

ДВНЗ “Донецький національний технічний університет ”
Факультет Комп’ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації,
електроінженерії та радіоелектроніки
Кафедра Електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

к.т.н. Колларов О.Ю.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“ ” _____ 2021 р

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до дипломного проекту (роботи)

Магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему « Методи підвищення надійності роботи електричних мереж»

Виконав: студент 2 курсу, групи ЕЛКЗм-19
(шифр групи)

напрямок підготовки (спеціальності) 141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»
(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

Фролова Каріна Віталіївна

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник к.т.н. Г.О. Шеїна

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую що у цьому дипломному проекті немає запозичень з
праць інших авторів без відповідних посилань

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2021 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

Факультет комп'ютерно- інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: (141) електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (Колларов О. Ю.)

« » _____ 2021 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Фролова Каріна Віталіївна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Методи підвищення надійності роботи електричних мереж

керівник роботи к. т. н. Г.О. Шеїна

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 30 травня 2021 року.

3. Вихідні дані до роботи: _____

схеми електричної мережі для досліджень

тип електричних з'єднань обладнання

вид пошкодження

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1. Аналіз надійності роботи електричних мереж

2. Аналіз несиметричних режимів

3. Розрахунок симетричних і несиметричних перехідних процесів

4. Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Вісім слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1 – 3	Шейна Г.О.		
Розділ 4	Біла Н. С.		

7. Дата видачі завдання 01 березня 2021 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Пункт 4.1	02.03–30.03.21	
2.	Пункт 4.2	31.03–21.04.21	
3.	Пункт 4.3	22.04–19.05.21	
4.	Охорона праці	20.05–30.05.21	
5.			
6.			

Студент

(підпис)

Фролова К. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи

(підпис)

Шейна Г.О.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Фролова К. В. Методи підвищення надійності роботи електричних мереж / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2021.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків та списку використаних джерел.

У першому розділі розглядалися питання надійності роботи елементів електроенергетичної системи. Були приведені основні властивості надійності, якими характеризуються елементи електроенергетичної системи.

У другому розділі розглянутий математичний апарат для дослідження несиметричних перехідних процесів в електричних мережах. Приведені основні характеристики різних елементів електричної мережі для різних послідовностей. Визначені співвідношення між струмами та напругами окремих послідовностей.

У третьому розділі визначенні режими симетричних і несиметричних КЗ схем електричної мережі різної конфігурації. Для симетричного КЗ були виконані спрощення схеми заміщення до найпростішого вигляду, багатопроменевої зірки. Для несиметричного КЗ показано визначення параметрів схем заміщення різних послідовностей, виконано їх перетворення. На основі отриманих даних визначенні складові струму та напруги різних послідовностей, та їх фазні значення.

У четвертому розділі розглянуті питання охорони праці.

Ключові слова: надійність, елементи електроенергетичної системи, несиметричні перехідні процеси, струми, напруги, охорона праці.

ANNOTATION

Frolova Karina Vitaliivna. Methods of increasing the reliability of electrical networks / Graduation qualifying work for obtaining an educational degree "Master" in specialty 141 "Electricity, electrical engineering and electromechanics". – DonNTU, Pokrovsk, 2021.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four sections, conclusions and a list of sources used.

The first section considered the reliability of the elements of the power system. The main properties of reliability, which characterize the elements of the power system, were presented.

In the second section the mathematical device for research of asymmetric transients in electric networks is considered. The main characteristics of different elements of the electrical network for different sequences are given. The relations between currents and voltages of separate sequences are determined.

The third section defines the modes of symmetric and asymmetric short circuit circuits of different configurations. For a symmetric short circuit, simplifications of the substitution scheme to the simplest form, a multibeam star, were performed. For an asymmetric short circuit, the parameters of substitution schemes of different sequences are determined, and their transformations are performed. Based on the obtained data, the components of current and voltage of different sequences and their phase values are determined.

The fourth section deals with issues of labor protection.

Key words: reliability, elements of electric power system, asymmetric transients, currents, voltages, labor protection.

ЗМІСТ

Вступ	7
Розділ 1. Аналіз надійності роботи електричних мереж	8
Висновки за першим розділом	13
Розділ 2 Аналіз несиметричних режимів	14
2.1 Методи аналізу режимів	14
2.2 Види несиметрії	36
2.3 Висновки за другим розділом	56
Розділ 3. Розрахунок симетричних і несиметричних перехідних процесів	57
3.1 Розрахунок симетричних аварійних режимів	57
3.2 Розрахунок несиметричних аварійних режимів	75
3.4 Висновок за третім розділом	81
Розділ 4 Охорона праці	82
Висновки	91
Список використаної літератури	92

ВСТУП

В роботі розглянута одна з важливих проблем енергетики – це надійність роботи електроенергетичної системи (ЕЕС). Вона характеризує збитки споживачів від недовідпущеної електроенергії.

Під надійністю розуміють спроможність елементів ЕЕС протягом певного часу (терміну експлуатації) зберігати свої параметри (наприклад, номінальний струм, аварійний струм відключення, струм динамічної та термічної стійкості), що дозволяє їм виконувати свої робочі функції в електричній мережі.

На якому етапі необхідно оцінювати надійність роботи мережі? Звісно ж починати необхідно на стадії проектування, коли обирається оптимальна електрична схема, тип і кількість працюючого обладнання, схеми резервування обладнання, релейний захист та автоматика.

З іншого боку, діючі електричні мережі потребують модернізації через незадовільний стан обладнання з урахуванням, так само, надійності електропостачання.

Крім того, необхідно враховувати, що на рівень надійності роботи мережі впливає і рівень струмів аварійних режимів. Тому необхідно використовувати методи розрахунку аварійних режимів, які забезпечують необхідну точність результатів. В майбутній експлуатації електричних мереж це дозволить виключити вихід з ладу комутаційного обладнання.

В даній роботі була поставлена задача розглянути питання підвищення надійності роботи ЕЕС за рахунок підвищення точності розрахунку аварійних режимів.

Для досягнення поставленої мети були визначенні струми як симетричних, так і несиметричних КЗ в схемах різної конфігурації. Отримані дані можуть бути використанні при виборі і перевірці обладнання мережі

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

Для практичного оцінки надійності роботи електроенергетичної мережі використовуються: по-перше, статистичні розрахунки, далі, прогнозування й оптимізація технічних рішень.

Розрізняють два основні поняття:

по-перше, елемент, яким є об'єкт ЕЕС, надійність якого розглядається як окремого незалежного елементу;

по-друге, система, як сукупність елементів, які мають спільний процес функціонування.

Всі об'єкти ЕЕС мають характеризуватися комплексно, всіма властивостями надійності – рис. 1.1.

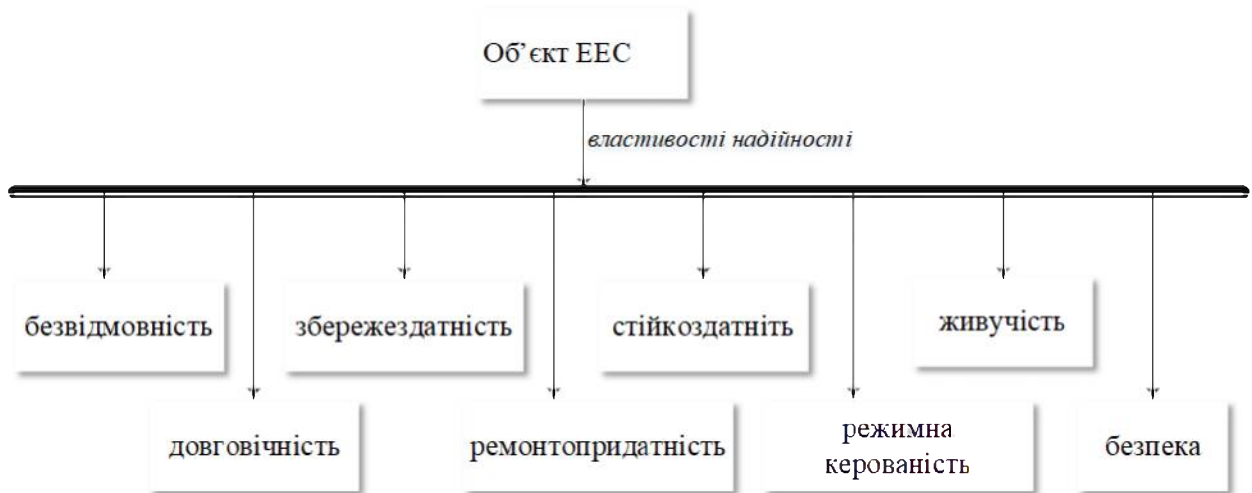


Рисунок 1.1 – Властивості надійності об'єкта ЕЕС

Далі більш детально роздивимося кожну властивість – рис.1.2.

Вони дозволяють оцінити аварійні режими, серед яких найбільша приділяється електромеханічним перехідним процесам.

Саме вони визначають через перекриття чи пробой ізоляції, через помилкового спрацювання пристроїв релейного захисту чи обладнання, через помилкові дії оперативного персоналу.

Розвиток аварійного режиму протікає швидко і наслідки серйозних аварій можуть спричинити тривале обмеження електроенергії всім категоріям споживачів.

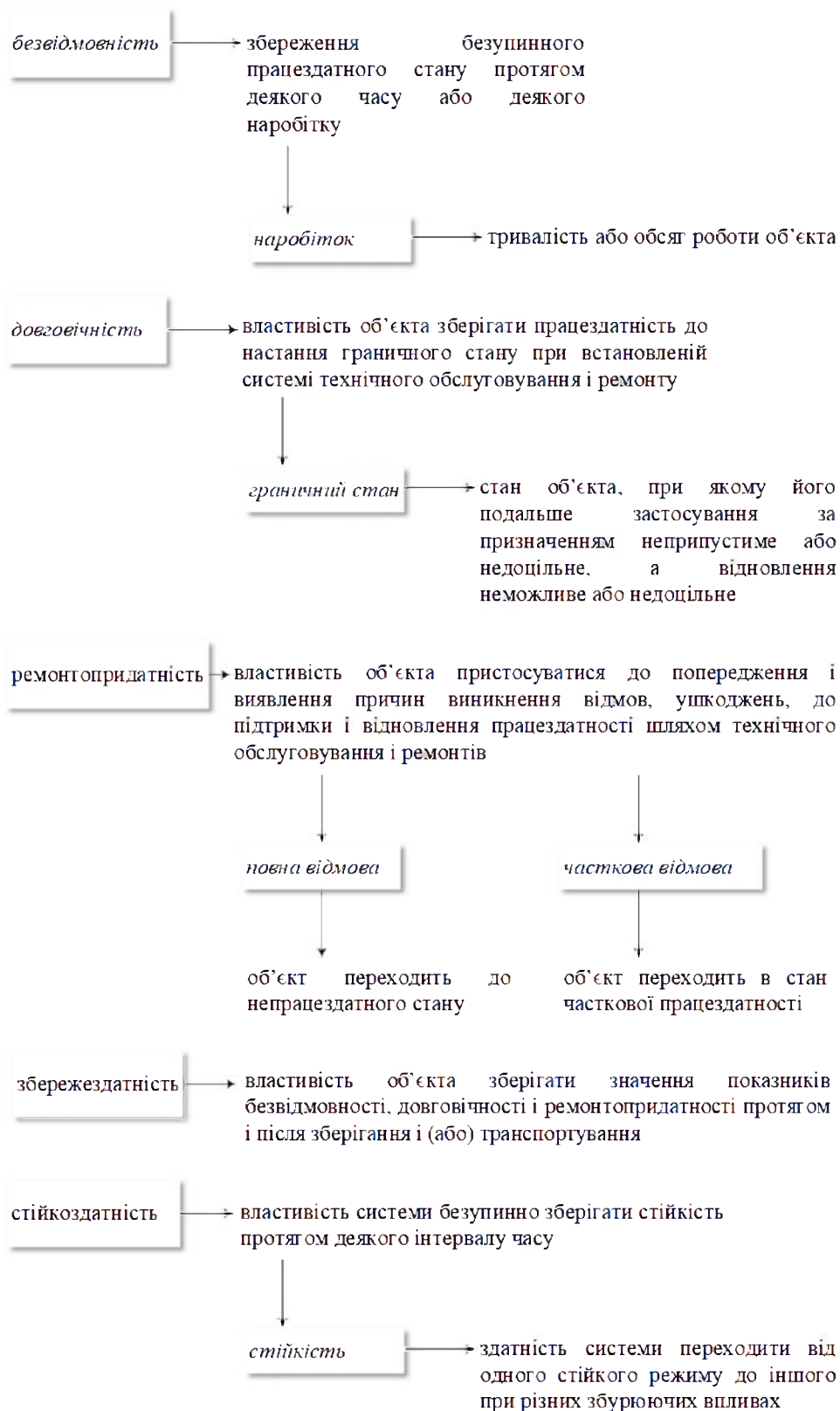
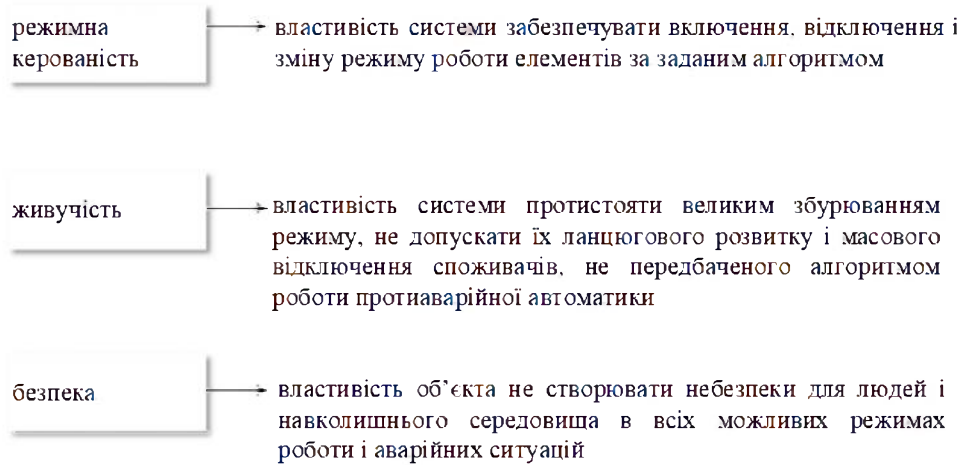


Рисунок 1.2 – Визначення властивостей надійності



Продовження рисунку 1.2 – Визначення властивостей надійності

Першими розглянемо спочатку повітряні ЛЕП, для яких вірогідність відмови є найвищою – рис. 1.3.



Рисунок 1.3 – Причини ушкоджень ПЛЕП через зовнішні фактори

Ми розглянули лише зовнішні фактори впливу (рис. 1.3), але існують ще фактори, які впливають на роботу ЛЕП і обумовлені безпосередньо параметрами режимів електричних мереж – рис. 1.4.



Рисунок 1.4 – Причини ушкоджень ПЛЕП

На відміну від повітряних ЛЕП, кабельні ЛЕП споруджуються в спеціальних кабельних спорудженнях, тому атмосферний вплив для них не є небезпечним.

Роздивимося причини їх ушкоджень – рис. 1.5.

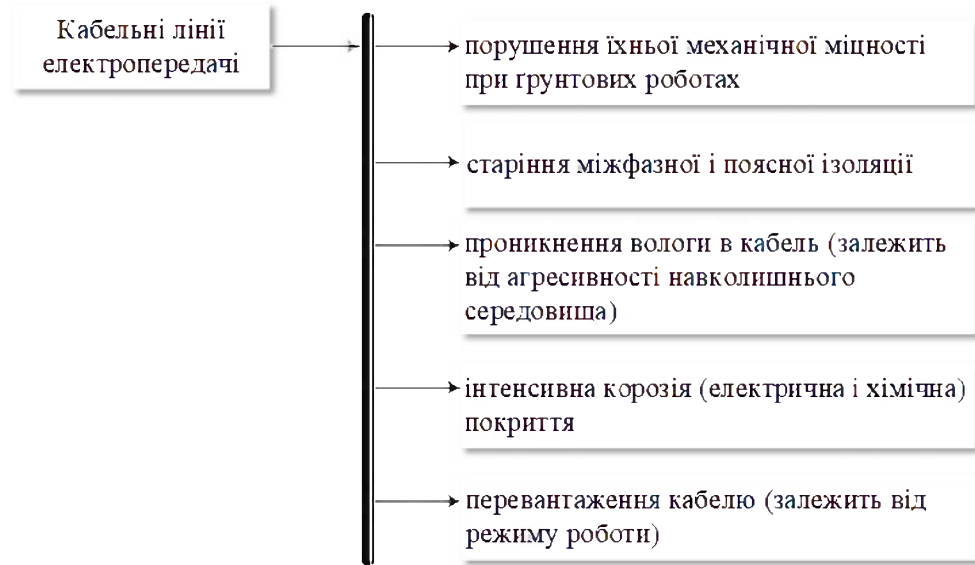


Рисунок 1.5 – Причини ушкоджень КЛЕП

Наступний елемент, який розглядається у роботі, силові трансформатори. В електричному плані вони більш захищені від атмосферного впливу, але їх ушкодження від перенапруги можуть призводити до тривалої перерви електропостачання і трудомісткого ремонту.

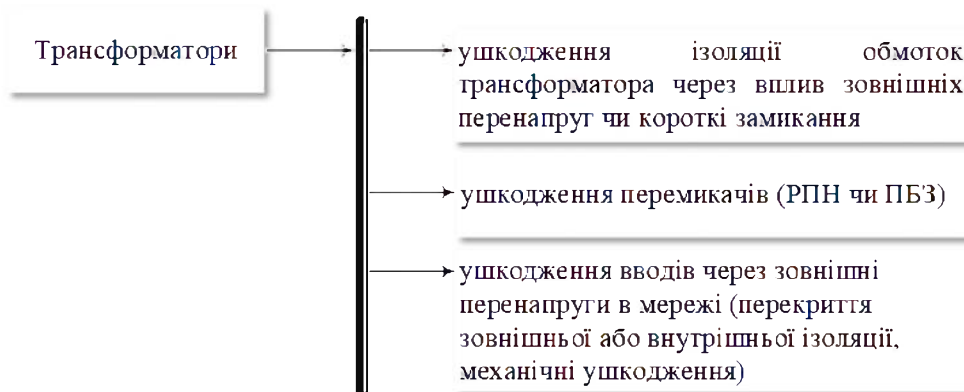


Рисунок 1.6 – Причини ушкоджень трансформаторів

Для комутаційних апаратів причинами ушкоджень можуть бути або допущені недоліки при виготовленні, або порушення при експлуатації.

Висновки за першим розділом

У розділі розглянуті поняття надійності роботи електроенергетичної мережі. Приведені основні властивості надійності, якими характеризуються елементи електроенергетичної системи.

Визначенні поняття таких властивостей елементів ЕЕС, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, стійкість, керованість, живучість і безпека.

Крім того, у розділі проаналізовані причини виникнення ушкоджень повітряних ЛЕП, кабельних ЛЕП, силових трансформаторів, комутаційної апаратури (вимикачів, роз'єднувачів, відокремлювачів, короткозамикачів).

РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ

2.1 Методи аналізу режимів

Вектор напруги або струму можуть представлятися проекціями на дві ортогональні осі:

$$\underline{V} = V_d + jV_q$$

$$\underline{V} = |\underline{V}| \cdot e^{j \arctg\left(\frac{V_q}{V_d}\right)}$$

Для характеристики повороту векторів використовуються

$$\left. \begin{aligned} a &= -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ} \\ a^2 &= -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ} \end{aligned} \right\}$$

Для цих векторів справедливими є твердження:

$$\left. \begin{aligned} a^2 + a &= -1 \\ a^2 - a &= -j\sqrt{3} \end{aligned} \right\}$$

Використовуючи наведені вище твердження можна записати фазні параметри:

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_a &= a \cdot \underline{V}_b = a^2 \cdot \underline{V}_c \\ \underline{V}_b &= a \cdot \underline{V}_c = a^2 \cdot \underline{V}_a \\ \underline{V}_c &= a \cdot \underline{V}_a = a^2 \cdot \underline{V}_b \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

На рис. 2.1 показана система векторів, яка дозволяє досліджувати несиметричну систему.

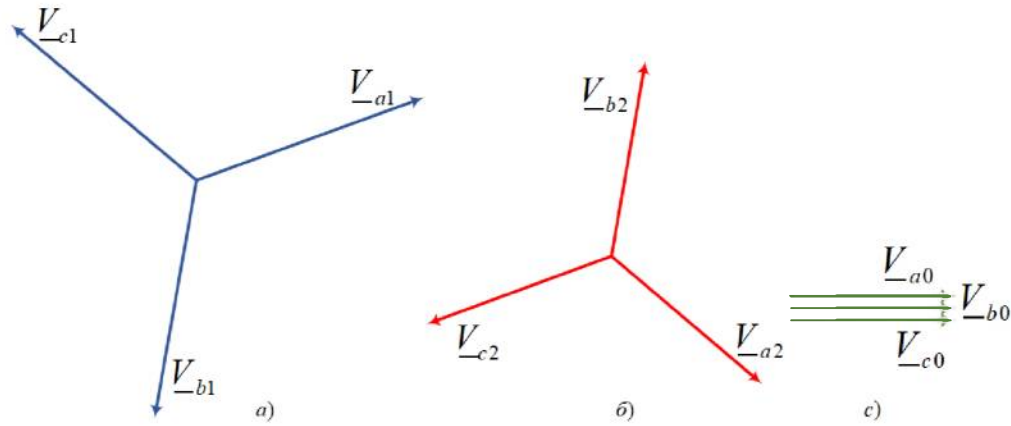


Рисунок 2.1 – Система послідовностей

Для цієї системи є справедливою рівність, яка показує її зрівноваженість:

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{b1} + \underline{V}_{c1} &= \underline{V}_{a1} \cdot (1 + a^2 + a) = 0 \\ \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{b2} + \underline{V}_{c2} &= \underline{V}_{a2} \cdot (1 + a + a^2) = 0 \end{aligned} \right\}$$

і незрівноваженість:

$$\underline{V}_{a0} + \underline{V}_{b0} + \underline{V}_{c0} = 3 \cdot \underline{V}_{a0} = 0$$

Отже на практиці, коли дуже часто зустрічаються несиметричні режими, ми можемо використовувати наступні перетворення:

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_a &= \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_b &= \underline{V}_{b1} + \underline{V}_{b2} + \underline{V}_{b0} \\ \underline{V}_c &= \underline{V}_{c1} + \underline{V}_{c2} + \underline{V}_{c0} \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

З урахуванням (2.1) і (2.2) отримуємо систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_a &= \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_b &= a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_c &= a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Далі виконуються наступні перетворення:

$$\sum \left[\begin{aligned} &\underline{V}_a = \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ &a \cdot \underline{V}_b = a \cdot (a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \\ &a^2 \cdot \underline{V}_c = a^2 \cdot (a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \end{aligned} \right]$$

$$\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c = \underline{V}_{a1} \cdot (1 + a^3 + a^3) + \underline{V}_{a2} \cdot (1 + a^2 + a^4) + \underline{V}_{a0} \cdot (1 + a + a^2)$$

Так як

$$a^3 = e^{j360^\circ} = 1$$

$$a^4 = a^3 \cdot a^1 = 1 \cdot a = e^{j120^\circ}$$

і

$$\underline{V}_{a0} \cdot (1 + a + a^2) = 0$$

$$\underline{V}_{a2} \cdot (1 + a^2 + a) = 0$$

то

$$\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c = \underline{V}_{a1} \cdot 3$$

$$\underline{V}_{a1} = \frac{\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c}{3}$$

Наступний етап:

$$\sum \left\{ \begin{array}{l} \underline{V}_a = \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ a^2 \cdot \underline{V}_b = a^2 \cdot (a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \\ a \cdot \underline{V}_c = a \cdot (a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0}) \end{array} \right\}$$

$$\underline{V}_a + a^2 \cdot \underline{V}_b + a \cdot \underline{V}_c = \underline{V}_{a1} \cdot \underbrace{(1 + a^4 + a^2)}_0 + \underline{V}_{a2} \cdot \underbrace{(1 + a^3 + a^3)}_3 + \underline{V}_{a0} \cdot \underbrace{(1 + a^2 + a)}_0$$

Отримуємо

$$\underline{V}_{a2} = \frac{\underline{V}_a + a^2 \cdot \underline{V}_b + a \cdot \underline{V}_c}{3} \quad (2.4)$$

Так само, для наступної системи рівнянь:

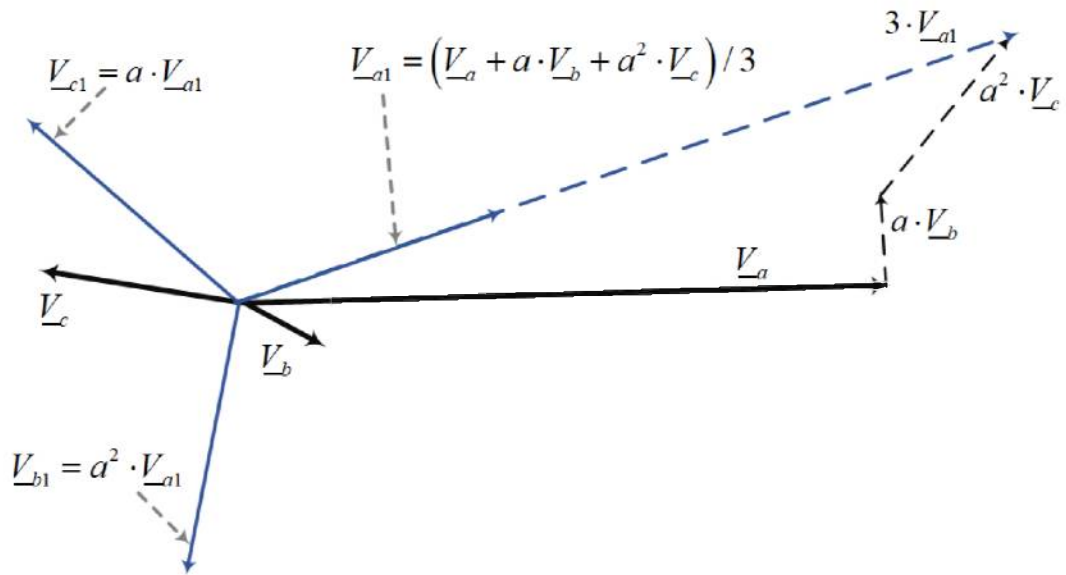
$$\sum \left\{ \begin{array}{l} \underline{V}_a = \underline{V}_{a1} + \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_b = a^2 \cdot \underline{V}_{a1} + a \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \\ \underline{V}_c = a \cdot \underline{V}_{a1} + a^2 \cdot \underline{V}_{a2} + \underline{V}_{a0} \end{array} \right\}$$

$$\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c = \underline{V}_{a1} \cdot \underbrace{(1 + a^2 + a)}_0 + \underline{V}_{a2} \cdot \underbrace{(1 + a + a^2)}_0 + \underline{V}_{a0} \cdot \underbrace{(1 + 1 + 1)}_3$$

