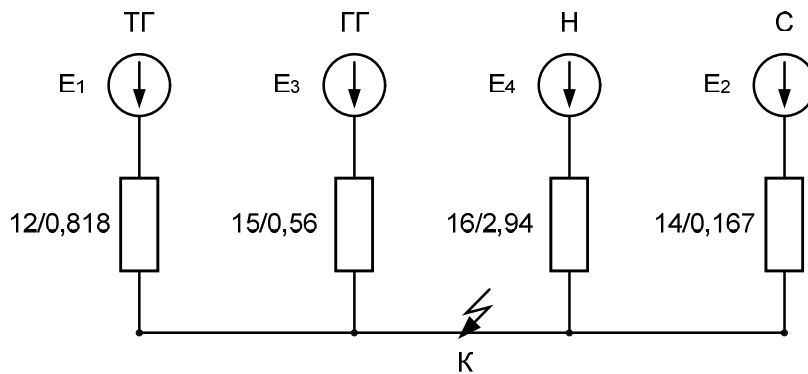


Рисунок А6 – Умовно-радіальна схема електричної мережі

Розрахуємо приведені до базисної напруги ЕРС усіх джерел. Для цього скористаємось інформацією табл. 2.1, де ЕРС усіх джерел задані у відносних одиницях при номінальних умовах:

$$E_{*(H)}^{TG} = 1,08; \quad E_{*(H)}^{GG} = 1,18; \quad E_{*(H)}^H = 0,85; \quad E_{*(H)}^C = 1.$$

Відповідно величини ЕРС у відносних базисних одиницях:

$$E_{*(6)}^{TG} = E_{*(H)}^{TG} \frac{U_H}{U_{6IV}} = 1,08 \frac{10,5}{10,9} = 1,04;$$

$$E_{*(6)}^{GG} = 1,18 \frac{10,5}{12,1} = 1,03;$$

$$E_{*(6)}^H = 0,85 \frac{10,5}{12,1} = 0,74;$$

$$E_{*(6)}^C = 1 \frac{220}{230} = 0,955.$$

Визначимо струми від усіх джерел у відносних базисних одиницях:

$$I_{*(6)}^{TG} = \frac{1,04}{0,818} = 1,27; \quad I_{*(6)}^H = \frac{0,74}{2,94} = 0,252;$$

$$I_{*(6)}^{GG} = \frac{1,03}{0,56} = 1,84; \quad I_{*(6)}^C = \frac{0,955}{1,167} = 0,817.$$

Значення струмів в іменованих одиницях в генерувальних вітках, приведені до напруги джерел:

$$I^{TG} = I_{6IV} I_{*(6)}^{TG} = 5,3 \cdot 1,27 = 6,73 \text{ кА};$$

$$I^{GG} = I_{6III} I_{*(6)}^{GG} = 4,8 \cdot 1,84 = 8,83 \text{ кА};$$

$$I^H = I_{6II} I_{*(6)}^H = 4,8 \cdot 0,252 = 1,21 \text{ кА};$$

$$I^C = I_{6I} I_{*(6)}^C = 0,25 \cdot 0,817 = 0,2 \text{ кА}.$$

Струм у точці короткого замикання у відносних базисних одиницях:

$$I_{\Sigma*(6)} = 1,27 + 1,84 + 0,252 + 0,817 = 4,179.$$

В іменованих одиницях струм короткого замикання приведений до напруги ступеня короткого замикання:

$$I_{\Sigma} = I_{\Sigma*(6)} I_{6II} = 4,179 \cdot 0,46 = 1,93 \text{ кА}.$$



Врахування навантаження, як це виконано в даному прикладі, проводиться в тому випадку, коли воно порівняно потужне і знаходиться поблизу точки короткого замикання.

Величини струмів джерел у точці К визначені для початкового моменту часу короткого замикання, тому що для цього моменту визначені величини опорів і ЕРС.

***Розрахування режиму короткого замикання методом розрахункових кривих***

Складемо схему заміщення надперехідного режиму, рис. А.7, в якій відсутнє навантаження Н. Вплив навантаження на величину струму короткого замикання оцінимо, виконавши додаткове розрахування. Джерела живлення різні за потужністю і за дальністю від точки К, тому розрахування виконуємо за індивідуальною зміною.

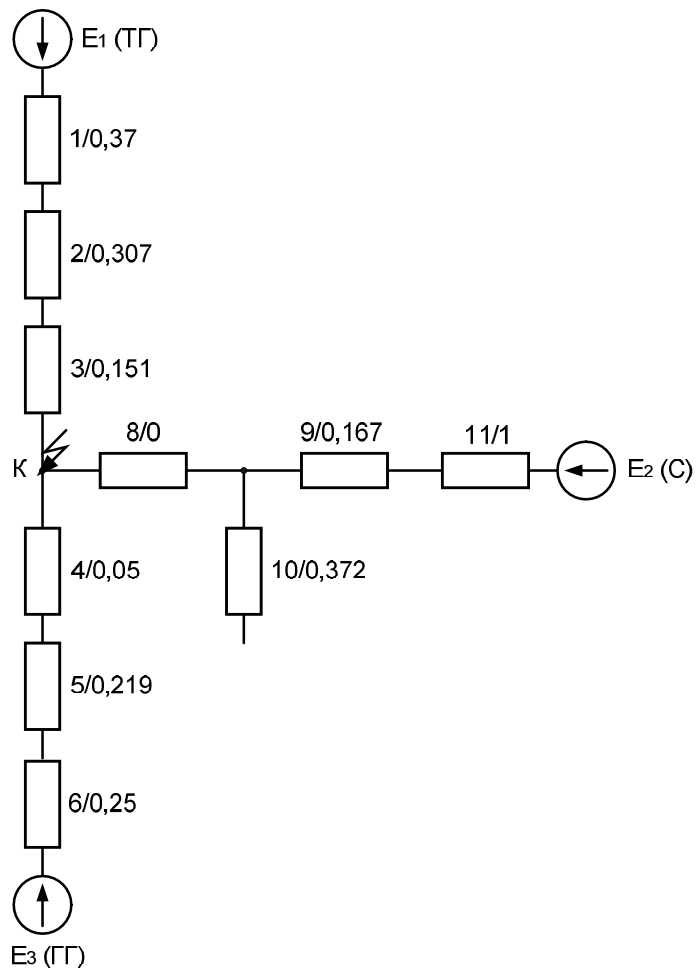


Рисунок А7 – Схема заміщення для надперехідного режиму

Зробимо розрахунки і перетворення схеми заміщення. У результаті одержимо схему, зображену на рис. А8.

