

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ:

методичні рекомендації

для виконання практичних робіт здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти ОПП «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності G3 «Електрична інженерія» денної форми здобуття вищої освіти

УДК 621.3.011:537.8

П27

Рекомендовано до друку методичною радою Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 18.04.2025, протокол № 8.

Укладачі:

- Дмитро Кошкін – канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.
- Віталій Мардзявко – асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

- Олексій Садовий – канд. техн. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.
- Андрій Ставинський – д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний
аграрний університет, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
ПРАКТИЧНА РОБОТА №1. Електромагнітні перехідні процеси. Застосування наближеного зведення для розрахунку опорів схем заміщення.....	6
ПРАКТИЧНА РОБОТА №2. Складання елементів заміщення електроенергетичної системи.....	18
ПРАКТИЧНА РОБОТА №3. Розрахунок струмів короткого замикання в електричних мережах напругою до 1000 В.....	30
ПРАКТИЧНА РОБОТА №4. Розрахунок струмів короткого замикання в електричних мережах напругою понад 1000 В.....	43
ПРАКТИЧНА РОБОТА №5. Аналіз трифазного короткого замикання за допомогою MS Excel.....	63
ПРАКТИЧНА РОБОТА №6. Аналіз перехідних процесів в електричних ланцюгах з використанням Mathcad.....	75
ПРАКТИЧНА РОБОТА №7. Розрахунок перехідних процесів при порушенні симетрії у трифазній мережі.....	88
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	101
ДОДАТОК.....	102

ВСТУП

Перехідні процеси в системах електропередач є одним із ключових аспектів аналізу та проєктування сучасних електроенергетичних систем. Вони виникають під час комутаційних перемикань, коротких замикань, аварійних ситуацій та змін режимів роботи мережі. Глибоке розуміння механізмів розвитку перехідних процесів дозволяє підвищити надійність роботи електромереж, оптимізувати режими роботи обладнання та забезпечити ефективний захист енергосистем.

Дисципліна «Перехідні процеси в системах електропередач» спрямована на вивчення основних фізичних принципів, математичних методів та алгоритмів аналізу перехідних процесів у мережах змінного та постійного струму. Основними задачами є моделювання електромагнітних та електромеханічних перехідних процесів, визначення параметрів струмів і напруг у перехідних режимах, оцінка впливу цих процесів на роботу обладнання та вибір ефективних засобів їх компенсації.

Запропоновані методичні рекомендації містять теоретичні основи, алгоритми виконання розрахунків та практичні завдання, що дозволяють засвоїти методи аналізу перехідних процесів за допомогою аналітичних та чисельних методів. Розглядаються такі підходи, як класичні диференціальні рівняння, операторний метод (перетворення Лапласа), метод симетричних складових, а також застосування сучасних програмних засобів, таких як Mathcad, MATLAB, Simulink, Excel.

Практичні роботи допоможуть студентам закріпити отримані теоретичні знання, навчитися будувати математичні моделі перехідних процесів, аналізувати результати розрахунків та застосовувати їх у реальних електроенергетичних системах. Виконання завдань сприятиме розвитку аналітичного мислення, навичок інженерного аналізу та моделювання складних електротехнічних процесів.

Методичні рекомендації призначені для студентів електротехнічних спеціальностей, що вивчають дисципліну «Перехідні процеси в системах електропередач», а також можуть бути корисними для викладачів, інженерів-електроенергетиків та фахівців, які займаються дослідженням і проектуванням електроенергетичних мереж та систем релейного захисту.

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

Тема: Електромагнітні перехідні процеси. Застосування наближеного зведення для розрахунку опорів схем заміщення

Мета: навчитися визначати показники елементів та опори схеми заміщення при трифазному КЗ.

1. Теоретичні відомості

Електромагнітні перехідні процеси в електроенергетичних системах виникають при різких змінах режиму роботи мережі, зокрема при короткому замиканні (КЗ). Для оцінки та аналізу цих процесів використовують схеми заміщення, що дозволяють моделювати поведінку електричних елементів у мережі.

При короткому замиканні струм різко зростає, що може призвести до термічних і електродинамічних пошкоджень обладнання. Для оцінки впливу КЗ виконують розрахунок струмів у різних умовах – у іменованих та відносних одиницях.

Короткі замикання поділяються на:

- однофазні – між фазою та землею;
- двофазні – між двома фазами;
- двофазні на землю – між двома фазами та землею;
- трифазні – одночасне замикання всіх трьох фаз.

Трифазне коротке замикання найбільш небезпечне, оскільки призводить до максимального струму КЗ, який визначає необхідність вибору апаратури та заходів захисту.

Для аналізу електричної мережі під час КЗ складається схема заміщення, що містить:

- джерело напруги – модель генераторів і трансформаторів;
- лінію електропередачі – з урахуванням її активного та реактивного опору;

- опір системи – загальний опір мережі від генератора до точки КЗ;
- точку КЗ – місце, де відбувається замикання.

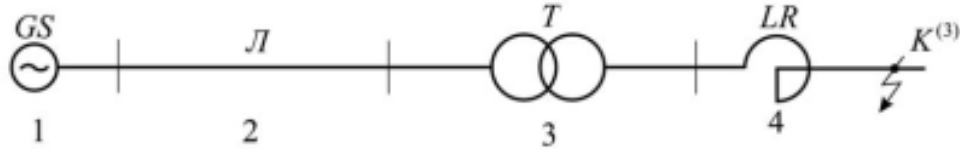


Рис. 1 – Схема електричної мережі при трифазному КЗ

Перехідні процеси при КЗ складається з періодичної та аперіодичної складових:

$$I_{\kappa\text{З}}(t) = I_{\text{пер}}(t) + I_{\text{апер}}(t), \quad (1)$$

Періодична складова - змінна складова, що коливається за синусоїдальним законом.

Аперіодична складова - експоненційно затухаючий струм, викликаний зміною магнітних потоків.

Аперіодична складова визначається рівнянням:

$$I_{\text{апер}}(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (2)$$

Повний струм КЗ у перехідному процесі виглядає як сума синусоїдальної та експоненційно затухаючої функції.

Періодична складова струму КЗ визначається рівнянням:

$$I_{\text{пер}}(t) = I_{\kappa\text{З}} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (3)$$

У практичній роботі необхідно розрахувати такі параметри:

-фазну напругу:

$$U_{\text{фаз}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad (4)$$

-індуктивний опір лінії:

$$X_L = x_0 \cdot L, \quad (5)$$

-загальний опір кола КЗ:

$$Z_{\text{заг}} = X_L + x_p, \quad (6)$$

- струм КЗ:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{заг}}}, \quad (7)$$

Для приведення розрахунків до відносних одиниць необхідно визначити базисні величини:

- базисний опір:

$$Z_{\text{б}} = \frac{U_{\phi}^2}{S_{\text{б}}}, \quad (8)$$

- відносний опір:

$$X_{\text{від}} = \frac{Z_{\text{заг}}}{Z_{\text{б}}}, \quad (9)$$

Таке зведення дозволяє спрощено порівнювати параметри в різних електричних мережах.

2. Завдання

Для електричної мережі (рис. 1) за вихідними даними які вказані в таблиці 1 скласти схему заміщення при трифазному КЗ у точці K та визначити її показники точним і наближеним способами зведення в іменованих та відносних одиницях виміру. А також визначити перехідні електромагнітні процеси при короткому замиканні.

3. Приклад виконання завдання

1. Складаємо схему заміщення при трифазному КЗ (рис. 2).

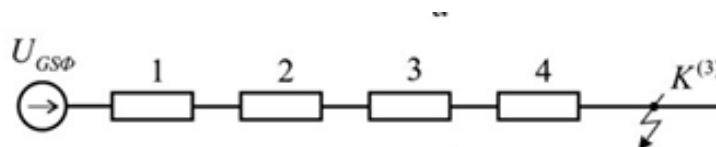


Рис. 2. – Схема заміщення вказаної електричної мережі

1. Розрахунки в іменованих та відносних одиницях опорів схеми заміщення.

1.1. Визначення фазної напруги.

Фазна напруга визначається за формулою:

$$U_{\text{фаз}} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}, \quad (10)$$

де лінійна напруга $U_{\text{GS}} = 150$ кВ;

Розрахунок:

$$U_{\text{фаз}} = \frac{150}{\sqrt{3}} = 86,6 \text{ кВ}, \quad (11)$$

1.2. Обчислення індуктивного опору лінії.

Повний індуктивний опір визначається за формулою:

$$X_L = x_0 \cdot L, \quad (12)$$

де довжина лінії $L = 30$ км; індуктивний опір на 1 км $x_0 = 0.43$ Ом/км;

Розрахунок:

$$X_L = 0,43 \cdot 30 = 12,9 \text{ Ом},$$

1.3. Визначення загального опору кола КЗ визначаємо за формулою:

$$X_{\text{total}} = X_L + x_p, \quad (13)$$

де опір $x_p = 0,108$ Ом.

Розрахунок:

$$X_{\text{total}} = 12,9 + 0,108 = 13,1 \text{ Ом},$$

1.4. Перехід до відносних одиниць.

Для аналізу КЗ параметри зводяться до базисних умов.

Базисна потужність $S_b = 100$ МВА;

Базисна напруга $U_b = 160$ кВ;

Обчислення базисного опору, який визначається за формулою:

$$Z_b = \frac{U_b^2}{S_b}, \quad (14)$$

Розрахунок:

$$Z_b = \frac{160^2}{100} = 256 \text{ Ом},$$

1.5. Розрахунок відносного опору.

Відносний опір визначається за формулою:

$$X_{\text{від}} = \frac{X_{\text{total}}}{Z_b}, \quad (15)$$

Розрахунок:

$$X_{\text{від}} = \frac{13,1}{256} = 0,0508,$$

Це означає, що опір лінії в відносних одиницях становить приблизно 5,08% від базисного значення.

2. Розрахунок струму короткого замикання (КЗ) для першого варіанту.

2.1. Струм КЗ визначається за законом Ома:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\phi}}{X_{\text{total}}}, \quad (16)$$

де $U_{\text{фазна}} = 86,6 \text{ кВ}$ - фазна напруга (розрахована раніше), $X_{\text{total}} = 13,008 \text{ Ом}$ - сумарний індуктивний опір кола (розрахований раніше).

Виконаємо розрахунок.

