

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

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до практичних занять  
з навчальної дисципліни

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

*(для здобувачів першого (бакалаврського)  
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,  
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. Бекетова**  
**2024**

Методичні рекомендації до практичних занять з навчальної дисципліни «Перехідні процеси в електроенергетичних установках з відновлюваними джерелами» (для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. Б. Єгоров, М. Л. Глебова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 42 с.

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

#### Рецензент

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

*Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 14 від 28.06.2023.*

## ЗМІСТ

1 Симетричні замикання.....	4
1.1 Призначення розрахунків струмів коротких замикань.....	4
1.2 Основні допущення, прийняті під час розрахунків.....	5
1.3 Порядок визначення струмів коротких замикань.....	6
1.4 Система відносних одиниць.....	9
2 Несиметричні короткі замикання.....	22
2.1 Загальні положення.....	22
2.2 Метод симетричних складових.....	22
2.3 Опір різних послідовностей елементів системи електропостачання.....	24
2.4 Порівняння різних видів короткого замикання .....	26
2.5 Вказівки до розрахунків струмів несиметричного короткого замикання .....	29
Список рекомендованої літератури.....	41

# 1 СИМЕТРИЧНІ ЗАМИКАННЯ

## 1.1 Призначення розрахунків струмів коротких замикань

Під час проектування й експлуатації системи електропостачання (далі – СЕП) загалом та окремих електроустановок для вирішення багатьох технічних питань потрібно провести розрахунки електромагнітних перехідних процесів.

Під розрахунками електромагнітного перехідного процесу зазвичай розуміють обчислення струмів і напруг у розглянутої СЕП при заданих умовах [1, 2]. Залежно від призначення таких розрахунків знаходять зазначені величини для необхідного моменту часу або їхньої зміни протягом усього процесу. Разом із тим рішення наводиться для однієї або декількох віток і точок СЕП.

До завдань, для практичного розв'язку яких здійснюють розрахунки електромагнітних перехідних процесів, належать [3]:

1. Порівняння, оцінка, вибір схеми електричних з'єднань, як окремих установок, так і всієї СЕП загалом.
2. Виявлення умов роботи споживачів під час аварійних режимів.
3. Вибір електричних апаратів, провідників і їхня перевірка за умовами роботи під час коротких замикань (далі – КЗ ).
4. Проектування й налаштування пристроїв релейного захисту й автоматики.
5. Визначення числа заземлених нейтралей і їхнього розміщення в системі.
6. Вибір числа й потужності, що компенсують дугогасильні пристрої.
7. Визначення впливу струмів КЗ на комунікації.
8. Проектування заземлювальних пристроїв.
9. Оцінка стійкості роботи СЕП.
10. Розробка заходів щодо координації й оптимізації струмів КЗ.
11. Аналіз аварій в електроустановках.

## 1.2 Основні допущення, прийняті під час розрахунків

Розрахунки електромагнітного перехідного процесу в СЕП із обліком усіх наявних умов і факторів надзвичайно складні і практично не виконувані. Для того щоб спростити завдання й зробити ці розрахунки практично можливими, вводять низку допущень, які не вносять істотних похибок у точність розрахунків. Допущення залежать від характеру й постановки самого завдання. Ті допущення, які цілком прийнятні для одного завдання, можуть бути зовсім неприйнятні для розв'язання іншого.

Кожний із практичних методів розрахунків перехідного процесу при КЗ заснований на низці допущень [4]:

1. Зневажають насиченням магнітних систем. Разом із тим всі схеми заміщення виявляються лінійними, розрахунки яких значно простіше.

2. Зневажають струмами намагнічування трансформаторів і автотрансформаторів.

3. Припускають, що всі елементи СЕП симетричні, а порушення симетрії відбувається тільки в місці КЗ.

4. Зневажають ємнісними провідностями ЛЕП напругою до 220 кВ включно.

5. Навантаження розраховують приблизно. Залежно від стадії перехідного процесу навантаження заміняють деяким постійним індуктивним опором.

6. Зневажають активними опорами елементів схеми, якщо відношення результуючих опорів від джерела до точки КЗ  $R_{рез} / x_{рез} \leq \frac{1}{3}$ . Активні опори

враховують тільки під час визначення загасання аперіодичних складових струмів КЗ.

7. Не враховують зрушення по фазі ЕРС джерел, що входять у розрахункову схему.

8. Припускають, що хитання синхронних машин відсутні. Якщо завдання обмежене розглядом лише початкової стадії перехідного процесу

(тобто в межах  $0,1-0,2$  с), це допущення не вносить помітної похибки. Проте у разі виникнення істотних хитань або випаданні машин із синхронізму, достатньо правильний результат може бути отриманий з урахуванням хитань синхронних генераторів.

Зазначені допущення спричиняють похибки у розрахунках, однак вони не перевищують 2–5 %, що в більшості випадків розрахунків припустиме.

### **1.3 Порядок визначення струмів коротких замикань**

У розв'язанні завдання щодо визначення струмів КЗ можна виділити такі основні етапи [1, 6]:

1. Вибір розрахункових умов.

2. Визначення параметрів елементів розрахункової схеми (Параметри елементів розрахункової схеми встановлюються відповідно до їхніх паспортних даних. За відсутності останніх параметри можна вибирати з довідкової літератури).

3. Складання схеми заміщення (Схеми заміщення виконують в однолінійному зображенні, водночас всі вхідні в них елементи й прикладені ЕРС доцільно відзначати порядковими номерами й указувати їхні величини).

4. Розрахунки режиму КЗ.

Після складання схеми заміщення розрахунки режиму КЗ становить звичайне завдання знаходження струмів і напруг у схемі з відомими для неї опорами й прикладеними ЕРС. Рішення такого завдання в загальному випадку можна виконати за допомогою законів Ома й Кірхгофа.

Відповідно до цільових призначень проведеного на практиці розрахунків електромагнітного перехідного процесу встановлюють вихідні розрахункові умови, які достатньо різноманітні та під час розв'язування різних завдань можуть бути навіть суперечливими.

До розрахункових умов належать: вибір розрахункової схеми, виду КЗ, вибір моменту часу від початку КЗ, вибір місця розташування точки КЗ.

1. Вибір виду КЗ і моменту часу від початку КЗ залежить від призначення розрахунків. У таблиці 1.1 наведені рекомендації з вибору видів КЗ і моменту часу від початку КЗ.

Таблиця 1.1 – Рекомендації з вибору виду КЗ і моменту часу від початку КЗ залежно від зміни розрахунків

Призначення розрахунків	Вид КЗ	Момент часу від початку КЗ
1	2	3
Вибір або перевірка комутаційних апаратів (вимикачів, віддільників, роз'єднувачів і т. п.) реакторів, трансформаторів струму, шин, кабелів:		
а) на термічну стійкість;	$K^{(3)}$	$\infty$
б) на динамічну стійкість;	$K^{(3)}$	0
в) вимикачів на припустимий струм, що вимикається, або потужність.	$K^{(3)}$	$t = t_{защ} + t_{викл}$
Розрахунки параметрів струмових відсічень по струму й напрузі від міжфазних КЗ:		
а) вибір струму або напруги спрацьовування;	$K^{(3)}$	0
б) визначення зони дії або $K_{чутл}$ .	$K^{(2)}$	0
Розрахунки парам. струмових відсічень від однофазних КЗ	$K^{(1)}$	0
Розрахунки параметрів макс. струмових, макс. струмових спрямованих струмових від однофазних КЗ із витримкою часу 0,5 з і більше.	$K^{(1)}$	$\infty$
Розрахунки параметрів максимальних, максимальних спрямованих і захистів з пуском мінімальної напруги від міжфазних КЗ із витримкою часу 0,5 з і більше:	$K^{(3)}$	$\infty$
	$K^{(2)}$	$\infty$
а) вибір струму або напруги спрацьовування;	$K^{(3)}$	0
б) визначення коефіцієнта чутливості.		
Розрахунки струмів небалансу трансформаторів струму.	$K^{(2)}$	0
Визначення коефіцієнтів чутливості диф. захистів ліній, трансформаторів, шин і ін.	$K^{(1)}$	0
	$K^{(2)}$	0
а) тільки від міжфазних КЗ;		
б) тільки від однофазних КЗ;	$K^{(1)}$	$\infty$
в) від усіх видів КЗ.		

2. Вибір місця КЗ залежно від призначення розрахунків проводиться з таких основних міркувань:

а) струм КЗ повинен проходити по вітках, для яких вибирається або перевіряється апаратура;

б) для визначення найбільшого значення струму КЗ за цього режиму місце КЗ вибирається в місця установки апарата, релейного захисту (на початку лінії, до реактора, до трансформатора і т. д., рахуючи від джерела живлення). Для визначення найменшого значення струму КЗ місце КЗ вибирається наприкінці ділянки.

3. Вибір режиму СЕП, що передує КЗ. Режим СЕП сильно впливає на величину струмів КЗ і є важливою ланкою вибору розрахункових умов.

Якщо розрахунки виконуються для вибору або перевірки апаратури, то розрахунковий режим має бути таким, за якого струм КЗ має найбільше значення. Для цього необхідно враховувати не тільки повну потужність СЕП, але й перспективу її розвитку.

4. Складена розрахункова схема (рис. 1.1) повинна включати генератори, що беруть участь у живленні КЗ, й усі елементи їхніх зв'язків як із місцем КЗ, так і між собою – лінії, кабелі, трансформатори, реактори. Додаткові джерела – синхронні компенсатори, великі двигуни, дрібні станції – необхідно зводити в схему тільки в тих випадках, коли вони порівняно близько розташовані до місця КЗ.