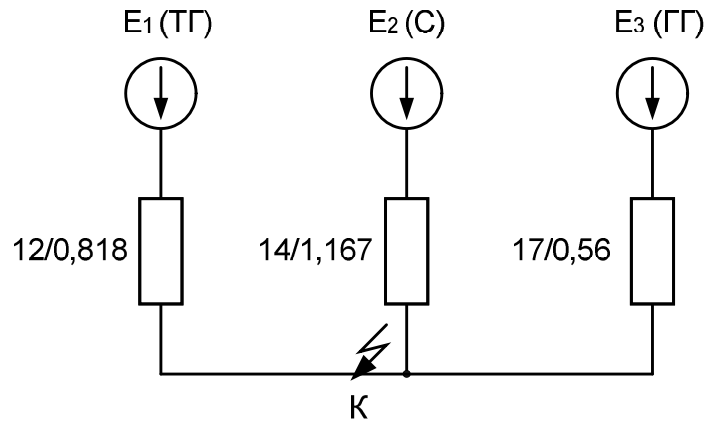


Рисунок А8 – Схема заміщення після перетворень

Визначаємо розрахункові опори:

$$X_{\text{расч}}^{\text{ТГ}} = X_{*(6)} \frac{S_{\Sigma\text{H}}}{S_6} = 0,818 \frac{30}{100} = 0,245;$$

$$X_{\text{расч}}^{\text{ГГ}} = 0,474 \frac{60}{100} = 0,284.$$

За розрахунковими кривими, рис. 2.2 та 2.2, визначаємо відносні величини періодичного струму в генерувальних вітках схеми:

$$I_{*t=0}^{\text{ТГ}} = 4,1; \quad I_{*t=0}^{\text{ГГ}} = 3,9.$$

Розраховуємо сумарний номінальний струм кожної вітки, приведений до напруги ступеня короткого замикання:

$$I_{\Sigma\text{H}}^{\text{ТГ}} = \frac{30}{3 \cdot 126} = 0,138; \quad I_{\Sigma\text{H}}^{\text{ГГ}} = \frac{60}{3 \cdot 126} = 0,276.$$

Струми короткого замикання в генерувальних вітках в іменованих одиницях:

$$I_{\text{nt}=0}^{\text{ТГ}} = I_{*t=0}^{\text{ТГ}} I_{\Sigma\text{H}}^{\text{ТГ}} = 4,1 \cdot 0,138 = 0,565 \text{ кА};$$

$$I_{\text{nt}=0}^{\text{ГГ}} = 3,9 \cdot 0,276 = 1,08 \text{ кА}.$$

Струм короткого замикання від енергосистеми залишається незмінним у часі:

$$I^{\text{С}} = I_{*(6)}^{\text{С}} I_{6\text{II}} = 0,817 \cdot 0,46 = 0,376 \text{ кА}.$$

Струм короткого замикання в точці К:

$$I_{n\Sigma t=0} = 0,565 + 1,08 + 0,376 = 2,02 \text{ кА.}$$

Ударний струм короткого замикання:

$$i_y = k_y \sqrt{2} I'' = 1,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 2,02 = 5,11 \text{ кА,}$$

де  $I'' = I_{n\Sigma t=0}$ ,  $k_y = 1,8$ .

Найбільше діюче значення повного струму короткого замикання:

$$I_y = I'' \sqrt{1 + 2(k_y - 1)^2} = 2,02 \sqrt{1 + 2(1,8 - 1)^2} = 1,51 \text{ кА.}$$

Оцінимо вплив навантаження на струм короткого замикання.

Якщо навантаження Н - це великі синхронні двигуни або синхронні компенсатори (особливо коли вони розташовані поблизу точки короткого замикання), то вони розглядаються як генератори рівновеликої потужності, рис. А9.

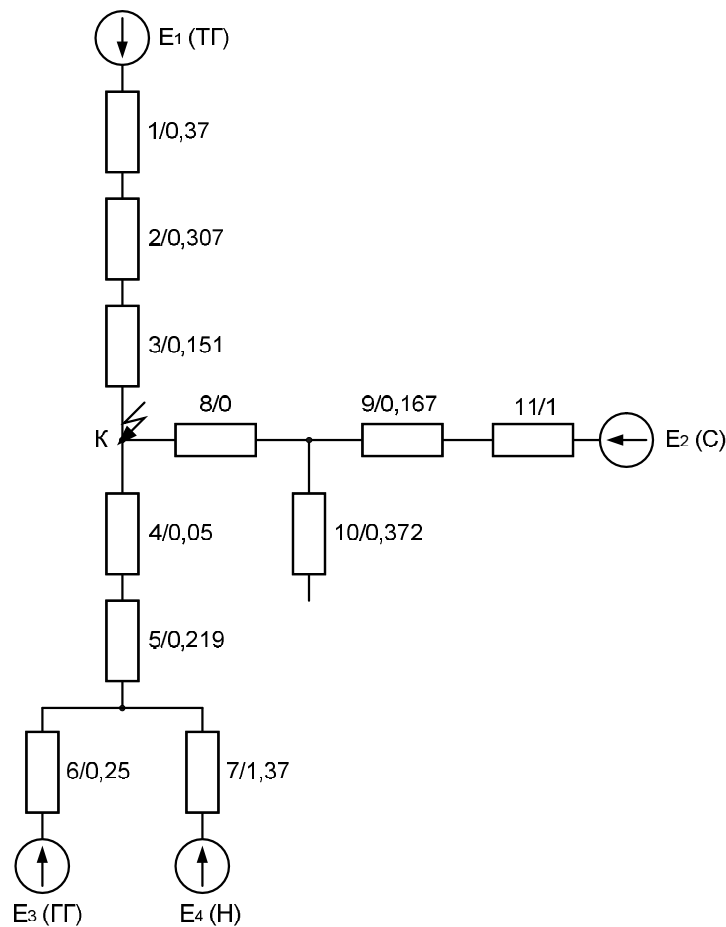


Рисунок А9 – Схема заміщення для оцінки впливу навантаження на струм короткого замикання

Струм у вітці генераторів ГГ у прийнятій системі відносних одиниць:

$$I_{*(6)}^{ГГ} = \frac{I_H}{I_{6П}} = \frac{1,08}{0,46} = 2,34.$$

Напруга в точці під'єднання навантаження (вузол М):

$$U_{*(6)}^M = I_{*(6)}^{ГГ} (X_4 + X_5) = 2,34(0,05 + 0,219) = 0,63.$$

Струм, що створюється навантаженням:

$$I_{*(6)}^H = \frac{E_{*(6)}^H - U_{*(6)}^M}{X_7} = \frac{0,74 - 0,63}{1,37} = 0,08.$$

Отримали додатне значення струму, отже, навантаження підживлює точку короткого замикання. В іменованих одиницях цей струм має значення:

$$I^H = I_{*(6)}^H I_{6П} = 0,08 \cdot 0,46 = 0,037 \text{ кА.}$$

Сумарний струм у точці короткого замикання з врахуванням впливу навантаження:

$$I_{\Sigma t=0} = 0,565 + 1,08 + 0,376 + 0,037 = 2,057 \text{ кА.}$$

**Приклад А3.** За умовою прикладу А2 розрахувати струм однофазного короткого замикання в точці К. Розрахування зробити для моменту часу  $t = 0,1$  с методом розрахункових кривих. Побудувати векторні діаграми струмів і напруг у точці пошкодження (точці К) і векторну діаграму напруг у точці N, рис. А3.