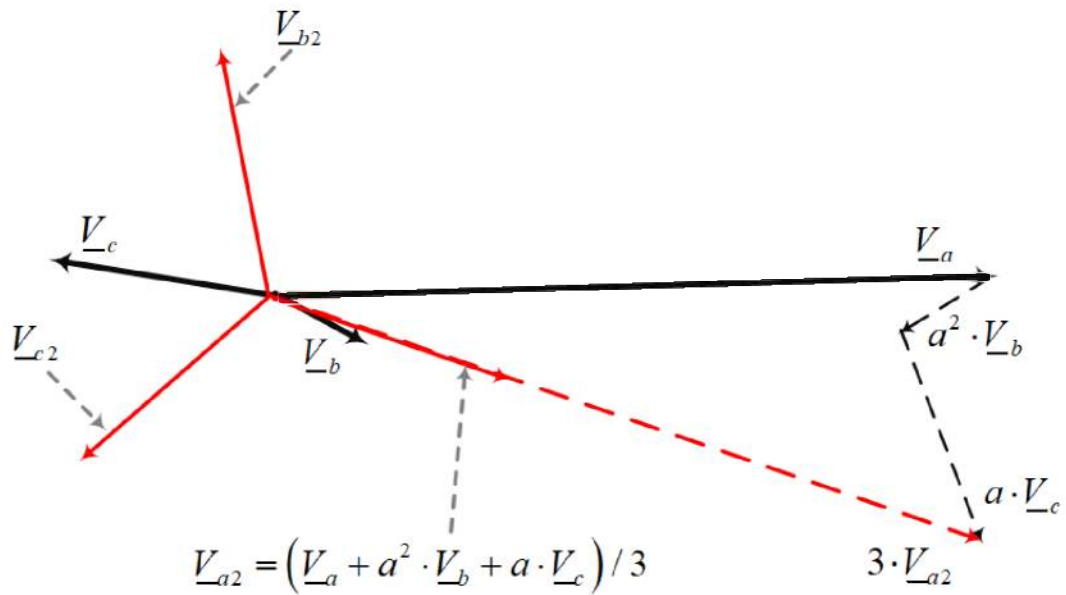
$$\underline{V}_{a0} = \frac{\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c}{3} \quad (2.5)$$

Рівняння (2.3) – (2.5) утворюють наступну систему (рис. 2.2):

$$\left. \begin{aligned} \underline{V}_{a1} &= (\underline{V}_a + a \cdot \underline{V}_b + a^2 \cdot \underline{V}_c) / 3 \\ \underline{V}_{a2} &= (\underline{V}_a + a^2 \cdot \underline{V}_b + a \cdot \underline{V}_c) / 3 \\ \underline{V}_{a0} &= (\underline{V}_a + \underline{V}_b + \underline{V}_c) / 3 \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

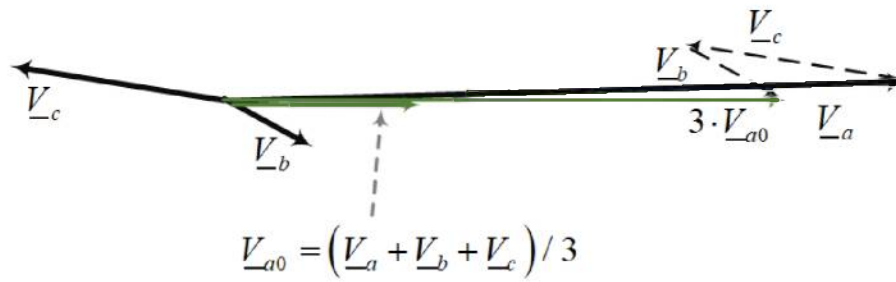


a



б

Рисунок 2.2 – Визначення складових



6

Продовження рисунку 2.2 – Визначення складових

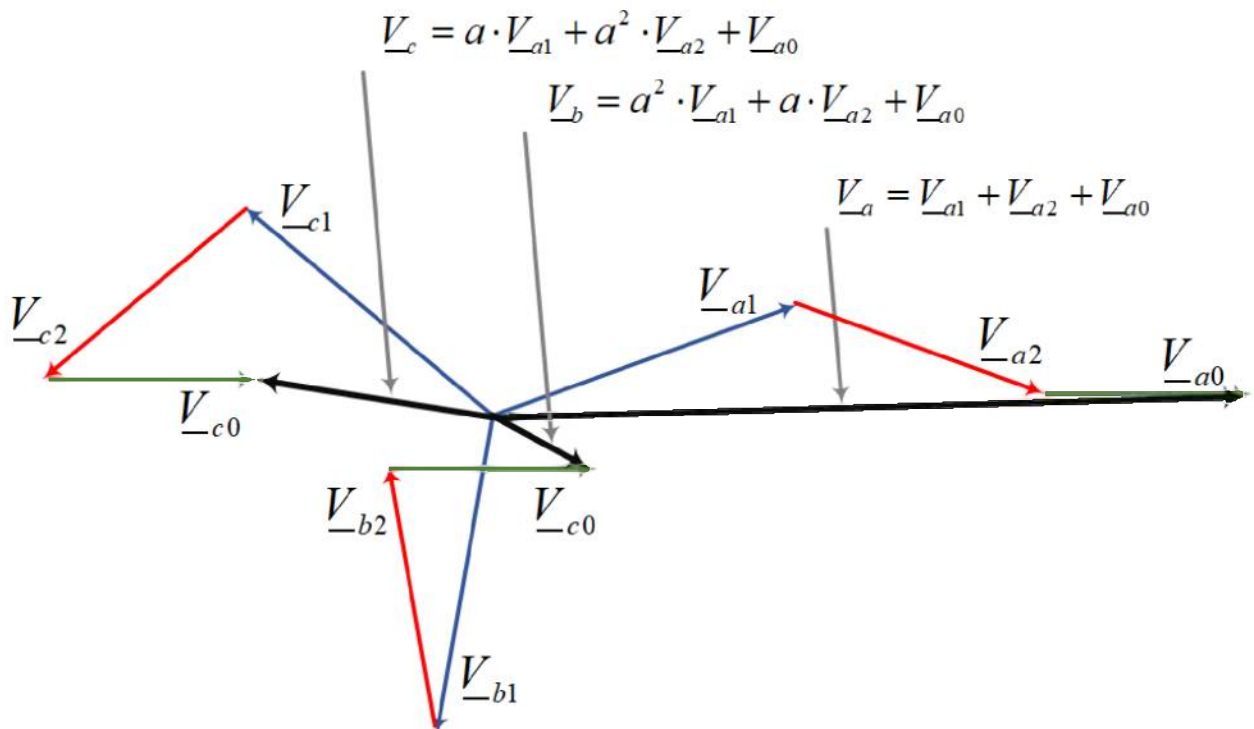


Рисунок 2.3 – Перехід до вихідної системи

Для окремих складових немає взаємодії і взаємного впливу, але кожний елемент електричної мережі має різний опір різним послідовностям:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_1 &= \underline{z}_1 \cdot \underline{I}_1 \\ \Delta U_2 &= \underline{z}_2 \cdot \underline{I}_2 \\ \Delta U_0 &= \underline{z}_0 \cdot \underline{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

Графічна інтерпретація – рис. 2.4.

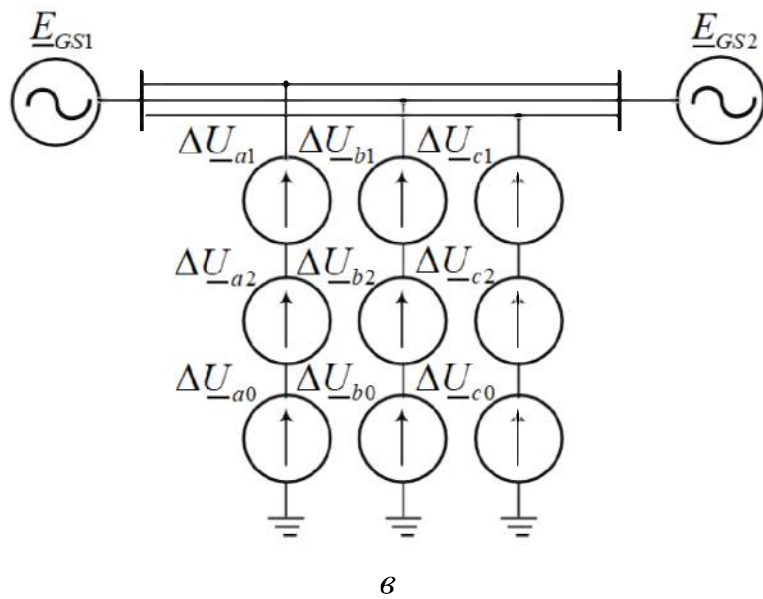
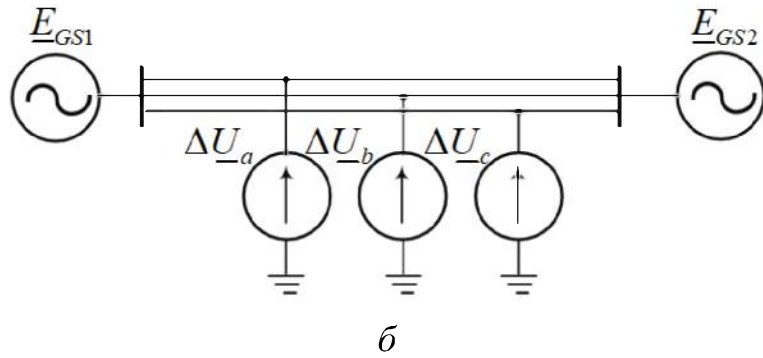
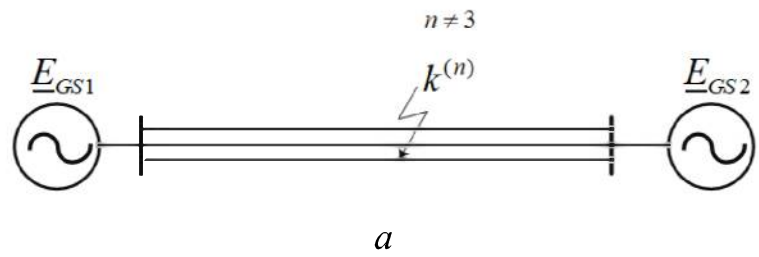
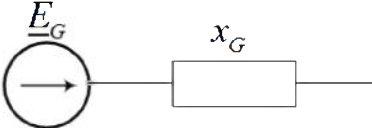


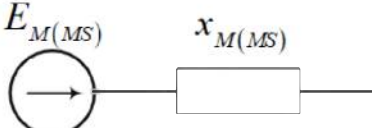
Рисунок 2.4 – Приклад несиметричного КЗ

У процесі аналізу несиметричного КЗ вводиться поняття «особлива фаза».

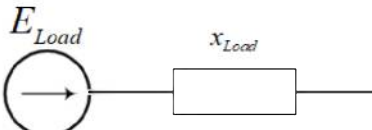
Для неї виводяться всі співвідношення, а потім виконується перехід до інших фаз.

	
$x_{*G} = x_{*d}'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{G,ном}}$ $E_G = \sqrt{(U_0 \cdot \cos \varphi_{ном})^2 + (U_0 \cdot \sin \varphi_{ном} + I_0 \cdot x_{*d}'')^2}$	
x_{*d}''	- надперехідний опір за поздовжньою віссю симетрії ротора;
U_0, I_0	- напруга, струм попереднього режиму: режим XX $U_0 = 1, I_0 = 0$, режим номінального навантаження - $U_0 = 1, I_0 = 1$;
$S_{G,ном}$	- номінальна потужність генератора (компенсатора)

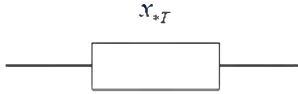
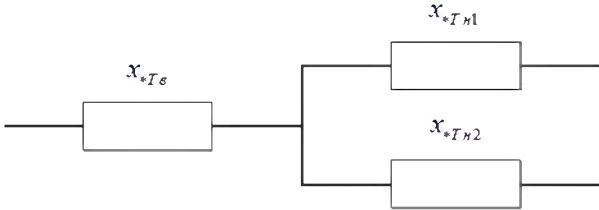
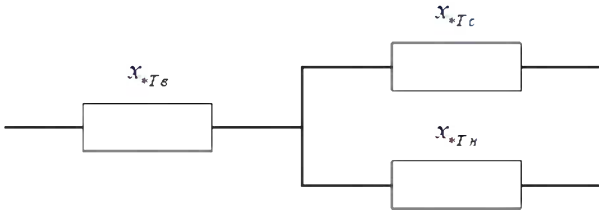
Для синхронних і асинхронних двигунів:

	
$x_{*M(MS)} = x_{*d}'' \cdot \frac{S_{\delta}}{S_{M(MS)ном}}$ $x_{*d}'' = \frac{1}{I_{*н}} \quad I_{*н} = \frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$ $E_{M(MS)} = \sqrt{(U_0 \cdot \cos \varphi_{ном})^2 + (U_0 \cdot \sin \varphi_{ном} \pm I_0 \cdot x_{*d}'')^2}$	
$I_{*н}$	- кратність пускового струму

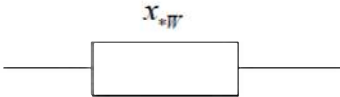
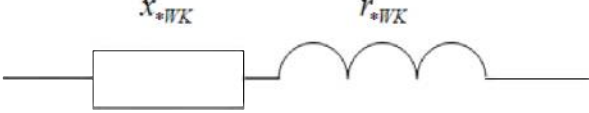
Для узагальненого навантаження (двигуни, освітлення, випрямлячі):

	
$x_{*Load}'' = \begin{cases} t=0 & x_{*Load}'' = 0,35 \\ t=1,2 & x_{*Load}'' = 1,2 \end{cases}$ $E_{Load} = 0,85$	

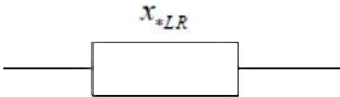
Для трансформаторів:

двообмоткові, двообмоткові з розщепленою обмоткою НН	
	
$x_{*T} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{ном}}$	
	
$x_{*T\epsilon} = 0,125 \cdot \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{ном}} \quad x_{*Tн1} = x_{*Tн2} = 1,75 \cdot \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{ном}}$	
$u_{k\%}$	- напруга короткого замикання;
триобмоткові, автотрансформатори	
	
$x_{*T\epsilon} = \frac{0,5 \cdot (u_{k\epsilon-c\%} + u_{k\epsilon-н\%} - u_{kc-н\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{ном}}$ $x_{*T\kappa} = \frac{0,5 \cdot (u_{kc-н\%} - u_{k\epsilon-н\%} + u_{k\epsilon-c\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{ном}}$ $x_{*Tн} = \frac{0,5 \cdot (-u_{k\epsilon-c\%} + u_{k\epsilon-н\%} + u_{kc-н\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{ном}}$	
$u_{k\epsilon-c\%}$	- напруга короткого замикання між обмотками ВН і СН;
$u_{k\epsilon-н\%}$	- напруга короткого замикання між обмотками ВН і НН;
$u_{kc-н\%}$	- напруга короткого замикання між обмотками СН і НН

Для ПЛЕП і КЛЕП:


$x_{*W} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2}$

$x_{*WK} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2} \quad r_{*WK} = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\delta}}{U_{cp}^2}$

Для реакторів:


$x_{*LR} = \frac{x_{ном\%}}{100} \cdot \frac{I_{\delta}}{U_{\delta}} \cdot \frac{U_{LR,ном}}{I_{LR,ном}}$

Далі роздивимося обернену послідовність. Вона характеризується зміною послідовностей фаз. Ця зміна не впливає на індуктивні опори, якщо вони нерухому і магнітозв'язані. Для таких елементів мережі, як трансформатори, автотрансформатори, реактори, ЛЕП і КЛЕП:

$$x_2 = x_1$$

А ось для елементів ЕЕС, обмотки яких обертаються, відбуваються зміни: магнітний потік оберненої послідовності обертається в протилежному напрямку і він зустрічає різний опір за поздовжньою і поперечною осями.

Для неявнополіусних машин:

$$x_d^{//} = x_q^{//}$$

$$x_2 \approx x_d^{//}$$

і навпаки, для явнополюсних машин з демпферними обмотками:

$$x_2 = \frac{x_d'' + x_q''}{2}$$

$$x_2 \approx 1,22 \cdot x_d''$$

і явнополюсних машин без демпферних обмоток

$$x_2 = \sqrt{x_d' \cdot x_q'}$$

$$x_2 \approx 1,45 \cdot x_d'$$

Двигуне навантаження має опір оберненої послідовності, який мало відрізняється від опору прямої послідовності. Таким чином, використовуються наступний вираз:

$$x_2 \approx x_d'' = \frac{1}{I_{*n}}$$

Для узагальненого навантаження, яке в більшій мірі є двигуном навантаженням:

$$x_2 \approx x_1 = 0,35$$

Далі роздивимося нульову послідовність. Вона в більшій мірі залежить від схеми з'єднання фаз елементів мережі та режиму їх нейтралі.

Спочатку роздивимося синхронні машини. Струми нульової послідовності в них створюють магнітні потоки, які є однаковими за величиною і напрямком. Через просторовий зсув 120° результуючий

магнітний потік в зазорі СМ дорівнює нулю. Магнітний потік розсіювання нульової послідовності залежить від типу обмоток. Тому для опору нульової послідовності є справедливим твердження:

$$\begin{cases} x_0 = (0,15 \div 0,6) \cdot x_d'' & \text{глухозаземлена нейтраль} \\ x_0 = \infty & \text{ізолювана нейтраль} \end{cases}$$

Для реакторів індуктивний опір нульової послідовності визначається взаємоіндукцією обмоток, тому через значну відстань між обмотками приймають:

$$x_0 \approx x_1$$

Набагато складніше фізика процесів в лініях електропередачі. Загально відомо, що струми нульової послідовності повертаються через землю. Тому схема, яка еквівалентує ці процеси, показана на рис. 2.6.

Для прямої послідовності:

$$\begin{aligned} \underline{V}_{a1} &= \underline{I}_{a1} \cdot jx_L + \underline{I}_{b1} \cdot jx_M + \underline{I}_{c1} \cdot jx_M = \\ &= \underline{I}_{a1} \cdot j(x_L + a^2 \cdot x_M + a \cdot x_M) = \\ &= \underline{I}_{a1} \cdot j(x_L - x_M) = \underline{I}_{a1} \cdot jx_1 \end{aligned}$$

Для симетричної системи:

$$\begin{cases} x_1 = x_L - x_M = x_2 \\ x_L = x_1 + x_M \end{cases}$$

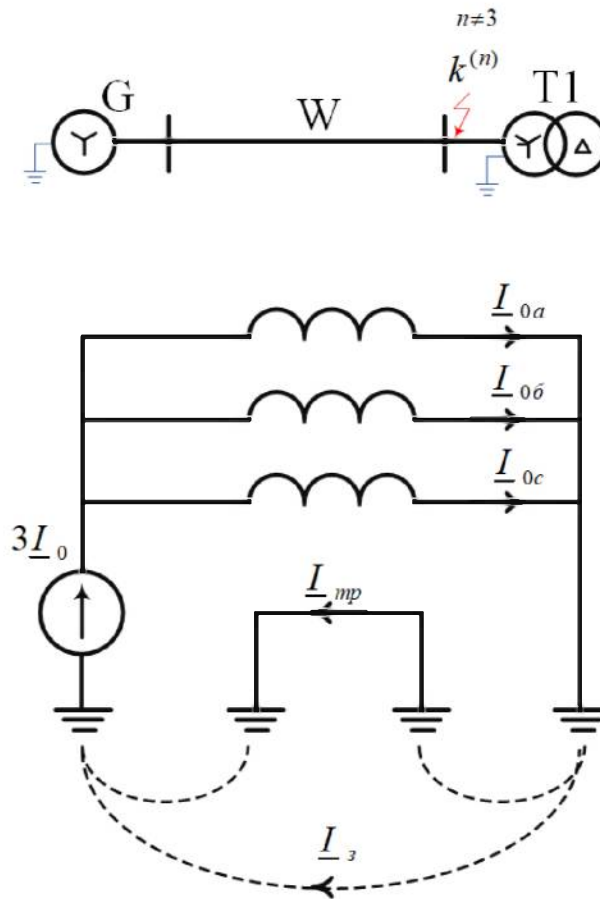


Рисунок 2.6 – Еквівалентна схема

Таким чином для нульової послідовності:

$$\underline{V}_{a0} = \underline{I}_{a0} \cdot j(x_L + x_M + x_M) = \underline{I}_{a0} \cdot jx_0$$

Враховуючи попередні вирази:

$$\begin{cases} x_L = x_1 + x_M \\ x_0 = x_L + 2 \cdot x_M = x_1 + 3 \cdot x_M \end{cases}$$

На власної індуктивності x_L справедливим є її залежність від питомої провідності землі λ_{num} , частоти струму f , радіусу проводу r_{np} , а для взаємної індуктивності x_M - так само, від ρ_{num} , f , і додатково від відстані між проводами D_{cp} .

І ось за допомогою наведених вище пояснень стає зрозумілим, що наближення проводів призводить до зменшення індуктивного опору як прямої, так і оберненої послідовності, але навпаки до збільшення магнітного потоку і опору нульової послідовності.

Для одноколової ЛЕП без тросу індуктивний опір нульової послідовності:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{екс.нр} = k \cdot r_{нр} \\ d_{ср} = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{bc} \cdot d_{ac}} \\ r_{ср} = \sqrt[3]{r_{екс.нр} \cdot d_{ср}^2} \\ d_{екс} = \frac{2,085 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{f \cdot \lambda_{нм} \cdot 10^{-9}}} \\ x_0 = 0,435 \cdot \lg \frac{d_{екс}}{r_{ср}} \end{array} \right.$$

В практичних розрахунках приймається, що $x_0 = 3,5 \cdot x_1$.

Наявність тросу зменшує індуктивний опір нульової послідовності через взаємну індукцію тросу і проводу: струми в тросах направлені зустрічно до основних струмів у фазних проводах. Для варіанту одноколової ЛЕП з тросом:

$$\left\{ \begin{array}{l} r_{екс.тп} = k_{тп} \cdot r_{тп} \\ d_{тп-тп} = \sqrt[3]{d_{a-тп} \cdot d_{b-тп} \cdot d_{c-тп}} \\ x_{0\ тп} = 0,435 \cdot \lg \frac{d_3}{r_{екс.тп}} \\ x_{0\ тп-тп} = 0,435 \cdot \lg \frac{d_3}{d_{тп.тп}} \\ x_0^{тп} = x_0 - \frac{(x_{0\ тп-тп})^2}{x_{0\ тп}} \end{array} \right.$$

де відомими повинні бути власний опір нульової послідовності тросу $x_{0_{тр}}$ і взаємна індукція між проводом і тросом $x_{0_{np-тр}}$; еквівалентний і дійсний радіус тросу $r_{екв.тр}$ і $r_{тр}$; середньо геометрична відстань між фазними проводами і тросом $d_{np-тр}$.

В практичних розрахунках для одноколової ЛЕП зі стальним тросом $x_0 = 3,0 \cdot x_1$, а з тросом, який добре проводить струм – $x_0 = 2,0 \cdot x_1$.

Для двохколової ЛЕП

$$\begin{cases} x_0 = 0,435 \cdot \lg \frac{d_3}{r_{cp}} \\ x_{0I-II} = 0,435 \cdot \lg \frac{d_3}{d_{I-II}} \\ d_{I-II} = \sqrt[9]{d_{AA} \cdot d_{AB} \cdot d_{AC} \cdot d_{BA} \cdot d_{BB} \cdot d_{BC} \cdot d_{CA} \cdot d_{CB} \cdot d_{CC}} \end{cases}$$

де відомими повинні бути власний опір нульової послідовності кожної з двох паралельних ЛЕП x_0 ; опір взаємоіндукції нульової послідовності між двома паралельними ЛЕП x_{0I-II} ; середньо геометрична відстань між проводами фаз I і II кола d_{I-II} .

В практичних розрахунках для двоколової ЛЕП без тросів – $x_0 = 5,5 \cdot x_1$; зі стальним тросом – $x_0 = 4,7 \cdot x_1$, а з тросом, який добре проводить струм – $x_0 = 3,0 \cdot x_1$.

Опір нульової послідовності для КЛЕП залежить від типу кабелю, способу його укладки, параметрів його оболонки, і характеристики заземлення. В практичних розрахунках приймають:

$$x_{0_{КЛЕП}} = (3,5 \div 4,6) \cdot x_1$$

Роздивимося силові трансформатори.