Струм короткого замикання для першого варіанту:

$$I_{\text{кз}} \approx 6658 \text{ А},$$

Цей струм показує, яку величину струму буде протікати через точку КЗ за умови, що опір системи розрахований правильно.

3. Перехідні електромагнітні процеси при короткому замиканні.

Коли відбувається коротке замикання (КЗ), у мережі виникає перехідний процес, який характеризується зміною струму КЗ у часі. Він включає аперіодичну (постійну) та періодичну (змінну) складові.

3.1. Загальне рівняння струму КЗ.

Струм КЗ можна представити у вигляді суми двох складових:

$$i_{\text{кз}}(t) = I_{\text{пер}}(t) + I_{\text{анер}}(t), \quad (17)$$

де $I_{\text{пер}}(t)$ - періодична (змінна) складова струму; $I_{\text{апер}}(t)$ - аперіодична (постійна) складова струму.

3.2. Періодична складова струму КЗ.

Змінна складова струму КЗ визначається за законом синусоїдного струму:

$$I_{\text{пер}}(t) = I_{\text{кз}} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (18)$$

де $\omega = 2\pi f$ - кругова частота мережі (для 50 Гц, $\omega = 314$ рад/с), φ - початкова фаза (якщо замикання відбулося у момент нульового перетину напруги, то $\varphi = 0$). t - час у секундах, обчислення для $t = 0,5$ мс, 10 мс і 20 мс (період змінного струму $T = 20$ мс).

Розрахунок:

Вибір часових точок. Для спрощення виконаємо розрахунки для: $t = 0$ мс; $t = 5$ мс (чверть періоду змінного струму); $t = 10$ мс (половина періоду); $t = 20$ мс (повний період).

Період змінного струму:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \text{ мс},$$

Таблиця 1. – Розрахунок значень струму періодичної складової

Час t , мс	$\sin(\omega t)$	$I_{\text{пер}}(t)$, А
0	$\sin(0) = 0$	000
5	$\sin(\pi/2) = 1$	6658
10	$\sin(\pi) = 0$	0
15	$\sin(3\pi/2) = -1$	-6658
20	$\sin(2\pi) = 0$	0

Періодична складова струму змінюється за синусоїдальним законом (рис. 3). Через кожні 10 мс струм проходить через нуль, а через 5 мс досягає максимального значення. Якщо коротке замикання відбулося в момент нульового перетину синусоїди (при $t = 0$), то $I_{\text{пер}(0)} = 0$.

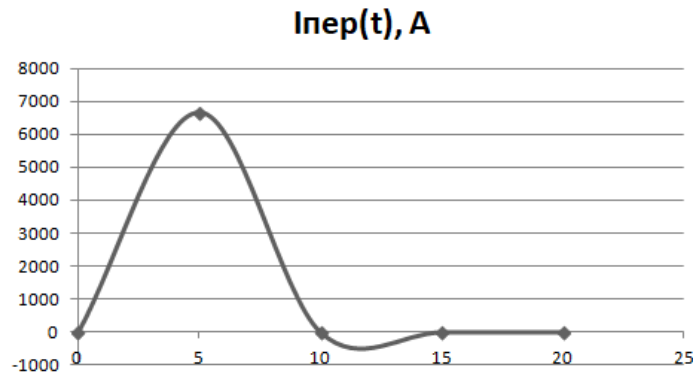


Рис. 3.

3.4. Аперіодична складова струму КЗ.

Ця складова викликана перехідними процесами у колі та визначається за експоненціальним законом:

$$I_{анер}(t) = I_0 e^{\frac{-t}{\tau}}, \quad (19)$$

де $I_0 = I_{КЗ} = 6658$ А - початкове значення струму (в момент КЗ), τ - електромагнітна стала часу.

Часова стала τ :

$$\tau = \frac{L_{екв}}{R}, \quad (20)$$

$L_{екв}$ можемо знайти за формулою:

$$X = \omega \cdot L \rightarrow L = \frac{X}{\omega}$$

Звідси, еквівалентна індуктивність визначається:

$$L_{екв} = \frac{X_{total}}{\omega}, \quad (21)$$

Розрахунок:

Знайдемо еквівалентну індуктивність:

$$L = \frac{13.008}{314.16} \approx 0.0414 \text{ Гн}$$

Знайдемо сталу часу τ :

Припустимо активний опір $R=0.1$ Ом:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.0414}{0.1} = 0.414 \text{ с}$$

Знайдемо значення аперіодичної складової в різні моменти часу за:

$$I_{\text{анер}}(t) = I_0 e^{-t/\tau}, \quad (22)$$

Таблиця 2. – Розрахунок значень струму аперіодичної складової

Час t, мс	$e^{-t/\tau}$	$I_{\text{анер}}(t), \text{ А}$
0	1.000	6658
5	$e^{-0.005/0.414} \approx 0.988$	6579
10	$e^{-0.01/0.414} \approx 0.976$	6499
20	$e^{-0.02/0.414} \approx 0.953$	6349
50	$e^{-0.05/0.414} \approx 0.886$	5899
100	$e^{-0.1/0.414} \approx 0.789$	5253

У перший момент $t = 0$, аперіодична складова дорівнює $I_0 = 6658 \text{ А}$, вона затухає з часом, приблизно на 2% за перші 10 мс., через 100 мс струм зменшується майже на 20%. Через 5-10 періодів струм аперіодичної складової майже зникає.

Крива аперіодичної складової виглядає як експоненційне затухання, тобто струм зменшується швидко на початку і повільніше з часом (рис. 4).

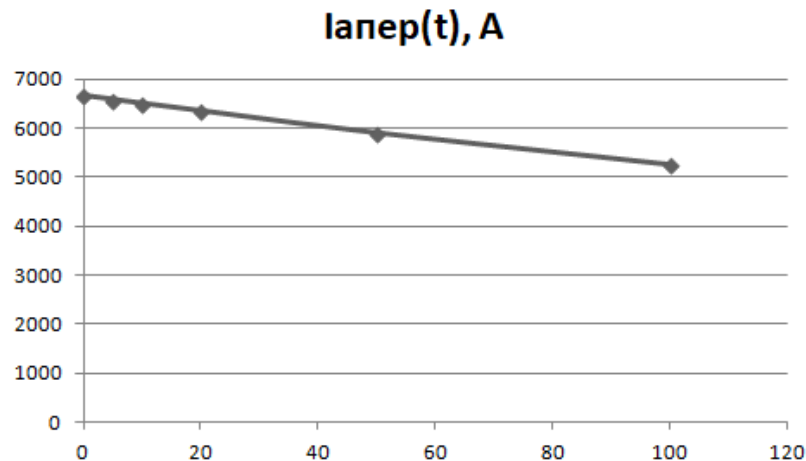


Рис. 4.

3.5. Повний струм КЗ у перехідному процесі.

Повний струм у момент короткого замикання:

$$I_{\text{кз}}(t) = I_{\text{пер}}(t) + I_{\text{апер}}(t), \quad (23)$$

У перший момент після КЗ аперіодична складова може значно перевищувати періодичну, що призводить до кидка струму.

Обчислення для кожного моменту часу:

Таблиця 3. – Розрахунок значень повного струму у момент короткого замикання

Час t, мс	$I_{\text{пер}}(t), (\text{A})$	$I_{\text{апер}}(t), (\text{A})$	$I_{\text{кз}}(t), (\text{A})$
0	0	6658	6658
5	6658	6579	13237
10	0	6499	6499
15	-6658	6349	-309
20	0	6349	6349

На початку ($t=0$) повний струм КЗ дорівнює тільки аперіодичній складовій (6658 А). Через 5 мс струм збільшується до 13237 А, оскільки додається періодична складова. Через 10 мс струм повертається до 6499 А, оскільки періодична складова проходить через нуль. Через 15 мс струм може навіть стати від'ємним (309 А), бо аперіодична складова ще не затухла повністю. Через 5-10 періодів (100-200 мс) аперіодична складова майже зникає, і струм стає чисто синусоїдальним, див. рис. 5.

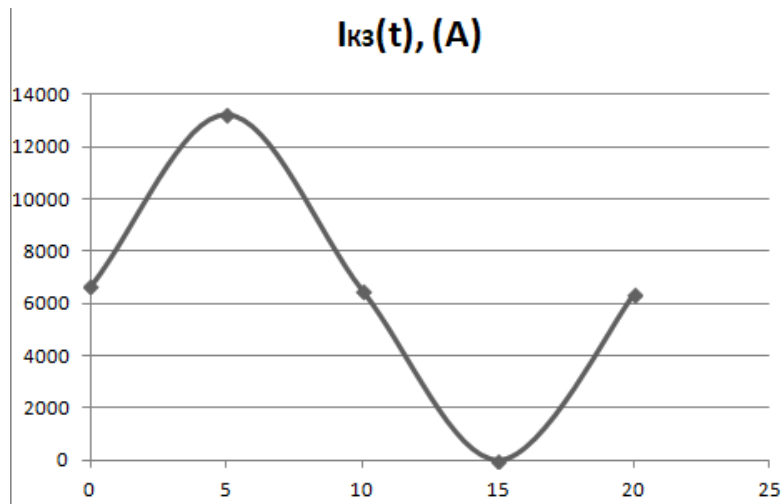


Рис. 5.

4. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи.
2. Ознайомитися порядком та методом виконання практичного завдання.
3. За вихідними даними, виконати розрахунок в іменованих та відносних одиницях опорів схеми заміщення та визначити значення перехідних електромагнітних процесів при короткому замиканні.
4. Проаналізувати результати виконаної роботи.
5. Відповісти на контрольні питання.
6. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
7. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні питання

1. Що таке коротке замикання (КЗ) та які його основні причини?
2. Які існують основні види коротких замикань у електричних мережах?
3. Як розраховується фазна напруга у трифазній системі під час КЗ?
4. Як визначити загальний опір кола КЗ?

5. Що таке базисний опір і як він розраховується?
6. Які складові має струм короткого замикання?
7. Чому аперіодична складова струму КЗ затухає з часом?
8. Як розрахувати часову сталу τ у перехідному процесі?
9. Як змінюється повний струм КЗ у часі після короткого замикання?
10. Як знайти значення аперіодичної складової струму через 5, 10, 20 мс після КЗ?
11. Як змінюється періодична складова струму КЗ у часі?
12. Яку роль відіграє активний опір у затуханні аперіодичної складової?
13. Яка залежність між індуктивним опором та еквівалентною індуктивністю в колі КЗ?
14. Як побудувати графік струму КЗ у перехідному процесі?
15. Через скільки часу аперіодична складова струму КЗ стає незначною?