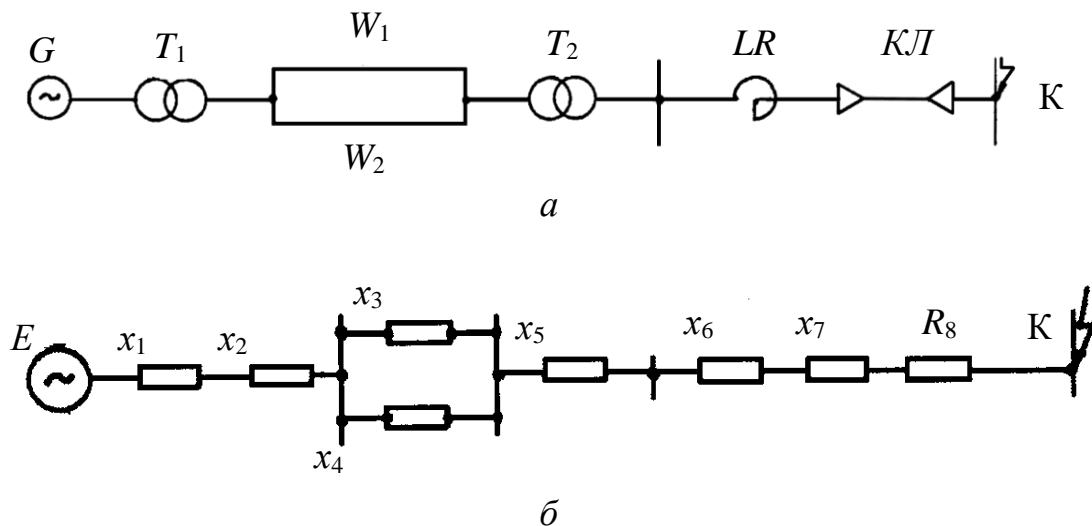


Рисунок 1.1 – Розрахункова схема (а) і схема заміщення (б) для розрахунків струмів КЗ



Дуже великі джерела (суміжні системи й ін.) часто можна замінити джерелами необмеженої потужності, тобто вважати, що напруги в точках їхнього приєднання у схемі залишаються незмінними протягом усього процесу КЗ.

При обліку навантажень їх можна об'єднати в доволі великі групи, а саме: навантаження району мережі, підстанції, секції шин тощо.

#### 1.4 Система відносних одиниць

Щоб виразити окремі величини у відносних одиницях, потрібно вибрати ті величини, які мають слугувати відповідними одиницями виміру, тобто встановити базисні одиниці або умови.

Нехай за базисний струм і базисну міжфазну напругу прийнято величини  $I_{\bar{\theta}}$  і  $U_{\bar{\theta}}$ . Тоді базисна потужність трифазної системи:

$$S_{\bar{\theta}} = \sqrt{3} U_{\bar{\theta}} I_{\bar{\theta}},$$

а базисний опір:

$$Z_{\bar{\theta}} = U_{\bar{\theta}} / \sqrt{3} I_{\bar{\theta}} = U_{\bar{\theta}}^2 / S_{\bar{\theta}}.$$

Як бачимо, із чотирьох базисних одиниць  $I_{\bar{\theta}}$ ,  $U_{\bar{\theta}}$ ,  $S_{\bar{\theta}}$  і  $Z_{\bar{\theta}}$  дві можуть бути обрані довільно, а дві інші виходять зі співвідношень між ними.

За обраних базисних умов відносні значення ЕРС, напруг, струмів, потужностей і опорів будуть:

$$E_{*(\bar{\theta})} = \frac{E}{E_{\bar{\theta}}}; \quad U_{*(\bar{\theta})} = \frac{U}{U_{\bar{\theta}}}; \quad I_{*(\bar{\theta})} = \frac{I}{I_{\bar{\theta}}}; \quad S_{*(\bar{\theta})} = \frac{S}{S_{\bar{\theta}}}; \quad Z_{*(\bar{\theta})} = \frac{Z}{Z_{\bar{\theta}}},$$

де «зірочка» указує, що величина виражена у відносних одиницях, а індекс  $(\bar{\theta})$  – що вона зведена до базисних умов.

Оскільки вибір базисних умов довільний, то та сама дійсна величина може мати різні чисельні значення при вираженні її у відносних одиницях.

Перепишемо опір

$$Z_{*(\bar{\theta})} = \frac{Z}{Z_{\bar{\theta}}} = Z \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{\theta}}}{U_{\bar{\theta}}} = Z \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{U_{\bar{\theta}}^2},$$

де  $Z$  – заданий опір, Ом на фазу;

$I_{\bar{o}}$  – базисний струм, кА;

$U_{\bar{o}}$  – базисна міжфазна напруга, кВ;

$S_{\bar{o}}$  – базисна потужність, МВ · А.

Для різних елементів системи електропостачання параметри, що характеризують їхні опори, задані в різних формах. Зокрема, для повітряних і кабельних ЛЕП задається погонний індуктивний і активний опори на фазу  $X_0$  та  $r_0$ , а також довжина  $L$ . Тому для цих елементів зручніше користуватися виразом:

$$X_{*(\bar{o})} = x_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}; \quad R_{*(\bar{o})} = r_0 \cdot L \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}.$$

Як відомо, напруга КЗ трансформатора задається у відсотках від його номінальної напруги. Нехтуючи доволі малою складовою активного опору обмоток трансформатора, можна вважати  $U_k \% = Z \% \approx X \%$ .

Разом із тим реактивний опір трансформатора у відносних одиницях визначається:

$$X_{*(\bar{o})} = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}.$$

Для реактора зазвичай задається його реактивний опір у відсотках  $X_p \%$ , визначений за номінальних напрузі й струмі. Опір реактора, зведений до базисних умов, визначиться:

$$X_{*(\bar{o})} = \frac{X_p \%}{100} \cdot \frac{U_n}{I_n} \cdot \frac{I_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}}.$$

Для генераторів і синхронних компенсаторів наводиться індуктивний опір  $X_{*H}$ , зведений до номінальних умов (табл. 1.2). Опір генератора, зведений до базисних умов, буде:

$$X_{*(\bar{o})} = X_{*H} \cdot \frac{U_n^2}{S_H} \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}.$$

Під час вибору базисних умов варто керуватися міркуваннями, щоб обчислювальна робота була якомога простіше, і порядок числових значень відносних базисних величин був достатньо зручний для оперування з ними. Для базисної потужності  $S_{\delta}$  доцільно обирати круглі числа (1 000, 100, 10 МВ · А).

Під час зведення опорів елементів у відносних одиницях до одного ступеня трансформації можливо **точно** або **наближене** зведення.

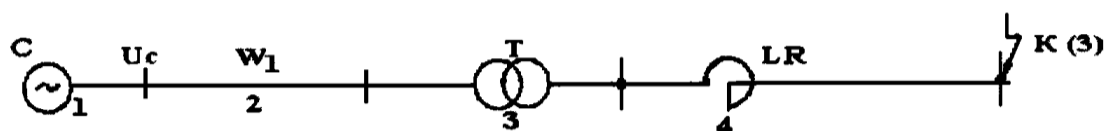
Таблиця 1.2 – Формули для визначення реактивних опорів елементів СЕП

Найменування	Реактивні опори елементів			
	Відносні номінальні одиниці	Іменовані одиниці	Відносні одиниці	
			Точне зведення	Наближене зведення
1	2	3	4	5
Синхронний генератор (двигун, компенсатор)	$X_d'', X_d$	$X_d'' U_n^2 / S_n$	$\frac{X_d'' U_n^2 S_{\delta}}{S_n U_{\delta}^2}$	$X_d'' S_{\delta} / S_n$
Двохобмот. трансформатор	$U_k \%$	$\frac{U_k \% U_n^2}{100 S_n}$	$\frac{U_k \% U_n^2 S_{\delta}}{100 S_n U_{\delta}^2}$	$\frac{U_k \% S_{\delta}}{100 S_n}$
ЛЕП повітряна або кабельна	$X_0, \text{Ом/км}$	$X_0 L$	$X_0 L S_{\delta} / U_{\delta}^2$	$X_0 L S_{\delta} / U_{cp}^2$
Реактор	$X_p \%$	$\frac{X_p \% U_n}{100 \sqrt{3} I_n}$	$\frac{X_p \% I_{\delta} U_n}{100 I_n U_{\delta}}$	$\frac{X_p \% I_{\delta} U_n}{100 I_n U_{\delta}}$
Здвоєний реактор	$X_1 = -k X_p \%$ , $X_2 = X_3 = (1+k) X_p \%$ , $k = 0,5$ .	$\frac{X_p \% U_n}{100 \sqrt{3} I_n}$	$\frac{X_p \% I_{\delta} U_n}{100 I_n U_{\delta}}$	$\frac{X_p \% I_{\delta} U_n}{100 I_n U_{\delta}}$

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5
Асинхронний двигун	$X_{\delta\sigma} = 1/K_n =$ $= 1/I_{нук}^*$	$1 U_H$ $\frac{\quad}{K_n \sqrt{3} I_H}$	$1 U_H^2 S_{\sigma}$ $\frac{\quad}{K_n S_H U_{\sigma}^2}$	$1 S_{\sigma}$ $\frac{\quad}{K_n S_H}$
Узагальнене навантаження	$X_H^* = 0,35$ $E_H^* = 0,8$	$0,35 U_H^2 / S_H$	$0,35 U_H^2 S_{\sigma}$ $\frac{\quad}{S_H U_{\sigma}^2}$	$0,35 S_{\sigma} / S_H$

**Приклад 1.** Для СЕП (рис. 1.2) скласти схему заміщення для розрахунків трифазного КЗ у точці К і визначити результуючий опір короткозамкненого ланцюга в іменованих і відносних одиницях за точного й наближеного зведення.