З боку обмотки, яка з'єднана в трикутник чи зірку з незаземленою нульовою точкою:

$$x_{0np} = \infty$$

При з'єднанні у зірку з заземленою нульовою точкою, опір залежить від схеми з'єднання інших обмоток. Наприклад, при схемі з'єднання Yn / Δ ЕРС нульової послідовності E_{nn} трансформатора цілком витрачається на проходження струму через реактивний опір розсіювання обмотки, яка з'єднана в трикутник, і за межі трикутника не виходить. На схемі це зображується закорочуванням гілки з x_{0nn} . Так як

$$x_{0\mu} > x_{0nn}$$

то шунт не враховується, а на опорі x_{0nn} закінчується шлях циркуляції струмів нульової послідовності.

В такому випадку

$$x_0 \approx x_{\phi H} + x_{HH} = x_1$$

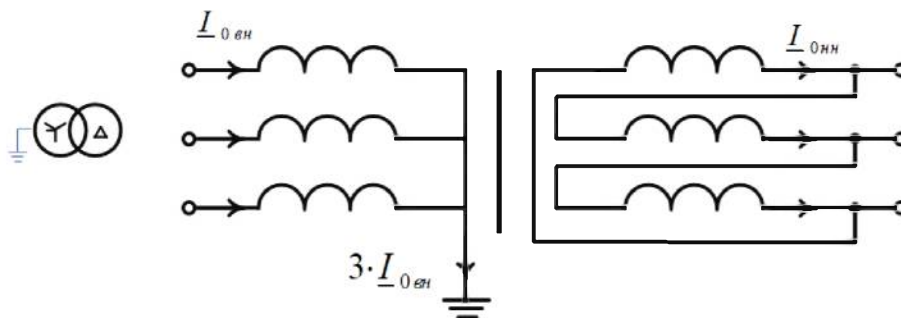
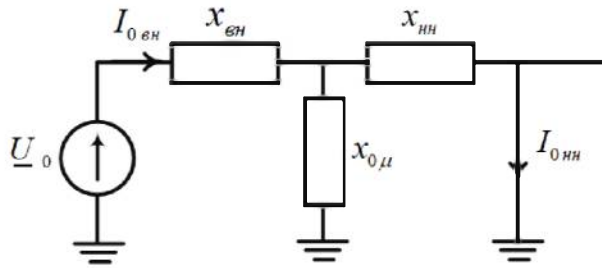


Рисунок 2.7 – Схема з'єднання Yn / Δ



Продовження рисунку 2.7 – Схема з'єднання Y_n / Δ

Для схеми з'єднання Y_n / Y_n необхідно контролювати шляхи циркуляції струмів нульової послідовності в наступних елементах мережі. Наприклад, на рис. 2.8 показано, що при наявності ще заземленої нейтралі – струм НП буде мати контур протікання.

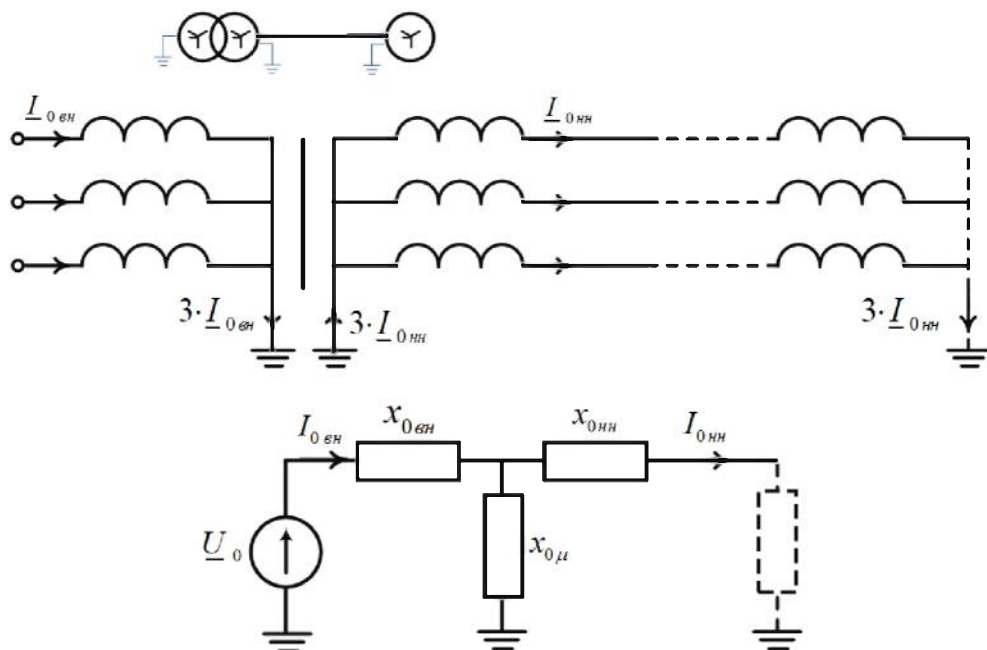


Рисунок 2.8 – Схема з'єднання Y_n / Y_n

У випадках Y_n / Y_n (без контурів протікання струмів) або Y_n / Y трансформатор не включається в схему заміщення нульової послідовності (рис. 2.9), так як має схему заміщення подібну режиму холостого ходу

$$x_{0тр} = x_{0вн} + x_{0μ}$$

Якщо він є групою однофазних чи трифазним трансформатором з чотирма чи п'ятьма магнітопроводами, то $x_{0\mu} = \infty$; для трифазних тристержневих трансформаторів – $x_{0\mu} = 0,3 \div 1$. Так як $x_{0\mu} \gg x_{0нн}$, то в практичних розрахунках, які будуть розглянуті у наступному розділі, можна прийняти: $x_{0\mu} = \infty$.

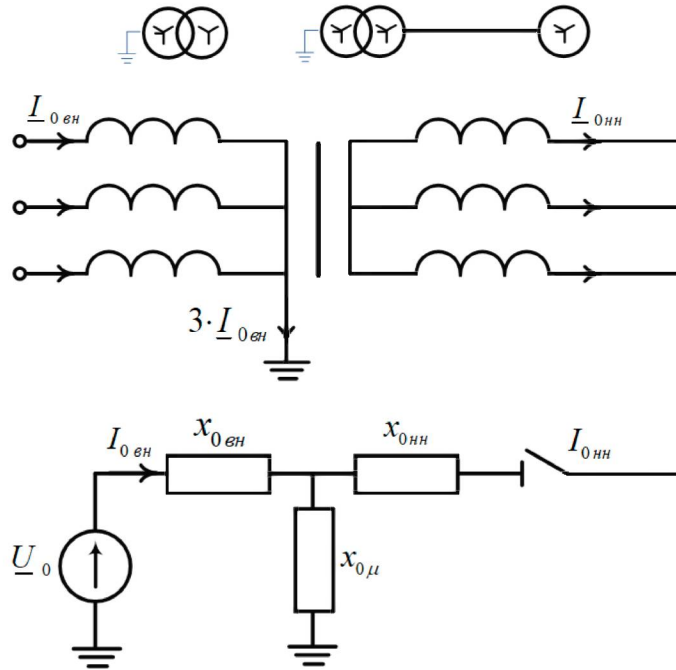
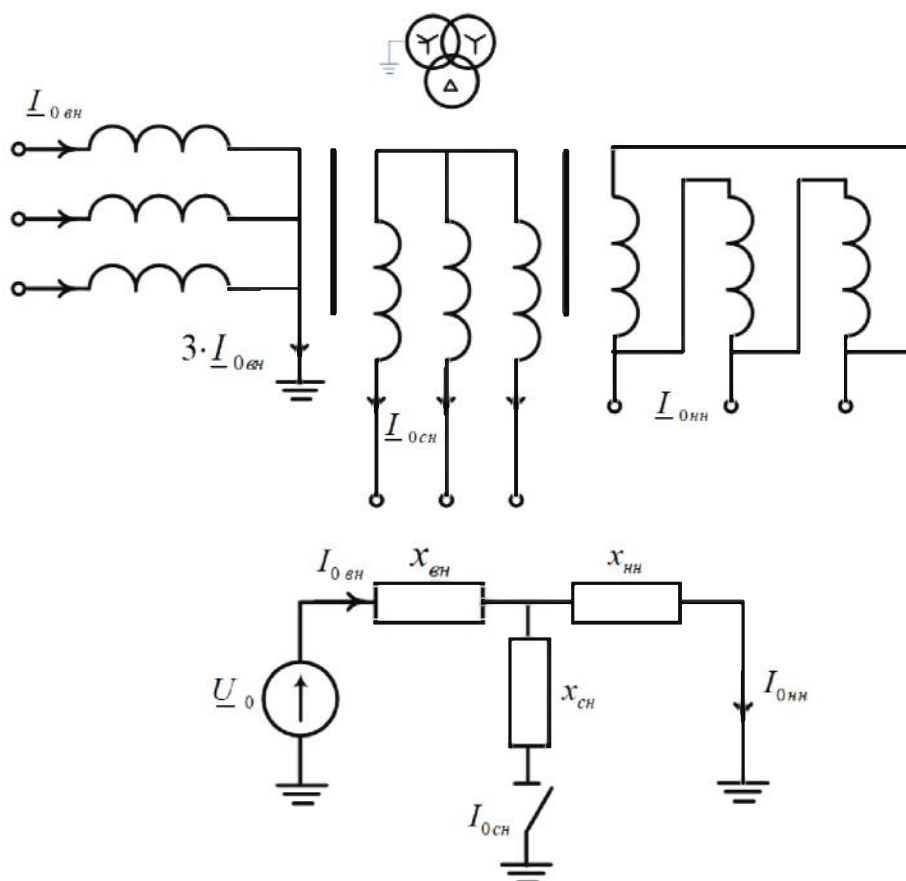
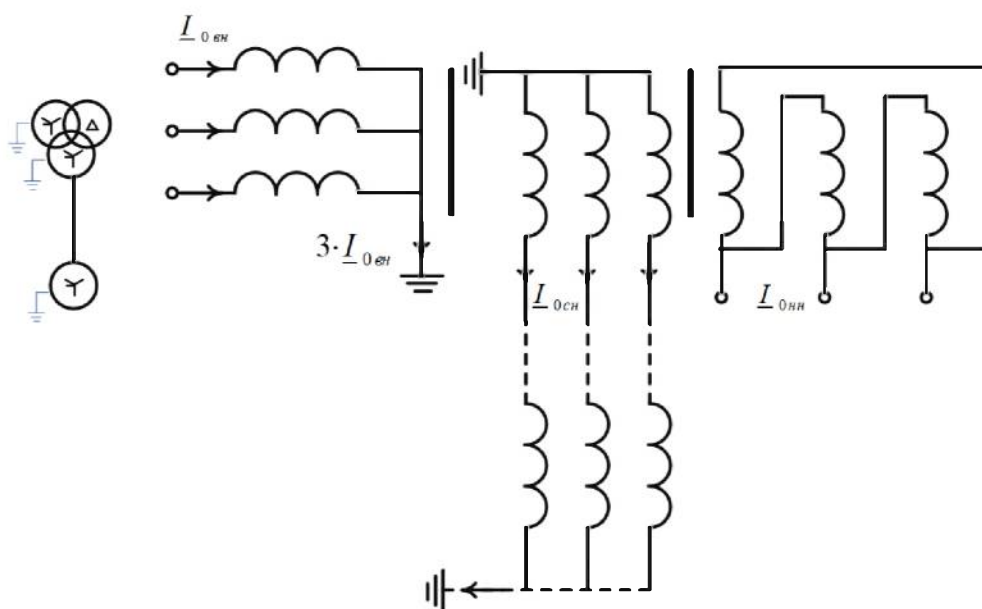


Рисунок 2.9 – Схема з'єднання Y_n / Y

Для триобмоткового трансформатора є різні можливості комбінацій обмоток. Перший варіант, $Y_n / Y / \Delta$ (рис. 2.10). Він є класичним. У випадку, якщо напруга подається з боку обмотки ВН, то у схему заміщення будуть входити дві обмотки, як високої, так і низької напруги.

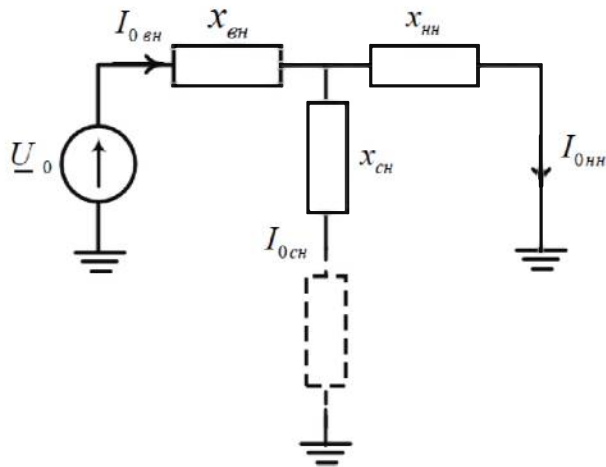
$$x_{0тр} = x_{0вн} + x_{0нн}$$

Другий варіант, $Y_n / Y_n / \Delta$ (рис. 2.11). В прикладі показано, що в цьому випадку забезпечується шлях для струмів НП в контурі обмотки середньої напруги.

Рисунок 2.10 – Схема з'єднання $Y_n / Y / \Delta$ Рисунок 2.11 – Схема з'єднання $Y_n / Y_n / \Delta$

Як видно на рис. 2.11 первинна обмотка заземлена, обмотка середньої напруги – заземлена і має контури протікання струмів нульової

послідовності, а обмотка низької напруги – замкнений трикутник. Таким чином, весь трансформатор входить в схему заміщення.



Продовження рисунку 2.11 – Схема з'єднання $Y_n / Y_n / \Delta$

Третій, цікавий випадок – це схема з'єднання $Y_n / \Delta / \Delta$ (рис. 2.12).

Як і має бути, за трикутник струми НП виходити на повинні.

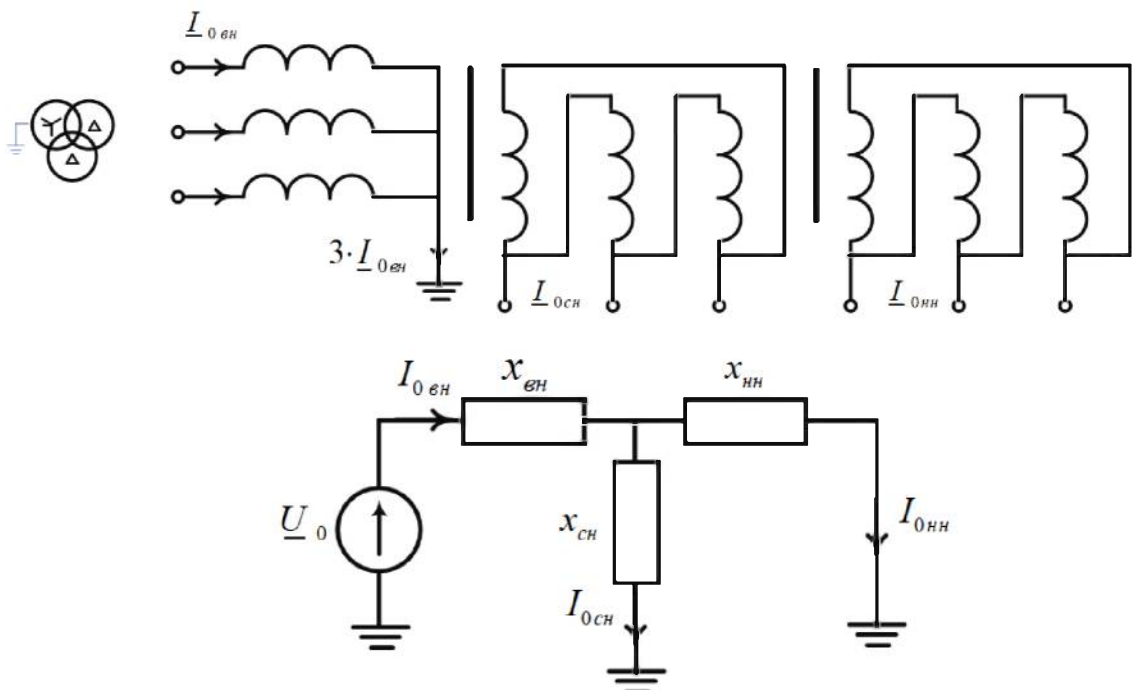


Рисунок 2.12 – Схема з'єднання $Y_n / \Delta / \Delta$

Наступний цікавий випадок – автотрансформатори $Yn / Yn / \Delta$ (рис. 2.13). Через спільну нейтраль обмоток ВН і СН, струм в нейтралі визначається:

$$I_N = 3 \cdot (I_{0ВН} - I_{0СН})$$

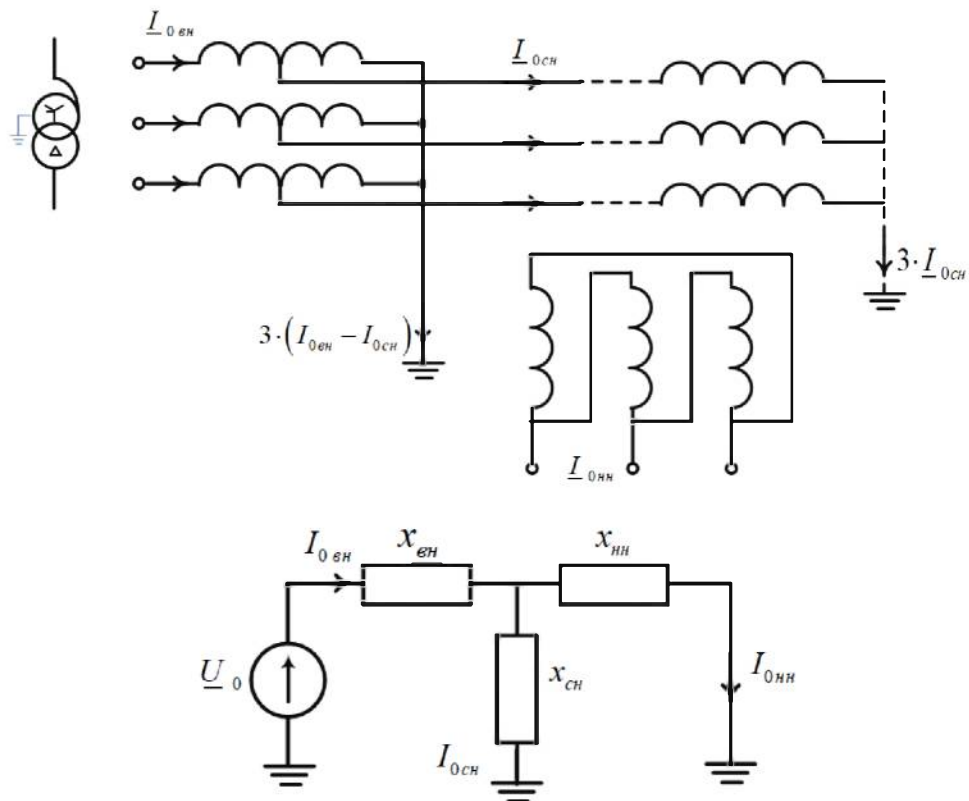


Рисунок 2.13 – Схеми з'єднання обмоток автотрансформатора

Алгоритм розрахунку струмів несиметричного короткого замикання – рис. 2.14.

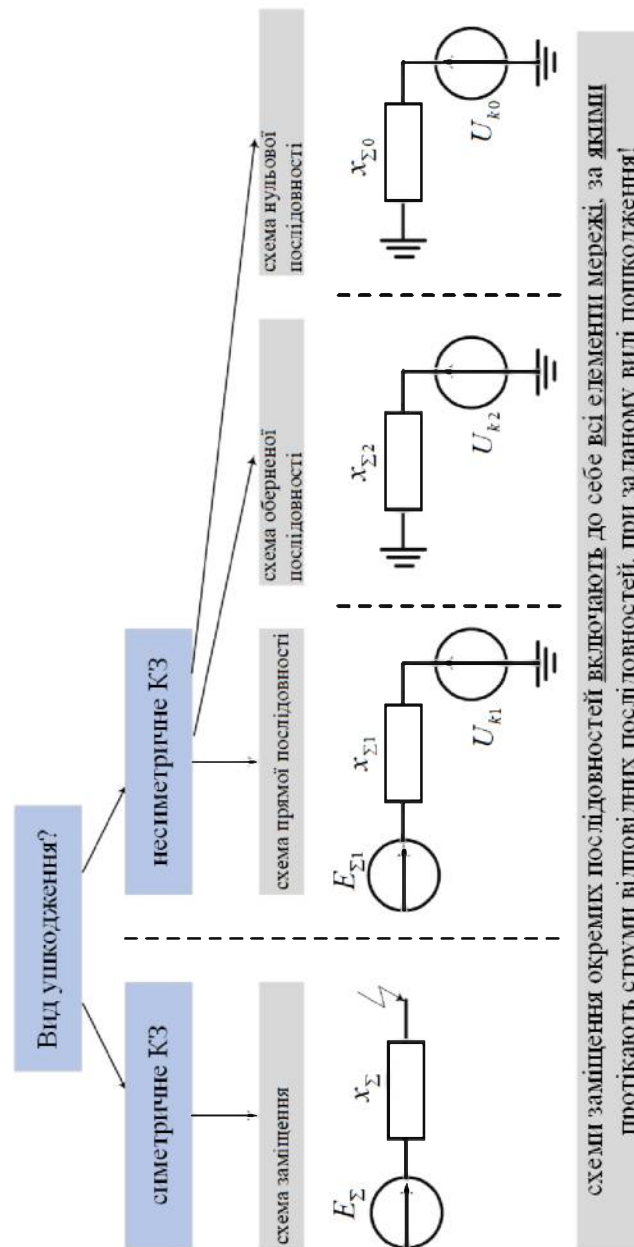


Рисунок 2.14 – Алгоритм розрахунку несиметричних КЗ

2.2 Види несиметрії

Використовуються значення отримані у попередньому розділі разом з граничними обмеженнями. В загальному вигляді для особливої фази:

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_{ka1} &= \underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} \\ \underline{U}_{ka2} &= 0 - j\underline{I}_{ka2} \cdot x_{\Sigma 2} \\ \underline{U}_{ka0} &= 0 - j\underline{I}_{ka0} \cdot x_{\Sigma 0} \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

На основі системи рівнянь (2.3) для дійсних значень режимних параметрів отримуємо:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_{ka1} + \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \\ \underline{I}_b &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \\ \underline{I}_c &= a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

$$\left. \begin{aligned} \underline{U}_a &= \underline{U}_{ka1} + \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} \\ \underline{U}_b &= a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} + a \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} \\ \underline{U}_c &= a \cdot \underline{U}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Для $k^{(3)}$ граничні умови:

$$\underline{U}_{ka}^{(3)} = 0, \quad \underline{U}_{kb}^{(3)} = 0, \quad \underline{U}_{kc}^{(3)} = 0$$

Далі вони підставляються в рівняння (2.9) і з урахуванням (2.7) рівняння (2.8) і (2.9) приймають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{ka1}^{(3)} &= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{jx_{\Sigma 1}} \\ \underline{I}_{ka2}^{(3)} &= 0 \\ \underline{I}_{ka0}^{(3)} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} \underline{I}_{ka}^{(3)} &= \underline{I}_{ka1}^{(3)} \\ \underline{I}_{kb}^{(3)} &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(3)} \\ \underline{I}_{kc}^{(3)} &= a \cdot \underline{I}_{ka1}^{(3)} \end{aligned} \right\}$$

Отримані співвідношення дозволяють визначати наступну характеристику:

$$m^{(3)} = \frac{\underline{I}_{ka}^{(3)}}{\underline{I}_{k1}^{(3)}} = 1 \quad (2.10)$$

Граничні умови для $k^{(1)}$

$$\underline{U}_{ka}^{(1)} = 0, \quad \underline{I}_{kb}^{(1)} = 0, \quad \underline{I}_{kc}^{(1)} = 0$$

Для системи рівнянь (2.9)

$$\underline{I}_b - \underline{I}_c = \left(a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \right) - \left(a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \right)$$

$$0 = a \cdot \left(\underline{I}_{ka2} - \underline{I}_{ka1} \right) + a^2 \cdot \left(\underline{I}_{ka1} - \underline{I}_{ka2} \right)$$

$$\left(\underline{I}_{ka1} - \underline{I}_{ka2} \right) \cdot \underbrace{\left(a^2 - a \right)}_{-j\sqrt{3}} = 0$$

$$\underline{I}_{ka1} = \underline{I}_{ka2}$$

і другий підхід

$$\underline{I}_b + \underline{I}_c = \left(a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \right) + \left(a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2} + \underline{I}_{ka0} \right)$$

$$0 = 2 \cdot \underbrace{\left(a^2 + a \right)}_{-1} \cdot \underline{I}_{ka1} + 2 \cdot \underline{I}_{ka0}$$

$$\underline{I}_{ka1} = \underline{I}_{ka0}$$

Далі використовуючи суму рівнянь (2.7)

$$\underbrace{\underline{U}_{ka1} + \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}}_{\underline{U}_{ka}^{(1)}=0} = \underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka2} \cdot x_{\Sigma 2} - j\underline{I}_{ka0} \cdot x_{\Sigma 0}$$

$$0 = \underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 2} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 0}$$

$$0 = \underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot \left(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0} \right)$$

$$\underline{I}_{ka1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})} \quad (2.11)$$

Повний аварійний струм:

$$\underline{I}_{ka}^{(1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1)} + \underline{I}_{ka2}^{(1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1)} = 3 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} = \frac{3 \cdot \underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})}$$

Так само:

$$m^{(1)} = \frac{\underline{I}_{ka}^{(1)}}{\underline{I}_{ka1}^{(1)}} = 3$$

Для напруги вирази знаходяться аналогічним чином з рівняння (2.7):

$$\begin{aligned} \underline{U}_{ka2}^{(1)} &= -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2} \\ \underline{U}_{ka0}^{(1)} &= -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0} \\ \underline{U}_{ka1}^{(1)} &= -\underline{U}_{ka0}^{(1)} - \underline{U}_{ka2}^{(1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Використовуючи рівняння (2.9), визначаються складові напруги в інших фазах:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{kb}^{(1)} &= a^2 \cdot \underline{U}_{ka1}^{(1)} + a \cdot \underline{U}_{ka2}^{(1)} + \underline{U}_{ka0}^{(1)} = \\ &= a^2 \cdot j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - a \cdot j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2} - j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0} \\ \underline{U}_{kc}^{(1)} &= a \cdot \underline{U}_{ka1}^{(1)} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2}^{(1)} + \underline{U}_{ka0}^{(1)} = \\ &= a \cdot j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) - a^2 \cdot j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2} - j \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Отримані значення (2.11) – (2.13) дозволяють показати графічне рішення для $k^{(1)}$ - рис. 2.15. На рис.2.15 показані графічні співвідношення між складовими струмів і напруги різних послідовностей.