Таблиця 4. - Вихідні дані для виконання практичної роботи

№	$U_{GS},$ кВ	x_{GS}	$L, км$	$x_0,$ Ом/км	$S_{TH},$ МВ*А	$U_B,$ кВ	$U_H,$ кВ	$x_p,$ Ом
0	150	0	30	0,43	66	160	6,5	0,108
1	110	0	20	0,49	50	115	6,2	0,105
2	220	0	40	0,36	60	225	10,5	0,110
3	330	0	55	0,3	160	330	38,5	0,120
4	150	0	40	0,42	62	160	6,4	0,108
5	330	0	150	0,3	150	330	38,5	0,120
6	150	0	80	0,44	66	160	6,4	0,108
7	110	0	30	0,48	48	115	6,2	0,105
8	220	0	68	0,34	70	225	10,5	0,110
9	150	0	34	0,5	64	160	6,4	0,108
10	330	0	60	0,3	151	330	38,5	0,120
11	220	0	76	0,35	71	225	10,5	0,110
12	110	0	25	0,47	49	115	6,2	0,105

13	330	0	280	0,3	158	330	38,5	0,120
14	150	0	50	0,48	68	160	6,4	0,108
15	330	0	88	0,29	155	331	38,5	0,120
16	220	0	67	0,33	79	225	10,5	0,110
17	110	0	15	0,48	47	115	6,2	0,105
18	330	0	120	0,3	165	330	38,5	0,120
19	150	0	28	0,47	63	160	6,4	0,108

ПРАКТИЧНА РОБОТА №2

Тема: Складання елементів заміщення електроенергетичної системи.

Мета : ознайомитись з моделюванням елементів електроенергетичної системи та освоїти методику набору і розв'язування електроенергетичних задач на статичній моделі змінного струму.

1. Теоретичні відомості

Елементи електричної мережі (повітряні та кабельні лінії електропередачі, трансформатори та автотрансформатори) при розрахунках параметрів її режимів (напруг, струмів, активних та реактивних потужностей) зображуються відповідними схемами заміщення чи розрахунковими схемами.

Розрахункова схема електричної мережі утворюється в результаті об'єднання розрахункових схем окремих елементів мережі з урахуванням послідовності їх з'єднань у мережі.

На рис.1 зображено схеми заміщення повітряних ліній залежно від класу напруги: а – до 35 кВ; б – 110 кВ; в – 220 кВ і вище.

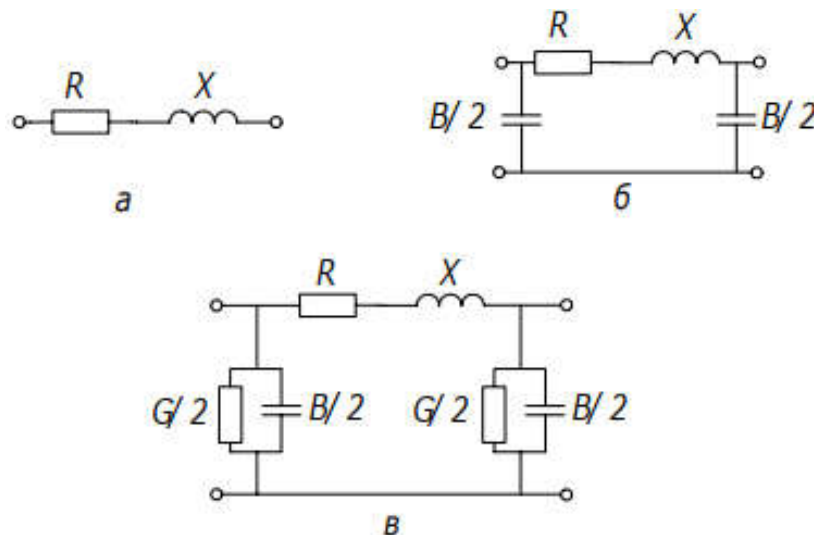


Рис. 1 – Схеми заміщення повітряних ЛЕП

Розрахунок параметрів схеми заміщення лінії електропередачі можна здійснити за формулами, та використовуючи відповідні таблиці (табл. 1.4).

Погодні активні опори проводів (Ом/км), які виготовлені із немагнітних матеріалів (мідь, алюміній), можна розрахувати за формулою:

$$R = \frac{\rho}{F}, \quad (1)$$

де ρ – розрахунковий питомий опір провідника; F – площа перерізу провідників, мм.

При іншому значенні температури навколишнього середовища активний опір проводів визначається за формулою:

$$R_t = R_{20}[1 + 0.004 \cdot (t - 20)], \quad (2)$$

При розрахунках усталених режимів використовують середнє значення питомого індуктивного опору фази повітряної лінії:

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg(D_{cp} / R_n) + 0,0157, \quad (3)$$

При розрахунках симетричних робочих режимів лінії, у якій виконано повний цикл транспозиції проводів, звичайно використовують середнє значення питомої ємнісної провідності лінії:

$$B_0 = \varpi \cdot C_0 = \frac{7,58}{\lg(D_{cp} / R_n)} \cdot 10^{-6}, \quad (4)$$

де C_0 – середня питома ємність (Ф/км) лінії електропередачі з одним проводом у фазі, яка визначається згідно з виразом:

$$C_0 = \frac{0,024}{\lg(D_{cp} / R_n)} \cdot 10^{-6}, \quad (5)$$

У повітряних лініях 220 кВ і вище при непогоді втрати на корону різко зростають і їх треба враховувати. Якщо відомі втрати на корону $P_{кор.сп.зв.}$, то можна визначити питому активну провідність повітряної лінії (См/км):

$$G_0 = \frac{\Delta P_{кор.сп.зв.}}{U^2}, \quad (6)$$

Двообмоткові трансформатори при розрахунках електричних мереж звичайно зображаються Г-подібною схемою заміщення (рис. 2), де $R_T = R_1 + R_2$ – сума активного опору первинної обмотки та зведеного до напруги первинної обмотки активного опору вторинної обмотки трансформатора; X_T – сума

індуктивного опору розсіювання первинної обмотки та зведеного до напруги первинної обмотки індуктивного опору розсіювання вторинної обмотки.

$$X_T = X_1 + X'_2 = \frac{U_K[\%] \cdot U_{ном}^2 [kB^2] \cdot 10}{S_{ном} [кВА]}, \quad (7)$$

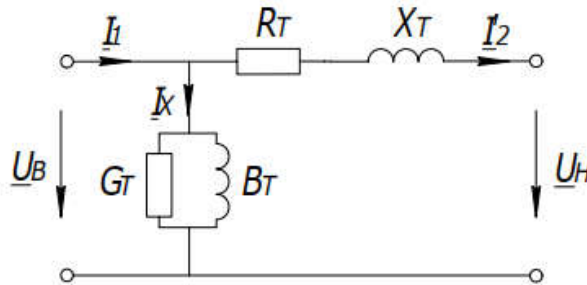


Рис. 2 – Схема заміщення двообмоткового трансформатора

Активна провідність G_T , зумовлена втратами активної потужності в магнітопроводі трансформатора на перемагнічування та вихрові струми, та реактивна провідність B_T , зумовлена потужністю намагнічування сталі, приєднані з одного боку схеми заміщення.

Кожен трансформатор характеризується відповідними параметрами, які подаються в його паспорті.

Триобмоткові трансформатори та автотрансформатори подаються схемою трипроменевої зірки (рис. 3).

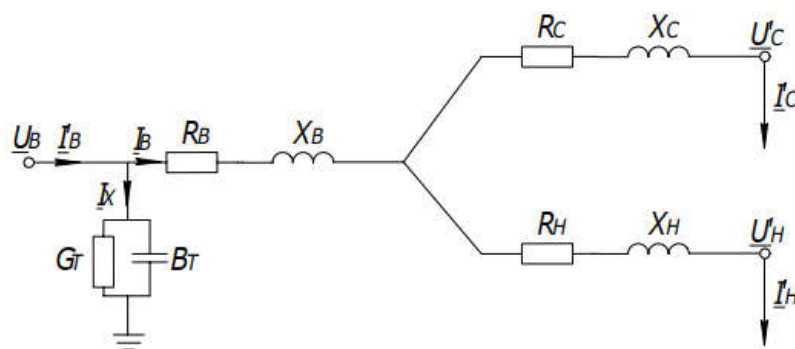


Рис. 3 – Схема заміщення триобмоткового трансформатора

Параметри вітки намагнічування триобмоткових трансформаторів визначаються аналогічно параметрам двообмоткових трансформаторів.

При визначенні R_T та X_T триобмоткових трансформаторів необхідно приймати до уваги виконання трансформаторів.

Для триобмоткових трансформаторів та автотрансформаторів, як і для двообмоткових, справедливі спрощення, коли вітка намагнічування подається втратами холостого ходу $\Delta S_X = \Delta P_X + j\Delta Q_X$.

Навантаження при розрахунках мереж, для яких характерні значні зміни напруги у вузлах приєднання, зручно подавати паралельно чи послідовно з'єднаними незмінними активними та реактивними опорами (рис. 4).

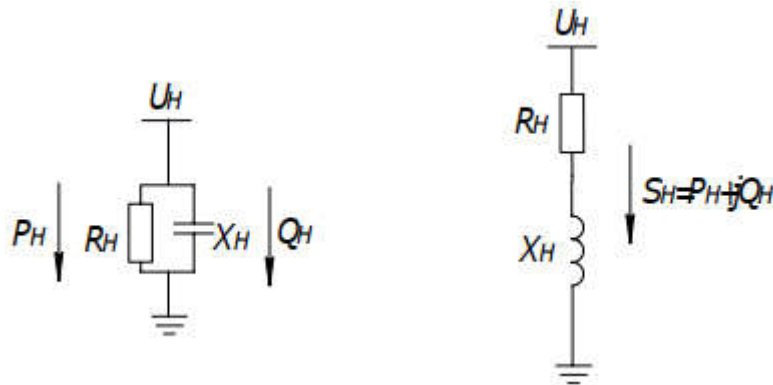


Рис. 4 – Схеми заміщення навантаження

Значення цих опорів вибираються таким чином, щоб потужність, що визначається при напрузі робочого режиму, дорівнювала заданій потужності навантаження.