### **Розв'язування**

Складемо схему заміщення прямої послідовності. Схема заміщення для прямої послідовності по суті є схемою заміщення мережі, яка складена для розрахування симетричного трифазного короткого замикання і, відповідно, показана на рис. А10. Напругу прямої послідовності в точці К представлено джерелом напруги величиною  $U_1$ .

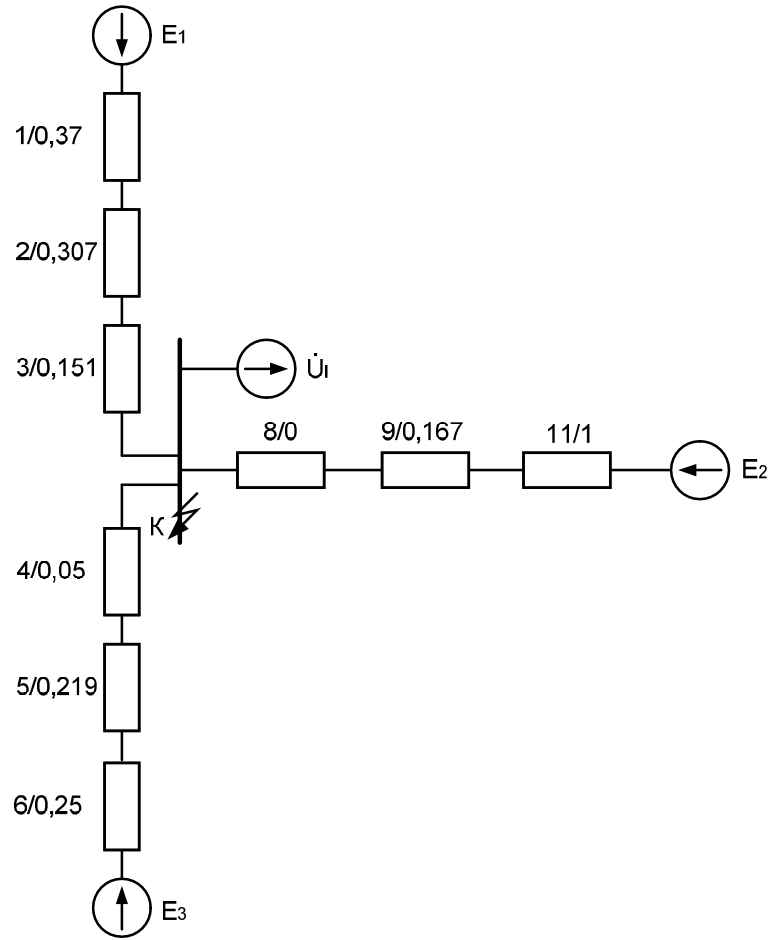


Рисунок А10 – Схема заміщення прямої послідовності

Виконавши елементарні перетворення і розрахунки, отримаємо схему, показану на рис. А11.

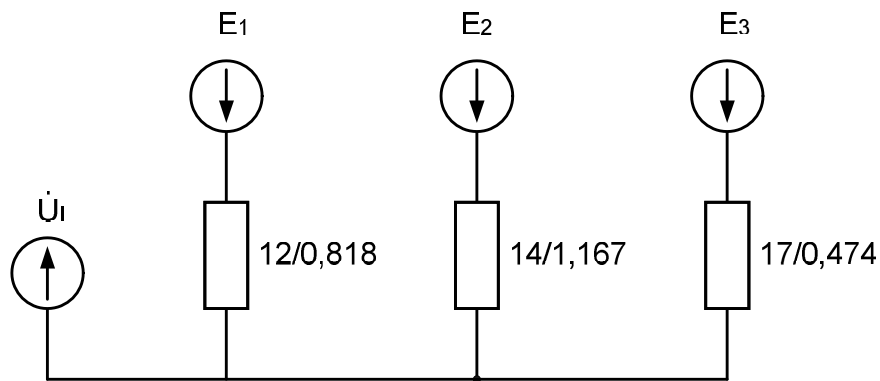


Рисунок А11 – Схема прямої послідовності отримана після перетворень

Складемо схему заміщення для струмів зворотної послідовності. Схема заміщення для струмів зворотної послідовності має таку ж

конфігурацію, що і схема для прямої послідовності, рис. А12.

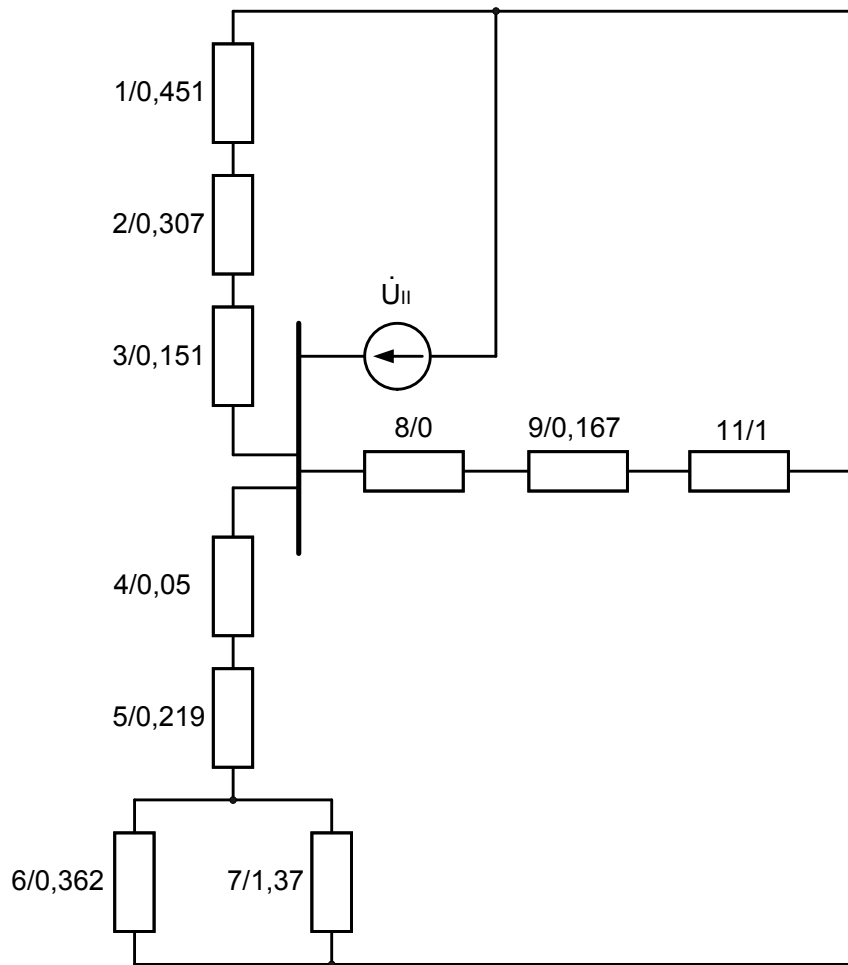


Рисунок А12 – Схема заміщення зворотної послідовності

З допустимою похибкою приймаємо, що величини опорів всіх елементів мережі струмам зворотної послідовності такі ж, як і струмам прямої послідовності. Виключенням є генератори:

$$X_1 = X_{*II} \frac{S_6}{S_H} \left( \frac{U_H}{U_{6IV}} \right)^2 = 0,147 \cdot \frac{100}{30} \left( \frac{10,5}{10,9} \right)^2 = 0,451;$$

$$X_6 = 0,29 \frac{100}{60} \left( \frac{10,5}{12,1} \right)^2 = 0,362.$$

Перетворимо схему.