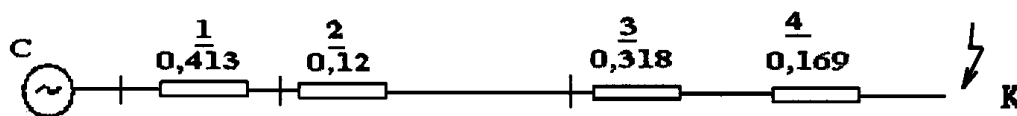
a

$$U_c = 121 \text{ кВ} = \text{const}; \quad L = 30 \text{ км}; \quad S_{\text{тр ном}} = 40 \text{ МВ А}; \quad U_{\text{нр}} = 10 \text{ кВ};$$

$$X_c = 50 \text{ Ом}; \quad x_0 = 0,4 \text{ Ом/км}; \quad U_k = 10,5 \text{ \%}; \quad I_H = 2000 \text{ А};$$

$$U_B / U_H = 110/11 \text{ кВ}; \quad X_p = 0,14 \text{ Ом}.$$

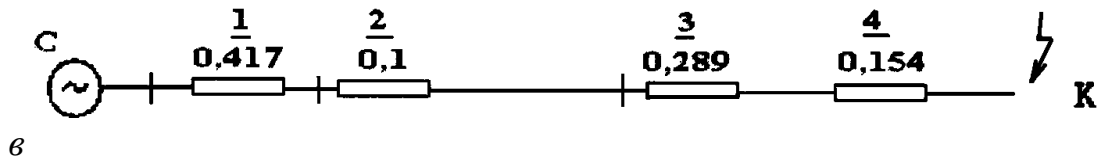
$$X_{\text{рез}} = 1,02 \text{ Ом}$$



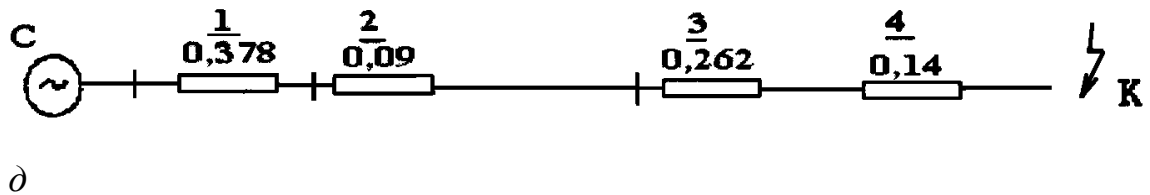
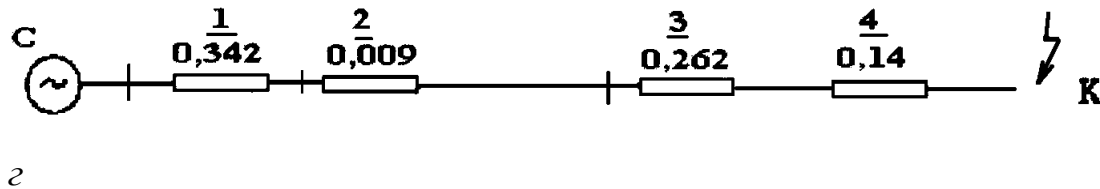
б

$$X_{\text{рез}} = 0,96 \text{ Ом}$$

Рисунок 1.2 – Розрахункова схема (а) і схеми заміщення з точним зведенням в іменованих одиницях (б); наближеним зведенням в іменованих одиницях (в); точним зведенням у відносних одиницях (г); наближеним зведенням у відносних одиницях (д)



$$X_{pez} = 1,02 \text{ Ом} \quad X_{*pez} = 0,843 \text{ Ом}$$



$$X_{*pez} = 0,87 \text{ Ом} \quad X_{*pez} = 0,87 \text{ Ом}$$

Продовження рисунка 1.2

**Розв'язок.** Розрахунки в іменованих одиницях з точним зведенням параметрів до базисних умов (рис. 1.2, б). За базисну напругу обираємо напругу ступеня, де відбулося КЗ, тобто  $U_0 = U_k$ . Тоді

$$U_c^0 = U_c \frac{U_H}{U_B} = 121 \frac{11,0}{110} = 12,10 \text{ кВ};$$

$$x_1 = x_c \frac{U_H^2}{U_c^2} = 50 \frac{11,0^2}{121^2} = 0,413 \text{ Ом};$$

$$x_2 = x_0 L \frac{U_H^2}{U_B^2} = 0,4 \cdot 30 \frac{11,0^2}{110^2} = 0,12 \text{ Ом};$$

$$x_3 = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_B^2 U_H^2}{S_{\text{тр ном}} \cdot U_B^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2 \cdot 11^2}{40 \cdot 110^2} = 0,318 \text{ Ом};$$

$$x_4 = X_p \frac{U_k^2}{U_{P_{ном}}^2} = 0,14 \frac{11,0^2}{10^2} = 0,169 \text{ Ом.}$$

Результуючий опір ланцюга КЗ:

$$x_{рез} = x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 0,413 + 0,12 + 0,318 + 0,619 = 1,02 \text{ Ом.}$$

Розрахунки в іменованих одиницях із наближеним зведенням параметрів до базисних умов.

Для розглянутої схеми середні напруги ступенів дорівнюють, відповідно, 115 і 10,5 кВ. Тоді

$$U_c^0 = U_c \cdot \frac{U_{срн}}{U_{срв}} = 121 \frac{10,5}{115} = 11,04 \text{ кВ;}$$

$$x_1 = x_c \cdot \frac{U_H^2}{U_c^2} = 50 \frac{10,5^2}{115^2} = 0,413 \text{ Ом;}$$

$$x_2 = x_0 L \cdot \frac{U_{срн}}{U_{срв}} = 0,4 \cdot 30 \frac{10,5^2}{115^2} = 0,1 \text{ Ом;}$$

$$x_3 = \frac{U_k}{100} \frac{U_{срв}^2 \cdot U_{срн}^2}{S_{тр-ном} \cdot U_{срв}^2} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{115^2 \cdot 10,5^2}{40 \cdot 115^2} = 0,289 \text{ Ом;}$$

$$x_4 = X_p \frac{U_{срн}^2}{U_{P_{ном}}^2} = 0,14 \cdot \frac{11,5^2}{10^2} = 0,154 \text{ Ом.}$$

Результуючий опір:  $x_{рез} = 0,417 + 0,1 + 0,289 + 0,154 = 0,96 \text{ Ом.}$

Розрахунки у відносних одиницях з точним зведенням параметрів до базисних умов. Обираємо за базисну потужність  $S_{\delta} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$  і зводимо до неї параметри елементів:

– на ступені напруги, де відбулося КЗ  $U_{\delta} = 11,0 \text{ кВ.}$

$$I_{н\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{н\delta}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 11,0} = 5,255 \text{ кА;}$$

– на ступені вищої напруги

$$U_{\delta\delta} = U_{н\delta} \cdot \frac{U_B}{U_H} = 11,0 \cdot \frac{110}{11,0} = 110 \text{ кВ};$$

$$I_{\delta\delta} = I_{н\delta} \cdot \frac{U_H}{U_B} = 5,255 \cdot \frac{11,0}{110} = 0,525 \text{ кА}.$$

Відносна напруга системи

$$U_{*c} = \frac{U_c}{U_e} = \frac{121}{110} = 1,1.$$

Опори, зведені до базисних умов:

$$x_{*1} = x_c \cdot \frac{S_{\delta}}{U_C^2} = 50 \cdot \frac{100}{121^2} = 0,342;$$

$$x_{*2} = x_0 L \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{\delta\delta}^2} = 0,4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{110^2} = 0,099;$$

$$x_{*3} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{трн}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,262;$$

$$x_{*4} = X_P \frac{S_{\delta}}{U_{Pном}^2} = 0,14 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,14.$$

Результуючий опір

$$X_{*рез} = 0,342 + 0,099 + 0,262 + 0,14 = 0,843 .$$

Визначимо базисний опір

$$X_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} I_{н\delta}} = \frac{11,0}{\sqrt{3} \cdot 5,255} = 1,21 \text{ Ом}.$$

Величина результуючого опору в іменованих одиницях

$$X_{рез} = X_{*рез} \cdot X_{\delta} = 0,843 \cdot 1,21 = 1,02 \text{ Ом},$$

тобто величина результуючого опору однакова у разі застосування іменованих і відносних одиниць.

Розрахунки у відносних одиницях з наближеним зведенням параметрів.

$$U_{*c} = \frac{U_c}{U_{cp}} = \frac{121}{115} = 1,052;$$

$$x_{*1} = 50 \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2} = 50 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,378;$$

$$x_{*2} = x_0 L \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{B\delta}^2} = 0,4 \cdot 30 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,09;$$

$$x_{*3} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{трном}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,2625;$$

$$x_{*4} = X_P \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{Pном}^2} = 1,4 \cdot \frac{100}{10^2} = 0,14.$$

Результуючий опір:  $X_{*рез} = 0,378 + 0,09 + 0,2625 + 0,14 = 0,87$ .

Базисні струм і опір

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{cp}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ кА};$$

$$X_{\delta} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot I_{\delta}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 5,5} = 1,104 \text{ Ом}.$$

Величина результуючого опору в іменованих одиницях

$$x_{рез} = 0,87 \cdot 1,104 = 0,96 \text{ Ом}.$$

**Приклад 2.** Визначити перехідний і ударний струми при КЗ у точці  $K$  (рис. 1.3). Розрахунки зробити з обліком усіх приєднаних навантажень.

1. Вибираємо базисні умови  $S_{\delta} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ,  $U_{\delta} = U_{cp} = 6,3 \text{ кВ}$ ,

$$I_{\delta} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА}.$$



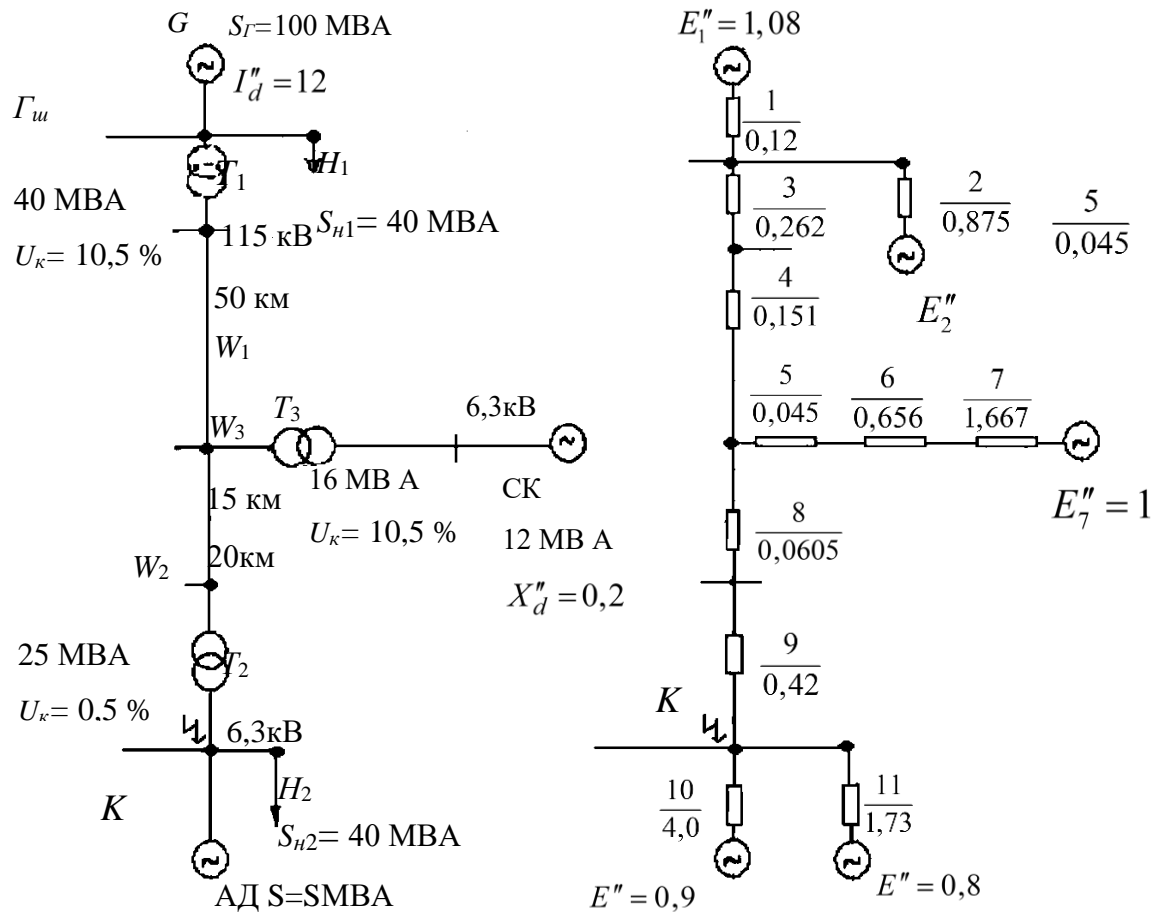


Рисунок 1.3 – Розрахункова схема (а) і схема заміщення

2. Зводимо величини опорів до обраних базисних умов:

– генератора  $X_{*1} = \frac{X_{d''}^* \cdot S_{\bar{\sigma}}}{S_{H2}} = \frac{0,12 \cdot 100}{100} = 0,12$ ;

– навантаження  $H_1$   $X_{*2} = \frac{X_{*H}^* \cdot S_{\bar{\sigma}}}{S_{H1}} = \frac{0,35 \cdot 100}{40} = 0,875$ ;

– трансформатора  $T_1$   $X_{*3} = \frac{U_k \% \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{T1}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 40} = 0,262$ ;

– ЛЕП  $W_1$   $X_{*4} = \frac{X_0 \cdot L \cdot S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = \frac{0,4 \cdot 50 \cdot 100}{115^2} = 0,151$ ;

– ЛЕП  $W_2$   $X_{*8} = \frac{0,4 \cdot 20 \cdot 100}{115^2} = 0,0605$ ;

– ЛЕП  $W_3$   $X_{*5} = \frac{0,4 \cdot 15 \cdot 100}{115^2} = 0,0454$ ;

$$\text{– трансформатора Т3 } X_{*6} = \frac{U_k \% \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{HT}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 16} = 0,656;$$

$$\text{– синхронного компенсатора } X_{*7} = \frac{X_{*d}'' \cdot S_{\bar{\sigma}}}{S_{HCK}} = \frac{0,2 \cdot 100}{12} = 1,667;$$

$$\text{– трансформатора Т2 } X_{*9} = \frac{U_k \% \cdot S_{\bar{\sigma}}}{100 \cdot S_{T2}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 25} = 0,42;$$

$$\text{– асинхронного двигуна } X_{*10} = \frac{X_{*ad}'' \cdot S_{\bar{\sigma}}}{S_{H ad}} = \frac{0,2 \cdot 100}{5} = 4,0;$$

$$\text{– навантаження Н2 } X_{*11} = \frac{X_{*OH}'' \cdot S_{\bar{\sigma}}}{S_{H2}} = \frac{0,35 \cdot 100}{20} = 1,75.$$

$$\text{Спрощуючи схему, знаходимо: } X_{*12} = X_{*1} // X_{*2} = \frac{0,12 \cdot 0,875}{(0,12 + 0,875)} = 0,105,$$

$$E_{12}'' = \frac{(E_{1*}' \cdot X_{*2} + E_{2*}'' X_{*1})}{(X_{*1} + X_{*2})} = \frac{(1,08 \cdot 0,875 + 0,8 \cdot 0,12)}{0,997} = 1,046,$$

$$X_{*13} = X_{*12} + X_{*3} + X_{*4} = 0,105 + 2,62 + 0,151 = 0,518,$$

$$X_{*14} = X_{*5} + X_{*6} + X_{*7} = 0,045 + 0,656 + 1,667 = 2,368,$$

$$X_{*15} = X_{*13} // X_{*14} = \frac{0,518 \cdot 2,368}{(0,528 + 2,368)} = 0,425,$$

$$E_{15}'' = \frac{(E_{*7}'' \cdot X_{*13} + E_{*12}'' X_{*14})}{(X_{*13} + X_{*14})} = 1,074,$$

$$X_{*16} = X_{*15} + X_{*8} + X_{*9} = 0,425 + 0,06 + 0,42 = 0,905.$$

Початковий струм з боку трансформатора Т2:

$$I_*'' = \frac{E_{*15}''}{X_{*16}} = \frac{1,074}{0,905} = 1,187.$$

Струм з боку синхронного компенсатора:

$$I_{*CK}'' = \frac{I_*'' X_{*13}}{(X_{*13} + X_{*14})} = \frac{1,187 \cdot 0,518}{2,286} = 0,213.$$

Струм з боку генератора й навантаження Н1:

$$I_{*r}'' = \frac{1,187 \cdot X_{*14}}{(X_{*13} + X_{*14})} = \frac{1,187 \cdot 2,368}{2,886} = 0,974.$$

Залишкова напруга в точці  $\Gamma_{ii}$ :

$$\begin{aligned} U_* &= I_*''(X_{*9} + X_{*8}) + I_{*r}''(X_{*3} + X_{*4}) = \\ &= 1,187(0,42 + 0,0605) + 0,974(0,262 + 0,151) = 0,973. \end{aligned}$$

Оскільки залишкова напруга в точці  $\Gamma_{ii}^* = 0,973$  й більше ЕРС навантаження Н1, рівної 0,8, то вона не є джерелом живлення і її можна не враховувати.

$$\text{Струм від асинхронного двигуна: } I_{*ad}'' = \frac{0,9}{4,0} = 0,225.$$

$$\text{Струм від узагальненого навантаження Н2: } I_{*OH2}'' = \frac{E_{*OH2}''}{X_{*11}} = \frac{0,8}{1,75} = 0,457.$$

Ударний струм у точці КЗ із урахуванням підживлення від АД ( $K_y = 1,7$ ) і від Н2 ( $K_y = 1$ ) буде:

$$\begin{aligned} i_y &= 1,8 \cdot \sqrt{2 \cdot 1,187 \cdot 9,16} + 1,7 \cdot \sqrt{2 \cdot 0,225 \cdot 9,16} + \sqrt{2 \cdot 0,457 \cdot 9,16} = \\ &= 27,68 + 4,955 + 5,92 = 38,555 \text{ кА}. \end{aligned}$$

$$\text{У цьому випадку участь АД становить: } \frac{4,955}{38,555} = 12,85 \% .$$

$$\text{Участь узагальненого навантаження Н2: } \frac{5,92}{38,555} = 15,35 \% .$$

За більш спрощених розрахунках, якщо зневажити навантаженням Н1 і синхронним компенсатором СК, струм із боку трансформатора Т2 буде:

$$I_*'' = \frac{1,08}{(0,12 + 0,262 + 0,151 + 0,0605 + 0,42)} = \frac{1,08}{1,014} = 1,065, \quad \text{тобто ця складова}$$

$$\text{виявилася зменшеною на } \frac{(1,187 - 1,065)}{1,187} = 10,27 \% .$$

**Приклад 3.** Для заданої схеми визначити ударний струм КЗ, найбільше діюче значення струму КЗ і потужність КЗ для  $t = 0$  і  $t = 0,3$  із за трифазного КЗ у точці  $K_1$  (рис. 1.4).

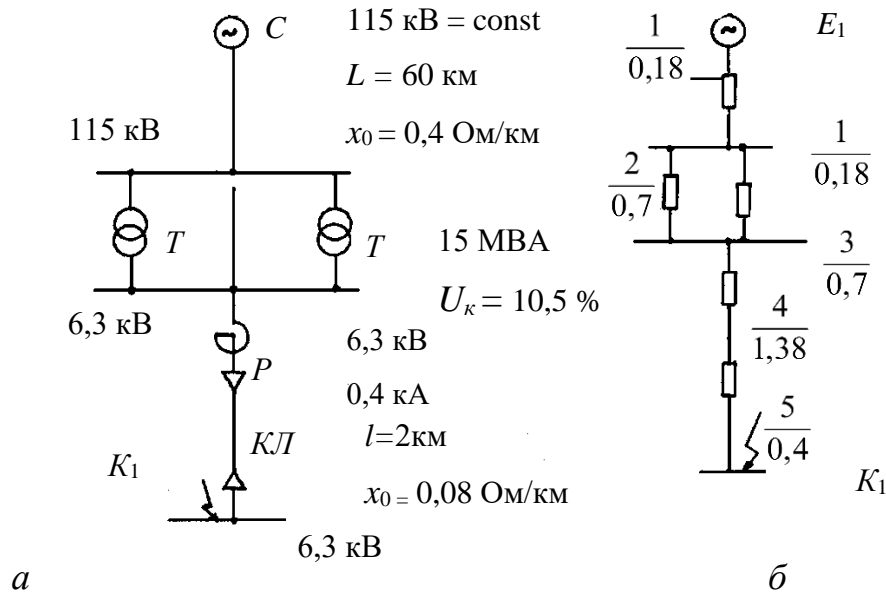


Рисунок 1.4 – Розрахункова схема (а) і схема заміщення (б)

$$X_{*1} = \frac{X_0 \cdot L \cdot S_{\delta}}{U_{cp}^2} = \frac{0,4 \cdot 60 \cdot 100}{115^2} = 0,18,$$

$$X_{*2} = \frac{U_k \% \cdot S_{\delta}}{100 S_{HT}} = \frac{10,5 \cdot 100}{100 \cdot 15} = 0,7 = X_{*3},$$

$$X_{*4} = \frac{X_p \% \cdot I_{\delta}}{100 I_H} = \frac{6,0 \cdot 9,2}{100 \cdot 0,4} = 1,38,$$

$$X_{*5} = \frac{0,08 \cdot 2 \cdot 100}{6,3^2} = 0,4,$$

$$\text{де } I_{\delta} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,2 \text{ кА.}$$

Сумарний реактивний опір до точки КЗ  $K_1$ :  $X_{*c} = 0,18 + 0,35 + 1,38 + 0,4 = 2,31$ .