Тоді при паралельному сполученні опорів:

$$R_H = \frac{U^2}{P_H}; X_H = \frac{U^2}{Q_H}, \quad (8)$$

при послідовному сполученні:

$$R_H = \frac{U^2}{S_H} \cdot \cos \varphi_n; X_H = \frac{U^2}{S_H} \cdot \sin \varphi_n, \quad (9)$$

Розглянемо принципи моделювання на розрахунковому столі змінного струму.

Коефіцієнти пропорційності координат режиму, змушуючих сил і параметрів системи будемо називати масштабними коефіцієнтами чи просто масштабами. При виборі масштабних коефіцієнтів слід прийняти до уваги, що $U_{\max M} = 80 \text{ В}$

та $I_{\text{MAX M}} = 0,3 \text{ A}$.

При виконанні лабораторних робіт рекомендується з метою забезпечення регулювання параметрів режиму мережі приймати $U_M = 50 \dots 60 \text{ В}$; $I_M = 0,2 \text{ A}$.

Після вибору залежних масштабних коефіцієнтів:

$$m_U = \frac{U_{op}}{U_M} \quad \text{та} \quad m_I = \frac{I_{op}}{I_M}, \quad (10)$$

інші визначаються через них:

$$m_S = m_P = m_Q = \frac{S_{op}}{S_M} = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{op} \cdot I_{op}}{U_M \cdot I_M} = \sqrt{3} \cdot m_U \cdot m_I, \quad (11)$$

$$m_Z = \frac{m_U}{\sqrt{3} \cdot m_I}; \quad m_\omega = \frac{\omega_U}{\omega_M} = \frac{314}{4 \cdot 314} = 0,25; \quad m_C = \frac{4}{m_Z}, \quad (12)$$

Наявність $\sqrt{3}$ зумовлена тим, що модель однофазна, а в практичній роботі моделюються лінійні напруги та струми та потужність трьох фаз.

Для виконання розрахунків на моделі необхідно визначити параметри схеми заміщення оригіналу, вибрати масштабні коефіцієнти та визначити параметри елементів моделі. Якщо з'єднати елементи моделі у схему і подати напругу на генераторні елементи, то можна встановити бажаний режим і провести його дослідження. Використовуючи масштабні коефіцієнти, можна модельні величини напруг, струмів, потужностей перерахувати на відповідні елементи оригіналу.

2. Завдання для виконання практичної роботи

1. Ознайомитись з методичними вказівками до роботи.
2. Скласти згідно із заданим варіантом, для додаткових принципових схем на рис. 5 – 6, розрахункову схему та визначити параметри її елементів.

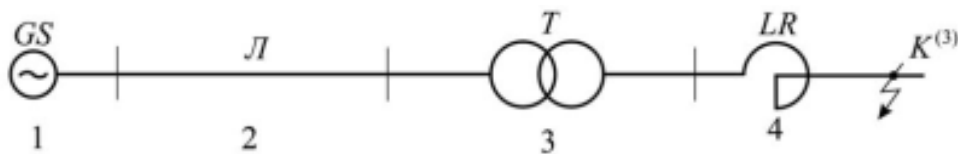


Рис. 5.

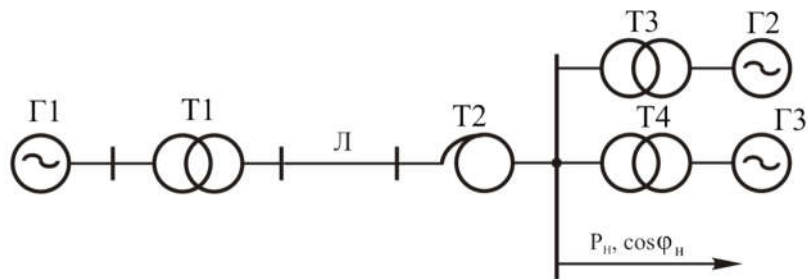


Рис. 6.

3. Приклад виконання

Розглянемо виконання підготовчих розрахунків на прикладі.

Електропередача електроенергії (рис. 7) має такі дані:

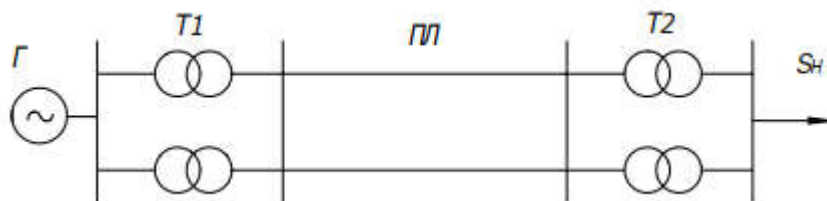


Рис. 7 – Схема електропередачі

- $U_G = 10,5 \text{ кВ}$;
- T_1, T_2 – трансформатори типу ТДЦ-80000/220;
- ПЛ – повітряна лінія напругою 220 кВ довжиною 120 км виконана проводом АС-240/39,
- Розміщення проводів на опорі горизонтальне, відстань між проводами сусідніх фаз $D = 6,3 \text{ м}$; середньорічна температура $+ 2^\circ\text{C}$;
- $\underline{S}_H = 100 + j50 \text{ МВА}$.

Таблиця 1 – Каталожні дані трансформаторів

Тип	S_H	U_H обмоток, кВ		U_K	ΔP_K	ΔP_X	I_X
	МВА	ВН	НН	%	кВт	кВт	%
ТДЦ-80000/220	80	242	10,5	11	320	105	0,6

1. Розрахуємо параметри схеми заміщення електропередачі (рис.8):

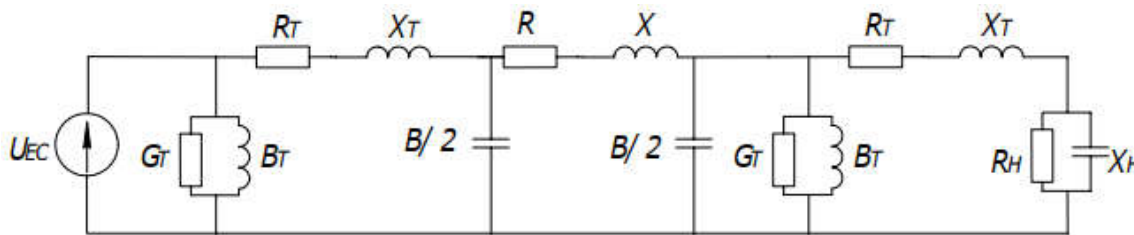


Рис. 8 – Схема заміщення електропередачі

Електрична станція на схемі зображена U_{Γ} . У схемі заміщення зв'язки тільки електричні, тому повинен існувати лише один рівень напруги. За основний рівень зручно прийняти напругу лінії, тоді

$$U_{EC} = U_{\Gamma} / K_T = 10,5 / 10,5 \cdot 220 = 220 \text{ кВ.}$$

З усіх параметрів трансформаторів визначимо тільки індуктивний опір розсіювання X_T , бо решта параметрів схеми заміщення на модельному елементі трансформатора не набирається. Значення цього опору з урахуванням установки двох трансформаторів відносно напруги 220 кВ:

$$X_T = \frac{11 \cdot 220 \cdot 10}{2 \cdot 80000} = 33,28 \text{ Ом,}$$

Лінія електропередачі: питомий активний опір проводів лінії з урахуванням даних табл. 4 згідно з формулою (2):

$$R_l = 0,12[1 + 0,004 \cdot (2 - 20)] = 0,11 \text{ Ом/км,}$$

Питомий індуктивний опір лінії визначається за (3); для $R_{II} = 21,5 / 2 = 10,8$ мм (табл. 4) та $D_{cp} = 1,26$ $D = 1,26 \cdot 6,3 = 8$ Ом (для горизонтального розміщення проводів):

$$X_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{8000}{10,8} + 0,016 = 0,429 \text{ Ом/км,}$$

Питома ємність за (5):

$$C_0 = \frac{0,024}{\lg \frac{8000}{10,8}} \cdot 10^{-6} = 8,36 \cdot 10^{-9} \text{ Ф/км},$$

Параметри П-подібної схеми заміщення повітряної лінії з урахуванням двох ланок ПЛ (рис. 6):

$$R_{\text{Л}} = 0,5 \cdot 0,11 \cdot 120 = 6,6 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{Л}} = 0,5 \cdot 0,429 \cdot 120 = 25,74 \text{ Ом};$$

$$C_{\text{Л}} / 2 = 2 \cdot 0,5 \cdot 8,36 \cdot 10^{-9} \cdot 120 = 10,03 \cdot 10^{-7} = 1 \text{ мкФ}.$$

Навантаження наведене у вигляді паралельно з'єднаних незмінних опорів, величини яких можуть бути знайдені за (8):

$$R_{\text{н}} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ Ом}; \quad X_{\text{н}} = \frac{220^2}{5} = 968 \text{ Ом};$$

Для визначення параметрів моделі визначаємо масштабні коефіцієнти:

$$m_U = \frac{220 \cdot 10^3}{50} = 4,4 \cdot 10^3;$$

$$I_{OP} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_H} = \frac{\sqrt{100^2 + 50^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} \cdot 10^3 = 293 \text{ А};$$

$$m_I = \frac{293}{0,2} = 1,465 \cdot 10^3;$$

$$m_Z = \frac{4,4 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,465 \cdot 10^3} = 1,734;$$

$$m_C = \frac{4}{1,734} = 2,31;$$

$$m_S = \sqrt{3} \cdot 4,4 \cdot 10^3 \cdot 1,465 \cdot 10^3 = 1,12 \cdot 10^7$$

Параметри схеми заміщення моделі:

$$R_{TM} = \frac{R_T}{m_Z} = \frac{1,21}{1,73} = 0,7;$$

$$X_{TM} = \frac{X_T}{m_Z} = \frac{33,28}{1,73} = 19,2;$$

$$R_{LM} = \frac{R_L}{m_Z} = \frac{6,6}{1,73} = 3,8 \text{ Ом};$$

$$X_{LM} = \frac{X_L}{m_Z} = \frac{25,74}{1,73} = 14,9 \text{ Ом};$$

$$\frac{C_{LM}}{2} = \frac{C_L}{2 \cdot m_C} = \frac{1,0}{2,31} = 0,43 \text{ мкФ};$$

$$R_{HM} = \frac{R_H}{m_Z} = \frac{484}{1,73} = 279,5 \text{ Ом};$$

$$X_{HM} = \frac{X_H}{m_Z} = \frac{968}{1,73} = 559,5 \text{ Ом};$$

Схема набору на моделі зображена на рис. 9.