$$\begin{aligned}
X_{12} &= X_1 + X_2 + X_3 = 0,451 + 0,307 + 1,151 = 0,909; \\
X_{13} &= X_8 + X_9 + X_{11} = 0 + 0,167 + 1 = 1,167; \\
X_{14} &= X_6 // X_7 = \frac{0,362 \cdot 1,37}{0,362 + 1,37} = 0,287; \\
X_{15} &= X_{14} + X_5 + X_4 = 0,287 + 0,219 + 0,05 = 0,511; \\
X_{16} &= X_{12} // X_{13} = \frac{0,909 \cdot 1,167}{0,909 + 1,167} = 0,513; \\
X_{\Sigma II} = X_{17} &= X_{16} // X_{15} = \frac{0,513 \cdot 0,511}{0,513 + 0,511} = 0,256.
\end{aligned}$$

У результаті отримаємо еквівалентну схему, рис. А13.

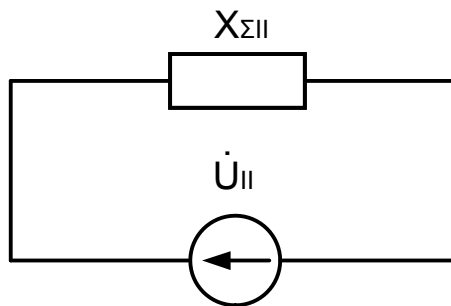


Рисунок А13 – Еквівалентна схема зворотної послідовності

Схема заміщення для струмів нульової послідовності показана на рис. А14.

Опори елементів струмам нульової послідовності, як правило, приймають такими ж, як і для прямої послідовності. Виключенням є опори ліній. Опір струмам нульової послідовності для лінії Л1:

$$X_{2o} = 3X_{0l} \frac{S_{\bar{6}}}{U_{\bar{6}}^2} = 3 \cdot 0,4 \cdot 60 \frac{100}{126^2} = 0,453.$$

Виконаємо перетворення схеми.

$$\begin{aligned}
X_{7o} &= X_{1o} + X_{2o} = 0,307 + 0,453 = 0,76; \\
X_{8o} &= X_{4o} + X_{6o} = 0,167 + 1 = 1,167; \\
X_{9o} &= X_{8o} // X_{5o} = \frac{1,167 \cdot 0,372}{1,167 + 0,372} = 0,28; \\
X_{\Sigma o} = X_{10o} &= X_{9o} // X_{7o} = \frac{0,76 \cdot 0,28}{0,76 + 0,28} = 0,205.
\end{aligned}$$

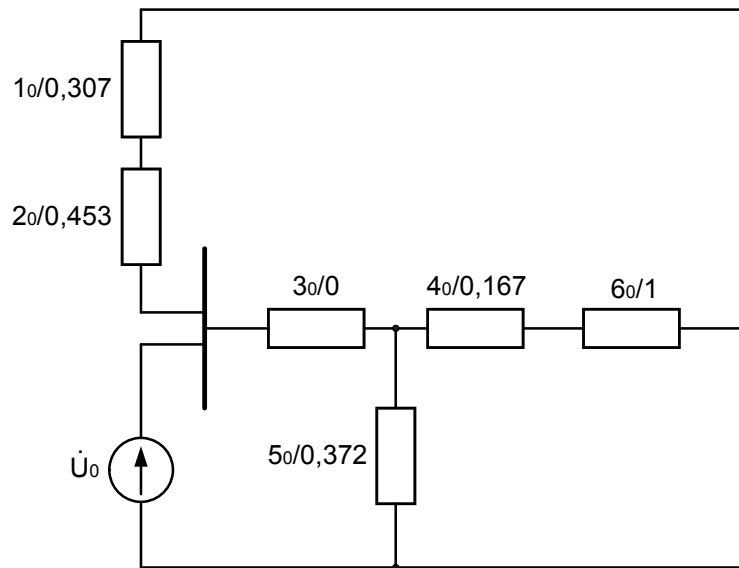


Рисунок А14 – Схема заміщення для струмів нульової послідовності

Після перетворення одержимо схему, показану на рис. А15.

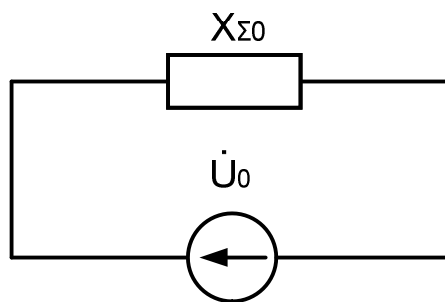


Рисунок А15 – Еквівалентна схема заміщення для струмів нульової послідовності

Визначимо величину додаткового опору для даного виду короткого замикання:

$$X_{\text{дод}}^{(1)} = X_{\Sigma \text{II}} + X_{\Sigma 0} = 0,256 + 0,205 = 0,461.$$

Скориставшись правилом еквівалентності прямої послідовності, складемо схему, рис. А16, для якої розрахуємо коефіцієнти струморозподілу для кожної групи джерел, що живлять точку короткого замикання.

$$X_{\Sigma \text{I}} = X_{\text{э}} = X_{12} // X_{14} // X_{17} = 0,238;$$



$$C_1 = \frac{0,238}{0,818} = 0,292; \quad C_2 = \frac{0,238}{1,167} = 0,204; \quad C_3 = \frac{0,238}{0,474} = 0,504.$$

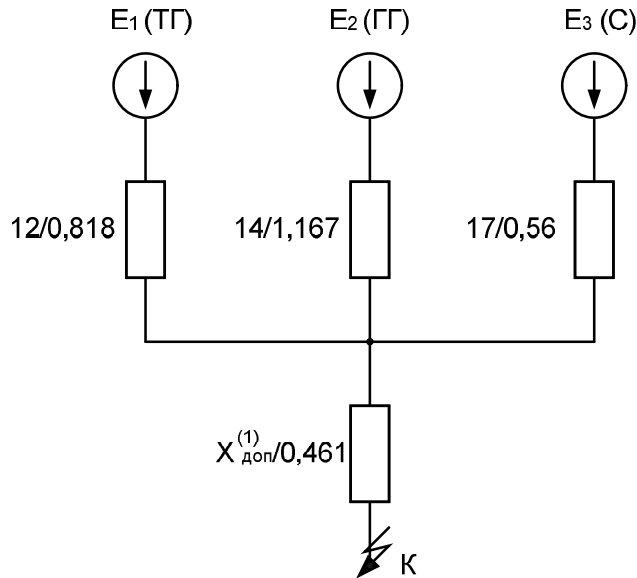


Рисунок А16 – Схема заміщення для визначення струму прямої послідовності при короткому замиканні в точці К