Діюче значення періодичної складової:

$$I = \frac{I_{\delta}}{X_c} = 9,2 \cdot 2,31 = 4 \text{ кА.}$$

Прийнявши  $K_y = 1,8$ , маємо:

$$i_y = 1,8\sqrt{2} \cdot 4 = 10 \text{ кА,}$$

$$I_y = 4\sqrt{1 + 2(1,8 - 1)^2} = 1,52 \cdot 4 = 6,1 \text{ кА.}$$

Потужність КЗ за  $t = 0$ :  $S_k = I_y \sqrt{3} \cdot U_{cp} = 6,1\sqrt{3} \cdot 6,3 = 66,5 \text{ МВ} \cdot \text{А.}$

За  $Ta = 0,045$  з (що відповідає  $K_y = 1,8$ ) аперіодична складова практично загасне через  $t = 0,3$ .

$$S_k = I_n \sqrt{3} \cdot U_{cp} = 4\sqrt{3} \cdot 6,3 = 43,5 \text{ МВ} \cdot \text{А.} \text{ або простіше}$$

$$S_k = \frac{S_{\delta}}{X_c} = \frac{100}{2,31} = 43,5 \text{ МВ} \cdot \text{А}$$

## 2 НЕСИМЕТРИЧНІ КОРОТКІ ЗАМИКАННЯ

### 2.1 Загальні положення

Розрахунки струмів трифазних КЗ у трифазних симетричних мережах проводяться на одну фазу внаслідок подоби явищ, що відбуваються в кожній з фаз, і рівності значень однойменних величин.

За несиметрії в довільній точці системи опору у фазах неоднакові, через це явища по фазах різні. Неоднакові в цьому випадку струми, напруги і кути зрушення між ними в різних фазах. Для визначення струмів і напруг у будь-якій фазі несиметричної системи необхідно скласти схему заміщення й написати необхідне число рівнянь із урахуванням взаємоіндукції, що ускладнює рішення.

Порівняно просто розрахунки несиметричних режимів у трифазних мережах здійснюються за допомогою методу симетричних складових. Обчислення струмів і напруг у цьому випадку зводяться до визначення цих величин за деякого фіктивного трифазного КЗ, що дає можливість знову скористатися однолінійною схемою заміщення й здійснити розрахунок на одну фазу. У цьому полягає одне з основних особливостей методу симетричних складових.

### 2.2 Метод симетричних складових

Довільну несиметричну систему трьох векторів  $\underline{A}$ ,  $\underline{B}$ ,  $\underline{Z}$  можна розкласти однозначно на три симетричні системи:

- систему векторів прямої послідовності  $\underline{A}_1; \underline{B}_1; \underline{Z}_1$ ;
- систему векторів зворотної послідовності  $\underline{A}_2; \underline{B}_2; \underline{Z}_2$ ;
- систему векторів нульової послідовності  $\underline{A}_0; \underline{B}_0; \underline{Z}_0$ .

Згідно з умовою розкладання маємо:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0;$$

$$\underline{B} = \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0;$$

$$\underline{C} = \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0.$$

Модуль оператора фази дорівнює 1. Таким чином, якщо будь-який вектор помножити на  $a$ , то модуль вектора не зміниться, а лише відбудеться його поворот на  $120^\circ$  проти годинникової стрілки. Завдяки цій властивості можна вектори кожної із симетричних систем (прямий, зворотної, нульовий) виразити через один вектор тієї ж системи, тобто три невідомі в рівнянні звести до одного [1].

Оператор фази  $a$  визначається зі співвідношень:

$$a = e^{j120^\circ} = \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2};$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad a^3 = e^{j360^\circ} = 1.$$

Якщо прийняти як основну фазу  $A$ , то систему за допомогою оператора фази  $a$  можна подати в такому вигляді:

$$\underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0;$$

$$\underline{B} = a^2 \underline{A}_1 + a \underline{A}_2 + \underline{A}_0;$$

$$\underline{C} = a \underline{A}_1 + a^2 \underline{A}_2 + \underline{A}_0.$$

Спільне розв'язання системи рівнянь (10.2) дає:

$$\underline{A}_1 = (\underline{A} + a \underline{B} + a^2 \underline{C})/3;$$

$$\underline{A}_2 = (\underline{A} + a^2 \underline{B} + a \underline{C})/3;$$

$$\underline{A}_0 = (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C})/3.$$

Ступінь несиметрії трифазної системи оцінюється коефіцієнтами несиметрії й невірноваженості системи.

Абсолютна величина відношення складової зворотної послідовності до прямої називається коефіцієнтом несиметрії системи.

$$b = |A_2 / A_1|$$

Абсолютна величина відношення складової нульової послідовності до прямої називається коефіцієнтом неврівноваженості системи.

$$k = |A_0 / A_1|$$

Системи прямої і зворотної послідовності є симетричними й урівноваженими, а система нульової послідовності є симетричною, але неврівноваженою. Система нульової послідовності може існувати тільки в неврівноважених системах, які характеризуються такою умовою:  $\underline{A} + \underline{B} + \underline{C} \neq 0$ .

Геометрична сума неврівноваженої системи фазних струмів дорівнює потроєному струму нульової послідовності, який протікає в землі або нульовому проведенні.

### **2.3 Опір різних послідовностей елементів системи електропостачання**

Усі опори, якими характеризуються окремі елементи в нормальному симетричному режимі, а також у симетричному перехідному процесі фактично є опорами прямої послідовності. Цей термін раніше не вводився, тому що у схемі протікали струми лише прямої послідовності. У разі відсутності взаємодукції між фазами якого-небудь елемента його опору, прямі, зворотні й нульові послідовності однакові, тому що вони обумовлені тільки власною індуктивністю фази  $X_1 = X_2 = X_0$ .

За наявності магнітного зв'язку між фазами реактивний опір визначається з урахуванням взаємної індуктивності, яке залежить від того, яка послідовність струмів протікає по фазах. Для елемента, магнітні ланцюги якого нерухливі один щодо одного, опори прямої і зворотної послідовностей однакові, тому що від зміни чергування фаз взаємодукція між фазами такого елемента не змінюється.

У такий спосіб для трансформаторів, повітряних і кабельних ліній, реакторів  $X_1 = X_2$ .



Опір нульової послідовності всіх елементів різко відрізняється від опору прямої і зворотної послідовностей, тому що в цьому випадку взаємодія позначається інакше через те, що система струмів нульової послідовності збігається по фазах, у той час як струми прямої і зворотної послідовностей по фазах зрушені на  $120^\circ$ . Крім того, на величину реактивності нульової послідовності позначається схема з'єднання фаз розглянутого елемента й режим нейтралі. Якщо немає шляху для протікання струмів нульової послідовності, то це рівносильне тому, що опір нульової послідовності дорівнює нескінченності.

Таблиця 2.1 – Опір елементів системи трьох послідовностей

Найменування елемента	Трифазне КЗ		Пряма послідовність	Зворотна послідовність	Нульова послідовність
	Іменовані одиниці	Відносні одиниці			
1	2	3	4	5	6
Синхронний генератор	$X_d'' \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$X_d'' \cdot \frac{S_\phi}{S_H}$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = 1,22X_d''$	$X_0 = (0,15 \dots 0,6)X_1$
ЛЕП	$x_0 \cdot l$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_\phi}{U_{Л}^2}$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = X_1$	Одноланцюгова із тросами $X_0 = 2,0X_1$ . Одноланцюгова без тросів $X_0 = 3,5X_1$ . Дволанцюгова із тросами $X_0 = 4,7X_1$ . Дволанцюгова без тросів $X_0 = 5,5X_1$
КЛ	$x_0 \cdot l$	$X_0 \cdot l \cdot \frac{S_\phi}{U_{Л}^2}$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = (3,5 \dots 4,6)X_1$ $r_0 = 10rL$
Реактор	$\frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{U_H}{\sqrt{3} \cdot I_H}$	$\frac{X_P\%}{100} \cdot \frac{I_\phi U_H}{I_H U_\phi}$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = X_1$
Асинхронний двигун	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 0,9 U_H$	$0,2 \cdot \frac{S_\phi}{S_H}$ $E_*'' = 0,9$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = X_1$	$X_0 = (0,15 \dots 0,6) X_1$

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5	6
Навантаження	$0,35 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E_H'' = 0,8 \underline{U}_H$	$0,35 \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$ $E_{H^*}'' = 0,8$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = X_1$	Визначається елементами
Трансформ.	$\frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$	$\frac{U_{\kappa} \%}{100} \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = X_1$	Визначається з'єднанням обмоток
Синхронний двигун	$0,2 \cdot \frac{U_H^2}{S_H}$ $E'' = 1,1 \underline{U}_H$	$0,2 \cdot \frac{S_{\sigma}}{S_H}$ $E_*'' = 1,1$	$X_1 = X_{(3)}$	$X_2 = 1,22 X_1$ опускається $X_2 = X_1$	$X_0 = (0,15 \dots 0,6) X_1$

## 2.4 Порівняння різних видів короткого замикання

Правило еквівалентності прямої послідовності й установлені значення  $X_{(n)}$  і  $m$  дозволяють доволі точно зробити порівняння різних видів КЗ по повному струму в місці ушкодження.

З'ясуємо, у яких межах можуть змінюватися величини струмів за різних несиметричних КЗ порівняно з величинами струмів трифазного КЗ, що виникає в тій самій точці системи. Знання цих меж становить практичний інтерес, тому що воно дозволяє по відомій для цієї точки величині струму трифазного КЗ (обчислення якої простіше, ніж за інших видів КЗ) оцінити в першому наближенні можливі найбільші й найменші значення струму за несиметричних КЗ. Установлювані нижче граничні співвідношення слушні для струмів у місці КЗ і їх не можна поширювати на струми інших віток схеми.

Вираз для струму справедливий для будь-якого моменту часу, однак його застосування ускладнюється тим, що значення результуючої ЕРС прямої послідовності за різних видів КЗ для того самого моменту часу різні внаслідок нерівності постійних часу за різних КЗ. Для усунення зазначеного ускладнення будемо вважати, що генератори працюють у режимі граничного порушення, що забезпечує те саме значення ЕРС незалежно від виду КЗ. Водночас шукане

відношення струму несиметричного КЗ до струму трифазного КЗ у тій самій точці буде:

$$\frac{I_{K(n)}}{I_{K3}} = \frac{m_{(n)} I_{K(n)}}{I_{k1}} = \frac{m_{(n)}}{1 + \frac{X_{(n)}}{X_{1c}}} = K_{(n-3)}.$$

Знайдемо для кожного виду несиметричного КЗ межі цього відношення.