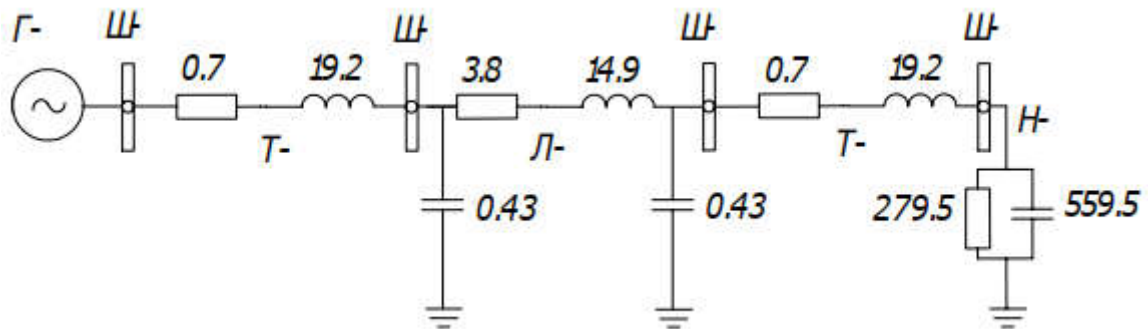


Рис. 9 – Схема набору на моделі

4. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи.
2. Ознайомитися порядком та методом виконання практичного завдання.
3. За вихідними даними, виконати практичну роботу.
4. Проаналізувати результати виконаної роботи.
5. Відповісти на контрольні питання.
6. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
7. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні запитання

1. Схема заміщення, розрахункова схема та розрахунок параметрів ліній електропередач 35, 110, 220 кВ і вище.
2. Схема заміщення, розрахункова схема та розрахунок параметрів двообмоткових трансформаторів.
3. Схема заміщення, розрахункова схема та розрахунок параметрів триобмоткових трансформаторів.
4. Як моделюється навантаження та здійснюється його розрахунок?

Таблиця 2 – Дані до практичної роботи

Варіант	Тип трансформатора	Повітряна лінія						Навантаження	
		U _н , кВ	L, км	Марка проводу	D, мм	Розташування проводів	t, °С	P _н , МВт	Q _н , МВАр
1	ТДН-16000/35	35	20	АС-70/11	3500	Трикутник	0	20	9
2	ТДН-25000/35	35	30	АС-95/16	3500	Трикутник	1	25	11
3	ТДН-16000/35	35	25	АС-50/8	3500	Трикутник	3	18	8
4	ТДН-25000/35	35	40	АС-120/19	3500	Трикутник	-1	30	14
5	ТДН-16000/110	110	70	АС-70/11	4500	Трикутник	2	16	16
6	ТД-40000/110	110	65	АС-120/19	4500	Трикутник	5	45	20
7	ТДН-16000/110	110	50	АС-95/16	4500	Трикутник	-1	22	7
8	ТД-40000/110	110	80	АС-185/29	4500	Трикутник	0	50	25
9	ТДЦ-80000/220	220	120	АС-300/39	6500	Горизонтальне	8	100	50
10	ТДЦ-	220	100	АС-	6500	Горизонталь	-3	160	70

	125000/220			400/51		не			
11	ТДЦ-80000/220	220	90	АС- 240/39	6500	Горизонталь не	1	90	40
12	ТДЦ- 125000/220	220	150	АС- 300/39	6500	Горизонталь не	0	130	60

Таблиця 4 – Погонні активні опори проводів різних перерізів ліній при температурі +20°C

Переріз провода, мм ²	Діаметр провода, мм	R ₀ при 20°C, Ом/км
35	8,4	0,773
50	9,6	0,592
70	13,5	0,420
95	15,4	0,314
120	15,5	0,249
150	17,1	0,195
185	18,9	0,156
240	21,6	0,120
300	27,7	0,098
400	29,2	0,073
500	30,6	0,059
600	33,2	0,050

Таблиця 5 – Втрати на корону в лініях напругою 220...500 кВ

Переріз провода, мм ²	Кількість проводів у фазі	Напруженість поля, кВ/см	Середньорічні втрати потужності на корону, $\Delta P_{\text{кор ср зв}}$, кВт/км
220 кВ ($a_{\text{ср}}=40$ см; $D_{\text{ср}}=7$ м)			

240	1	25,2	2,7	1,2
300	1	23,5	2,0	0,8
400	1	20,7	1,0	0,4
500	1	19,0	0,7	0,3
330 κB ($a_{cp}=40$ см; $D_{cp}=11$ м)				
240	2	25,7	6,3	2,7
300	2	23,9	4,6	1,9
400	2	21,2	2,5	1,0
500	2	19,3	1,6	0,5
500 κB ($a_{cp}=40$ см; $D_{cp}=14$ м)				
330	3	25,4	11,5	4,9
400	3	24,0	12,2	5,2
500	3	21,8	7,5	3,0

ПРАКТИЧНА РОБОТА №3

Тема: Розрахунок струмів короткого замикання в електричних мережах напругою до 1000 В.

Мета: навчитися розраховувати величини струмів короткого замикання в електричних мережа напругою до 1000 В (380 В).

1. Теоретичні відомості

Коротке замикання (КЗ) – це аварійний режим роботи електричної мережі, при якому електричний струм у ланцюзі значно перевищує номінальне значення. Такий режим може спричинити перегрів проводів, пошкодження електрообладнання та вихід з ладу електричних апаратів.

У даній роботі розглядається методика розрахунку струмів короткого замикання у мережах напругою до 1000 В (380 В).

У трифазних мережах можуть виникати такі типи КЗ:

Трифазне коротке замикання – всі три фази замикаються між собою або через малий опір.

Двофазне коротке замикання – замикання двох фаз між собою.

Однофазне коротке замикання – замикання однієї фази на землю або корпус електроустановки.

Найнебезпечнішим є трифазне КЗ, оскільки воно створює найбільший струм. Проте однофазне КЗ є найпоширенішим у мережах до 1000 В.

Електричні мережі напругою 380 В (0,4 кВ) виконуються із глухо заземленою нейтраллю. В таких мережах можуть виникати трифазні, двофазні та однофазні короткі замикання (к.з.). Розрахунок струмів к.з. в таких мережах зводиться до визначення максимального струму к. з. (трифазного) на шинах 0,4 кВ трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ та мінімального струму к.з. (однофазного) в найбільш електрично віддаленій точці лінії. Значення струму трифазного к. з. на шинах підстанції необхідне для вибору та перевірки

електричних апаратів підстанції 10/0,4 кВ на термічну та електродинамічну стійкість та узгодження захистів трансформатора та лінії 0,38 кВ, а за струмом однофазного к.з. в найбільш електрично віддаленій точці лінії перевіряють ефективність (чутливість) пристроїв захисту (реле, автоматів, плавких запобіжників).

При визначенні струмів замикання в мережах низької напруги треба враховувати як індуктивний, так і активний опори елементів схеми. У розрахунках не враховують опір лінії 10 кВ, що живить силовий трансформатор 10/0,4 кВ ($Z_{л10} = 0$), і вважають, що напруга на шинах високої напруги трансформаторної підстанції при к.з. в мережі низької напруги залишається незмінною та дорівнює номінальному значенню.

Розрахунок струмів к.з. в мережах низької напруги рекомендується виконувати методом іменованих одиниць. Результируючий опір до точки к.з. складається з активного та індуктивного опорів трансформатора 10/0,4 кВ та лінії 0,38 кВ.

Повний опір трансформатора визначається за виразом:

$$Z_{mp.\delta} = \frac{U_k \%}{100} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{ном.тр}}, \quad (1)$$

Активний опір трансформатора визначаємо, користуючись виразом:

$$r_{mp.\delta} = \frac{\Delta P_m}{S_{ном.тр}} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{ном.тр}}, \quad (2)$$

де ΔP_m - втрата потужності в обмотці трансформатора (втрата в «міді»), кВт.

Індуктивний опір трансформатора:

$$x_{mp(\delta)} = x_{mp(n)} \frac{U_{\delta}^2}{S_{н.тр.}} = \sqrt{\left(\frac{U_k \%}{100}\right)^2 - r_{mp(n)}^2} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{н.тр.}}, \quad (3)$$

або

$$x_{mp(\delta)} = \sqrt{Z_{mp(\delta)}^2 - r_{mp(n)}^2}, \quad (4)$$

Активний і реактивний опір лінії визначаємо за виразами:

$$r_{л(\delta)} = r_0 \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\delta}}{U_{с.н.}} \right)^2, \quad (5)$$

$$x_{л(\delta)} = x_0 \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\delta}}{U_{с.н.}} \right)^2, \quad (6)$$

Струм трифазного к.з. в будь якій точці лінії 0,38 кВ визначається за допомогою виразу:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\delta}}{\sqrt{3} \cdot z_{раз(\delta)}}, \quad (7)$$

Максимальний струм трифазного к.з. на шинах 0,4 кВ підстанції 10(6)/0,4 кВ можна визначити за виразом:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{100 \cdot S_{н.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_r \cdot U_{\delta}} = \frac{100}{U_{\kappa}} \cdot I_{н.тр}, \quad (8)$$

де $I_{н.тр}$ - номінальний струм трансформатора, А.

Струм однофазного к.з. лінії 0,4 кВ можна визначити за формулою:

$$I_{\kappa}^{(1)} = \frac{U_{\phi}}{\frac{z_{mp}^{(1)}}{3} + z_n} = \frac{230}{\frac{z_{mp}^{(1)}}{3} + z_n}, \quad (9)$$

де U_{ϕ} - фазна напруга мережі, В; $z_{тр}$ - повний опір трансформатора струму при замиканні на корпус, Ом; z_n - повний опір петлі «фаза-нуль» до точки к.з., Ом.