Визначимо розрахункові опори окремих джерел живлення:

$$X_{\text{розр}}^{\text{TГ}} = \frac{X_{\Sigma\text{I}} + X_{\text{доп}}^{(1)}}{C_1} \frac{S_{\text{H}}}{S_{\sigma}} = \frac{0,238 + 0,461}{0,292} \cdot \frac{30}{100} = 0,72;$$

$$X_{\text{розр}}^{\text{ГГ}} = \frac{0,238 + 0,461}{0,504} \cdot \frac{60}{100} = 0,832;$$

$$X^{\text{C}} = \frac{0,238 + 0,461}{0,204} = 3,42.$$

За знайденими  $X_{\text{розр}}$  для відповідного моменту часу ( $t=0,1\text{c}$ ) та розрахунковими кривими визначаємо відносні номінальні величини періодичних складових струмів прямої послідовності:

$$I_{*I t=0.1}^{\text{TГ}} = 1,26; \quad I_{*I t=0.1}^{\text{ГГ}} = 1,23.$$

Струми в іменованих одиницях:

$$I_{I t=0,1}^{\Gamma} = 1,26 \cdot 0,138 = 0,174 \text{ кА};$$

$$I_{I t=0,1}^{\Gamma} = 1,23 \cdot 0,276 = 0,337 \text{ кА};$$

$$I_I^C = \frac{0,955}{3,42} 0,46 = 0,128 \text{ кА}.$$

Сумарний струм прямої послідовності в точці короткого замикання:

$$I_{I t=0,1} = 0,174 + 0,337 + 0,128 = 0,64 \text{ кА}.$$

Сумарні струми зворотної і нульової послідовностей:

$$I_{II t=0,1} = I_{0 t=0,1} = I_{I t=0,1} = 0,64 \text{ кА}.$$

Визначимо періодичну складову повного струму однофазного короткого замикання в пошкодженій фазі:

$$I_{nt=0,1}^{(1)} = m^{(1)} I_{I t=0,1} = 3 \cdot 0,64 = 1,92 \text{ кА}.$$

### *Побудова векторних діаграм*

При побудові векторних діаграм струмів і напруг будемо вважати дійсну вісь комплексної площини суміщеною з вектором  $\dot{I}_{AI}$  фази А.

Розрахуємо напруги прямої, зворотної і нульової послідовностей у точці К:

$$\dot{U}_{AI}^K = j I_{AI} X_{\text{дод}}^{(1)} = j 0,64 \cdot 126 = j 46,7 \text{ Ом};$$

$$\text{де } X_{\text{дод}}^{(1)} = X_{\text{дод}}^{(1)*} \frac{U_{6II}}{\sqrt{3} I_{6II}} = 0,461 \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 0,46} = 126 \text{ Ом};$$

$$\dot{U}_{AII}^K = -j I_{AI} X_{\Sigma II} \frac{U_{6II}}{\sqrt{3} I_{6II}} = -j 0,64 \cdot 0,256 \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 0,46} = -j 25,9 \text{ кВ};$$

$$\dot{U}_{AI0}^K = -j I_{AI} X_{\Sigma 0} \frac{U_{6II}}{\sqrt{3} I_{6II}} = -j 0,64 \cdot 0,205 \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 0,46} = -j 20,8 \text{ кВ}.$$

За результатами проведених розрахунків будемо векторну діаграму струмів, рис. А18, і напруг, рис. А19, для вузла К:

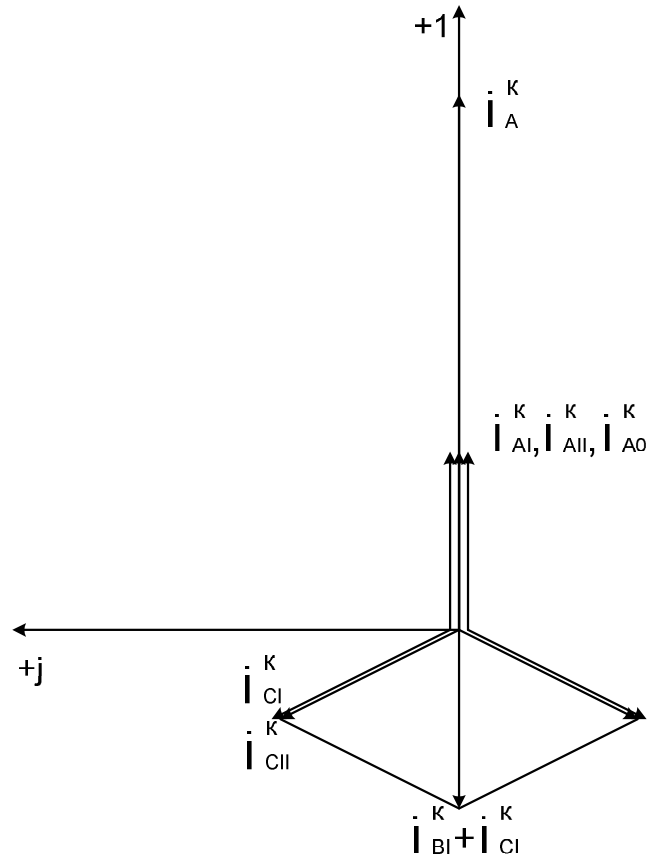


Рисунок А17 – Векторна діаграма струмів в точці К при однофазному короткому замиканні

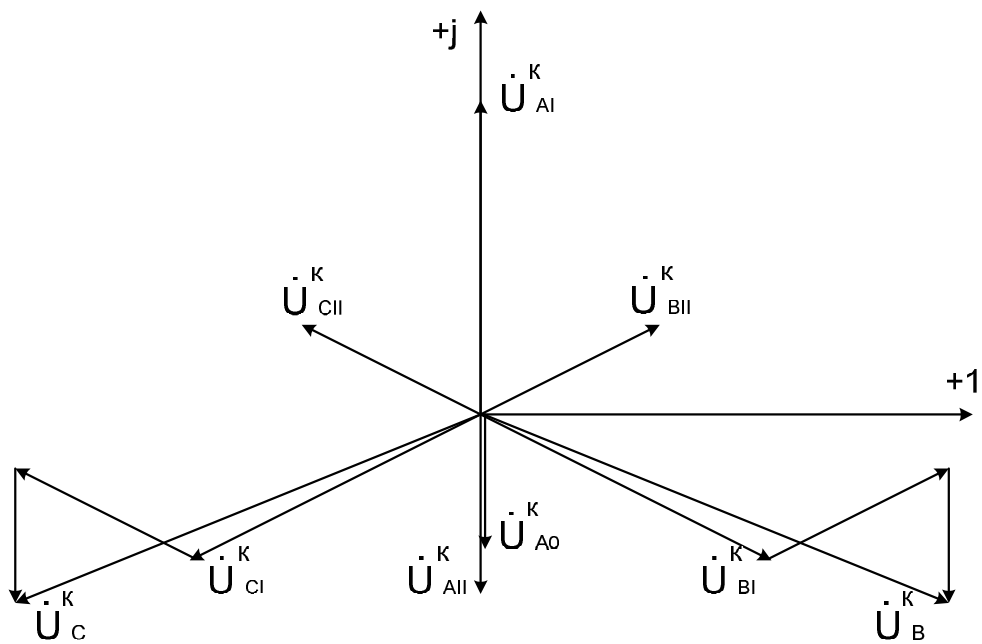


Рисунок А18 – Векторна діаграма напруг в точці К при однофазному короткому замиканні

Зробимо необхідні розрахунки для побудови векторних діаграм струмів і напруг в точці N.