### 1. Двофазне КЗ.

Для двофазного КЗ маємо:  $m_{(2)} = \sqrt{3}$ .

Отже,

$$K_{(2-3)} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{X_{2c}}{X_{1c}}}.$$

Верхня межа виходить в умовах режиму, що встановився, КЗ на виводах генератора, коли

$$X_{2c} \ll X_{1c} \text{ і } K_{(2-3)} \rightarrow \sqrt{3}.$$

Нижня межа  $K_{(2-3)}$  спостерігається за умов, коли  $X_{2c}$  досягає найбільшого можливого значення. Це буде в тому випадку, якщо у схемі відсутні навантаження (оскільки вони суттєво знижують  $X_2$ ), тобто

$$X_{2c} = X_{2Г} + X_{1вн}$$

і, відповідно,

$$X_{1c} = X_{1Г} + X_{1вн}.$$

Враховуючи  $X_{2Г} = X_{1Г}$ , маємо:

$$X_{1c} = X_{2c} \text{ і } K_{(2-3)} \rightarrow \frac{\sqrt{3}}{2},$$

$$\frac{\sqrt{3}}{2} < K_{(2-3)} < \sqrt{3}.$$

При вилучених КЗ струми двофазного й трифазного КЗ змінюються в часі порівняно мало, завдяки чому між ними протягом усього процесу КЗ зберігається постійне співвідношення:

$$I_{k(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{k(3)} = 0,867 I_{k(3)}.$$

## 2. Однофазне КЗ.

Для однофазного КЗ маємо:

$$m_{(1)} = 3, X_{(1)} = X_{2c} + X_{0c},$$

отже,

$$K_{(1-3)} = \frac{3}{1 + \frac{(X_{2c} + X_{0c})}{X_{1c}}}.$$

Верхня межа спостерігається за однофазного КЗ на виводах генератора, нейтраль якого заземлена наглухо.

При вилученому КЗ  $X_{2c} \cong X_{1c}$ , то  $K_{(1-3)} \rightarrow 1,5$ .

Під час заземлення нейтралі через опір можна струм однофазного КЗ обмежити до малої величини, аж до нуля, за  $X_0 \rightarrow \infty$ , водночас  $K_{(1-3)} = 0$ .

Таким чином, шукане значення  $K_{(1-3)}$  перебуває в межах:

$$0 < K_{(1-3)} < 1,5 \dots 3.$$

## 3. Двофазне КЗ на землю.

Для двофазного КЗ на землю маємо:

$$m_{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_{2c} X_{0c}}{(X_{2c} + X_{0c})^2}} \quad \text{і} \quad X_{(1,1)} = \frac{X_{2c} + X_{0c}}{(X_{2c} + X_{0c})^2}.$$

Найменше значення  $X_{(1,1)}$  буде за  $X_{0c} = 0$  або за  $X_{2c} = 0$ , разом із тим  $m_{(1,1)} = \sqrt{3}$ . Отже, верхня межа, до якої прагне відношення  $K_{(1,1-3)}$ , становить  $\sqrt{3}$ .

Найбільше значення  $X_{(1,1)}$  виходить за  $X_{0c} = \infty$ , тобто коли немає заземлених нейтралей, і, отже, цей вид КЗ є двофазним КЗ. У цьому випадку  $K_{(1,1-3)}$  дорівнює 1.

Для умов вилученого КЗ  $X_{2c} = X_{1c}$ , відношення  $K_{(1,1-3)}$  перебуває в межах

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \leq K_{(1,1-3)} \leq \sqrt{3}.$$

## 2.5 Вказівки до розрахунків струмів несиметричного короткого замикання

Розрахунки несиметричних КЗ проводять із використанням методу симетричних складових, згідно з яким будь-яка несиметрична трифазна система напруг, струмів, потоків і т. п. замінюється трьома симетричними трифазними системами прямої, зворотної й нульової послідовності.

Під час розрахунків струмів несиметричних КЗ застосовують правило еквівалентності прямої послідовності, на підставі якого струм прямої послідовності за будь-якого несиметричному КЗ чисельно дорівнює току при деякому трифазному КЗ у точці, вилученої на величину  $X_{(n)}$  від дійсної точки КЗ. Отже, усі методи розрахунків струмів при трифазних КЗ прийнятні й для визначення струму будь-якого несиметричного КЗ.

Порядок розрахунків струмів несиметричних КЗ такий:

1. Складаються схеми заміщення окремих послідовностей.
2. Розраховуються параметри елементів схем заміщення, приводяться до одного ступеня трансформації точним або наближеним зведенням і

визначаються результуючі опори окремих послідовностей щодо точки КЗ, а також результуюча ЕРС зі схеми заміщення прямої послідовності.

3. З комплексної схеми заміщення визначається струм прямої послідовності, а потім – повний струм в ушкоджених фазах у місці КЗ.

**Приклад 2.1** Визначити для початкового моменту часу струм двофазного й однофазного КЗ у точці К.

*Аналітичне розв’язання у відносних одиницях*

1. Обираємо базисні умови:  $S_{\bar{\sigma}} = 100 \text{ МВ} \cdot \text{А}$ ;  $U_{\bar{\sigma}1} = 115 \text{ кВ}$ ;  $I_{\bar{\sigma}1} = 0,5 \text{ кА}$ .

2. Параметри елементів схеми заміщення прямої послідовності:

$$Г_1, Г_2 \quad X_1 = X_2 = X_d'' \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n} = \frac{0,27 \cdot 100}{30} = 0,9;$$

$$Т_1, Т_2 \quad X_3 = X_4 = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{40} = 0,26;$$

$$Т_3 \quad X_5 = \left[ \frac{U_{квн} \%}{100} \right] \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_n} = \left[ \frac{18}{100} \right] \cdot \frac{100}{63} = 0,286;$$

$$Л_2 \quad X_6 = X_0 \frac{LS_{\bar{\sigma}}}{U_{\bar{\sigma}2}^2} = \frac{0,4 \cdot 30 \cdot 100}{115^2} = 0,09;$$

$$Л_3 \quad X_7 = \frac{0,4 \cdot 70 \cdot 100}{115^2} = 0,21;$$

$$Л_1 \quad X_8 = \frac{0,4 \cdot 50 \cdot 100}{115^2} = 0,15;$$

$$\begin{aligned} \text{ЕДС} \quad E_1'' = E_2'' = U_0 + I_0 X_d'' \sin \varphi_{nc} &= 1 + 1 \cdot 0,27 \cdot 0,6 = 1,16, \\ E_3 &= 1. \end{aligned}$$

Опори зворотної послідовності всіх елементів схеми, крім генераторів, дорівнюють опорам прямої послідовності. Для генераторів маємо:  $X_2 = 1,45 X_1 = 1,305$ .

3. Перетворимо схеми, визначимо результуючу ЕРС і результуючі опори:

$$X_{10} = \frac{X_1 + X_3}{2} = \frac{0,9 + 0,26}{2} = 0,56;$$

$$X_{11} = \frac{X_8}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075;$$

$$X_{12} = X_{10} + X_{11} = 0,56 + 0,075 = 0,655;$$

$$X_{13} = X_5 + X_6 + X_7 = 0,286 + 0,09 + 0,21 = 0,586;$$

$$X_{1C} = \frac{X_{12} X_{13}}{X_{12} + X_{13}} = \frac{0,655 \cdot 0,586}{0,655 + 0,586} = 0,31;$$

$$E_1 = \frac{E_1 X_{13} + E_3 X_{12}}{X_{12} X_{13}} = \frac{1,16 \cdot 0,586 + 1 \cdot 0,655}{0,586 \cdot 0,655} = 1,163.$$

Після перетворення схеми заміщення зворотної послідовності одержимо  $X_2 = 0,35$ .

4. Струм прямої послідовності в місці КЗ:

$$I''_{k1} = E_1'' / (X_1 + X_2) = 1,163 / (0,31 + 0,35) = 1,76.$$

5. Струм в ушкоджених фазах у місці КЗ в іменованих одиницях:

$$\underline{I}_K = \sqrt{3} I_{k1} I_{\phi 2} = 1,73 \cdot 1,76 \cdot 0,5 = 1,52 \text{ кА.}$$

#### *Розв'язання з використанням розрахункових кривих*

1. Виділяємо дві генерувальні вітки: система й станція з генераторами. Опори прямої і зворотної послідовностей генерувальної вітки з попередніх розрахунків:

$$X_{1c} = 0,586; X_{2c} = 0,586; X_{1\Gamma} = 0,655; X_{2\Gamma} = 0,86.$$

2. Розрахункові опори генерувальної вітки будуть:

$$X_{\text{розрах1}} = X_{1(1)} + X_{2(2)} = 0,586 + 0,586 = 1,17,$$

генератори  $\Gamma_1$  і  $\Gamma_2$

$$X_{\text{розрах2}} = (X_{2(1)} + X_{2(2)}) S_H / S_\sigma = (0,655 + 0,86) \cdot 60 / 100 = 0,9.$$

3. За розрахунковими кривими для гідрогенераторів з АРВ визначаємо періодичну складову струму прямої послідовності від генераторів:

$$I''_{nk1(2)} = 0,95 .$$

4. Повний струм в ушкоджених фазах у місці КЗ:

$$I_{к(2)} = \sqrt{3} I''_{nk1(2)} I_{сн} + \sqrt{3} \cdot I_{\delta 2} / X_{розрах1} = 1,73 \cdot 0,95 \cdot 0,3 + 1,73 \cdot 0,5 / 1,17 = 1,23 \text{ кА},$$

де  $I_{сн} = 2 \cdot S_n / \sqrt{3} U_{ср.н} = 2 \cdot 30 / \sqrt{3} \cdot 115 = 0,3 \text{ кА}.$

Для розрахунків струму однофазного КЗ необхідно скласти схеми заміщення прямої, зворотної й нульової послідовностей.