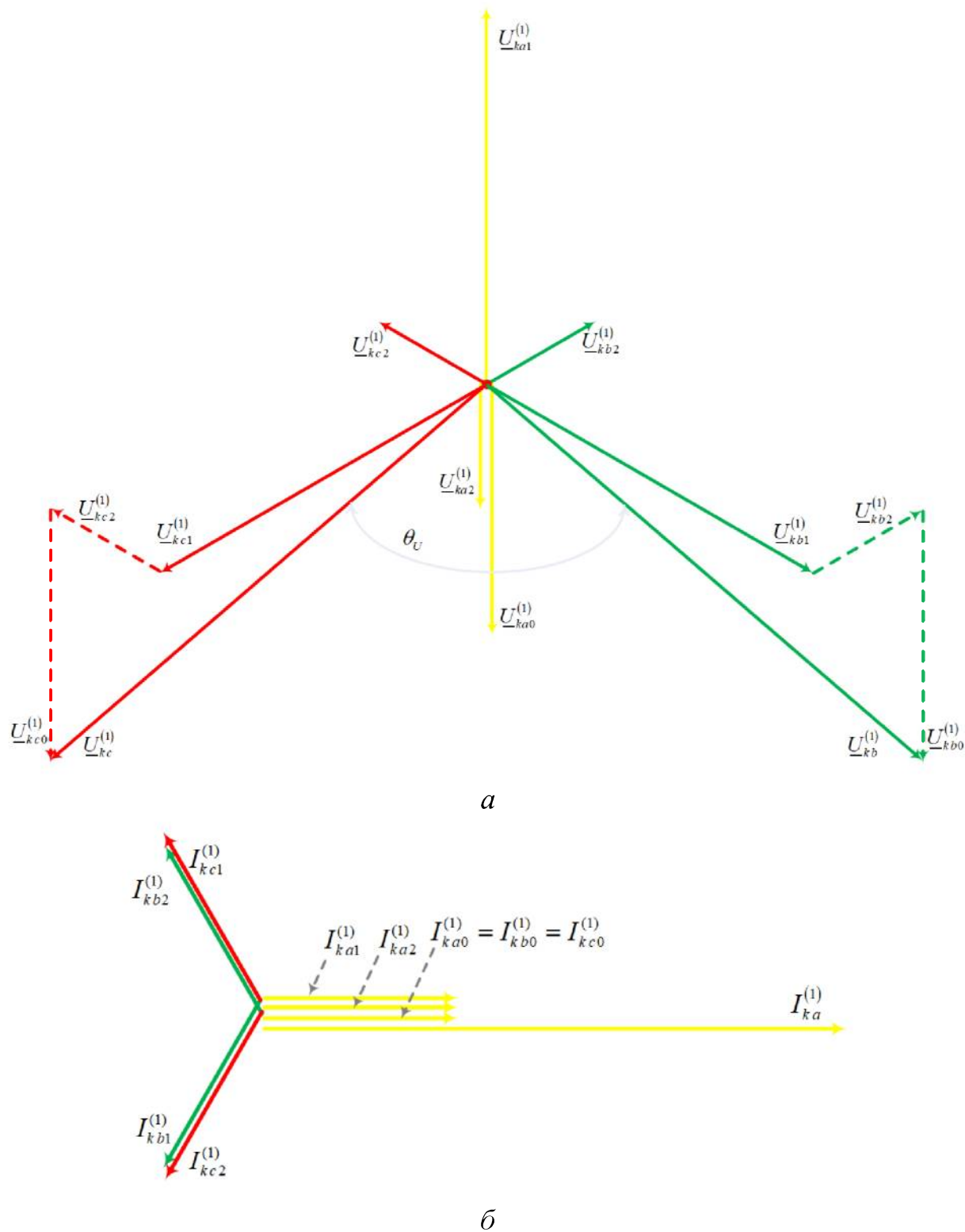


Рисунок 2.15 – ВД для $k^{(1)}$

Кут між напругами двох неушкоджених фаз змінюється в діапазоні:

$$60^\circ \leq \theta_U < 180^\circ$$

Цей діапазон визначається співвідношенням між опорамі зворотної $x_{\Sigma 2}$ та нульової $x_{\Sigma 0}$ послідовностей. Значення цього кута визначається параметрами схеми заміщення окремих послідовностей:

$$\begin{aligned} x_{\Sigma 0} \rightarrow \infty \quad \theta_U &= 60^\circ \\ x_{\Sigma 0} = x_{\Sigma 2} \quad \theta_U &= 120^\circ \\ x_{\Sigma 0} \rightarrow 0 \quad \theta_U &= 180^\circ \end{aligned}$$

Граничні умови для $k^{(2)}$ між фазами B і C :

$$\underline{U}_{kb}^{(2)} = \underline{U}_{kc}^{(2)}, \quad \underline{I}_{kb}^{(2)} = -\underline{I}_{kc}^{(2)}, \quad \underline{I}_{ka}^{(2)} = 0$$

Таким чином системи рівнянь (2.8) прийме вигляд:

$$\underline{I}_a^{(2)} + \underline{I}_b^{(2)} + \underline{I}_c^{(2)} = 0$$

$$\begin{aligned} \underline{I}_a^{(2)} + \underline{I}_b^{(2)} + \underline{I}_c^{(2)} &= (\underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underline{I}_{ka1}) + \\ &+ (\underline{I}_{kb1} + a^2 \cdot \underline{I}_{kb1} + a \cdot \underline{I}_{kb1}) + (\underline{I}_{kc0} + \underline{I}_{ka0} + \underline{I}_{kb0}) \end{aligned}$$

$$\underbrace{\underline{I}_a^{(2)} + \underline{I}_b^{(2)} + \underline{I}_c^{(2)}}_0 = \underbrace{(1 + a + a^2)}_0 \cdot \underline{I}_{ka1} + \underbrace{(1 + a + a^2)}_0 \cdot \underline{I}_{ka2} + 3 \cdot \underline{I}_{ka0}$$

Як результат:

$$\underline{I}_{ka0}^{(2)} = 0$$

а

$$\begin{aligned}\underline{I}_{ka}^{(2)} &= \underline{I}_{ka1}^{(2)} + \underline{I}_{ka2}^{(2)} = 0 \\ \underline{I}_{ka1}^{(2)} &= -\underline{I}_{ka2}^{(2)}\end{aligned}\quad (2.14)$$

Такі ж перетворення виконуються для напруги:

$$\begin{aligned}\underline{U}_{kb}^{(2)} &= \underline{U}_{kc}^{(2)} \\ a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} + a \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} &= a \cdot \underline{U}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0} \\ a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} - a \cdot \underline{U}_{ka2} &= a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} - a \cdot \underline{U}_{ka1} \\ (a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka1} &= (a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka2} \\ \underline{U}_{ka1}^{(2)} &= \underline{U}_{ka2}^{(2)}\end{aligned}\quad (2.15)$$

З урахуванням (2.7) і (2.15)

$$\underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} = -j\underline{I}_{ka2} \cdot x_{\Sigma 2}$$

Якщо врахувати (2.14)

$$\begin{aligned}\underline{E}_{\Sigma 1} - j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 1} &= j\underline{I}_{ka1} \cdot x_{\Sigma 2} \\ \underline{E}_{\Sigma 1} &= j\underline{I}_{ka1} \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2}) \\ \underline{I}_{ka1}^{(2)} &= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}\end{aligned}\quad (2.16)$$

З урахуванням (2.8) визначаються струми в двох інших фазах:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{kb}^{(2)} &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1} + a \cdot \underbrace{\underline{I}_{ka2}}_{-\underline{I}_{ka1}} + \underbrace{\underline{I}_{ka0}}_0 = \\ &= (a^2 - a) \cdot \underline{I}_{ka1} = -j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{kc}^{(2)} &= a \cdot \underline{I}_{ka1} + a^2 \cdot \underbrace{\underline{I}_{ka2}}_{-\underline{I}_{ka1}} + \underbrace{\underline{I}_{ka0}}_0 = \\ &= (a - a^2) \cdot \underline{I}_{ka1} = j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}\end{aligned}$$

Так само:

$$m^{(2)} = \frac{\underline{I}_{kb}^{(2)}}{\underline{I}_{ka1}^{(2)}} = \frac{\underline{I}_{kc}^{(2)}}{\underline{I}_{ka1}^{(2)}} = \sqrt{3} \quad (2.17)$$

Графічна інтерпретація – рис.2.16.

За допомогою (2.16), повний струм КЗ для $k^{(2)}$

$$\underline{I}_k^{(2)} = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3} \cdot \underline{E}_{\Sigma 1}}{j \cdot (x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}$$

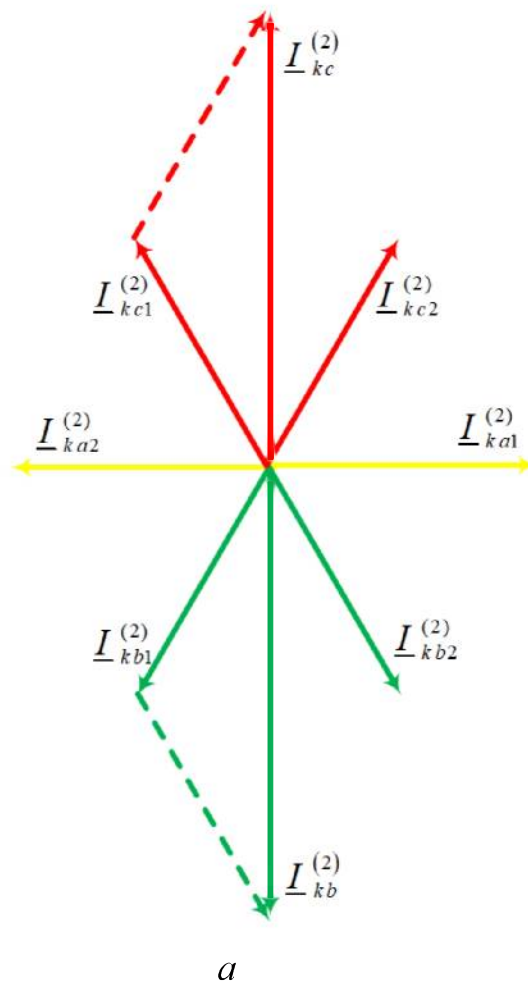


Рисунок 2.16 – ВД для $k^{(2)}$

якщо вона ізольована ($x_{\Sigma 0} = \infty$), то

$$\underline{U}_{ka0}^{(2)} = -\infty$$

І ця напруга виключається з системи рівнянь (2.9).

Фазні напруги

$$\underline{U}_{ka}^{(2)} = \underline{U}_{ka1}^{(2)} + \underline{U}_{ka2}^{(2)} = 2 \cdot \underline{U}_{ka1}^{(2)} = 2 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(2)} \cdot jx_{\Sigma 2}$$

$$\underline{U}_{kb}^{(2)} = \underline{U}_{kc}^{(2)} = a^2 \cdot \underline{U}_{ka1}^{(2)} + a \cdot \underline{U}_{ka2}^{(2)} = -\underline{U}_{ka1}^{(2)} = -\underline{U}_{ka}^{(2)} / 2$$

Граничні умови для $k^{(1,1)}$

$$\underline{I}_{ka}^{(1,1)} = 0, \quad \underline{U}_{kb}^{(1,1)} = 0, \quad \underline{U}_{kc}^{(1,1)} = 0$$

Далі за рівняннями (2.8)

$$\underline{I}_{ka}^{(1,1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} = 0$$

$$\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} = -\left(\underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)}\right)$$

За граничними умовами для напруги з системи (2.9) отримуємо

$$\underline{U}_{kb}^{(1,1)} - \underline{U}_{kc}^{(1,1)} = \left(a^2 \cdot \underline{U}_{ka1} + a \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}\right) - \left(a \cdot \underline{U}_{ka1} + a^2 \cdot \underline{U}_{ka2} + \underline{U}_{ka0}\right)$$

$$0 = (a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka1} + (a - a^2) \cdot \underline{U}_{ka2}$$

$$(a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka1} = (a^2 - a) \cdot \underline{U}_{ka2}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} = \underline{U}_{ka2}^{(1,1)}$$

Так само, але обернений результат:

$$\begin{aligned}
 \underline{U}_{\bar{k}b}^{(1,1)} + \underline{U}_{\bar{k}c}^{(1,1)} &= (a^2 \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 1} + a \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 2} + \underline{U}_{\bar{k}\alpha 0}) + (a \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 1} + a^2 \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 2} + \underline{U}_{\bar{k}\alpha 0}) \\
 \underline{U}_{\bar{k}b}^{(1,1)} + \underline{U}_{\bar{k}c}^{(1,1)} &= \left(\frac{a^2 + a}{-1} \right) \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 1} + \left(\frac{a^2 + a}{-1} \right) \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 2} + 2 \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 0} \\
 0 &= -\underline{U}_{\bar{k}\alpha 1} - \underline{U}_{\bar{k}\alpha 2} + 2 \cdot \underline{U}_{\bar{k}\alpha 0} \\
 \underline{U}_{\bar{k}\alpha 1} &= \underline{U}_{\bar{k}\alpha 2} = \underline{U}_{\bar{k}\alpha 0}
 \end{aligned}$$

Використовуючи рівняння (2.7) отримуємо

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{\bar{k}\alpha 0}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 0}} \\
 \underline{I}_{\bar{k}\alpha 2}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 2}}
 \end{aligned}$$

А як було показано вище:

$$\begin{aligned}
 \underline{I}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)} &= -\left(\underline{I}_{\bar{k}\alpha 2}^{(1,1)} + \underline{I}_{\bar{k}\alpha 0}^{(1,1)} \right) = -\left(-\frac{\underline{U}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 2}} - \frac{\underline{U}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)}}{jx_{\Sigma 0}} \right) = \\
 &= \underline{U}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)} \cdot \left(\frac{1}{jx_{\Sigma 2}} + \frac{1}{jx_{\Sigma 0}} \right)
 \end{aligned}$$

Це дозволяє визначити напругу прямо послідовності:

$$\underline{U}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)} = j\underline{I}_{\bar{k}\alpha 1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$$

Якщо враховувати два попередні вирази, то отримуємо:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{ka0}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{j\underline{x}_{\Sigma 0}} = -\frac{1}{j\underline{x}_{\Sigma 0}} j\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 2} \cdot \underline{x}_{\Sigma 0}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} = -\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 2}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} \\ \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} &= -\frac{\underline{U}_{ka1}^{(1,1)}}{j\underline{x}_{\Sigma 2}} = -\frac{1}{j\underline{x}_{\Sigma 2}} j\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 2} \cdot \underline{x}_{\Sigma 0}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} = -\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 0}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}}\end{aligned}$$

А далі виконуються перетворення для фаз B і C :

$$\begin{aligned}\underline{I}_{kb}^{(1,1)} &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a \cdot \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} = \\ &= a^2 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a \cdot \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 0}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} \right) + \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 2}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} \right) = \\ &= \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \left(a^2 - a \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 0}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} - \frac{\underline{x}_{\Sigma 2}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} \right)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{I}_{kc}^{(1,1)} &= a \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a^2 \cdot \underline{I}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{I}_{ka0}^{(1,1)} = \\ &= a \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} + a^2 \cdot \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 0}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} \right) + \left(-\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 2}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} \right) = \\ &= \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \left(a - a^2 \cdot \frac{\underline{x}_{\Sigma 0}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} - \frac{\underline{x}_{\Sigma 2}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}} \right)\end{aligned}$$

Після математичних перетворень можна виділити спільний модуль величини струмів

$$\underline{I}_b^{(1,1)} = \underline{I}_c^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{\sqrt{\underline{x}_{\Sigma 2}^2 + \underline{x}_{\Sigma 2} \cdot \underline{x}_{\Sigma 0} + \underline{x}_{\Sigma 0}^2}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}}$$

Так само співвідношення для струмів при $k^{(1,1)}$

$$m^{(1,1)} = \frac{\underline{I}_{kb}^{(1,1)}}{\underline{I}_{ka1}^{(1,1)}} = \frac{\underline{I}_{kc}^{(1,1)}}{\underline{I}_{ka1}^{(1,1)}} = \sqrt{3} \cdot \frac{\sqrt{\underline{x}_{\Sigma 2}^2 + \underline{x}_{\Sigma 2} \cdot \underline{x}_{\Sigma 0} + \underline{x}_{\Sigma 0}^2}}{\underline{x}_{\Sigma 2} + \underline{x}_{\Sigma 0}}$$

А далі доведено, що в залежності від співвідношення між опорами різних послідовностей:

$$\left\{ \begin{array}{ll} x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 0} & \rightarrow m^{(1,1)} = 1,5 \\ \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 0}} = 0 \text{ або } \infty & \rightarrow m^{(1,1)} = \sqrt{3} \end{array} \right.$$

Отже $1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}$.

Графічна інтерпретація для $k^{(1,1)}$ – рис 2.17.

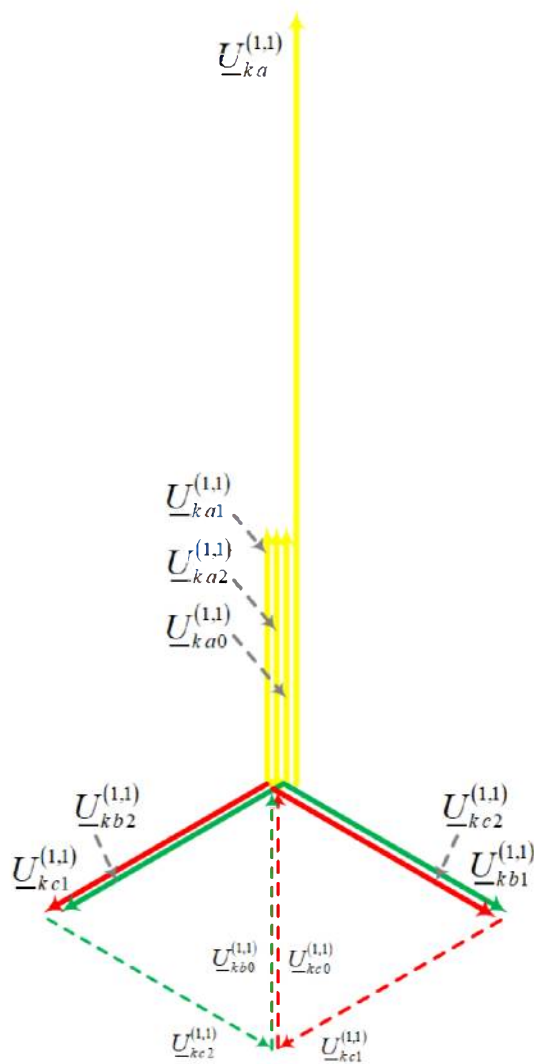
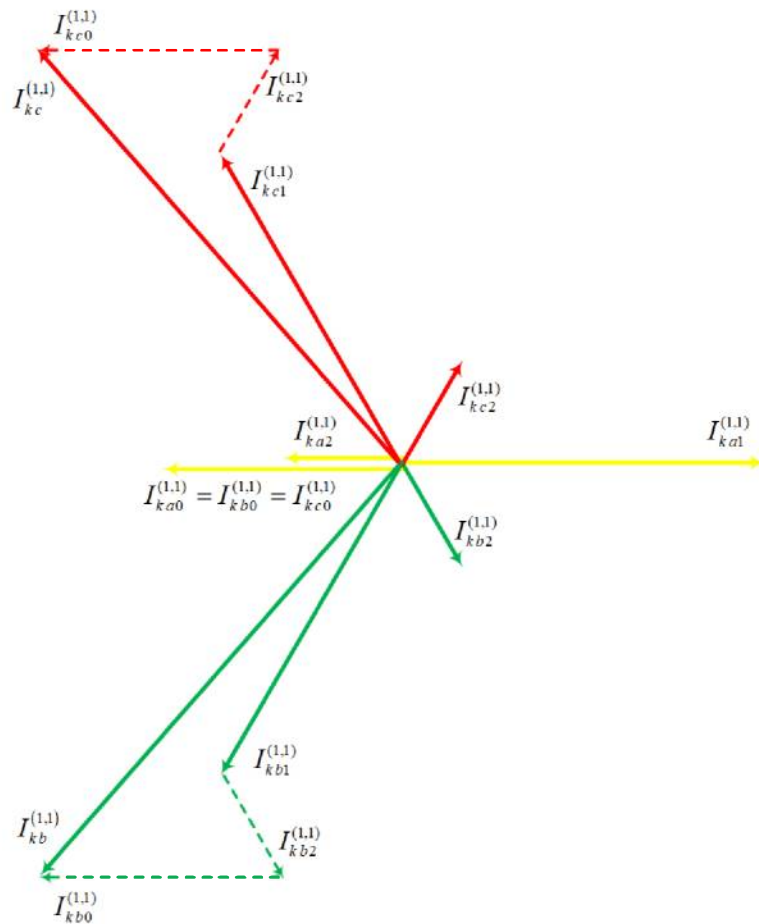


Рисунок 2.17 – ВД для $k^{(1,1)}$



Продовження рисунку 2.17 – ВД для $k^{(1,1)}$

Так само для напруги:

$$\underline{U}_{ka}^{(1,1)} = \underline{U}_{ka1}^{(1,1)} + \underline{U}_{ka2}^{(1,1)} + \underline{U}_{ka0}^{(1,1)} = 3 \cdot \underline{U}_{ka1}^{(1,1)}$$

$$\underline{U}_{kb}^{(1,1)} = \underline{U}_{kc}^{(1,1)} = 0$$

Ось тут можна вже згадати, що на практиці у місці пошкодження виникає додатковий опір, який визначається не тільки опором електричної дуги r_δ , але й опором інших елементів шляху струму КЗ від фази до фази або від фази до землі.

Таким чином для $k^{(1)}$

$$\underline{I}_{ka1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{[r_\delta + jx_{\Sigma 1}] + [r_\delta + jx_{\Sigma 2}] + [r_\delta + jx_{\Sigma 0}]}$$

$$= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{3r_{\partial} + j[x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}]}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot (3r_{\partial} + j[x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}])$$

Таким чином для $k^{(2)}$

$$\underline{I}_{ka1}^{(2)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{\left[\frac{r_{\partial}}{2} + jx_{\Sigma 1} \right] + \left[\frac{r_{\partial}}{2} + jx_{\Sigma 2} \right]} =$$

$$= \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{r_{\partial} + j(x_{\Sigma 1} + x_{\Sigma 2})}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(2)} = \underline{U}_{ka2}^{(2)} = \underline{I}_{ka2}^{(2)} \cdot [r_{\partial} + jx_{\Sigma 2}]$$

Аналогічно для $k^{(1,1)}$

$$\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{jx_{\Sigma 1} + \frac{jx_{\Sigma 2} \cdot (r_{\partial} + jx_{\Sigma 0})}{jx_{\Sigma 2} + (r_{\partial} + jx_{\Sigma 0})}}$$

$$\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{jx_{\Sigma 2} \cdot (r_{\partial} + jx_{\Sigma 0})}{jx_{\Sigma 2} + (r_{\partial} + jx_{\Sigma 0})}$$

Задача розрахунку будь-якого типу несиметричного КЗ полягає в визначенні струму прямої послідовності у місці пошкодження. В загальному вигляді:

$$\underline{I}_{ka1}^{(n)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Delta}^{(n)}}$$

де

n	$x_{\Delta}^{(n)}$
1	$x_{\Delta}^{(1)} = x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}$
1,1	$x_{\Delta}^{(1,1)} = \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$
2	$x_{\Delta}^{(2)} = x_{\Sigma 2}$

Для складових інших послідовностей:

n	$\underline{I}_{ka2}^{(n)}$	$\underline{I}_{ka0}^{(n)}$
1	$\underline{I}_{ka2}^{(1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1)}$	$\underline{I}_{ka0}^{(1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1)}$
1,1	$\underline{I}_{ka2}^{(1,1)} = -\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$	$\underline{I}_{ka0}^{(1,1)} = -\underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$
2	$\underline{I}_{ka2}^{(2)} = -\underline{I}_{ka1}^{(2)}$	$\underline{I}_{ka0}^{(2)} = 0$

Повний фазний струм в місці пошкодження:

$$\underline{I}_k^{(n)} = m^{(n)} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(n)}$$

де

n	$m^{(n)}$
1	$m^{(1)} = 3$
1,1	$m^{(1,1)} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}}$
2	$m^{(2)} = \sqrt{3}$

Напруги різних послідовностей:

n	$\underline{U}_{ka1}^{(n)}$	$\underline{U}_{ka2}^{(n)}$	$\underline{U}_{ka0}^{(n)}$
1	$\underline{U}_{ka1}^{(1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1)} (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})$	$\underline{U}_{ka2}^{(1)} = -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2}$	$\underline{U}_{ka0}^{(1)} = -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0}$
1,1	$\underline{U}_{ka1}^{(1,1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$	$\underline{U}_{ka2}^{(1,1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$	$\underline{U}_{ka0}^{(1,1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$
2	$\underline{U}_{ka1}^{(2)} = j \underline{I}_{ka1}^{(2)} \cdot x_{\Sigma 2}$	$\underline{U}_{ka2}^{(2)} = j \underline{I}_{ka1}^{(2)} \cdot x_{\Sigma 2}$	$\underline{U}_{ka0}^{(2)} = 0$

Перехід до фазних струмів:

n	$\underline{I}_{ka}^{(n)}$	$\underline{I}_{kb}^{(n)}$	$\underline{I}_{kc}^{(n)}$
1	$\underline{I}_{ka}^{(1)} = 3 \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)}$	$\underline{I}_{kb}^{(1)} = 0$	$\underline{I}_{kc}^{(1)} = 0$
1,1	$\underline{I}_{ka}^{(1,1)} = 0$	$\underline{I}_{kb}^{(1,1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \left(a^2 - \frac{a \cdot x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right)$	$\underline{I}_{kc}^{(1,1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \cdot \left(a - \frac{a^2 \cdot x_{\Sigma 0} + x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} \right)$
2	$\underline{I}_{ka}^{(2)} = 0$	$\underline{I}_{kb}^{(2)} = (a^2 - a) \cdot \underline{I}_{ka1}^{(2)} = -j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(2)}$	$\underline{I}_{kc}^{(2)} = (a - a^2) \cdot \underline{I}_{ka1}^{(2)} = j\sqrt{3} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(2)}$

і до фазних напруг

n	$\underline{U}_{ka}^{(n)}$	$\underline{U}_{kb}^{(n)}$	$\underline{U}_{kc}^{(n)}$
1	$\underline{U}_{ka}^{(1)} = 0$	$\underline{U}_{kb}^{(1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot [x_{\Sigma 2} (a^2 - a) + x_{\Sigma 0} (a^2 - 1)]$	$\underline{U}_{kc}^{(1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot [x_{\Sigma 2} (a - a^2) + x_{\Sigma 0} (a - 1)]$
1,1	$\underline{U}_{ka}^{(1,1)} = 3 j \underline{I}_{ka1}^{(1,1)} \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}}$	$\underline{U}_{kb}^{(1,1)} = 0$	$\underline{U}_{kc}^{(1,1)} = 0$
2	$\underline{U}_{ka}^{(2)} = 2 j \underline{I}_{ka1}^{(2)} \cdot x_{\Sigma 2}$	$\underline{U}_{kb}^{(2)} = -j \underline{I}_{ka1}^{(2)} \cdot x_{\Sigma 2}$	$\underline{U}_{kc}^{(2)} = -j \underline{I}_{ka1}^{(2)} \cdot x_{\Sigma 2}$

Отримані дані необхідно узагальнити. Це можна зробити не лише за формулами, але й за схемами заміщення.