Визначимо розподіл струмів у схемі.

Струм прямої послідовності у вітці ТГ, рис. А16.

$$I_{I t=0,1}^{ТГ} = 0,174 \text{ кА.}$$

Струми зворотної і нульової послідовностей у тій же вітці:

$$I_{II}^{ТГ} = I_{II t=0,1} \frac{X_{II\Sigma}}{X_{12}} = 0,64 \frac{0,256}{0,909} = 0,18 \text{ кА;}$$

$$I_0^{ТГ} = I_{0 t=0,1} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{20}} = 0,64 \frac{0,205}{0,76} = 0,172 \text{ кА.}$$

Складові падіння напруг на опорі лінії Л1 (опори  $X_3$  на рис. А10, А12 і  $X_{20}$  на рис. А14):

$$\Delta \dot{U}_{AI} = j X_3 \frac{U_{6II}}{\sqrt{3} I_{6II}} I_{It=0,1}^{ТГ} = j0,151 \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 0,46} 0,174 = j4,1 \text{ кВ;}$$

$$\Delta \dot{U}_{AII} = -j X_3 \frac{U_{6II}}{\sqrt{3} I_{6II}} I_{II t=0,1}^{ТГ} = -j0,151 \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 0,46} 0,18 = -j4,27 \text{ кВ;}$$

$$\Delta \dot{U}_{A0} = -j X_{20} \frac{U_{6II}}{\sqrt{3} I_{6II}} I_{0 t=0,1}^{ТГ} = -j0,453 \frac{126}{\sqrt{3} \cdot 0,46} * 0,172 = -j12,4 \text{ кВ.}$$

Напруги на шинах 110 кВ трансформатора Т1 (точка N):

$$\dot{U}_{AI}^N = \dot{U}_{AI}^K + \Delta \dot{U}_{AI} = j46,7 + j4,1 = j50,8;$$

$$\dot{U}_{AII}^N = \dot{U}_{AII}^K + \Delta \dot{U}_{AII} = -j25,9 + j4,27 = -j21,7;$$

$$\dot{U}_{A0}^N = \dot{U}_{A0}^K + \Delta \dot{U}_{A0} = -j20,8 + j12,4 = -j8,4.$$

Відповідно до отриманих результатів будуємо векторну діаграму напруг у точці N, рис. А19.

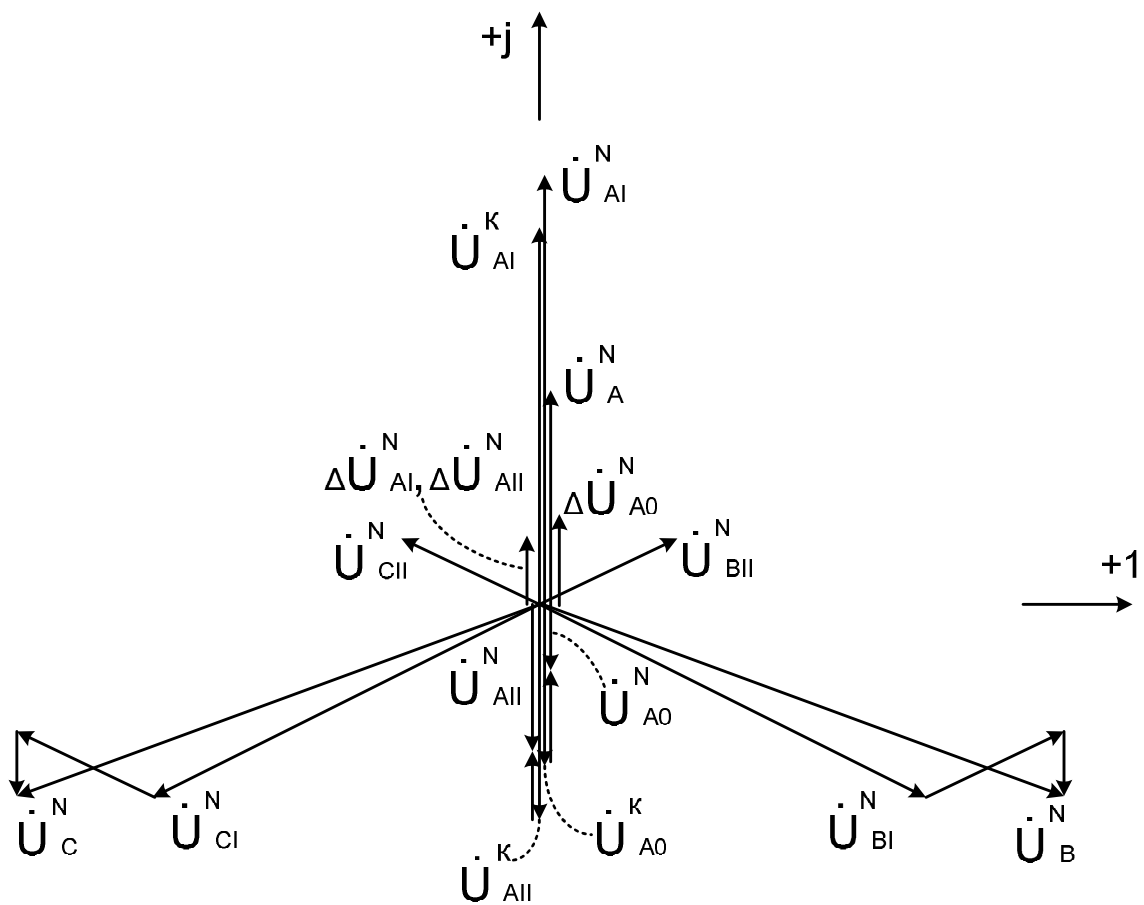


Рисунок А19 – Векторна діаграма напруг в точці N при однофазному короткому замиканні в точці K

**Приклад А4.** Визначити струм трифазного короткого замикання для схеми рис. А20. Шини перерізом 50×5 мм розташовані в одній площині, відстань між ними складає 240 мм. Загальна довжина від виводів трансформатора до автоматичного вимикача на лінії, яка відходить – 15 м. Інші необхідні для розрахунку відомості приведені на рис. А20.