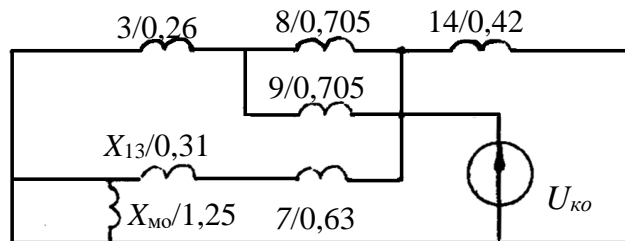


Рисунок 2.1 – Схема заміщення нульової послідовності

1. Опори нульової послідовності елементів схеми у відносних одиницях:

$$T_1 \quad X_{3(0)} = X_{3(1)} = 0,26 ,$$

$$T_5 \quad X_{14(0)} = X_{14(1)} = 0,42$$

$$L_1 \quad X_{8(0)} = X_{9(0)} = 4,7 X_{8(1)} = 4,7 \cdot 0,15 = 0,705 ,$$

$$L_3 \quad X_{7(0)} = 3X_{7(1)} = 3 \cdot 0,21 = 0,63 ,$$

$$T_4 \quad X_{1(0)} = X_{1(1)} = 0,13 , \quad X_{mo} = (0,3 \dots 1,0) S_{\delta} / S_n = 0,5 \cdot 100 / 40 = 1,25 .$$

2. Резульгуючий опір нульової послідовності:

$$X_{0c} = X_{14(0)} \parallel (X_{3(0)} + X_{8(0)} / 2) \parallel (X_{7(0)} + X_{1(0)}) + X_{mo} = 0,42 \parallel 0,7 \parallel 2,01 = 0,23 .$$



3. Струм прямої послідовності в місці КЗ:

$$I''_{\kappa 1(1)} = E''_{1c} / (X_{1c} + X_{2c} + X_{0c}) = 1,163 / (0,31 + 0,39 + 0,23) = 1,25.$$

4. Повний струм у місці КЗ:

$$I''_{\kappa(1)} = 3 I''_{\kappa 1(1)} \cdot I_{\beta 2} = 3 \cdot 1,25 \cdot 0,5 = 1,875 \text{ кА.}$$

1. Якщо розрахунки ведуться за розрахунковими кривими і з урахуванням індивідуального загасання струмів окремих генерувальних віток, то необхідно результуючий опір нульової послідовності розподілити по генерувальних вітках. Для цього знаходимо коефіцієнти розподілу генерувальних віток, що характеризують частку їхньої участі в живленні КЗ. Коефіцієнти визначаємо зі схеми заміщення прямої послідовності:

$$C_1 = X_{1c} / X_{13} = 0,31 / 0,586 = 0,53,$$

$$C_2 = X_{1c} / X_{12} = 0,31 / 0,655 = 0,47$$

2. Опори нульової послідовності вітки будуть:

$$X_{1(0)} = X_{0c} / C_1 = 0,23 / 0,53 = 0,434,$$

$$X_{2(0)} = X_{0c} / C_2 = 0,23 / 0,47 = 0,49.$$

3. Визначаємо розрахункові опори вітки:

$$C X_{\text{розрах1}} = X_{1(1)} + X_{1(2)} + X_{1(0)} = 0,586 + 0,586 + 0,434 = 1,606,$$

$$\Gamma X_{\text{розрах2}} = (X_{2(1)} + X_{2(2)} + X_{2(0)}) S_n / S_{\beta} = (0,655 + 1,15 + 0,49) 60 / 100 = 1,377.$$

4. По кривих струм прямої послідовності від другої генерувальної вітки

$$I_{\kappa 1} = 0,74 \text{ в.о.}$$

5. Повний струм  $I_{\kappa(1)}$  у місці КЗ буде:

$$I_{\kappa(1)} = 3 I_{\beta 2} X_{\text{розрах}} + 3 I_{\kappa 1(1)},$$

$$I_{\kappa(1)} = 3 \cdot 0,5 / 1,606 + 3 \cdot 0,74 \cdot 0,3 = 1,6 \text{ кА.}$$

**Приклад 2.2** Визначити аналітичним способом і за допомогою розрахункових кривих ударний струм КЗ для двофазного, однофазного та для двофазного КЗ на землю (рис. 2.2).

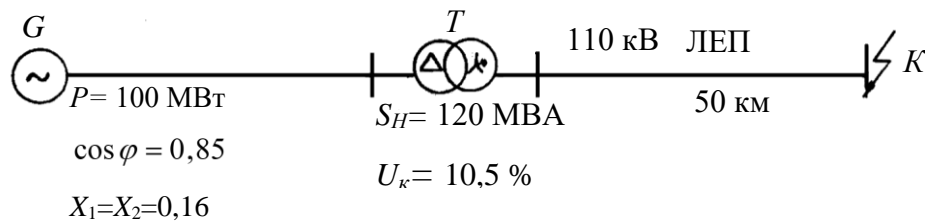


Рисунок 2.2 – Розрахункова схема

### Двофазне КЗ

Для двофазного КЗ необхідно скласти схеми заміщення прямої і зворотної послідовностей.

1. Вибираємо базисні умови:

$$S_{\sigma} = 100 \text{ МВА}, U_{\sigma} = U_{cp} = 115 \text{ кВ}, I_{\sigma} = 0,5 \text{ кА}.$$

2. Становимо схеми заміщення прямої і зворотної послідовностей:

$$1/0,136 \quad 2/0,087 \quad 3/0,15 \quad 1/0,136 \quad 2/0,087 \quad 3/0,15.$$

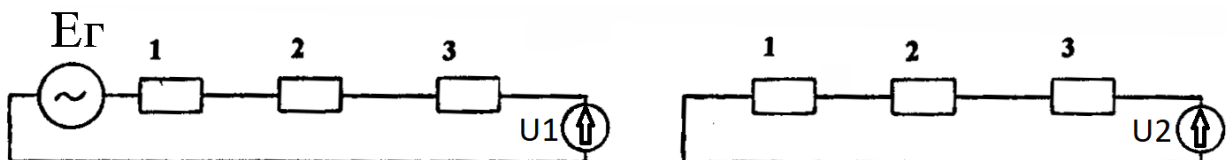


Рисунок 2.3 – Схеми заміщення прямої та зворотної послідовностей

3. Параметри схеми заміщення прямої послідовності:

$$E'' = U_* + I_* X_1 \sin \varphi = 1 + 1 \cdot 0,16 \cdot 0,53 = 1,085,$$

$$X_1 = X_1 S_{\sigma} / S_H = 0,16(100 \cdot 0,85 / 100) = 0,136,$$

$$X_2 = U_{\kappa} \% \cdot S_{\sigma} / 100 S_H = 10,5 \cdot 100 / 100 \cdot 120 = 0,087,$$

$$X_3 = X_0 L S_{\sigma} / U_{\sigma}^2 = 0,4 \cdot 50 \cdot 100 / 115^2 = 0,15.$$

4. Зводимо схему заміщення до найпростішого вигляду:

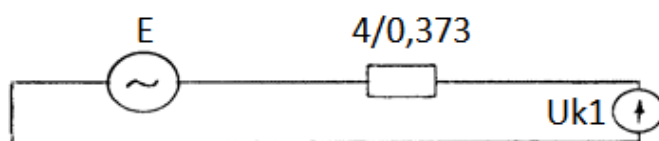


Рисунок 2.4 – Результуюча схема прямої послідовності

$$X_4 = X_1 + X_2 + X_3 + 0,136 + 0,087 + 0,15 = 0,373 ,$$

$$X_4 = X_{1c} = 0,373 .$$

5. Параметри схеми заміщення зворотної послідовності. Схема зворотної послідовності тільки в тому випадку може відрізнятися від схеми прямої послідовності, якщо опір зворотної послідовності генератора відрізняється від опору прямої послідовності. У цьому випадку обираємо опори прямої і зворотної послідовностей генератора однаковими й тому схема заміщення зворотної послідовності буде мати ті самі параметри, що й прямої.

Схема заміщення зворотної послідовності, зведена до найпростішого вигляду, буде:

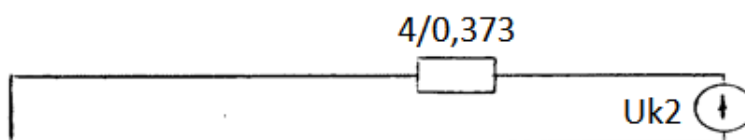


Рисунок 2.5 – Результуюча схема зворотної послідовності

$$X_4 = X_{2c} = 0,373 .$$

6. Струм прямої послідовності:

$$I''_{*k1(2)} = E''_{1c} / (X_{1c} + X_{(2)}) = 1,085 / (0,373 + 0,373) = 1,455 .$$

7. Надперехідний струм в ушкоджених фазах в іменованих одиницях:

$$I''_{k(2)} = m_{(2)} I''_{k1} I_{\sigma} = \sqrt{3} \cdot 1,455 \cdot 0,5 = 1,26 \text{ кА} .$$

8. Ударний струм:

$$i_y = \sqrt{2} K_y I_k'' = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 1,26 = 3,26 \text{ кА.}$$

9. Для використання методу розрахункових кривих визначимо розрахунковий опір:

$$X_{\text{розрах.}} = (X_1 + X_2) S_H / S_{\bar{\sigma}} = (0,373 + 0,373) \cdot 100 / 0,85 \cdot 100 = 0,878.$$

10. З розрахункових кривих визначаємо для  $X_{\text{расч}} = 0,878$ :

$$I_{*1t=0} = 1,14; I_{*1t=0,5} = 0,98; I_{*1t=\infty} = 1,27;$$

$$I_{*t=0} = m_{(2)} I_{*1t=0} = \sqrt{3} \cdot 1,14 = 1,973;$$

$$I_{*t=0,5} = m_{(2)} I_{*1t=0,5} = \sqrt{3} \cdot 0,98 = 1,695;$$

$$I_{*t=\infty} = m_{(2)} I_{*1t=\infty} = \sqrt{3} \cdot 1,27 = 2,2.$$

11. Новий базисний струм:

$$\underline{I}_{\bar{\sigma}H} = S / \sqrt{3} \underline{U}_{\bar{\sigma}} = 100 / \sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,85 = 0,598 \text{ кА.}$$

12. Струми в іменованих одиницях:

$$I_{t=0} = I_{*t=0} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 1,973 \cdot 0,598 = 1,18 \text{ кА;}$$

$$I_{t=0,5} = I_{*t=0,5} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 1,695 \cdot 0,598 = 1,014 \text{ кА;}$$

$$I_{\infty} = I_{*t=\infty} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 2,2 \cdot 0,598 = 1,317 \text{ кА.}$$

13. Ударний струм:

$$i_y = 2,55 \cdot I_{t=0} = 2,55 \cdot 1,18 = 3,04 \text{ кА.}$$

### **Однофазне КЗ**

Для цього випадку необхідно мати три схеми заміщення: прямої, зворотної й нульової послідовностей.