Роздивимося це детально.

По-перше, для трифазного КЗ характеристикою є лише пряма послідовність, рис. 2.18.

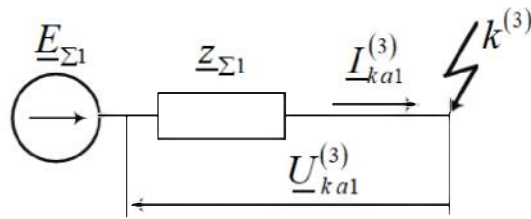


Рисунок 2.18 – Для $k^{(3)}$

Далі для двофазного КЗ $k^{(2)}$ характеристикою є вже дві послідовності – пряма та обернена, рис. 2.19. За наведеними вище узагальненими характеристиками можна зробити висновок, про паралельне з'єднання цих послідовностей.

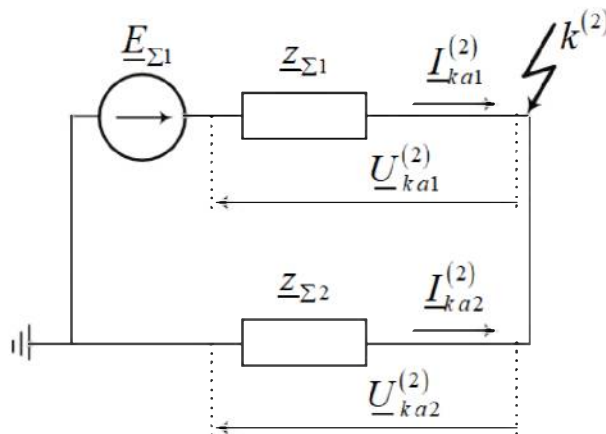
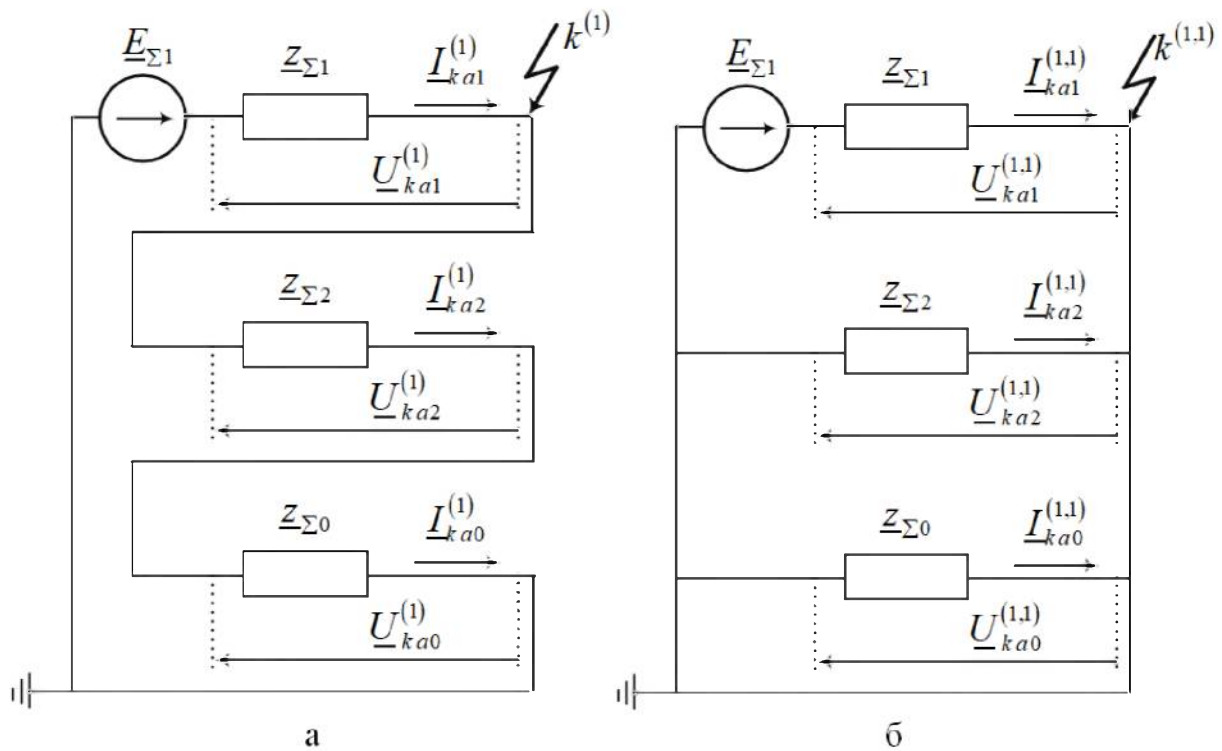


Рисунок 2.19 – Для $k^{(2)}$

А ось для наступного, однофазного КЗ $k^{(1)}$, це вже послідовне з'єднання всіх трьох послідовностей, рис. 2.20, а, для двофазного на землю $k^{(1,1)}$ – паралельне з'єднання всіх трьох послідовностей, рис. 2.20, б.

Рисунок 2.20 – Для $k^{(1)}$ і $k^{(1,1)}$

Отримані данні далі використовуються для простого зіставлення різних видів струмів КЗ в одному місці пошкодження, в одній точці енергосистеми:

$$x_{\Delta}^{(1)} > x_{\Delta}^{(2)} > x_{\Delta}^{(1,1)} > x_{\Delta}^{(3)} = 0$$

$$I_{ka1}^{(1)} < I_{ka1}^{(2)} < I_{ka1}^{(1,1)} < I_{ka1}^{(3)}$$

$$U_{ka1}^{(1)} > U_{ka1}^{(2)} > U_{ka1}^{(1,1)} > U_{ka1}^{(3)} = 0$$

Вони дозволяють визначити максимальні значення повних фазних струмів і їх відношення до струмів трифазного КЗ:

$$k^{(n-3)} = \frac{I_k^{(n)}}{I_k^{(3)}} = \frac{m^{(n)} \cdot E_{\Sigma}^{(n)}}{(x_{\Sigma 1} + x_{\Delta}^{(n)})} / \frac{E_{\Sigma}^{(3)}}{x_{\Sigma 1}} = \frac{m^{(n)} \cdot E_{\Sigma}^{(n)}}{(1 + x_{\Delta}^{(n)} / x_{\Sigma 1}) \cdot E_{\Sigma}^{(3)}}$$

Якщо прийняти $E_{\Sigma}^{(n)} \approx E_{\Sigma}^{(3)}$, яка в свою чергу залежить від схеми заміщення генераторів, то

$$k^{(n-3)} = \frac{I_{\bar{k}}^{(n)}}{I_{\bar{k}}^{(3)}} = \frac{m^{(n)}}{1 + x_{\Delta}^{(n)} / x_{\Sigma 1}}$$

А далі в кожному конкретному випадку ми отримуємо наступні значення кратності струмів.

Однофазне КЗ

$$k^{(1-3)} = \frac{I_{\bar{k}}^{(1)}}{I_{\bar{k}}^{(3)}} = \frac{m^{(1)}}{1 + x_{\Delta}^{(1)} / x_{\Sigma 1}} = \frac{3}{1 + (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) / x_{\Sigma 1}}$$

При близькому КЗ $x_{\Sigma 0} \approx 0$ в залежності від режиму нейтралі трансформаторів: якщо $x_{\Sigma 0} \approx 0$, і $x_{\Sigma 1} \gg x_{\Sigma 2}$ то $x_{\Sigma 2} \approx 0$, а $k^{(1-3)} = 3$; якщо ж $x_{\Sigma 0} \approx \infty$, то $k^{(1-3)} = 0$. Це дозволяє стверджувати: $0 \leq k^{(1-3)} < 3$.

При віддаленому КЗ $x_{\Sigma 2} \approx x_{\Sigma 1}$, то при $x_{\Sigma 0} \approx 0$ буде $k^{(1-3)} = 1,5$, а при $x_{\Sigma 0} \approx \infty$ буде $k^{(1-3)} = 0$. А це дозволяє стверджувати: $0 \leq k^{(1-3)} < 1,5$.

Це теоретично підтверджує, що струм однофазного КЗ може значно перевищувати струм трифазного КЗ. Тому при виборі обладнання в мережах 110 кВ і вище розраховуються два види КЗ.

Двофазне КЗ на землю:

$$k^{(1,1-3)} = \frac{I_{\bar{k}}^{(1,1)}}{I_{\bar{k}}^{(3)}} = \frac{m^{(1,1)}}{1 + x_{\Delta}^{(1,1)} / x_{\Sigma 1}} = \frac{\sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{(x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0})^2}}}{1 + \frac{x_{\Sigma 2} \cdot x_{\Sigma 0}}{x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}} / x_{\Sigma 1}}$$

Як було доведено вище $1,5 \leq m^{(1,1)} \leq \sqrt{3}$. Далі, при близькому КЗ, якщо $x_{\Sigma 0} = 0$, то $k^{(1,1-3)} = \sqrt{3}$; а якщо $x_{\Sigma 0} = \infty$, то $k^{(1,1-3)} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 1}}}$.

При віддаленому КЗ $x_{\Sigma 2} \approx x_{\Sigma 1}$, маємо $k^{(1,1-3)} = \frac{\sqrt{3}}{2}$.

Це дозволяє стверджувати: $\frac{\sqrt{3}}{2} \leq k^{(1,1-3)} \leq \sqrt{3}$.

Двофазне КЗ:

$$k^{(2-3)} = \frac{I_k^{(2)}}{I_k^{(3)}} = \frac{m^{(2)}}{1 + x_{\Delta}^{(2)} / x_{\Sigma 1}} = \frac{\sqrt{3}}{1 + \frac{x_{\Sigma 2}}{x_{\Sigma 1}}}$$

Можливі два варіанти: якщо $x_{\Sigma 2} \approx x_{\Sigma 1}$, то $k^{(2-3)} = \frac{\sqrt{3}}{2}$, якщо ж $x_{\Sigma 2} \leq x_{\Sigma 1}$, то $k^{(2-3)} = \sqrt{3}$.

Отримані співвідношення дозволяють визначити струми в схемі електричної мережі в залежності від різних пошкоджень.

2.3 Висновки за другим розділом

Розглянутий математичний апарат для дослідження несиметричних перехідних процесів в електричних мережах. Приведені основні характеристики різних елементів електричної мережі для різних послідовностей. Визначені співвідношення між струмами та напругами окремих послідовностей.

Таким чином у наступному використовуються розглянуті теоретичні положення для аналізу процесів в конкретних схемах мережі.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК СИМЕТРИЧНИХ І НЕСИМЕТРИЧНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

3.1 Розрахунок симетричних аварійних режимів

На рис. 3.1 показана схема електричної мережі, яка включає три підстанції: одна з автотрансформатором і дві з трансформаторами. Схеми з'єднання обмоток і режими роботи нейтралі показані на рис. 3.1.

Роздивимося режими симетричних і несиметричних КЗ.

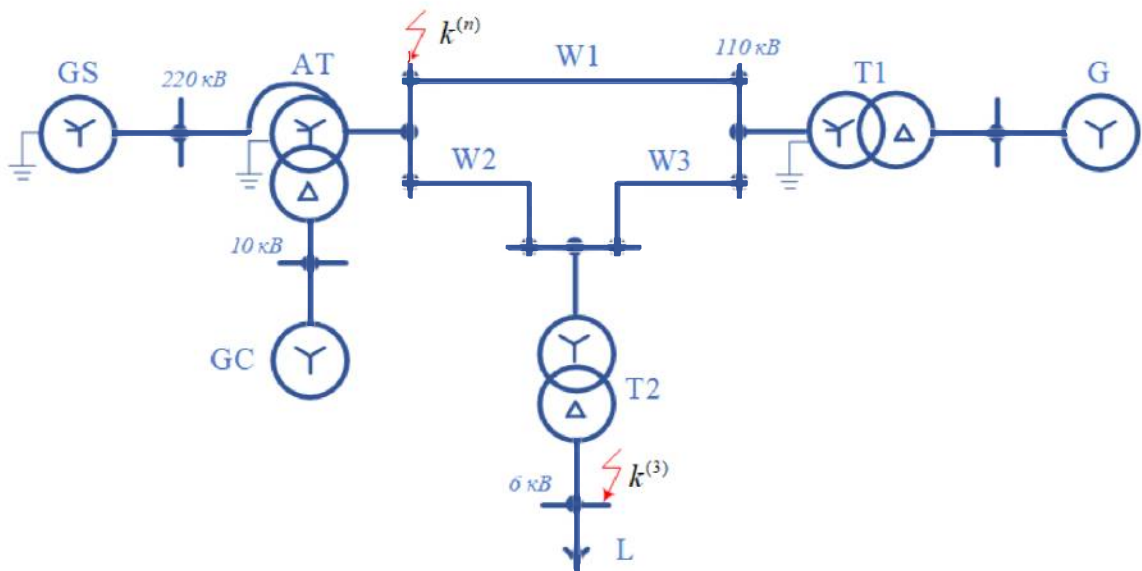


Рисунок 3.1 – Перша схема для досліджень

Для GS :

S_{ϕ} МВА	$S_{k3}^{//}$ МВА	x_{GS} в.о.
1000	7000	0,143

Для G і GC :

$S_{\bar{\sigma}}$ МВА	$P_{G,ном}$ МВА	$\cos \varphi_{G,ном}$	$x_{*d}^{//}$ в.о.	$U_{G,ном}$ кВ	E_G в.о.	x_G в.о.
Генератор						
1000	200	0,85	0,18	15,75	1,106	0,765
Компенсатор						
1000	50	-	0,23	11	1,23	4,6

Для L :

$$x_{Load}^{//} = 0,35, \quad E_{Load} = 0,85$$

Для автотрансформатора і трансформаторів:

$$x_{AT\bar{\sigma}} = \frac{0,5 \cdot (u_{\bar{\sigma}-c\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%} - u_{\bar{\sigma}-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{0,5 \cdot (11 + 32 - 20)}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,46;$$

$$x_{ATc} = \frac{0,5 \cdot (u_{\bar{\sigma}-c\%} - u_{\bar{\sigma}-H\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{0,5 \cdot (11 - 32 + 20)}{100} \cdot \frac{1000}{250} = -0,02 \approx 0;$$

$$x_{ATH} = \frac{0,5 \cdot (-u_{\bar{\sigma}-c\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{0,5 \cdot (-11 + 32 + 20)}{100} \cdot \frac{1000}{250} = 0,82.$$

$$x_{T1} = \frac{u_{\%T1}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{125} = 0,840$$

$$x_{T2} = \frac{u_{\%T2}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{16} = 6,563$$

Для повітряних ЛЕП:

$$x_{W1} = x_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,454$$

$$x_{W2} = x_0 \cdot l_2 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,302$$

$$x_{W3} = x_0 \cdot l_3 \cdot \frac{S_6}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,302$$

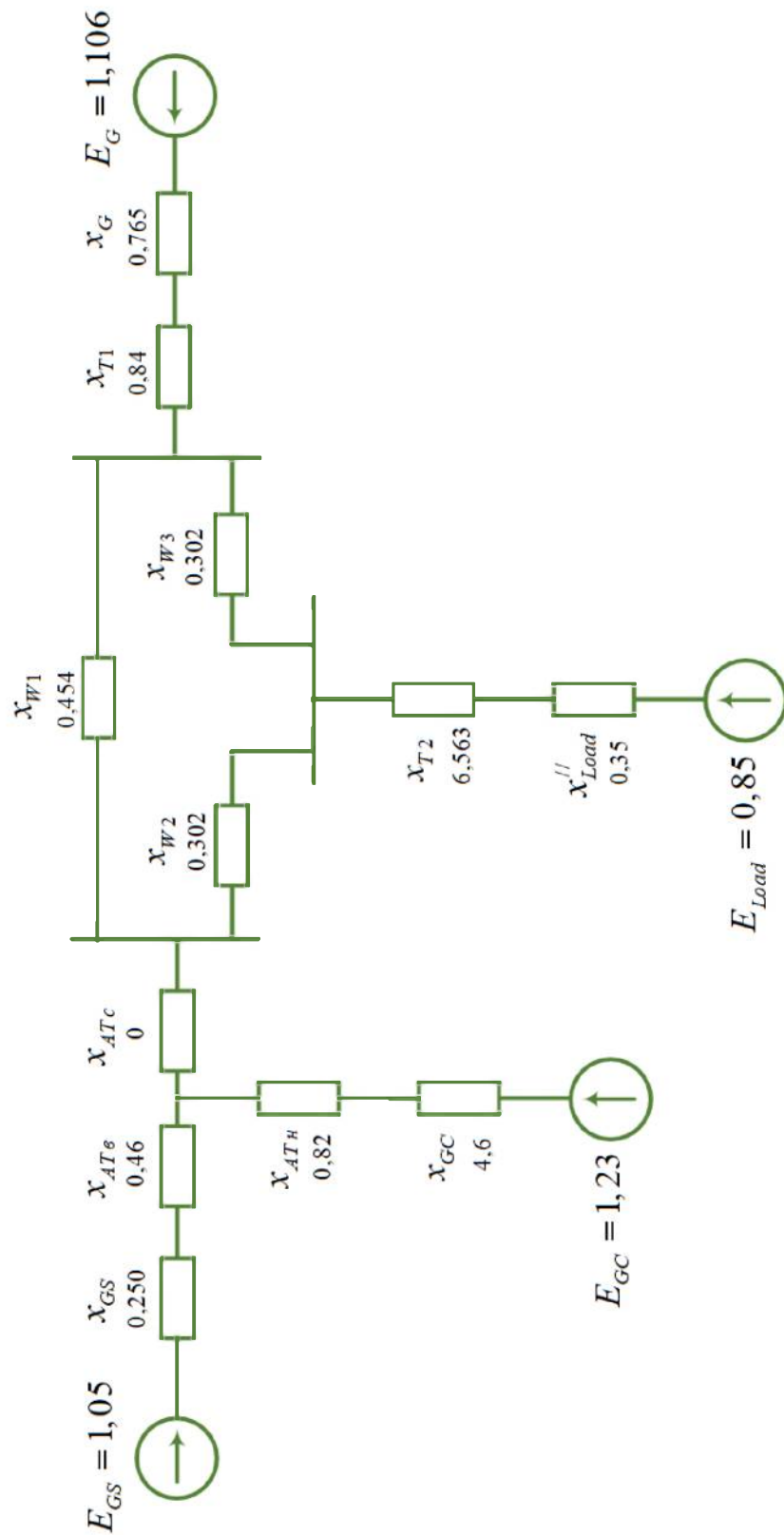


Рисунок 3.2 – Схема заміщення з результати розрахунку

Перетворення послідовно включених елементів (рис. 3.3):

$$x_1 = x_{GS} + x_{ATs} = 0,25 + 0,46 = 0,71$$

$$x_2 = x_{GC} + x_{ATH} = 4,6 + 0,82 = 5,42$$

$$x_3 = x_G + x_{T1} = 0,765 + 0,84 = 1,605$$

Далі перетворення трикутник – зірка:

$$x_{W1-2} = \frac{x_{W1} \cdot x_{W2}}{x_{W1} + x_{W2} + x_{W3}} = \frac{0,454 \cdot 0,302}{0,454 + 0,302 + 0,302} = 0,13$$

$$x_{W1-3} = \frac{x_{W1} \cdot x_{W3}}{x_{W1} + x_{W2} + x_{W3}} = \frac{0,454 \cdot 0,302}{0,454 + 0,302 + 0,302} = 0,13$$

$$x_{W2-3} = \frac{x_{W2} \cdot x_{W3}}{x_{W1} + x_{W2} + x_{W3}} = \frac{0,302 \cdot 0,302}{0,454 + 0,302 + 0,302} = 0,086$$

$$x_4 = x_{T2} + x_{W2-3} = 6,563 + 0,086 = 6,649$$

Еквівалент енергосистеми та компенсатора (рис. 3.4):

$$x_5 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_{w1-2} = \frac{0,71 \cdot 5,42}{0,71 + 5,42} + 0,13 = 0,758$$

$$x_6 = x_3 + x_{w1-3} = 1,605 + 0,13 = 1,735$$

$$E_{exs1} = \frac{\frac{E_{GS}}{x_1} + \frac{E_{GC}}{x_2}}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}} = \frac{E_{GS} \cdot x_2 + E_{GC} \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,05 \cdot 5,42 + 1,23 \cdot 0,71}{5,42 + 0,71} = 1,071$$

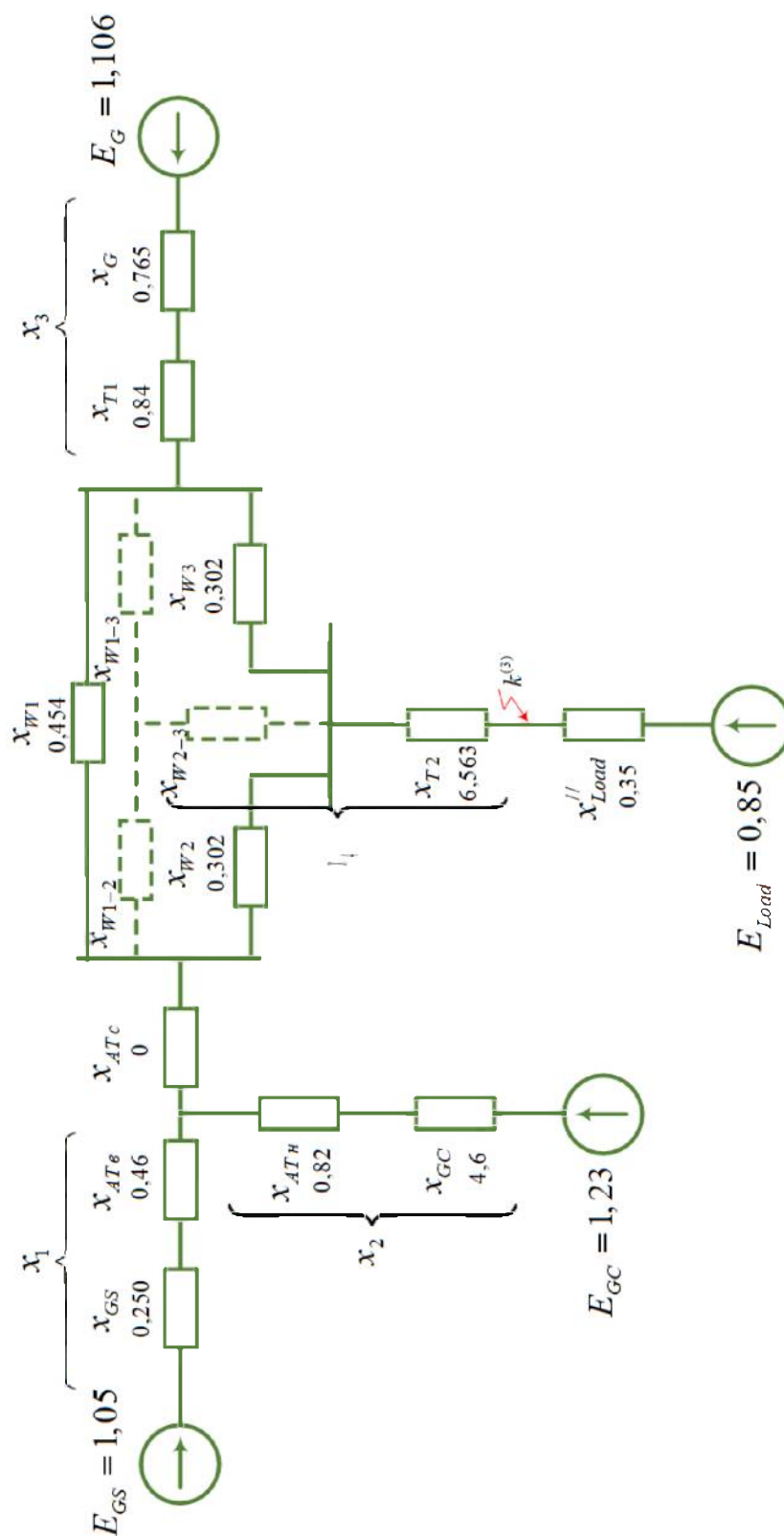


Рисунок 3.3 – Перший етап перетворення

Наступний крок:

$$x_7 = \frac{x_5 \cdot x_6}{x_5 + x_6} + x_4 = \frac{0,758 \cdot 1,735}{0,758 + 1,735} + 6,649 = 7,177$$

$$E_{екс2} = \frac{\frac{E_{екс1}}{x_5} + \frac{E_G}{x_6}}{\frac{1}{x_5} + \frac{1}{x_6}} = \frac{E_{екс1} \cdot x_6 + E_G \cdot x_5}{x_5 + x_6} = \frac{1,071 \cdot 1,735 + 1,106 \cdot 0,758}{1,735 + 0,758} = 1,082$$