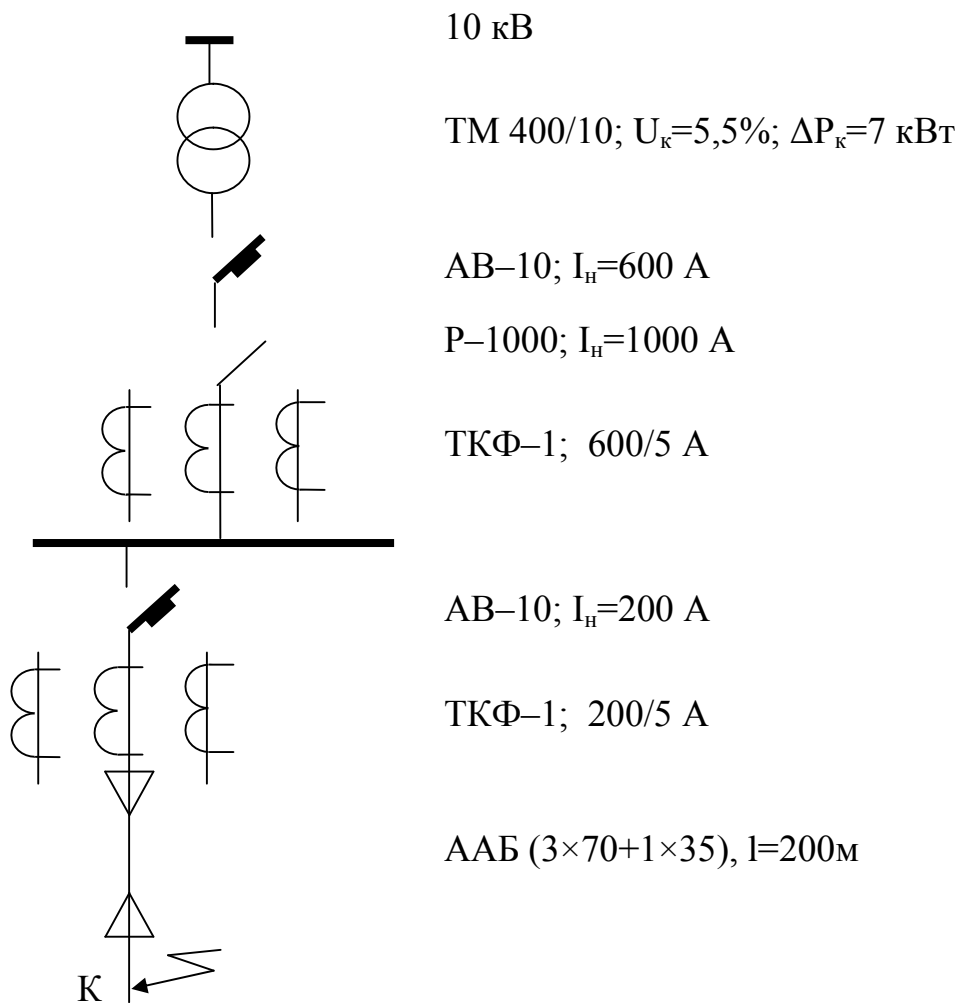


Рисунок А20 – Розрахункова схема електричної мережі

**Розв'язування**

Складемо схему заміщення, рис. А21, та розрахуємо її параметри

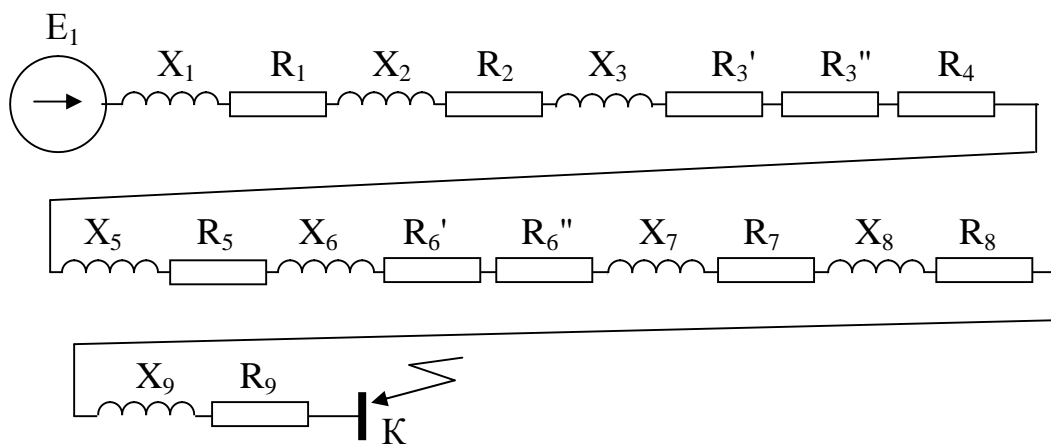


Рисунок А21 – Схема заміщення для розрахування струму короткого замикання

### Опори силового трансформатора

$$U_{кр} \% = 100 \sqrt{\left(\frac{U_K}{100}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_K}{S_H}\right)^2} = 100 \sqrt{\left(\frac{5,5}{100}\right)^2 - \left(\frac{7}{400}\right)^2} = 5,21\%$$

$$X_1 = \frac{U_{кр} \%}{100} \frac{U_6^2}{S_H} = \frac{5,21}{100} \frac{400^2}{400} = 20,84 \text{ мОм};$$

$$R_1 = \Delta P_K \left(\frac{U_6}{S_H}\right)^2 = 7 \left(\frac{400}{400}\right)^2 = 7 \text{ мОм};$$

### Опори збірних шин

$$a_{ср} = \sqrt[3]{a_{12} \cdot a_{13} \cdot a_{23}} = \sqrt[3]{240 \cdot 240 \cdot 240} = 300 \text{ мм.}$$

У відповідності до цього визначається питомий активний та індуктивний опір збірних шин: активний – 0,142 мОм, індуктивний – 0,2 мОм.

$$X_2 = 0,142 \cdot 15 = 2,12 \text{ мОм};$$

$$R_2 = 0,2 \cdot 15 = 3 \text{ мОм.}$$

Опір ввідного автоматичного вимикача:

опір розчеплювача  $X_3 = 0,084 \text{ мОм}$ ,  $R_3' = 0,12 \text{ мОм}$ ;

опір контактів  $R_3'' = 0,25 \text{ мОм}$ .

Опір контактів рубильника  $R_4 = 0,08 \text{ мОм}$ .

Опори вимірювальних трансформаторів струму, що встановлені на вводі:  $X_5 = 0,07 \text{ мОм}$ ;  $R_5 = 0,05 \text{ мОм}$ .

Опори автоматичного вимикача, який встановлений на лінії, що відходить:  $X_6 = 0,28 \text{ мОм}$ ,  $R_6' = 0,36 \text{ мОм}$ ,  $R_6'' = 0,6 \text{ мОм}$ .

Опори вимірювальних трансформаторів струму, які встановлені на лініях, що відходять:  $X_7 = 0,67 \text{ мОм}$ ,  $R_7 = 0,42 \text{ мОм}$ .