Опір петлі «фаза-нуль» у загальному випадку складає:

$$z_n = \sum l_i \cdot \sqrt{\left(r_{0\phi.i} + r_{0н.i} \right)^2 + \left(x_{0\phi.i} + x_{0н.i} + x_{0\phi-н.i} \right)^2}, \quad (10)$$

де $r_{0\phi.i}$, $x_{0\phi.i}$ - питомий активний та індуктивний опір і-ї ділянки фазного проводу лінії, Ом/км; $r_{0н.i}$, $x_{0н.i}$ - питомий активний та індуктивний опір і-ї ділянки нульового проводу, Ом/км; $x_{0\phi-н.i}$ - питомий зовнішній індуктивний опір петлі «фаза-нуль», Ом/км; l_i - довжина і-ї ділянки лінії, км.

Якщо фазний та нульовий провід лінії виготовлені із кольорового металу, то їхнім індуктивним опором (внутрішнім) нехтують, тоді:

$$z_n = \sum l_i \cdot \sqrt{(r_{0\phi.i} + r_{0н.і})^2 + x_{0\phi-н.і}^2}, \quad (11)$$

Якщо нульовий провід лінії виконаний таким же перерізом, що і фазний, із кольорового металу, тоді:

$$z_n = \sum l_i \cdot \sqrt{(2 \cdot r_{0\phi.i})^2 + x_{0\phi-н.і}^2}, \quad (12)$$

Для проводів із кольорового металу зовнішній індуктивний опір петлі «фаза-нуль» приймається рівним Ом/км.

2. Завдання

Повітряна лінія напругою 0,38 кВ (рис. 1) приєднана до шин 0,4 кВ споживчої ТП 10/0,4 кВ із n трансформаторами потужністю $S_{н.тр.}$, кВА. Опір системи невідомий. Розрахувати максимальні та мінімальні значення струмів к. з. мережі 0,38 кВ в розрахункових точках. Також виконати розрахунок перехідного струм короткого замикання в розрахункових точках.

Вихідні данні для розрахунку за варіантами наведені в таблиці 3.

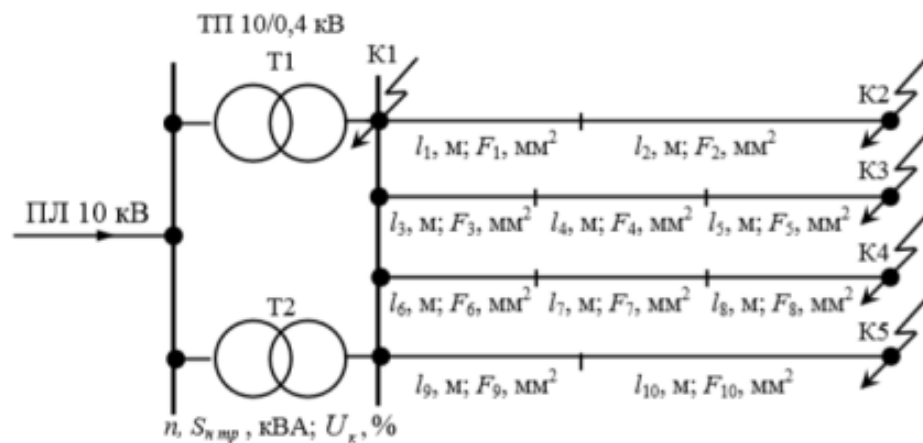


Рис. 1 – Розрахункова схема мережі

3. Приклад виконання завдання

Повітряна лінія напругою 0,38 кВ відходить від шин споживчої трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ. Розрахункові дані наведені на схемі мережі (рис. 2). Визначити струм трифазного к.з. в точці К-1 та струм однофазного к.з. в точці К-2.

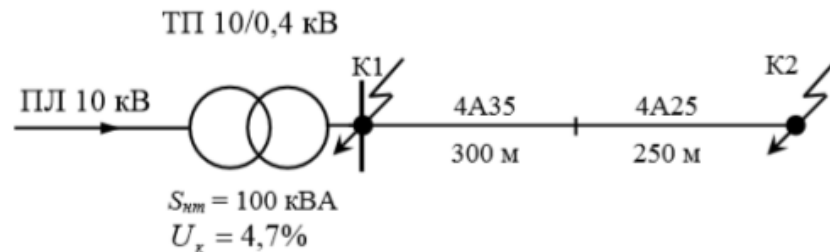


Рис. 2 – Розрахункова схема мережі

1. За розрахунковою схемою (рис. 2) складаємо еквівалентну схему заміщення мережі (рис. 3). Приймаємо, що $Z_{л10} = 0$.

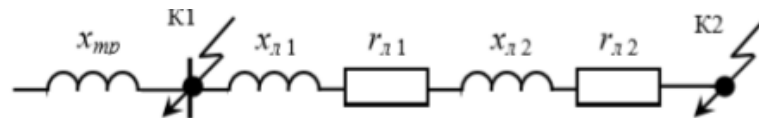


Рис. 3 – Еквівалентна схема заміщення мережі

2. Визначення базової напруги.

Згідно з методикою, базова напруга визначається як:

$$U_b = 1.05 \cdot U_n, \quad (13)$$

Підставимо значення

$$U_b = 1.05 \cdot 0,38 = 0,4 \text{ кВ}$$

3. Розрахунок струму трифазного короткого замикання у точці К-1:

Формула для максимального струму короткого замикання:

$$I_{кз} = \frac{I_{н.тр}}{Z_{\Sigma}}, \quad (14)$$

де $I_{н.тр}$ - номінальний струм трансформатора; Z_{Σ} – сумарний опір системи.

Спочатку знаходимо номінальний струм трансформатора:

$$I_{н.тр} = \frac{S_{н.тр}}{\sqrt{3} \cdot U_n}, \quad (15)$$

Підставимо значення:

$$I_{н.тр} = \frac{250 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 380}$$

$$I_{н.тр} = \frac{250000}{1,732 \cdot 380} \approx 380,5 \text{ А}$$

Тепер знаходимо повний опір системи:

$$Z_{\Sigma} = Z_{тр} + Z_{лінії}, \quad (16)$$

де $Z_{тр}$ - повний опір трансформатора (повний опір трансформатора струму при замиканні на корпус, з таблиці: $Z_{тр} = 1.07 \text{ Ом}$); $Z_{лінії}$ - опір повітряної лінії.

Опір лінії включає активний і реактивний опір:

$$Z_{лінії} = 0,3 \sqrt{(r_0 + r_H)^2 + (x_0 + x_H)^2}, \quad (17)$$

Для проводів:

Алюміній А35: $r_0 = 0.83 \text{ Ом/км}$;

Алюміній А25: $r_0 = 1.14 \text{ Ом/км}$;

Реактивний опір $x_0 = 0.6 \text{ Ом/км}$;

Значення довжин проводів беремо з таблиці (сума довжин):

$$I_{\Sigma} = 200 + 100 + 500 + 200 + 100 + 120 + 150 + 250 + 200 = 1820 = 1,82 \text{ км}$$

Середній питомий опір розраховується для різних ділянок, але для спрощення беремо середнє значення $r_{ср} = 1 \text{ Ом/км}$, $x_{ср} = 0.6 \text{ Ом/км}$:

$$Z_{лінії} = 0,3 \sqrt{(1 + 1,82)^2 + (0,6 + 1,82)^2} \text{ Ом}$$

$$Z_{лінії} = 0,3 \sqrt{(1,82)^2 + (1,092)^2} \text{ Ом}$$

$$Z_{лінії} = 0,3 \sqrt{3,3124} \text{ Ом}$$

$$Z_{лінії} \approx 0,3 \cdot 1,82 = 0,55 \text{ Ом}$$

Тоді сумарний опір:

$$Z_{\Sigma} = 1,07 + 0,55 = 1,62 \text{ Ом}$$

Знаходимо струм короткого замикання:

$$I_{\kappa 3} = \frac{380,5}{1,62} \approx 235 \text{ A}$$

4. Розрахунок струму однофазного короткого замикання у точці К-2.

Формула:

$$I_{\kappa 31} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{тр}} + Z_{\text{петлі}}}, \quad (18)$$

де $U_{\phi} = 220 \text{ В}$; $Z_{\text{тр}} = 1.07 \text{ Ом}$; $Z_{\text{петлі}}$ розраховується аналогічно $Z_{\text{лінії}}$, але з урахуванням фази та нуля.

Опір петлі:

$$Z_{\text{петлі}} = 0,3 \sqrt{(r_0 + r_H)^2 + (x_0 + x_H)^2}, \quad (19)$$

Припустимо, що нульовий провід аналогічний фазному, тоді:

$$Z_{\text{петлі}} = 0,3 \sqrt{(1,82 + 1,82)^2 + (1,092 + 1,092)^2}$$

$$Z_{\text{петлі}} = 0,3 \sqrt{(3,64)^2 + (2,184)^2}$$

$$Z_{\text{петлі}} \approx 0,3 \sqrt{13,24 + 4,77}$$

$$Z_{\text{петлі}} = 0,3 \cdot \sqrt{18} \approx 0,3 \cdot 4,24 = 1,27 \text{ Ом}$$

Тоді загальний опір:

$$Z_{\Sigma} = 1,07 + 1,27 = 2,34 \text{ Ом}$$

Знаходимо струм однофазного к.з.:

$$I_{\kappa 31} = \frac{220}{2,34} \approx 94 \text{ A},$$

В результаті, струм трифазного к.з. у точці К1: 235 А, а струм однофазного к.з. у точці К2: 94 А.

5. Розрахунок перехідного струму короткого замикання в розрахункових точках.

Поетапний розрахунок перехідного процесу для точки К1.

З попереднього розрахунку для варіанта маємо:

- струм трифазного короткого замикання: $I_{\kappa 3} = 235 \text{ A}$;

- активний опір: $R_{\Sigma} = 1.62 \text{ Ом}$;

- індуктивність мережі: $L = 0.2 \text{ Гн}$.

- частота мережі: $f = 50$ Гц, $\omega = 2\pi f = 314$ рад/с;

Формула для струму перехідного процесу

Загальне рівняння миттєвого струму при КЗ:

$$I_{\text{кз}}(t) = \sqrt{2}I_{\text{кз}} \cdot \sin(\omega t) + I_{\text{анер}} e^{\frac{-t}{\tau}}, \quad (20)$$

де $\sqrt{2}I_{\text{кз}} \sin(\omega t)$ - періодична складова; $I_{\text{анер}} e^{-t/\tau}$ - аперіодична складова; τ - стала часу аперіодичної складової.