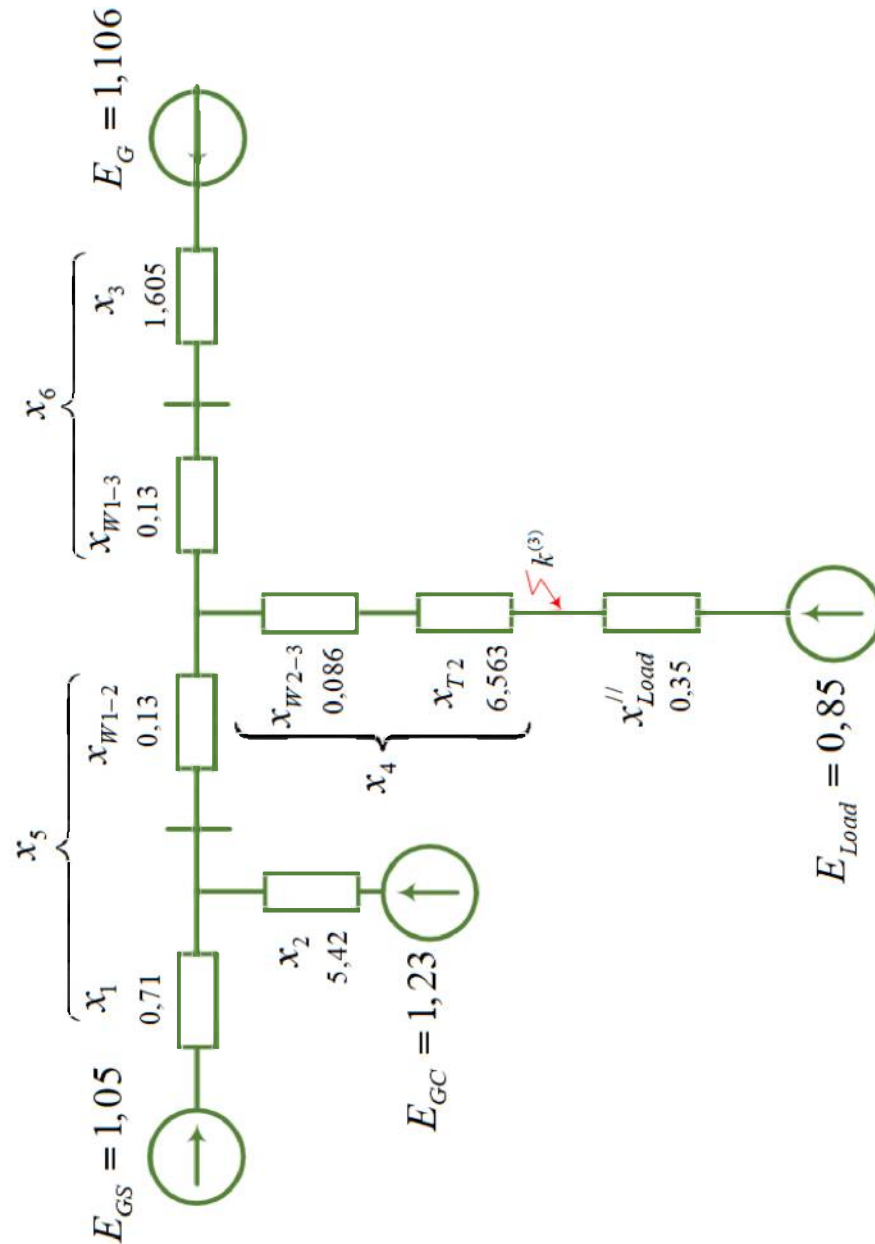
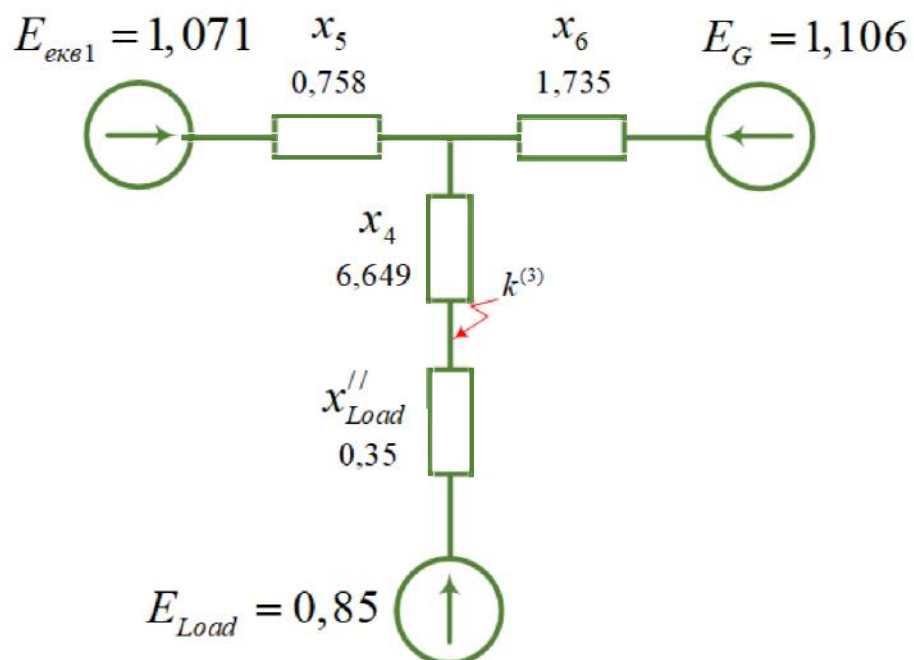
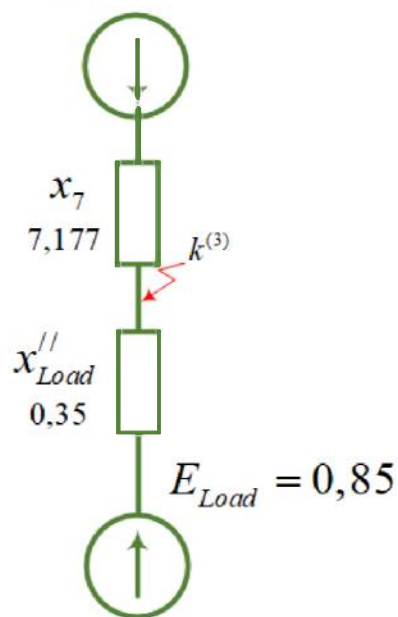


Рисунок 3.4 – Другой этап перетворення



a)

$$E_{екв2} = 1,082$$



б)

Рисунок 3.5 – Третій етап перетворення

А далі

$$I_{n0*} = \frac{E_{екв2}}{x_7} + \frac{E_{Load}}{x_{Load}''} = \frac{1,082}{7,177} + \frac{0,85}{0,35} = 2,579 \text{ в.о.}$$

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 91,64 \text{ кА}$$
$$I_{n0} = I_{n0*} \cdot I_{\delta} = 2,579 \cdot 91,64 = 236,34 \text{ кА}$$

А без урахування двигуного навантаження:

$$I_{n0*} = \frac{E_{екз2}}{x_7} = \frac{1,082}{7,177} = 0,151 \text{ в.о.}$$
$$I_{n0} = I_{n0*} \cdot I_{\delta} = 0,151 \cdot 91,64 = 13,838 \text{ кА}$$

Для наступної схеми – рис. 3.6.

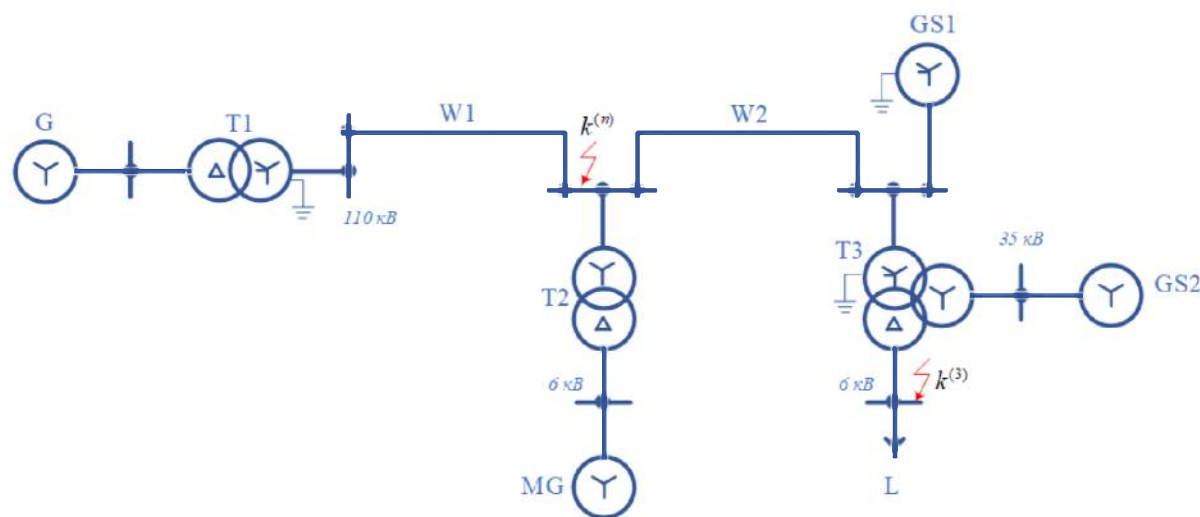


Рисунок 3.6 – Друга схема для досліджень

Для GS :

S_{δ} МВА	$S_{кз}^{//}$ МВА	x_{GS} в.о.
1000	1200	0,833
	3000	0,333

Для G і MG :

$S_{\bar{\sigma}}$ МВА	$P_{G,ном}$ МВА	$\cos \varphi_{G,ном}$	$x_{*d}^{//}$ в.о.	$U_{G,ном}$ кВ	E_G в.о.	x_G в.о.
Генератор						
1000	63	0,8	0,203	6,3	1,133	2,578
Синхронна машина						
1000	6	0,9	0,143	6	1,167	20,378

Для L :

$$x_{Load}^{//} = 0,35, \quad E_{Load} = 0,85$$

Для трансформаторів:

$$x_{T\bar{\sigma}} = \frac{0,5 \cdot (u_{\bar{\sigma}-\bar{\sigma}\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%} - u_{\bar{\sigma}-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{0,5 \cdot (10,5 + 17,5 - 6,5)}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2,688;$$

$$x_{T\bar{\sigma}} = \frac{0,5 \cdot (u_{\bar{\sigma}-\bar{\sigma}\%} - u_{\bar{\sigma}-H\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{0,5 \cdot (10,5 - 17,5 + 6,5)}{100} \cdot \frac{1000}{40} = -0,063 \approx 0;$$

$$x_{TH} = \frac{0,5 \cdot (-u_{\bar{\sigma}-\bar{\sigma}\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%} + u_{\bar{\sigma}-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{0,5 \cdot (-10,5 + 17,5 + 6,5)}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 1,688.$$

$$x_{T1} = \frac{u_{\bar{\sigma}T1}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1,375$$

$$x_{T2} = \frac{u_{\bar{\sigma}T2}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{S_{ном}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{10} = 10,5$$

Для повітряних ЛЕП:

$$x_{W1} = x_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 10 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,302$$

$$x_{W2} = x_0 \cdot l_2 \cdot \frac{S_{\bar{\sigma}}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 16 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,484$$

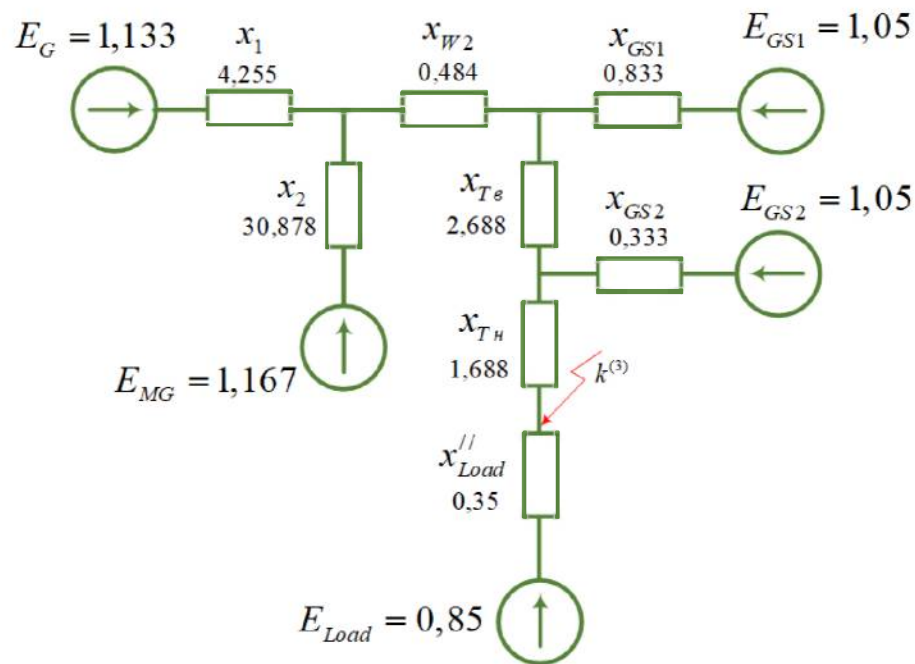


Рисунок 3.8 – Перший етап перетворення

Еквівалент генератора і двигуна (рис. 3.9):

$$x_3 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_{w2} = \frac{4,255 \cdot 30,878}{4,255 + 30,878} + 0,484 = 4,224$$

$$E_{екс1} = \frac{\frac{E_G}{x_1} + \frac{E_{MG}}{x_2}}{\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2}} = \frac{E_G \cdot x_2 + E_{MG} \cdot x_1}{x_1 + x_2} = \frac{1,133 \cdot 30,878 + 1,167 \cdot 4,255}{30,878 + 4,255} = 1,137$$

Наступний крок (рис. 3.10):

$$x_4 = \frac{x_3 \cdot x_{GS1}}{x_3 + x_{GS1}} + x_{Te} = \frac{4,224 \cdot 0,833}{4,224 + 0,833} + 2,688 = 3,384$$

$$E_{екс2} = \frac{\frac{E_{екс1}}{x_3} + \frac{E_{GS1}}{x_{GS1}}}{\frac{1}{x_3} + \frac{1}{x_{GS1}}} = \frac{E_{екс1} \cdot x_{GS1} + E_{GS1} \cdot x_3}{x_{GS1} + x_3} = \frac{1,137 \cdot 0,833 + 1,05 \cdot 4,224}{0,833 + 4,224} = 1,064$$

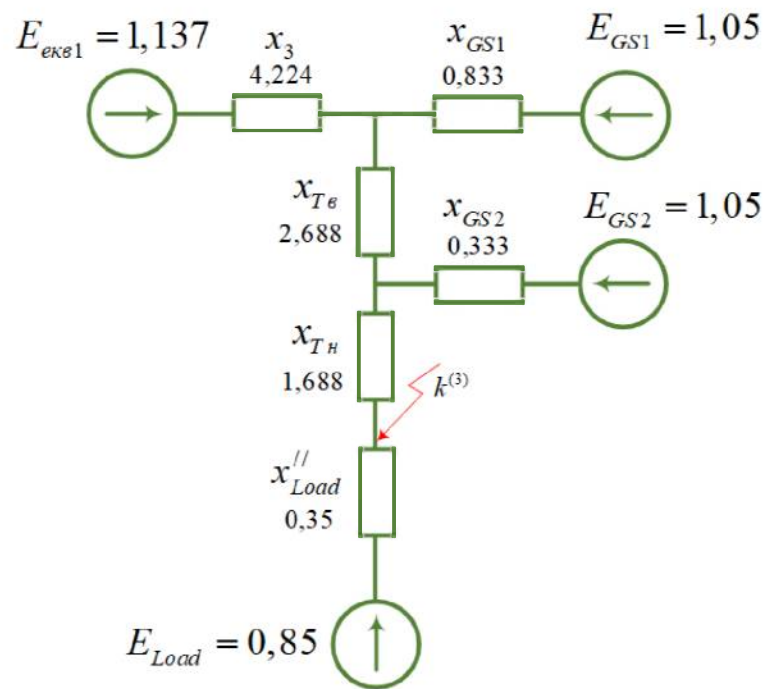


Рисунок 3.9 – Другий етап перетворення

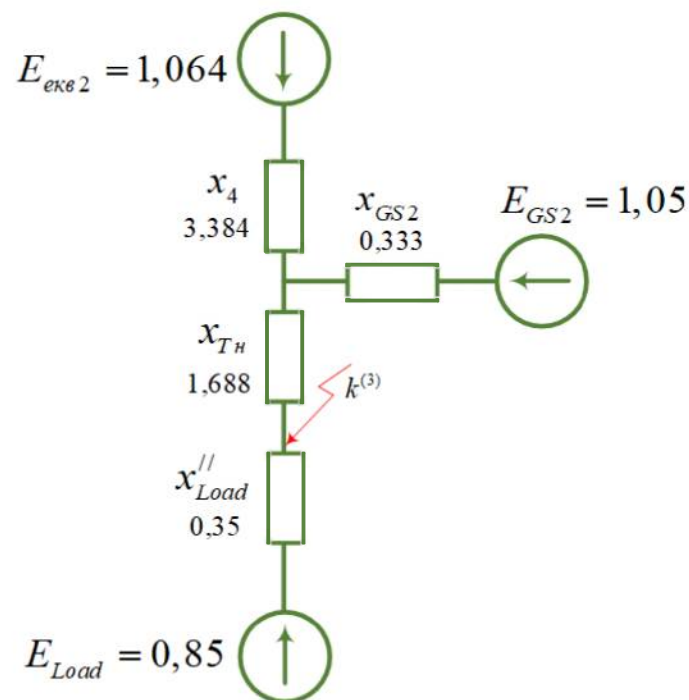


Рисунок 3.10 – Третій етап перетворення

Наступний крок (рис. 3.11):

$$x_5 = \frac{x_4 \cdot x_{GS2}}{x_4 + x_{GS2}} + x_{TH} = \frac{3,384 \cdot 0,333}{3,384 + 0,333} + 1,688 = 1,991$$

$$E_{екз3} = \frac{\frac{E_{екз2}}{x_4} + \frac{E_{GS2}}{x_{GS2}}}{\frac{1}{x_4} + \frac{1}{x_{GS2}}} = \frac{E_{екз2} \cdot x_{GS2} + E_{GS2} \cdot x_4}{x_{GS2} + x_4} = \frac{1,064 \cdot 0,333 + 1,05 \cdot 3,384}{0,333 + 3,384} = 1,051$$

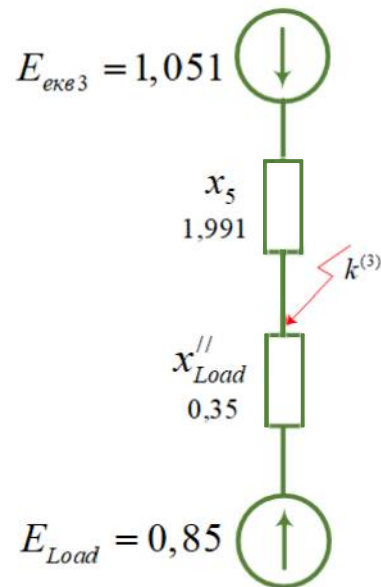


Рисунок 3.11 – Третій етап перетворення

А далі

$$I_{n0*} = \frac{E_{екз3}}{x_5} + \frac{E_{Load}}{x_{Load}''} = \frac{1,051}{1,991} + \frac{0,85}{0,35} = 2,956 \text{ в.о.}$$

$$I_{n0} = I_{n0*} \cdot I_{\sigma} = 2,956 \cdot 91,64 = 270,888 \text{ кА}$$

А без урахування двигуного навантаження:

$$I_{n0*} = \frac{E_{екз3}}{x_5} = \frac{1,051}{1,991} = 0,528 \text{ в.о.}$$

$$I_{n0} = I_{n0*} \cdot I_{\sigma} = 0,528 \cdot 91,64 = 48,386 \text{ кА}$$

Наступна третя схема – рис. 3.12:

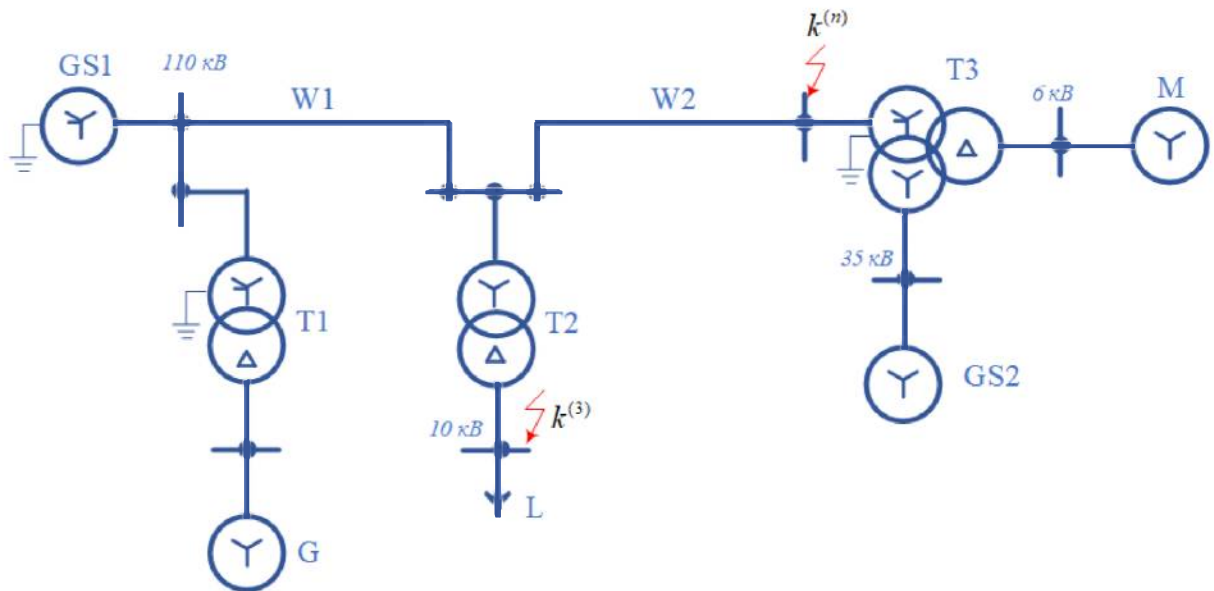


Рисунок 3.12 – Третя схема для досліджень

Для GS :

S_{θ} МВА	$S_{\theta}^{//}$ МВА	x_{GS} в.о.
1000	2800	0,357
	1500	0,667

Для G і MG :

S_{θ} МВА	$P_{G,ном}$ МВА	$\cos \varphi_{G,ном}$	$x_{*d}^{//}$ в.о.	$U_{G,ном}$ кВ	E_G в.о.	x_G в.о.
Генератор						
1000	63	0,8	0,203	6,3	1,133	2,578
Асинхронна машина						
1000	6,4	0,87	0,143	6	1,114	18,662

Для L :

$$x_{Load}^{//} = 0,35, \quad E_{Load} = 0,85$$

Для трансформаторів:

$$x_{T\theta} = \frac{0,5 \cdot (u_{\bar{k}\theta-c\%} + u_{\bar{k}\theta-H\%} - u_{\bar{k}C-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{HOM}} = \frac{0,5 \cdot (10,5 + 17,5 - 6,5)}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 2,688;$$

$$x_{Tc} = \frac{0,5 \cdot (u_{\bar{k}\theta-c\%} - u_{\bar{k}\theta-H\%} + u_{\bar{k}C-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{HOM}} = \frac{0,5 \cdot (10,5 - 17,5 + 6,5)}{100} \cdot \frac{1000}{40} = -0,063 \approx 0;$$

$$x_{TH} = \frac{0,5 \cdot (-u_{\bar{k}\theta-c\%} + u_{\bar{k}\theta-H\%} + u_{\bar{k}C-H\%})}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{HOM}} = \frac{0,5 \cdot (-10,5 + 17,5 + 6,5)}{100} \cdot \frac{1000}{40} = 1,688.$$

$$x_{T1} = \frac{u_{\bar{k}\%T1}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{HOM}} = \frac{11}{100} \cdot \frac{1000}{80} = 1,375$$

$$x_{T2} = \frac{u_{\bar{k}\%T2}}{100} \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{S_{HOM}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{1000}{6,3} = 16,67$$