1. Базисні умови залишаються ті самі.

2. Схеми заміщення прямих і зворотної послідовності будуть ті самі, що й за двофазного КЗ і  $X_1 = 0,373$ ;  $X_2 = 0,373$ .

Схема заміщення нульової послідовності:

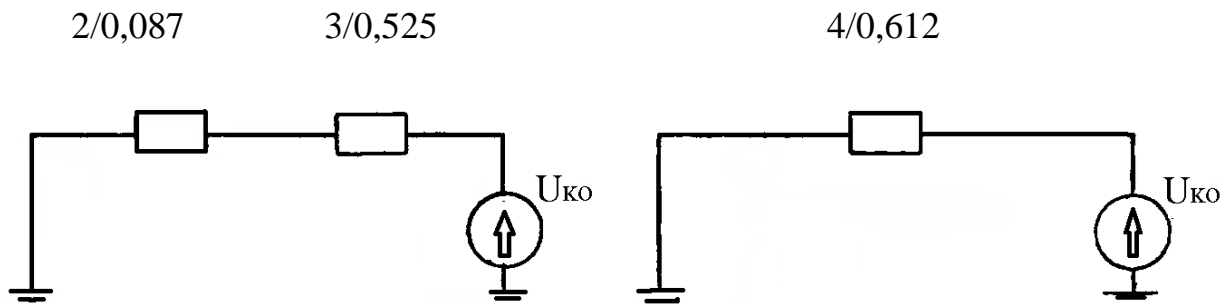


Рисунок 2.6 – Схема заміщення нульової послідовності

Для трансформатора опір нульової послідовності дорівнює опору прямої послідовності, тобто  $X_{*om} = 0,087$ . Для повітряної одноланцюгової ЛЕП без тросів  $X_{*ол} = 3,5 X_{*1л}$ , тоді:

$$X_{*ол} = 3,5 \cdot 0,15 = 0,525.$$

3. Струм прямої послідовності:

$$I_{*1}'' = E_{*1} / (X_{*1} + X_{(1)}) = 1,085 / (0,373 + 0,373 + 0,612) = 0,8.$$

4. Надперехідний струм:

$$I_1'' = m_{(1)} \cdot I_{*1}'' = 3 \cdot 0,8 = 2,4.$$

5. Ударний струм:

$$i_y = 2,55 \cdot I_{*1}'' = 2,55 \cdot 1,2 = 3,06 \text{ кА}.$$

6. Під час розрахунків за допомогою розрахункових кривих перебувають струми

$$I_{t=0}''; I_{t=0,5}'' \text{ і } I_{\infty}''.$$

Аналогічно випадку двофазного КЗ за  $X_{1c} = 0,373$ ;  $X_{2c} = 0,373$ ;  $X_{0c} = 0,612$ , розрахунковий опір:

$$X_{\text{розрах.}} = (X_{1c} + X_{(1)}) S_{nc} / S_{\delta} = (0,373 + 0,373 + 0,612) \cdot 100 / 0,85 \cdot 100 = 1,6.$$

Звертаємося до розрахункових кривих:

$$I_{*1t=0} = 1,6; \quad I_{*1t=0} = 0,62; \quad I_{*1t=0,5} = 0,575; \quad I_{*1\infty} = 0,68;$$

$$I_{*t=0} = m_{(1)} I_{*1t=0} = 3 \cdot 0,62 = 1,86;$$

$$I_{*t=0,5} = m_{(1)} I_{*1t=0,5} = 3 \cdot 0,575 = 1,725;$$

$$I_{*t=\infty} = m I_{*1t=\infty} = 3 \cdot 0,68 = 2,04.$$

Знаючи сумарні реактивності окремих послідовностей, визначаємо розрахункові реактивності виділюваних генерувальних віток за виразом

$$X_{\text{розрах}}^{(11)} = \frac{X_{1C} + X_{(n)}}{C} \cdot \frac{S_{HC}}{S_{\delta}},$$

де  $X_{1C}$  – сумарна реактивність схеми заміщення прямої послідовності у відносних одиницях;

$X_{(n)}$  – додаткова реактивність у відносних одиницях;

$S_{HC}$  – сумарна номінальна потужність генераторів виділюваної вітки, МВ·А;

$C$  – коефіцієнт розподілу для тієї саме вітки.

Якщо у схемі присутнє джерело нескінченної потужності, то реактивність його вітки визначається аналогічно:

$$X_c = (X_{1C} + X_{(n)}) C_c.$$

Оскільки розрахунки таким методом є доволі наближеними, то можна не підраховувати сумарний реактанс схеми зворотної послідовності, а приймати  $X_{2C} = X_{1C}$ .

Для знайденої розрахункової реактивності за цього виду КЗ за відповідними розрахунковими кривими знаходять значення відносного струму прямої послідовності в розглянутий момент часу  $t$ .

Розв'яжемо цей же приклад за допомогою розрахункових кривих і знайдемо

$$I''^{(1)}; I^{(1)}_{t=0,5}; I^{(1)}_{\infty}.$$

У цьому випадку ЕРС не становить інтересу, і нею ми користуватися не будемо. Схеми заміщення й зведення їх до найпростішого вигляду проводяться також, як це було зроблено під час розрахунків аналітичним методом.

Визначаємо базисний струм:

$$I_{\bar{\sigma}} = \frac{S_{\bar{\sigma}}}{\sqrt{3}U_{\bar{\sigma}}} = \frac{P}{\sqrt{3}U_{\bar{\sigma}} \cdot \cos \varphi} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 115 \cdot 0,85} = 0,598 \text{ кА.}$$

Визначаємо струми в іменованих одиницях:

$$I''_{t=0}^{(1)} = I''_{*t=0} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 1,983 \cdot 0,598 = 1,18 \text{ кА,}$$

$$I_t^{(1)} = 0,5 = I''_{*t=0,5} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 1,695 \cdot 0,598 = 1,014 \text{ кА,}$$

$$I_{\infty}^{(1)} = I''_{*\infty} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 2,04 \cdot 0,598 = 1,317 \text{ кА.}$$

Ударний струм:

$$i_y = 2,55 \cdot I''_{t=0}^{(1)} = 2,55 \cdot 1,18 = 3,01 \text{ кА.}$$

### ***Двофазне КЗ на землю***

У цьому випадку необхідно мати три схеми заміщення: прямої, зворотної й нульової послідовностей. Оскільки під час розрахунків однофазного КЗ ці схеми заміщення були визначені, то ми беремо результуючі опори й ЕРС із цього саме прикладу.

1. Базисні умови залишаються ті самі.

2. Результуючі опори всіх трьох схем заміщення:

$$X_{1C} = 0,373; X_{2C} = 0,373; X_{0C} = 0,612; E''_{1C} = 1,085.$$

3. Струм прямої послідовності:

$$I''_{*1}^{(1,1)} = \frac{E''_{12}}{X_1 + X^{(1,1)}} = \frac{1,085}{0,373 + \frac{0,373 \cdot 0,612}{0,373 + 0,612}} = 1,8;$$

$$I_*^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{*1}^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{X_2 \cdot X_0}{X_2 + X_0}} \cdot I_{*1}^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,373 \cdot 0,612}{0,373 + 0,612}} \cdot 1,8 = 2,7.$$

4. Струм в іменованих одиницях за  $I_{\bar{\sigma}} = 0,5$  кА:

$$I^{(1,1)} = I_*^{(1,1)} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 2,7 \cdot 0,5 = 1,35 \text{ кА.}$$

5. Ударний струм:

$$i_y^{(1,1)} = 2,55 \cdot I^{(1,1)} = 2,55 \cdot 1,35 = 3,44 \text{ кА.}$$

Розв'яжемо цей саме приклад за допомогою розрахункових кривих і знайдемо струми:

$$I^{(1,1)}; I_{t=0,5}^{(1,1)}; I_{\infty}.$$

Аналогічно попереднім випадкам КЗ за  $X_1 = X_2 = 0,373$ ;  $X_0 = 0,612$  розрахунковий опір:

$$X_{\text{розрах.}} = (X_{1C} + X^{(1,1)}) \frac{S_{HC}}{S_{\bar{\sigma}}} = \left( 0,373 + \frac{0,373 \cdot 0,612}{0,373 + 0,612} \right) \cdot \frac{100}{0,85 \cdot 100} = 0,712.$$

Звертаємося до розрахункових кривих:

$$X_{\text{розрах.}} = 0,712; I_{1(t=0)}'' = 1,4; I_{*(t=0,5)} = 1,19; I_{*1\infty} = 1,47;$$

$$I_*^{(1,1)} = m^{(1,1)} \cdot I_{t=0}'' = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{0,373 \cdot 0,612}{(0,373 + 0,612)^2}} \cdot 1,4 = 2,1;$$

$$I_* = m^{(1,1)} \cdot I_{t=0,5} = 1,5 \cdot 1,19 = 1,785;$$

$$I_{*\infty} = m^{(1,1)} \cdot I_{*1\infty} = 1,5 \cdot 1,47 = 2,2.$$

Визначаємо струми в іменованих одиницях:

$$I^{(1,1)} = I_* \cdot I_{\bar{\sigma}} = 2,1 \cdot 0,598 = 1,26 \text{ кА};$$

$$I_{0,5}^{(1,1)} = I_{*(t=0,5)} \cdot I_{\bar{\sigma}} = 1,785 \cdot 0,598 = 1,07 \text{ кА};$$

$$I = I_* \cdot I_{\bar{\sigma}} = 2,2 \cdot 0,598 = 1,32 \text{ кА.}$$

Ударний струм:

$$i_y = 2,55 \cdot I'' = 2,55 \cdot 1,26 = 3,22 \text{ кА.}$$



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

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

*Електронне навчальне видання*

Методичні рекомендації

до практичних занять  
з навчальної дисципліни

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

*(для здобувачів першого (бакалаврського)  
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,  
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

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

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*  
Редактор *О. В. Михаленко*  
Комп'ютерне верстання *М. Л. Глєбова*

План 2023, поз. 215М

---

Підп. до друку 04.01.2024. Формат 60 × 84/16.  
Ум. друк. арк. 2,4.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: office@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.