Знаходимо сталу часу

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,2}{1,62} = 0,123$$

Визначаємо максимальний перехідний струм

$$I_{\text{макс}} = 3,41 \cdot I_{\text{кз}}$$

$$I_{\text{макс}} = 3,41 \cdot 235 = 801,35$$

Розрахунок струму у різні моменти часу

- час 0.01 с після КЗ

$$I_{\text{кз}}(0,01) = \sqrt{2} \cdot 235 \cdot \sin(314 \cdot 0,01) + 470 e^{\frac{-0,01}{0,123}}$$

$$I_{\text{кз}}(0,01) = 332 \cdot \sin(3,14) + 470 e^{-0,0813}$$

Оскільки $\sin(3,14) \approx 0,0016$:

$$I_{\text{кз}}(0,01) = 332 \cdot 0,0016 + 470 e^{-0,0831}$$

$$I_{\text{кз}}(0,01) \approx 0,53 + 432 = 432,53 \text{ А}$$

- час 0.1 с після КЗ

$$I_{\text{кз}}(0,1) = \sqrt{2} \cdot 235 \cdot \sin(314 \cdot 0,1) + 470 e^{\frac{-0,1}{0,123}}$$

$$I_{\text{кз}}(0,1) = 332 \cdot \sin(31,4) + 470 e^{-0,0831}$$

Оскільки $\sin(31,4) \approx 0,309 \cdot e^{-0,813} \approx 0,444$:

$$I_{\text{кз}}(0,1) = 332 \cdot 0,309 + 470 \cdot 0,444$$

$$I_{\text{кз}}(0,1) \approx 102,6 + 208,7 = 311,3 \text{ А}$$

- час 0.5 с після КЗ

$$I_{\text{кз}}(0,5) = 332 \cdot \sin(314 \cdot 0,5) + 470e^{\frac{-0,5}{0,123}}$$

$$I_{\text{кз}}(0,5) = 332 \cdot \sin(157) + 470e^{-4,07}$$

Оскільки $\sin(157) \approx 0,98$ і $e^{-4,07} \approx 0,017$

$$I_{\text{кз}}(0,5) = 332 \cdot 0,98 + 470 \cdot 0,017$$

$$I_{\text{кз}}(0,5) \approx 325,4 + 8 = 333,4 \text{ А}$$

Отже, максимальний перехідний струм $I_{\text{макс}} = 801.35 \text{ А}$, що у 3.41 рази перевищує розрахунковий струм КЗ. Через 0.01 с після КЗ струм зменшився до 432.5 А, через 0.1 с після КЗ струм вже 311.3 А, через 0.5 с після КЗ струм практично стабілізується на рівні 333.4 А.

Таблиця 1. - Результатів розрахунку перехідного процесу

Час (с)	Струм (А)
0.00	801.35
0.01	432.53
0.02	381.20
0.03	352.75
0.04	336.30
0.05	327.10
0.10	311.30
0.20	305.40
0.30	333.10
0.40	331.70
0.50	333.40

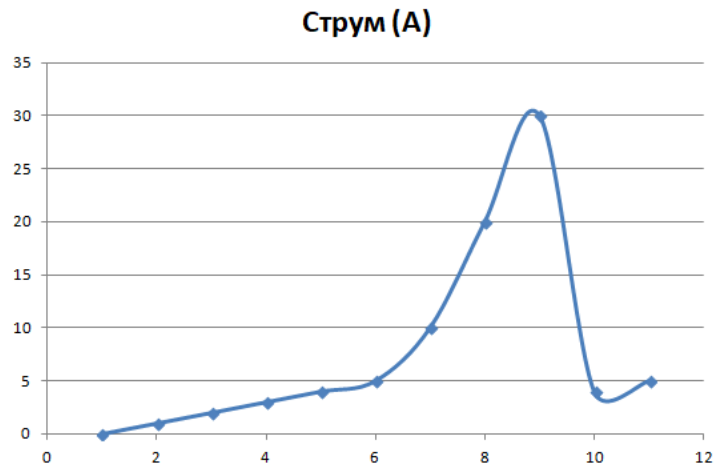


Рис. 4. – Результати розрахунку перехідного процесу

Аналогічно виконуємо розрахунок перехідного струм короткого замикання в точці К-2 (табл. 2).

Таблиця 2. - Результатів розрахунку перехідного процесу для точки К-2

Час (с)	Струм (А)
0.00	771.0
0.01	416.8
0.02	365.2
0.03	340.5
0.04	325.1
0.05	316.0
0.10	290.6
0.20	305.2
0.30	318.0
0.40	320.5
0.50	322.9

4. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися порядком та методом виконання практичного завдання;
3. За вихідними даними, виконати розрахунок максимальних та мінімальні значення струмів к. з. мережі 0,38 кВ в розрахункових точках;
4. Виконати розрахунок перехідного струм короткого замикання в розрахункових точках;
5. Проаналізувати результати виконаної роботи;
6. Відповісти на контрольні питання;
7. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
8. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні питання

1. Що таке коротке замикання і які його основні причини в електричних мережах?
2. Які види коротких замикань існують у трифазних електричних мережах?
3. Які параметри електричної мережі необхідно враховувати при розрахунку струмів короткого замикання?
4. Що таке активний, реактивний та повний опір електричної мережі?
5. Яким чином визначається повний опір трансформатора при розрахунках короткого замикання?
6. Як визначити повний опір електричної лінії, що веде до точки короткого замикання?
7. Яка формула використовується для розрахунку трифазного струму короткого замикання?
8. Як розрахувати струм однофазного короткого замикання у точці мережі?
9. Що таке перехідний процес при короткому замиканні?

10. Як визначається максимальний струм під час перехідного процесу короткого замикання?

11. Що таке стала часу (τ) у перехідному процесі і як вона визначається?

12. Яким чином змінюється струм короткого замикання у часі після виникнення аварії?

13. Як використовуються розрахункові значення струмів КЗ при виборі захисних пристроїв?

14. Чому важливо враховувати аперіодичну складову струму при розрахунку короткого замикання?

15. Які заходи дозволяють зменшити струми короткого замикання в електричних мережах?

Таблиця 3. - Вихідні дані електричної мережі

Варіант	п. шт.	Стр	Ділянки мережі																	
			1		2		3		4		5		6		7		8		9	
			I_1 , м	F1, мм2	I_2 , м	F2, мм2	I_3 , м	F3, мм2	I_4 , м	F4, мм2	I_5 , м	F5, мм2	I_6 , м	F6, мм2	I_7 , м	F7, мм2	I_8 , м	F8, мм2	I_9 , м	F9, мм2
1	1	250	200	70	100	50	500	70	200	50	100	35	120	70	150	50	250	35	20	70
2	2	160	150	50	200	35	120	70	160	50										
3	1	100	300	70	120	50	150	50	140											
4	2	63	250	50	300	35	50	35	200											
5	1	400	600	70	550	50	400	50	250											
6	2	250	400	70	350	50	250	50	120											
7	1	160	150	50	200	35	120	35	160											

8	2	630	700	70	-	50	120	70	-											
9	1	400	600	70	550	50	400	70	250											
10	2	250	400	70	350	50	250	70	120											
11	1	160	150	50	200	35	120	70	160											

ПРАКТИЧНА РОБОТА №4

Тема: Розрахунок струмів короткого замикання в електричних мережах напругою понад 1000 В.

Мета: навчитися розраховувати струми короткого замикання в електричних мережах напругою понад 1000В методом практичних та відносних одиниць.

1. Теоретичні відомості

Коротким замиканням називається будь-яке, не передбачене нормальними умовами роботи, замикання між фазами, а в мережах із заземленою нейтраллю також замикання однієї або декількох фаз на землю (або на нульовий провід).

Найпростішим видом короткого замикання (к.з.), із точки зору сприйняття процесу, є симетричне трифазне коротке замикання. При такому к.з. опір усіх трьох фаз до точки к.з. буде однаковим.

До несиметричних к.з. можна віднести двофазне, двофазне через землю і однофазне к.з.. Останній вид к.з. може спостерігатися лише в мережах із заземленою нейтраллю.

Розрахунок струмів к.з. виконують для вибору струмоведучих частин та електричних апаратів, для перевірки їх на термічну та електродинамічну стійкість, для проектування, налаштування та перевірки на чутливість релейного захисту, для вибору засобів обмеження струмів.

Для визначення максимальних струмів к.з. в заданих точках мережі приймають ряд припущень:

- всі джерела живлення включені і працюють із номінальним навантаженням;
- всі синхронні генератори електростанцій оснащені пристроями автоматичного регулювання збудження (АРЗ) і мають форсування збудження;

- розрахункова напруга кожного ступеня мережі на 5% більша від номінальної;
- насичення магнітних систем відсутнє;
- для всіх елементів мережі враховується лише реактивний опір.

Активний опір враховується лише тоді, коли його значення перевищує 0,33 індуктивного;

- струмами намагнічування трансформаторів нехтують;
- опір в місці к.з. приймається рівним нулю;
- при к.з. поблизу електростанцій частота обертання генераторів залишається незмінною.

Для розрахунку струмів к.з. необхідно скласти розрахункову схему електричної мережі (рис. 1). Струми к.з. в мережі 10 кВ необхідно розраховувати в наступних точках:

- точка К1 (шини 10 кВ РТП 35(110)/10 кВ) – для вибору та перевірки на термічну та електродинамічну стійкість високовольтного вимикача (масляного, вакуумного та ін.), роз'єднувачів, шин, трансформаторів струму, а також для розрахунку параметрів релейного захисту обладнання підстанції та лінії;
- точка К2 (шини 10 кВ найближчої до районної підстанції споживчої ТП 10/0,4 кВ) – для розрахунку релейного захисту (струмової відсічки лінії);
- точка К3 (шини 10 кВ будь-якої споживчої ТП 10/0,4 кВ, що проектується) – для вибору роз'єднувача і запобіжників на ТП 10/0,4 кВ;
- точка К4 (шини 10 кВ віддаленої споживчої ТП 10/0,4 кВ) – для розрахунку параметрів релейного захисту лінії 10 кВ.