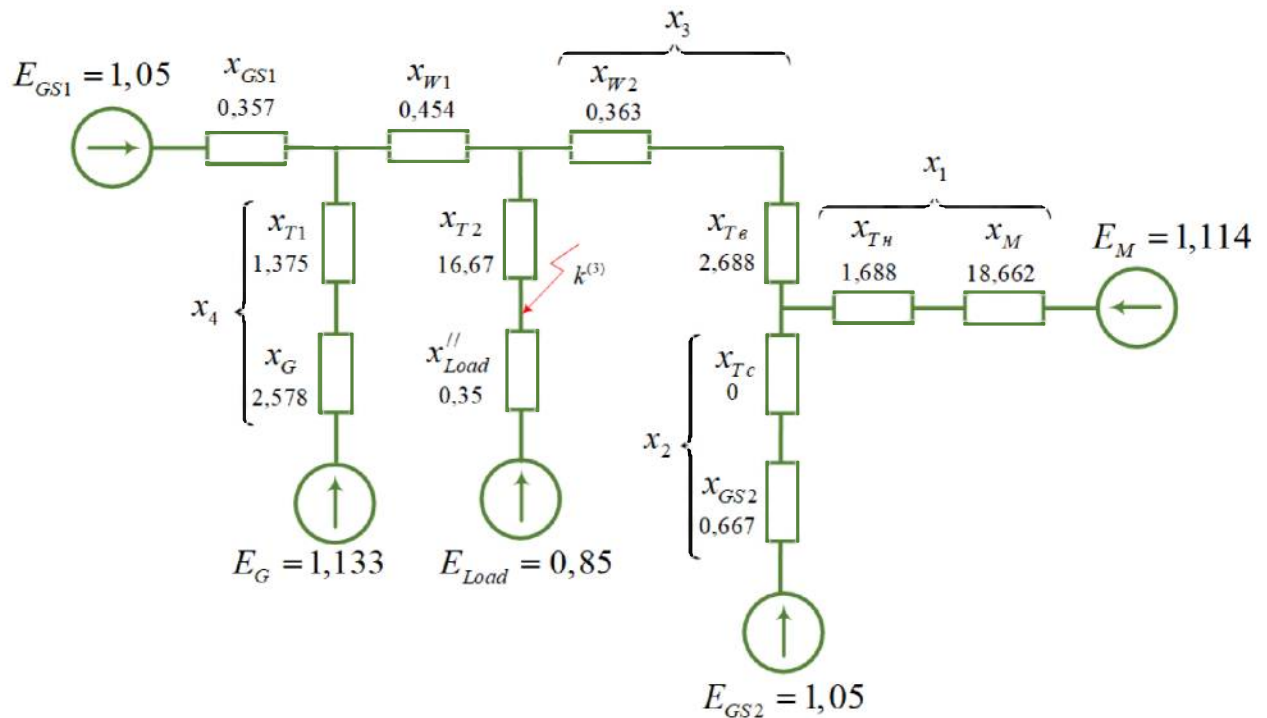


Рисунок 3.13 – Схема заміщення з результатами розрахунків

Для повітряних ЛЕП:

$$x_{W1} = x_0 \cdot l_1 \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 15 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,454$$

$$x_{W2} = x_0 \cdot l_2 \cdot \frac{S_{\bar{\theta}}}{U_{cp}^2} = 0,4 \cdot 12 \cdot \frac{1000}{115^2} = 0,363$$

Перетворення послідовно включених елементів (рис. 3.14):

$$x_1 = x_{TH} + x_M = 1,688 + 18,662 = 20,35$$

$$x_2 = x_{Tc} + x_{GS2} = 0 + 0,667 = 0,667$$

$$x_3 = x_{Te} + x_{W2} = 2,688 + 0,363 = 3,051$$

$$x_4 = x_{T1} + x_G = 1,375 + 2,578 = 3,953$$

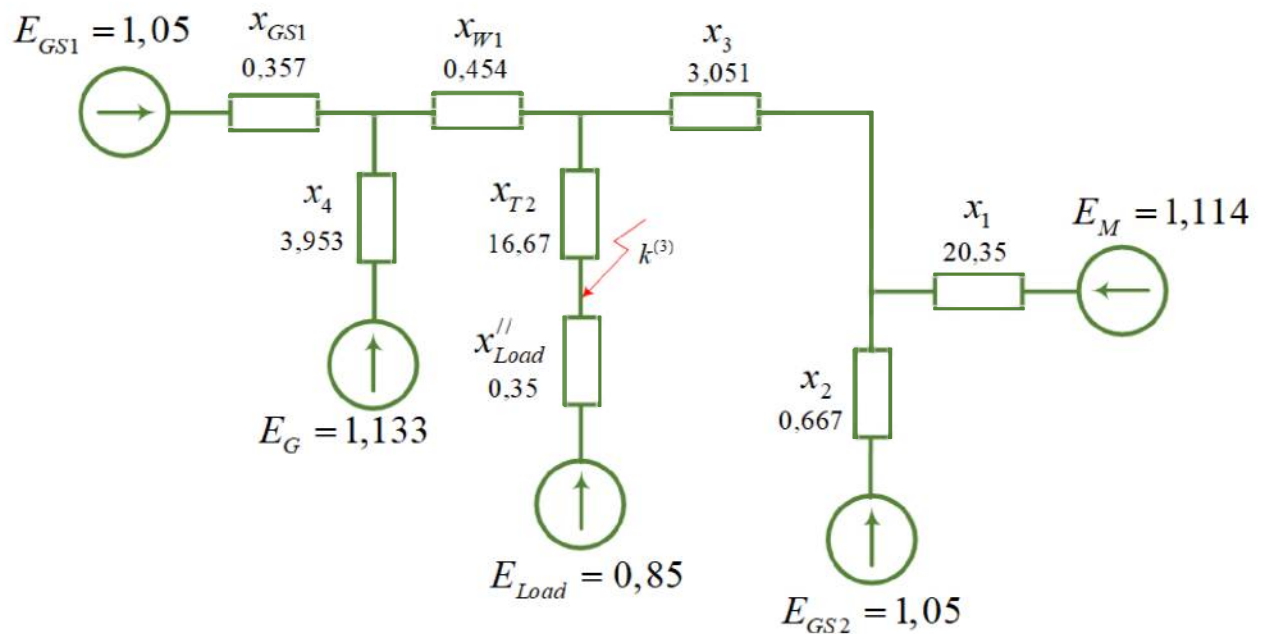


Рисунок 3.14 – Перший етап перетворення

Еквівалент генератора і першої енергосистеми (рис. 3.15):

$$x_5 = \frac{x_{GS1} \cdot x_4}{x_{GS1} + x_4} + x_{w1} = \frac{0,357 \cdot 3,953}{0,357 + 3,953} + 0,454 = 0,781$$

$$E_{екв1} = \frac{\frac{E_{GS1}}{x_{GS1}} + \frac{E_G}{x_4}}{\frac{1}{x_{GS1}} + \frac{1}{x_4}} = \frac{E_{GS1} \cdot x_4 + E_G \cdot x_{GS1}}{x_4 + x_{GS1}} = \frac{1,05 \cdot 3,953 + 1,133 \cdot 0,357}{3,953 + 0,357} = 1,057$$

Еквівалент двигуна і другої енергосистеми:

$$x_6 = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} + x_3 = \frac{20,35 \cdot 0,667}{20,35 + 0,667} + 3,051 = 3,697$$

$$E_{екв2} = \frac{\frac{E_{GS2}}{x_2} + \frac{E_M}{x_1}}{\frac{1}{x_2} + \frac{1}{x_1}} = \frac{E_{GS2} \cdot x_1 + E_M \cdot x_2}{x_1 + x_2} = \frac{1,05 \cdot 20,35 + 1,114 \cdot 0,667}{20,35 + 0,667} = 1,052$$

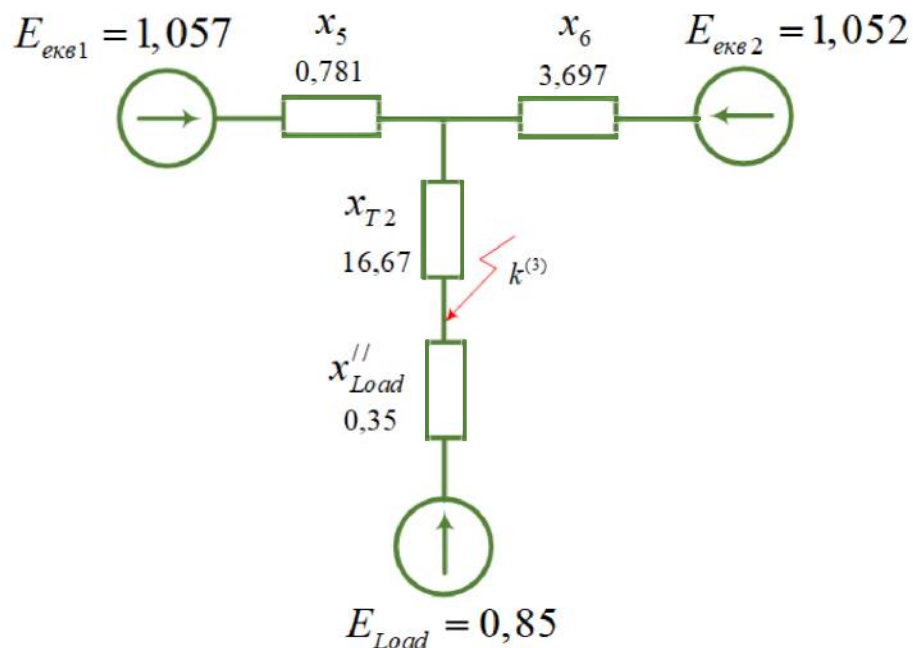


Рисунок 3.15 – Другий етап перетворення

Наступний крок (рис. 3.16):

$$x_7 = \frac{x_5 \cdot x_6}{x_5 + x_6} + x_{T2} = \frac{0,781 \cdot 3,697}{0,781 + 3,697} + 16,67 = 17,315$$

$$E_{екв3} = \frac{\frac{E_{екв1}}{x_5} + \frac{E_{екв2}}{x_6}}{\frac{1}{x_5} + \frac{1}{x_6}} = \frac{E_{екв1} \cdot x_6 + E_{екв2} \cdot x_5}{x_6 + x_5} = \frac{1,057 \cdot 3,697 + 1,052 \cdot 0,781}{3,697 + 0,781} = 1,056$$

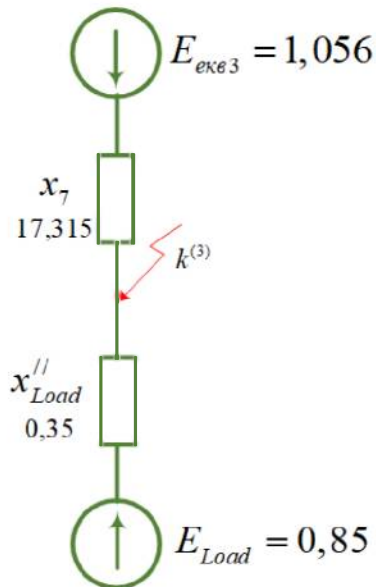


Рисунок 3.16 – Третій етап перетворення

А далі

$$I_{n0*} = \frac{E_{екв3}}{x_7} + \frac{E_{Load}}{x_{Load}''} = \frac{1,056}{17,315} + \frac{0,85}{0,35} = 2,49 \text{ в.о.}$$

$$I_{\delta} = \frac{S_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta}} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10} = 57,74 \text{ кА}$$

$$I_{n0} = I_{n0*} \cdot I_{\delta} = 2,49 \cdot 57,74 = 143,747 \text{ кА}$$

А без урахування двигуного навантаження:

$$I_{n0*} = \frac{E_{екв3}}{x_7} = \frac{1,056}{17,315} = 0,061 \text{ в.о.}$$

$$I_{n0} = I_{n0*} \cdot I_{\delta} = 0,061 \cdot 57,74 = 3,521 \text{ кА}$$

3.2 Розрахунок несиметричних аварійних режимів

Аналіз несиметричного КЗ.

Для схеми першої – схема прямої послідовності – рис. 3.17.

Етапи її перетворення:

перший (рис. 3.18)

$$x_1 = 0,71 \text{ в.о.}, \quad x_2 = 5,42 \text{ в.о.}, \quad x_3 = 1,605 \text{ в.о.}.$$

другий (рис. 3.19)

$$x_9 = 1,735 \text{ в.о.}, \quad x_{10} = 6,999 \text{ в.о.}.$$

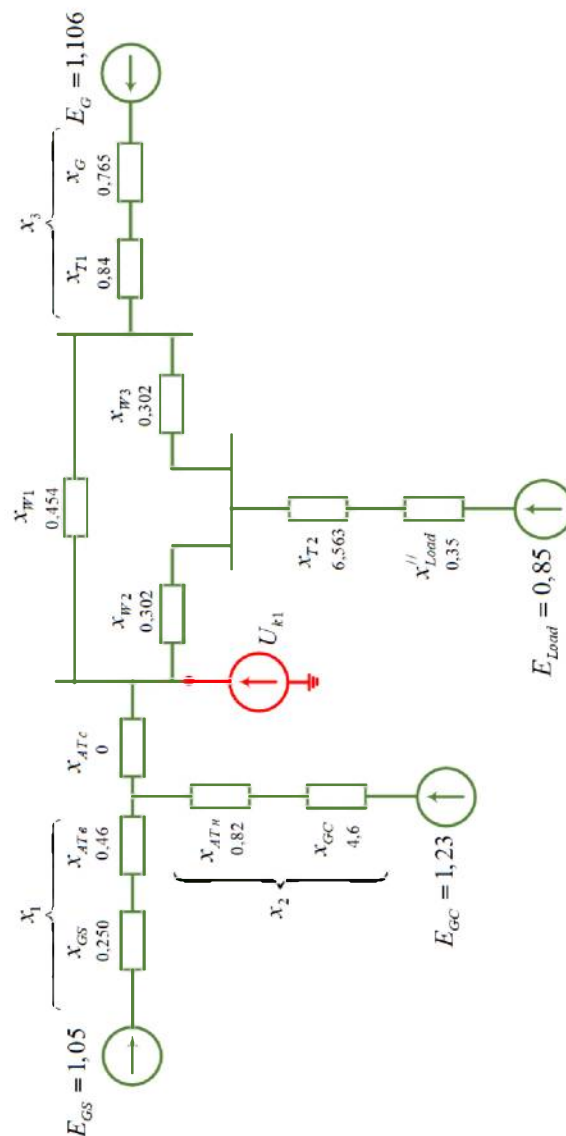


Рисунок 3.17 – Перша схема: пряма послідовність

третій (рис. 3.20)

$$x_{11} = \frac{x_1 \cdot x_2}{x_1 + x_2} = \frac{0,71 \cdot 5,42}{0,71 + 5,42} = 0,628 \text{ в.о.}$$

$$x_{12} = x_{w1-2} + \frac{x_9 \cdot x_{10}}{x_9 + x_{10}} = 0,13 + \frac{1,735 \cdot 6,999}{1,735 + 6,999} = 1,520 \text{ в.о.}$$

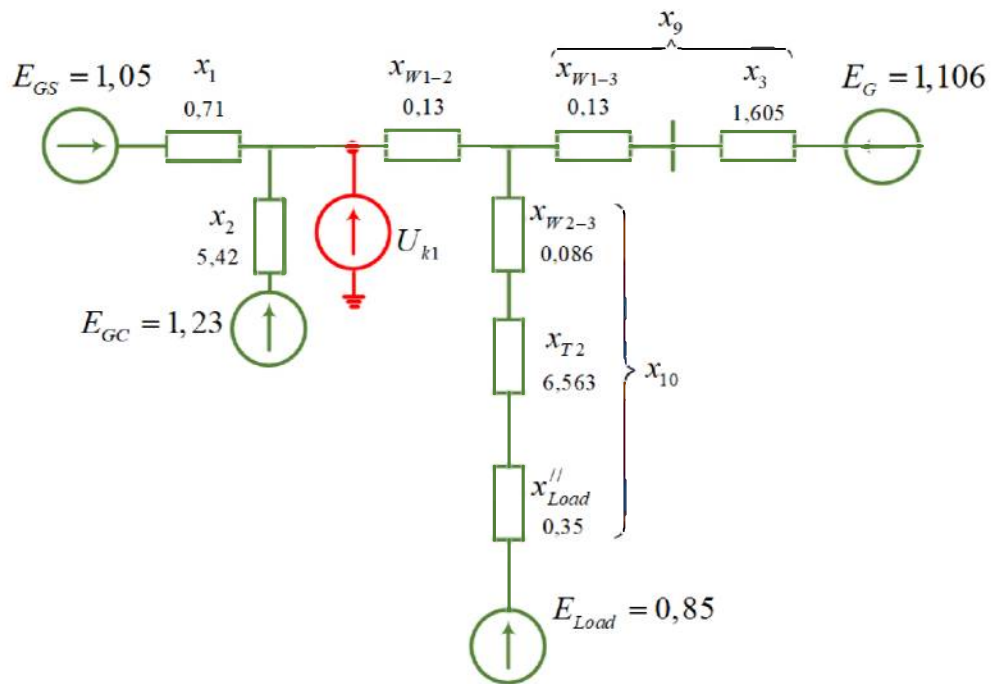


Рисунок 3.18 – Перший етап прямої послідовності схеми №1

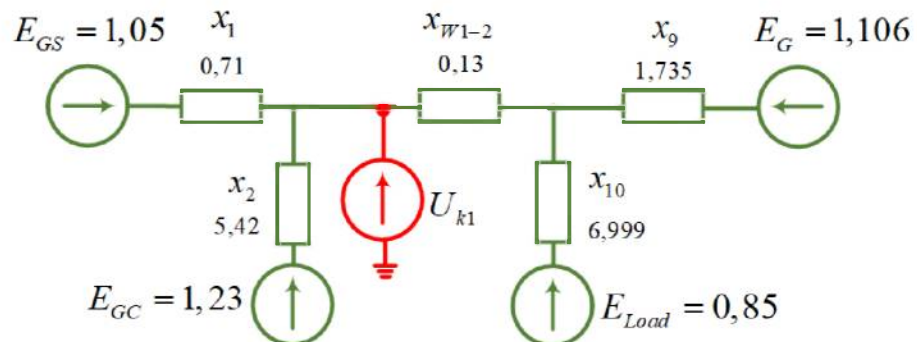


Рисунок 3.19 – Другий етап прямої послідовності схеми №1

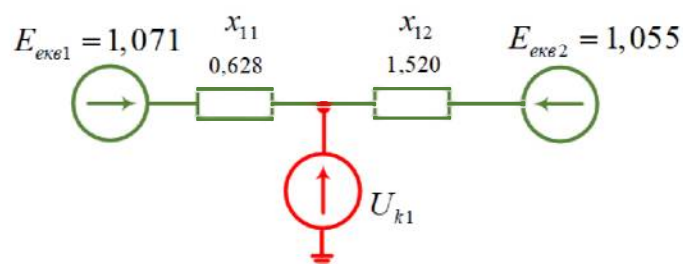


Рисунок 3.20 – Третій етап прямої послідовності схеми №1

Для схеми першої – схема оберненої послідовності – рис. 3.21.

Так само, етапи її перетворення:

перший (рис. 3.22)

$$x_{G3n} = x_2 \cdot \frac{S_{\delta} \cdot \cos \varphi_{HOM}}{P_{HOM}} = 0,22 \cdot \frac{1000 \cdot 0,85}{200} = 0,935 \text{ в.о.}$$

$$x_{13} = x_{T1} + x_G = 0,84 + 0,935 = 1,775 \text{ в.о.}$$

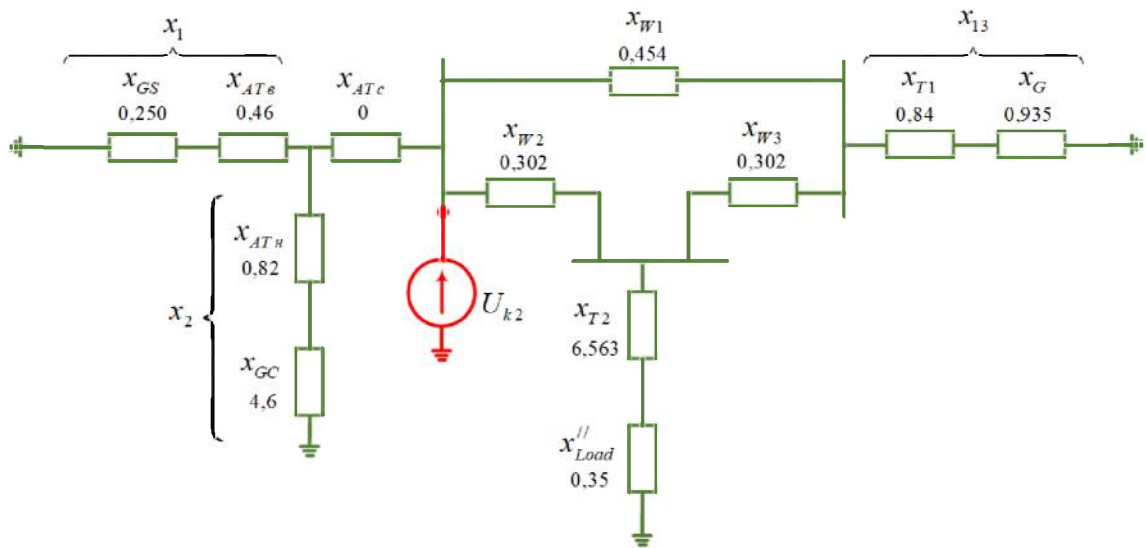


Рисунок 3.21 – Перша схема: обернена послідовність

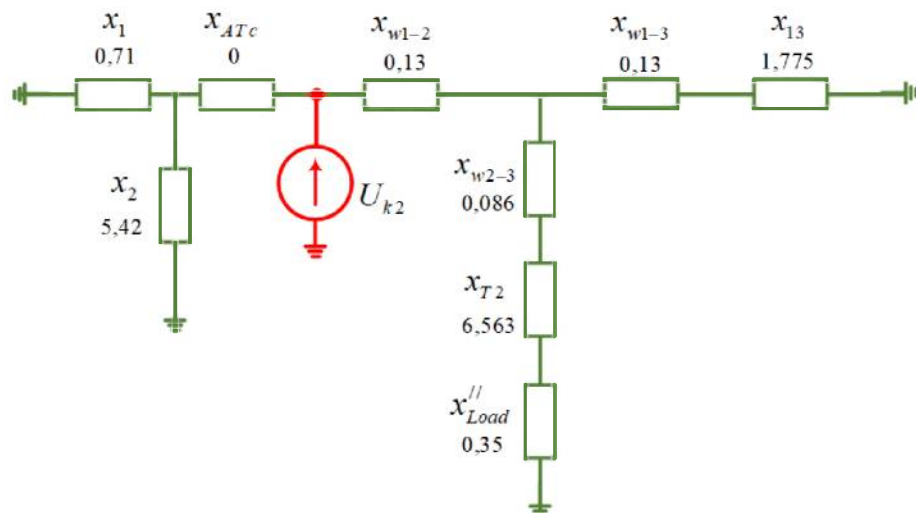


Рисунок 3.22 – Перший етап оберненої послідовності схеми №1

другий (рис. 3.23)

$$x_{10} = 6,999 \text{ в.о.}, \quad x_{11} = 0,628 \text{ в.о.},$$

третій (рис. 3.24)

$$x_{14} = x_{w1-2} + \frac{x_{10} \cdot (x_{w1-3} + x_{13})}{x_{10} + x_{w1-3} + x_{13}} = 0,13 + \frac{6,999 \cdot (0,13 + 1,775)}{6,999 + 0,13 + 1,735} = 1,627 \text{ в.о.}$$

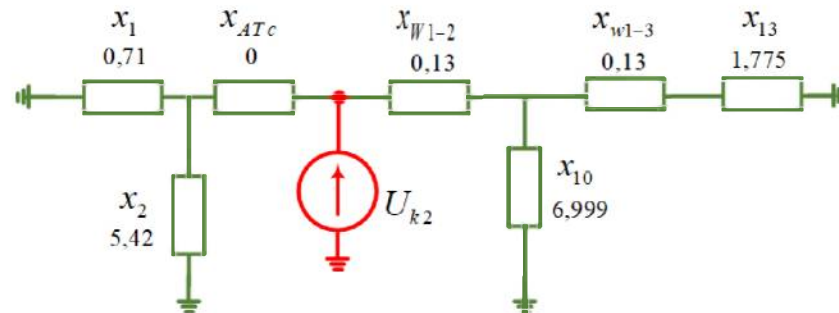


Рисунок 3.23 – Другий етап оберненої послідовності схеми №1

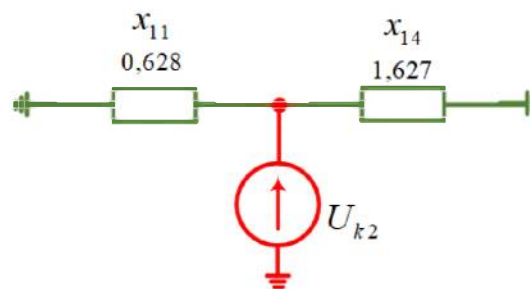


Рисунок 3.24 – Третій етап оберненої послідовності схеми №1

Для схеми першої – схема нульової послідовності – рис. 3.25.

$$x_{GS0} = 2 \cdot x_{GS} = 2 \cdot 0,25 = 0,5 \text{ в.о.}$$

Для одноколової ЛЕП зі стальним тросом

$$x_{w1_0} = 3,0 \cdot x_{w1} = 3,0 \cdot 0,454 = 1,362 \text{ в.о.}$$

$$x_{w2_0} = x_{w3_0} = 3,0 \cdot x_{w2} = 3,0 \cdot 0,302 = 0,906 \text{ в.о.}$$

Так само, етапи її перетворення:

перший, рис. 3.26:

$$x_{15} = x_{16} = \frac{x_{w1_0} \cdot x_{w2_0}}{x_{w1_0} + x_{w2_0} + x_{w3_0}} = \frac{1,362 \cdot 0,906}{1,362 + 0,906 + 0,906} = 0,389$$

$$x_{17} = \frac{x_{w2_0} \cdot x_{w3_0}}{x_{w1_0} + x_{w2_0} + x_{w3_0}} = \frac{0,906 \cdot 0,906}{1,362 + 0,906 + 0,906} = 0,259$$

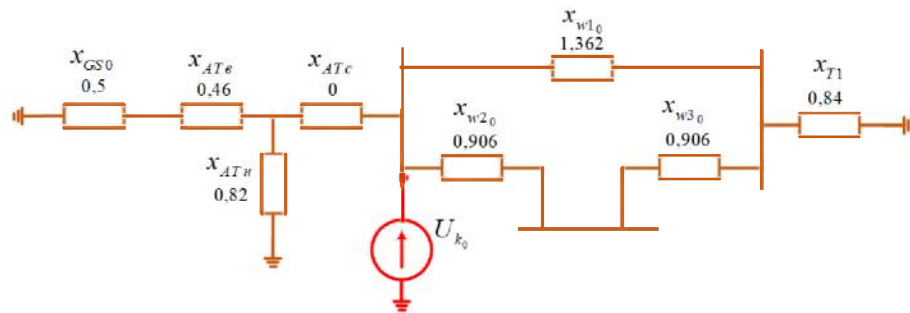


Рисунок 3.25 – Перша схема: нульова послідовність

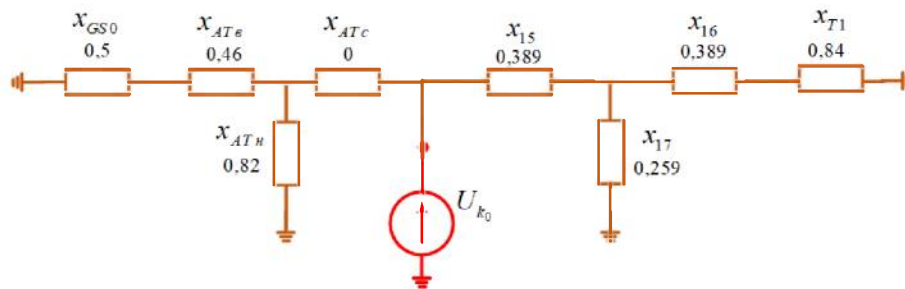


Рисунок 3.26 – Перший етап нульової послідовності схеми №1

другий, рис. 3.27:

$$x_{18} = x_{AT_c} + \frac{x_{AT_n} \cdot (x_{GS_0} + x_{AT_e})}{x_{AT_n} + x_{GS_0} + x_{AT_e}} = 0 + \frac{0,82 \cdot (0,5 + 0,46)}{0,82 + 0,5 + 0,46} = 0,442 \text{ в.о.}$$

$$x_{19} = x_{15} + \frac{x_{17} \cdot (x_{16} + x_{T1})}{x_{17} + x_{16} + x_{T1}} = 0,389 + \frac{0,259 \cdot (0,389 + 0,84)}{0,259 + 0,389 + 0,84} = 0,603$$

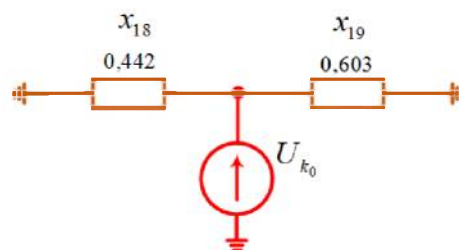


Рисунок 3.27 – Другий етап нульової послідовності схеми №1

А далі окремі схеми заміщення об'єднуються в комплексну схему (рис. 3.28) в залежності від типу несиметричного КЗ.