Опір кабельної лінії

$$X_8 = 0,086 \cdot 0,2 = 0,0172 \text{ мОм}; \quad R_8 = 0,48 \cdot 0,2 = 88,6 \text{ мОм},$$

де 0,086 та 0,48, відповідно, питомий індуктивний та активний опори кабелю ААБ (3×70+1×35)

Опір повітряної лінії

$X_9 = 0,24 \cdot 200 = 48 \text{ мОм}$ ,  $R_9 = 0,48 \cdot 200 = 96 \text{ мОм}$ ,  
де 0,24 та 0,48, відповідно, питомий індуктивний та активний опори  
повітряної лінії.

Результуючий опір схеми

$$R_{\Sigma} = \Sigma_i R_i = 196,48 \text{ мОм},$$

$$X_{\Sigma} = \Sigma_i X_i = 89,264 \text{ мОм}.$$

$$Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} = \sqrt{196,48^2 + 89,264^2} = 215,8 \text{ мОм}.$$

Струм трифазного короткого замикання

$$I_k = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot Z_{\Sigma}} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 215,8} = 1,07 \text{ кА}.$$



## Додаток Б

Таблиця Б1 – Опори понижувальних трансформаторів 10(6) 0,4кВ,  
мОм

З'єднання обмоток	$S_{\text{ном.т}},$ кВ·А	$U_{\text{к}},$ %	$R_{\text{т}}$	$X_{\text{т}}$	$R_{\text{от}}$	$X_{\text{от}}$	$Z_{0\text{т}}$
У/У <sub>Н</sub>	100	4,5	31,5	65	254	582	779
	160	4,5	16,6	41,7	151	367	486
	250	4,5	9,4	27,2	96,5	235	311
	400	4,5	5,5	17,1	55,6	149	195
	630	5,5	3,1	13,6	30,2	95,8	128
	1000	5,5	1,7	8,6	19,6	60,6	81
	1600	5,5	1	5,4	16,3	50,0	63,5
Д/У <sub>Н</sub>	160	4,5	16,6	41,7	135	16,6	41,7
	250	4,5	9,4	27,2	86,3	9,4	27,2
	400	4,5	5,9	17	54	5,9	17
	630	5,5	3,4	13,5	42	3,4	13,5
	1000	5,5	1,9	8,6	26,4	1,9	8,6
	1600	5,5	1,1	5,4	16,5	1,1	5,4
	2500	5,5	0,64	3,46	10,56	0,64	3,46

$U_{\text{к}}$  – напруга короткого замикання

Таблиця Б2 – Питомі опори кабелів з алюмінієвими жилами, мОм/м

Переріз жил, мм <sup>2</sup>	$R_{\text{пит}}$	$X_{\text{пит}}$	$Z_{\text{ф-н}}$
3×4 + 1×2,5	9,610	0,098	24,08
3×6 + 1×4	6,410	0,094	15,43
3×10 + 1×6	3,840	0,088	9,88
3×16 + 1×10	2,400	0,084	5,92
3×25 + 1×16	1,540	0,072	3,70
3×35 + 1×16	1,100	0,068	3,35
3×50 + 1×25	0,769	0,066	2,22
3×70 + 1×25	0,549	0,065	1,59
3×95 + 1×35	0,405	0,064	1,13
3×120+1×35	0,320	0,064	1,05
3×150 + 1×50	0,256	0,063	0,82
3×185 + 1×50	0,208	0,063	0,73

Таблиця Б3 – Питомі опори шинопроводів, мОм/м

Тип шинопроводу	$I_{\text{ном.ш}}, \text{A}$	$R_{\text{ш}}$	$X_{\text{ш}}$	$Z_{\text{ф-н}}$
ШМА 68П	4000	0,013	0,015	0,103
-«-	2500	0,02	0,02	0,112
ШМА 73(16)	1600	0,031	0,022	0,160
ШМА4	3200	0,015	0,007	0,053
-«-	2500	0,017	0,008	0,082
-«-	1600	0,03	0,014	0,087
-«-	1250	0,034	0,016	0,086
ШЗМ 16	1600	0,014	0,006	0,07
ШРА73	630	0,1	0,13	0,33
-«-	400	0,15	0,17	0,38
-«-	250	0,21	0,21	0,59
ШРА 4	630	0,1	0,13	-
ШРА 4	400	0,15	0,17	-
-«-	290	0,21	0,21	-

Таблиця Б4 – Опори первинних обмоток трансформаторів струму типу ТКФ

Номінальний струм, А	ТКФ-1		ТКФ-3	
	г, мОм	х, мОм	г, мОм	х, мОм
7,5	300	480	130	120
10	170	270	75	70
15	75	120	33	30
20	42	67	19	17
30	20	30	8,2	8
40	11	17	4,8	4,2
50	7	11	3,0	2,8
75	3	4,8	1,3	1,2
100	1,7	2,7	0,75	0,7
150	0,75	1,2	0,33	0,3
200	0,42	0,67	0,19	0,17
300	0,2	0,3	0,08	0,08
400	0,11	0,17	0,05	0,04
600	0,05	0,07	0,02	0,02

Таблиця Б5 – Середні опори автоматичних вимикачів і рубильників

Номинальний струм, А	Опори розчеплювачів автоматичних вимикачів, мОм		Опори контактів мОм	
	г	х	автоматичних вимикачів	рубильників
50	5,5	2,7	1,3	-
70	2,35	1,3	1,0	-
100	1,3	0,85	0,75	0,5
140	0,74	0,55	0,65	-
200	0,36	0,28	0,6	0,4
400	0,15	0,1	0,4	0,4
600	0,12	0,084	0,25	0,15
1000	-	-	-	0,08

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Аввакумов В.Г. Методическое пособие для выполнения курсовых и контрольных работ по электромагнитным переходным процессам для студентов энергетических специальностей. - Винница: ВПИ, 1973.
2. Винославский В.Н., Пивняк Г.Г., Несен Л.И., Рыбалко А.Я., Прокопенко В.В. Переходные процессы в системах электроснабжения - К.: Выща школа, 1989.
3. Ульянов С.А. Короткие замыкания в электрических системах - М.: Госэнергоиздат, 1952.
4. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах.- М.: Энергия, 1964.
5. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах. - М.: Энергия, 1970.
6. Перехідні процеси в системах електропостачання. Під ред. Черемісіна М.М. Вид-во Факт, 2005.

*Навчальне видання*

Леонід Борисович Терешкевич, Олександр Дмитрович Демов,  
Віктор Остапович Іванков

**Електромагнітні перехідні процеси в системах  
електроспоживання**

Навчальний посібник

Оригінал-макет підготовлено Терешкевичем Л.Б.

Редактор В.О.Дружиніна  
Коректор Ю.І.Франко

Науково-методичний відділ ВНТУ  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК № 746 від 25.12.2001  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

Підписано до друку  
Формат 29,7×42<sup>1</sup>/<sub>4</sub>  
Друк різнографічний  
Тираж прим.  
Зам. №

Гарнітура Times New Roman  
Папір офсетний  
Ум. друк. арк.

Віддруковано в комп'ютерному інформаційно-видавничому центрі  
Вінницького національного технічного університету  
Свідоцтво Держкомінформу України  
серія ДК №746 від 25.12.2001  
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ