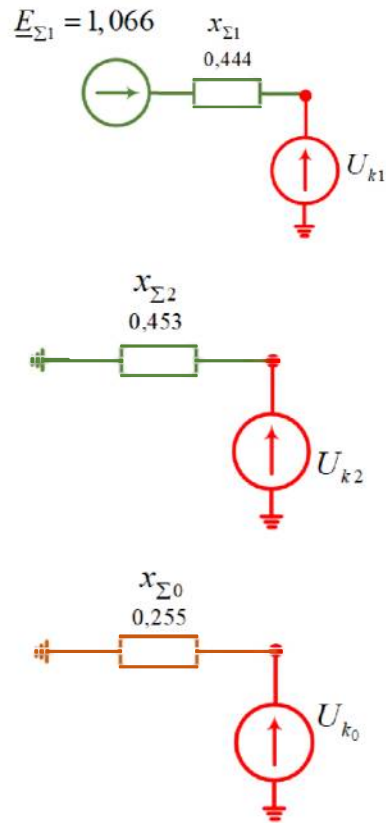


Рисунок 3.28 – Результати перетворення схем заміщення

Для однофазного КЗ:

$$x_{\Delta}^{(1)} = x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0} = 0,453 + 0,255 = 0,708$$

Струми окремих послідовностей:

$$\underline{I}_{ka1}^{(1)} = \frac{\underline{E}_{\Sigma 1}}{x_{\Sigma 1} + x_{\Delta}^{(1)}} = \frac{1,066}{0,444 + 0,708} = 0,925 \text{ в.о.}$$

$$\underline{I}_{ka2}^{(1)} = \underline{I}_{ka0}^{(1)} = \underline{I}_{ka1}^{(1)} = 0,925 \text{ в.о.}$$

Фазні струми:

$$\underline{I}_{ka}^{(1)} = m^{(1)} \cdot \underline{I}_{ka1}^{(1)} = 3 \cdot 0,925 = 2,775 \text{ в.о.}$$

$$\underline{I}_{kb}^{(1)} = 0 \quad \underline{I}_{kc}^{(1)} = 0$$

Напруги окремих послідовностей:

$$\underline{U}_{ka1}^{(1)} = j \underline{I}_{ka1}^{(1)} (x_{\Sigma 2} + x_{\Sigma 0}) = 0,925 \cdot (0,453 + 0,255) = 0,655 \text{ в.о.}$$

$$\underline{U}_{ka2}^{(1)} = -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 2} = -0,925 \cdot 0,453 = -0,419 \text{ в.о.}$$

$$\underline{U}_{ka0}^{(1)} = -j \underline{I}_{ka1}^{(1)} \cdot x_{\Sigma 0} = -0,925 \cdot 0,255 = -0,236 \text{ в.о.}$$

Фазні напруги:

$$\underline{U}_{ka}^{(1)} = 0$$

3.4 Висновок за третім розділом

У даному розділі визначенні режими симетричних і несиметричних КЗ схем електричної мережі різної конфігурації.

Для симетричного КЗ були виконані спрощення схеми заміщення до найпростішого вигляду, багатопроменевої зірки.

Для несиметричного КЗ показано визначення параметрів схем заміщення різних послідовностей, виконано їх перетворення. На основі отриманих даних визначенні складові струму та напруги різних послідовностей, та їх фазні значення.

Отримані дані використовуються для вибору та перевірки комутаційного обладнання мережі, яке в свою чергу, визначає надійність роботи електричної мережі.

РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Як відомо, умови праці – це так звана сукупність усіх факторів, які є необхідними для нормальної діяльності всіх працівників під час їх виконання робочих обов’язків.

Ці фактори характеризуються:

– по–перше, загальними показниками. До таких відносять конструктивні особливості виробничого устаткування; можливі особливості систем енергопостачання; зовнішні кліматичні умови та особливості розташування виробничого устаткування; наявність пристроїв для створення мікроклімату, освітлення, опалення тощо;

– по–друге, локальними показниками: рівень статичних і динамічних навантажень працівників; рівень напруженості праці; кількісні показники небезпечних і (або) шкідливих виробничих чинників (НШВЧ); санітарно гігієнічні умовами у виробничих приміщеннях та на робочих місцях тощо.

За своїм походженням та природою дії НШВЧ поділяють на п’ять груп: фізичні, хімічні, біологічні, психофізіологічні та соціальні.

До фізичних НШВЧ відносяться машини та механізми або їх елементи, а також вироби, матеріали, заготовки тощо, які рухаються або обертаються; конструкції, які руйнуються; системи, устаткування або елементи обладнання, які знаходяться під підвищеним тиском; підвищена запиленість та загазованість повітря; підвищена або понижена температура повітря, поверхонь приміщення, обладнання, матеріалів; підвищені рівні шуму, вібрації, ультразвуку, інфразвуку; підвищений або понижений барометричний тиск та його різкі коливання; підвищена та понижена вологість; підвищена швидкість руху та підвищена іонізація повітря; підвищений рівень іонізуючих випромінювань; підвищене значення напруги в електричній мережі; підвищені рівні статичної електрики, електромагнітних випромінювань; підвищена напруженість електричного,

магнітного полів; відсутність або нестача світла; недостатня освітленість робочої зони; підвищена яскравість світла; понижена контрастність; прямий та віддзеркалений блиск; підвищена пульсація світлового потоку; підвищені рівні ультрафіолетової та інфрачервоної радіації; гострі кромки, задирки, шершавість на поверхні заготовок, інструментів та обладнання; розташування робочого місця на значній висоті відносно землі (підлоги); слизька підлога; невагомість.

До хімічних НШВЧ відносяться хімічні речовини, які по характеру дії на організм людини поділяються на токсичні, задушливі, наркотичні, подразнюючі, сенсibiliзуючі, канцерогенні, мутагенні та такі, що впливають на репродуктивну функцію. Основні способи потрапляння НШВЧ в організм – інгаляційний (органи дихання), пероральний (шлунково-кишковий тракт) і резорбційний (шкіряні покриви та слизисті оболонки).

До біологічних НШВЧ відносяться патогенні мікроорганізми (бактерії, віруси, рикетсії, спірохети, грибки, найпростіші) та продукти їхньої життєдіяльності, а також макроорганізми (тварини та рослини).

До психофізіологічних НШВЧ відносяться фізичні (статичні та динамічні) перевантаження і нервово-психічні перевантаження (розумове перенапруження, перенапруження аналізаторів, монотонність праці, емоційні перевантаження).

Соціальні НШВЧ – це неякісна організація роботи, понаднормова робота, необхідність роботи в колективі з поганими відносинами між його членами, соціальна ізоляваність з відривом від сім'ї, зміна біоритмів, незадоволеність роботою, фізична та/або словесна образа та її ризик, насильство та його ризик.

На енергетичних об'єктах фіксують усі види НШВЧ.

Основними НШВЧ під час експлуатації електроустановок є електричний струм, напруга прямого і непрямого дотику, напруга кроку, електростатичні та електромагнітні поля промислової частоти, електрична дуга, яка утворюється під час комутації енергетичного устаткування.

Однією з вагомих причин, які викликають виробничий травматизм та професійну захворюваність, є аварії – небезпечні події техногенного характеру, що створюють на об'єкті, території або акваторії загрозу для життя і здоров'я людей і призводять до руйнування будівель, споруд, обладнання і транспортних засобів, порушення виробничого процесу чи завдають шкоди довкіллю. Аварії поділяються на дві категорії.

До I категорії належать аварії, внаслідок яких:

- загинуло 5 чи травмовано 10 і більше осіб;
- стався викид отруйних, радіоактивних та небезпечних речовин за межі санітарно-захисної зони підприємства;
- збільшилася концентрація забруднюючих речовин у навколишньому природному середовищі більш як у 10 разів;
- зруйновано будівлі, споруди чи основні конструкції об'єкта, що створило загрозу для життя і здоров'я значної кількості працівників підприємства чи населення.

До II категорії належать аварії, внаслідок яких:

- загинуло до 5 чи травмовано від 4 до 10 осіб;
- зруйновано будівлі, споруди чи основні конструкції об'єкта, що створило загрозу для життя і здоров'я працівників цеху, ділянки з чисельністю працюючих 100 чоловік і більше.

Випадки порушення технологічних процесів, роботи устаткування, тимчасової зупинки виробництва внаслідок спрацювання автоматичних захисних блокувань та інші локальні порушення у роботі цехів, діляниць і окремих об'єктів, падіння опор та обрив проводів ліній електропередачі тощо не належать до аварій, що мають категорію.

Як правило до аварій на промислових об'єктах призводять відмови (неполадки) – події, що полягають у порушенні робочого стану обладнання (об'єкту). До однієї й тієї ж аварії або аварійної ситуації можуть привести різні види відмов, а одна й та ж відмова може привести до різних аварійних ситуацій (аварій). Переважна кількість аварійних ситуацій на промислових

об'єктах України виникає в результаті порушення технологічного процесу, порушення трудової та виробничої дисципліни, незадовільної організації виконання робіт.

Промислові об'єкти, на яких використовуються, виготовляються, переробляються, зберігаються або транспортуються одна або кілька небезпечних речовин чи категорій речовин у кількості, що дорівнює або перевищує нормативно встановлені порогові маси, а також інші об'єкти, що є реальною загрозою виникнення надзвичайної ситуації техногенного та природного характеру, називаються об'єктами підвищеної небезпеки.

У зв'язку з використанням все більших енергетичних потужностей та зростанням концентрації енергії на невеликих ділянках, різко зростає ступінь небезпеки аварій як для довкілля, так і для людей, що мешкають поблизу об'єктів підвищеної небезпеки, а особливо для працюючих на них. До того ж останнім часом відмічено значне зростання надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних з аваріями на промислових об'єктах. Наслідком цього є зростання кількості працівників, що травмується і гине в аварійних ситуаціях. За 1996 – 1999 рр. кількість потерпілих в аваріях в Україні зросло з 1 до 1,5%, загиблих – з 11,7 до 17,9%. Значна кількість, а саме, 30,6% аварій закінчується летальними наслідками.

В даній роботі розглядається надійність елементів ЕЕС, що є важливим з позиції техніки безпеки.

Крім надійності електрообладнання, яка закладена на стадії його проектування й виготовлення, необхідно досліджувати надійність електрообладнання, яка проявляється під час експлуатації. Процес експлуатації включає такі елементи: саме електрообладнання, організацію його експлуатації та організацію обслуговування й ремонту.

Розрізняють розрахункову й експлуатаційну надійність енергосистеми та її елементів. Перша характеризує очікувану надійність електроустановок або енергосистеми в цілому, розраховану з використанням статистичних даних показників експлуатації обладнання енергосистеми. Методично

розрахункова надійність може бути поділена на апаратну й схемну. Друга (експлуатаційна надійність) характеризує надійність роботи конкретного обладнання (елемента) енергосистеми, яке реально експлуатується, або надійність системи електропостачання в цілому.

Між розрахунковою та експлуатаційною надійністю є принципова різниця. При проектуванні та розвитку системи тягового електропостачання використовується розрахункова надійність електрообладнання, а при оцінці господарської діяльності експлуатованої електросистеми, з метою розробки заходів щодо поліпшення її роботи, проводиться розрахунок експлуатаційної надійності електроустановок.

Експлуатація здійснює вирішальний вплив на надійність об'єктів, яка забезпечується шляхом:

- дотримання умов і режимів експлуатації (мастило, навантажувальні режими, температурні режими й ін.);
- проведення періодичних технічних обслуговувань з метою виявлення й усунення виникаючих порушень та підтримки об'єкта в працездатному стані;
- систематична діагностика стану об'єкта, виявлення відмов та запобігання їм, зниження шкідливих наслідків відмов тощо;
- проведення профілактичних відновних ремонтів.

Основною причиною зниження надійності в процесі експлуатації є знос і старіння компонентів об'єкта. Знос призводить до зміни параметрів об'єкта, порушення працездатності, поломки, зниження міцності й т.д. Старіння спричиняє зміну фізико-механічних властивостей матеріалів, що викликає несправності або відмови.

У період приробітку надійність, у першу чергу, визначається конструктивно-технологічними факторами, що веде до підвищеної інтенсивності відмов. У міру виявлення та усунення цих факторів надійність об'єкта досягає номінального рівня, який зберігається в тривалому періоді ТН нормальної експлуатації обладнання. Протягом експлуатації в об'єкті накопичуються прояви зносу і втоми, інтенсивність яких зростає зі

збільшенням терміну експлуатації об'єкта. Настає період інтенсивного зносу об'єкта, який закінчується його переходом у граничний стан та зняттям з експлуатації. Досвід експлуатації показує, що надійність роботи електрообладнання залежить від численних і різноманітних факторів, які умовно можуть бути розділені на чотири групи: конструктивні, виробничі, монтажні, експлуатаційні.

Конструктивні фактори зумовлені застосуванням у пристроях елементів з низькою надійністю; недоліками схемних і конструктивних рішень, прийнятих під час проектування; застосуванням комплектуючих елементів, що не відповідають умовам навколишнього середовища, тощо.

Виробничі фактори зумовлені порушеннями технологічних процесів та слабким контролем якості виготовлення, забрудненням навколишнього середовища, робочих місць і пристроїв, слабким контролем якості виготовлення та ін.

Монтажні фактори. У процесі монтажу електротехнічних пристроїв їх надійність може бути знижена в разі недотримання вимог технології і порядку виконання робіт та безпосередньо монтажу.

Експлуатаційні фактори. Умови експлуатації мають найбільший вплив на надійність електротехнічних пристроїв. Перевантаження елементів електрообладнання, струми коротких замикань, різні види перенапружень (дугові, комутаційні, резонансні й т. д.), температура, вологість, корозійні рідини й гази, електричні й магнітні поля, удари, вібрація, сонячна радіація, пісок, пил, цвіль – усе це впливає на роботу пристроїв. Різні умови експлуатації неоднаково можуть позначатися на терміні служби й надійності роботи електрообладнання ТП.

Перевантаження призводять до підвищення температури нагрівання ізоляції електротехнічних пристроїв вище допустимої і різкого зниження терміну її служби. Електричні й механічні перевантаження відбуваються в результаті несправності механізмів електроустановок, значних змін частоти або напруги мережі живлення, загустіння мастила механізмів у холодну

погоду, перевищення номінальної розрахункової температури навколишнього середовища в окремі періоди року і дня тощо.

Високі температури також викликають механічні та електричні пошкодження елементів електротехнічних пристроїв, прискорюючи їх знос і старіння. Вплив підвищеної температури на надійність роботи електротехнічних пристроїв проявляється в найрізноманітніших формах: утворюються тріщини в ізоляційних матеріалах, зменшується опір ізоляції, а значить, збільшується небезпека електричних пробоїв, порушується герметичність (починають витікати заливні й просочувальні компаунди). У результаті порушення ізоляції в обмотках трансформаторів, електромагнітів і електродвигунів виникають пошкодження. Так само підвищена температура дуже впливає на роботу механічних елементів електротехнічних пристроїв.

Під дією вологи відбувається дуже швидка корозія металевих деталей електротехнічних пристроїв, зменшується поверхневий і об'ємний опір ізоляційних матеріалів, з'являються різні витіки, різко збільшується небезпека поверхневих пробоїв, утворюється грибова цвіль, під впливом якої поверхня матеріалів роз'їдається й електричні властивості пристроїв погіршуються.

Ударно-вібраційні навантаження значно знижують надійність електротехнічних пристроїв. Вплив ударно-вібраційних навантажень у деяких випадках може бути значнішим впливу інших механічних, а також електричних і теплових навантажень. У результаті тривалого знакозмінного впливу навіть невеликих ударно-вібраційних навантажень відбувається накопичення втоми в елементах, що призводить до раптових відмов. Під впливом вібрацій і ударів виникають численні механічні пошкодження елементів конструкції, послаблюються їх кріплення й порушуються контакти електричних з'єднань.

Навантаження при циклічних режимах роботи, пов'язаних з частими увімкненням й вимиканням електротехнічного пристрою, так само як і ударновібраційні навантаження, сприяють виникненню й розвитку ознак

втомі елементів. Фізична природа підвищення небезпеки відмов пристроїв при їх увімкненні й вимкненні полягає в тому, що під час перехідних процесів у їхніх елементах виникають надструми і перенапруги, значення яких часто набагато перевищують (хоча й короткочасно) значення, регламентовані технічними умовами.

Пил, потрапляючи в мастило, осідає на частинах і механізмах електротехнічних пристроїв і викликає швидкий знос частин, що труться, і забруднення ізоляції. Тому при великій запиленості особливого значення набуває якість ущільнень елементів електричних пристроїв і догляд за ними.

Якість експлуатації електротехнічних пристроїв також залежить від ступеня наукової обґрунтованості застосовуваних методів експлуатації та кваліфікації обслуговуючого персоналу (знання матеріальної частини, теорії та практики надійності, вміння швидко знаходити й усувати несправності тощо). Застосування профілактичних заходів (регламентні роботи, огляди, випробування), ремонту, використання досвіду експлуатації електротехнічних пристроїв забезпечують їх більш високу експлуатаційну надійність.

Враховуючи вищевикладене, відзначимо основні шляхи підвищення надійності ТП:

- подальше вивчення й удосконалення умов експлуатації та підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання, визначення характеру, причин і законів розподілу відмов;
- вдосконалення та розробка нових методів розрахункової оцінки надійності електроустаткування, а також оцінки надійності шляхом випробування на надійність;
- розробка і вдосконалення методів розрахункової і експериментальної оцінки надійності при зберіганні й транспортуванні;
- налагодження й правильна експлуатація систем захисту електрообладнання, передбачених під час проектування;

- покращення теплового стану електрообладнання шляхом переходу на більш високий клас нагрівостійкості ізоляції, вирівнювання температури окремих частин обладнання за рахунок вибору навантажень, розробки сучасних систем охолодження, застосування захисту від перевантажень тощо;

- розробка і впровадження заходів щодо зниження вібрацій як електроустаткування, так і електромеханічної системи ТП у цілому;

- підвищення якості комплектуючих виробів і матеріалів, у тому числі: застосування їх найвищих класів, використання просочувальних лаків, спеціальних проводів з міцною та еластичною ізоляцією, зменшення жорсткості обмотувальних проводів, застосування високоякісної міканітової ізоляції (міканітова ізоляція струмовідводів настільки надійна, що їх огляди можуть здійснюватися через дуже великі проміжки часу) тощо;

- розробка методів визначення економічно оптимальних показників надійності.

Підвищення експлуатаційної надійності електрообладнання пов'язане з матеріальними витратами, тому ця проблема повинна вирішуватися на базі техніко-економічних розрахунків. Для кожного типу силового електрообладнання ТП можуть бути розроблені економічно-обґрунтовані оптимальні показники надійності з урахуванням умов застосування, фізичного та морального зносу, витрат на технічне обслуговування і ремонт.

ВИСНОВКИ

В роботі розглядалися питання надійності роботи елементів електроенергетичної системи.

У першому розділі розглянуті поняття надійності роботи електроенергетичної мережі. Приведені основні властивості надійності, якими характеризуються елементи електроенергетичної системи.

Визначенні поняття таких властивостей елементів ЕЕС, як безвідмовність, довговічність, ремонтпридатність, стійкість, керованість, живучість і безпека.

Крім того, у розділі проаналізовані причини виникнення ушкоджень повітряних ЛЕП, кабельних ЛЕП, силових трансформаторів, комутаційної апаратури (вимикачів, роз'єднувачів, відокремлювачів, короткозамикачів).

У другому розділі розглянутий математичний апарат для дослідження несиметричних перехідних процесів в електричних мережах. Приведені основні характеристики різних елементів електричної мережі для різних послідовностей. Визначені співвідношення між струмами та напругами окремих послідовностей.

У третьому розділі визначенні режими симетричних і несиметричних КЗ схем електричної мережі різної конфігурації. Для симетричного КЗ були виконані спрощення схеми заміщення до найпростішого вигляду, багатопроменевої зірки. Для несиметричного КЗ показано визначення параметрів схем заміщення різних послідовностей, виконано їх перетворення. На основі отриманих даних визначенні складові струму та напруги різних послідовностей, та їх фазні значення.

Отримані дані використовуються для вибору та перевірки комутаційного обладнання мережі, яке в свою чергу, визначає надійність роботи електричної мережі.

У четвертому розділі розглянуті питання охорони праці.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Гук Ю. Б. Теория надежности в электроэнергетике / Ю. Б. Гук. – Л: Энергоатомиздат, 1990. – 234 с.
2. Журахівський А. В. Надійність електричних систем і мереж / А. В. Журахівський, Б. М. Кінаш, О. Р. Пастух. – Львів: Вид. Львівської політехніки, 2012. – 280 с.
3. Reliability evaluation method considering demand response (DR) of household electrical equipment in distribution networks / [H. Chen, J. Tang, L. Sun and other]. // Advances in Theoretical and Computational Energy Optimization Processes. – 2019. – P. 799–817. – <https://doi.org/10.3390/pr7110799>
4. Pinson P. Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review / P. Pinson, H. Madsen. // Renew Sustain Energy Rev.. – 2014. – v. 39. – P. 686–699.
5. Kolisnyk I. On the reliability of electric power supply of electrical receiver in the electric networks / I. Kolisnyk, D. Oliynyk, A. Ponomarenko // Electrical and Electronic Engineering. – 2014. – v. 2. – P. 1 to 7. - <https://doi.org/10.21833/aeee.2019.04.001>
6. Kolisnyk I. On the reliability of electric power supply of electrical receiver in the electric networks / I. Kolisnyk, D. Oliynyk, A. Ponomarenko // Electrical and Electronic Engineering. – 2014. – v. 2. – P. 1-7. - <https://doi.org/10.21833/aeee.2019.04.001>
7. Ardabili H. A. R. A probabilistic reliability-centred maintenance approach for electrical distribution networks / H. A. R. Ardabili, M.-R. Haghifam, S. M. Abedi // IET Generation, Transmission & Distribution. – 2021. – v. 15, Issue 6. – P. 1070-1080. - <https://doi.org/10.1049/gtd2.12081>
8. Reffas O. Reactive energy compensator effect on the reliability of a complex electrical system using Bayesian networks / [O. Reffas, Y. Sahraoui, M. Nahal and other] // Eksploatacja i Niezawodnosc - Maintenance and Reliability. – 2020. – v. 22, Issue 4. – P. 684-693. - <https://doi.org/10.17531/ein.2020.4.12>
9. Ait Mokhtar E Bayesian approach for the reliability assessment of corroded interdependent pipe networks / Ait Mokhtar E, Chateaneuf A, Laggoune R. // International Journal of Pressure Vessels and Piping – 2016 – v. 14, Issue 14. – P. 46-58. - <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2016.11.002>
10. Ditlevsen O. Structural reliability methods / O. Ditlevsen, HO. Madsen – New York: Wiley, 1992. – 373 p.