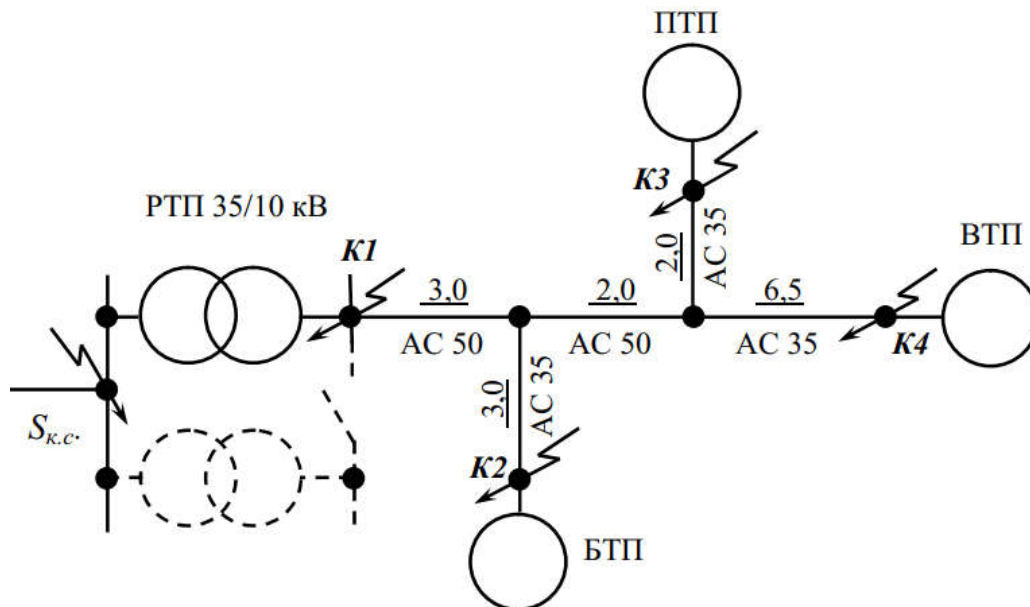


Рис. 1 – Розрахункова схема електричної мережі (приклад)

При визначенні струмів к.з., використовують один із двох методів:

1. метод практичних (іменованих) одиниць – параметри схеми виражають в іменованих одиницях (омах, амперах, вольтах та ін.);
2. метод відносних (умовних) одиниць – параметри схеми виражають в частках або відсотках від величини, що прийнята в якості основної (базисної).

Метод практичних одиниць застосовують для розрахунку струмів к.з. відносно простих електричних мереж із невеликою кількістю ступенів трансформації.

Методом відносних одиниць зручніше користуватися при розрахунку струмів к.з. в складних електричних мережах із декількома ступенями трансформації напруги.

Розрахунок струмів к.з. проводиться в наступній послідовності:

- вибирається метод розрахунку та розрахункові умови;
- складається розрахункова схема мережі;
- для розрахункової схеми складається еквівалентна схема заміщення;
- визначається опір елементів схеми заміщення в практичних або іменованих одиницях;

- еквівалентна схема заміщення зводиться до простішого виду;
- визначаються результуючі опори до точок к.з.;
- визначаються значення струмів к.з. в розрахункових точках.

В електроустановках напругою понад 1000 В активний опір елементів мережі враховується тільки у випадках, коли виконується умова:

$$r_{рез} \geq \frac{1}{3} \cdot x_{рез}, \quad (1)$$

де $r_{рез}$, $x_{рез}$ — відповідно активний та реактивний результуючий опір усіх елементів мережі, Ом.

Кожний елемент мережі необхідно виразити відповідним опором (рис. 2).

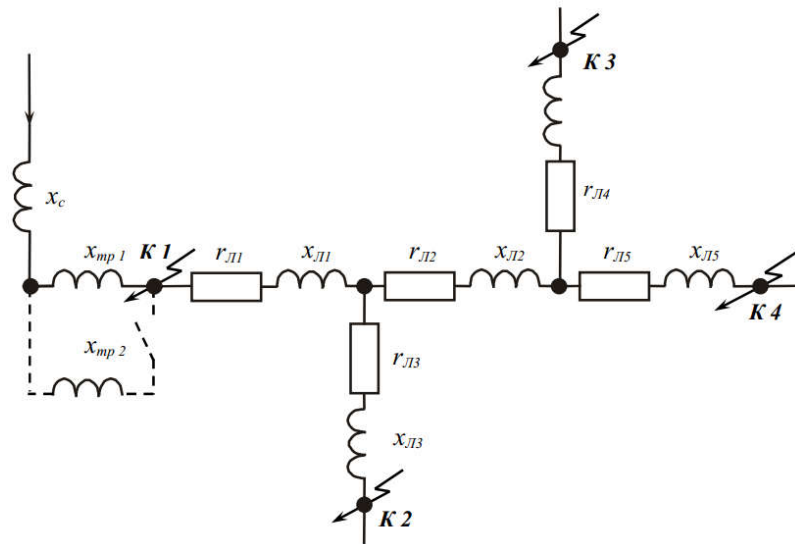


Рис. 2 — Схема заміщення електричної мережі (рис. 1)

Для того щоб знайти еквівалентний опір мережі необхідно привести всі опори елементів мережі до однієї напруги, яку називають **базисною**. За базисну напругу приймають, як правило напругу того ступеню, де знаходиться точка к.з., базисна напруга визначається як:

$$U_b = 1,05 \cdot U_n, \quad (2)$$

Опір елементів електричної мережі в практичних одиницях приведений до базисної напруги визначають за наступними виразами:

- опір лінії:

$$r_{л(\delta)} = r_0 \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\delta}}{U_{с.н}} \right)^2, \quad (3)$$

$$x_{л(\delta)} = x_0 \cdot l \cdot \left(\frac{U_{\delta}}{U_{с.н}} \right)^2, \quad (4)$$

де r_0 , x_0 - відповідно питомий активний та індуктивний опори лінії, Ом/км; l - довжина лінії, км; $U_{с.н}$ - середня номінальна напруга ступеня з якого виконується перерахунок, кВ. $U_{с.н} = 1,05 \cdot U_H$;

– опір трансформатора:

$$x_{mp(\delta)} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{н.мп}}, \quad (5)$$

де U_K - напруга короткого замикання трансформатора, %; $S_{н.тр}$ - номінальна потужність трансформатора, МВА;

– опір генератора:

$$x_{mp(\delta)} = x_{*d}'' \cdot \frac{U_{\delta}^2}{S_{н.г}}, \quad (6)$$

де x_{*d} - індуктивний опір генератора у відносних одиницях; $S_{н.г}$ - номінальна потужність генератора, МВА.

Результуючий опір мережі до точки короткого замикання:

$$z_{рез(\delta)} = \sqrt{(\sum r_{(\delta)i})^2 + (\sum x_{(\delta)i})^2}, \quad (7)$$

де $\sum r_{(\delta)i}$ – сума активних опорів елементів мережі до точки к.з., Ом; $\sum x_{(\delta)i}$ – сума реактивних опорів елементів мережі до точки к.з., Ом.

Для складних схем користуються методом відносних одиниць. В цьому випадку всі величини схеми виражають у відносних одиницях (в частках) від базисних величин. В якості основної базисної величини приймають базисну потужність. Базисна потужність приймається рівною довільному значенню або, для зручності розрахунку, кратною 10 МВА (10, 100, 1000 та ін.).

Базисні величини пов'язані між собою наступними виразами:

$$S_{\delta} = \sqrt{3} \cdot U_{\delta} \cdot I_{\delta}, \quad (8)$$

$$I_{\bar{o}} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}}}, \quad (9)$$

$$z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\bar{o}}}, \quad (10)$$

$$z_{\bar{o}} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\bar{o}}}, \quad (11)$$

Опір елементів електричної мережі у відносних одиницях приведений до базисних умов визначають за наступними виразами:

– опір лінії:

$$r_{*л}(\bar{o}) = r_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}i}^2}, \quad (12)$$

$$x_{*л}(\bar{o}) = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}i}^2}, \quad (13)$$

де $U_{\bar{o}i}$ - базисна напруга i -го ступеню мережі, кВ.

– опір трансформатора:

$$x_{*mp}(\bar{o}) = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{н.мр}}, \quad (14)$$

– опір генератора:

$$x_{*г}(\bar{o}) = x_{*г}'' \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{S_{н.г}}, \quad (15)$$

Якщо опір елемента схеми задається в іменованих одиницях то перевести його у відносні базисні одиниці можна за виразом:

$$x_{*(\bar{o})} = x \cdot \frac{S_{\bar{o}}}{U_{\bar{o}}^2}, \quad (16)$$

де $S_{\bar{o}}$ - базисна потужність, МВА.

Результуючий опір мережі до точки к.з.:

$$z_{*рез}(\bar{o}) = \sqrt{(\sum r_{*(\bar{o})i})^2 + (\sum x_{*(\bar{o})i})^2}, \quad (17)$$

Якщо відомо потужність або струм короткого замикання в місці приєднання до системи, то крім опорів схеми, що розглядалися вище, до схеми заміщення заносять також опір системи (від джерела живлення до місця

приєднання сільської електричної мережі).

Опір системи в практичних одиницях визначають за виразами:

$$x_{c(\bar{o})} = \frac{U_{\bar{o}}^2}{S_{\kappa.c}^{(3)}}, \quad (18)$$

$$x_{c(\bar{o})} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\kappa.c}^{(3)}}, \quad (19)$$

де $S_{\kappa.c}$ - потужність трифазного к.з. на шинах системи, МВА. $I_{\kappa.c}$ - струм трифазного к.з. на шинах системи, кА.

Опір системи у відносних одиницях визначають за виразами:

$$x_{*c(\bar{o})} = \frac{S_{\bar{o}}}{S_{\kappa.c}^{(3)}}, \quad (20)$$

$$x_{*c(\bar{o})} = \frac{I_{\bar{o}}}{I_{\kappa.c}^{(3)}}, \quad (21)$$

Струм трифазного к.з. визначається за наступними виразами.

В практичних одиницях:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot z_{рез.(\bar{o})}}, \quad (22)$$

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{U_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot x_{рез.(\bar{o})}}, \quad (23)$$

У відносних одиницях:

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{I_{\bar{o}}}{z_{*рез.(\bar{o})}}, \quad (24)$$

$$I_{\kappa}^{(3)} = \frac{I_{\bar{o}}}{x_{*рез.(\bar{o})}}, \quad (25)$$

Ударний струм трифазного к.з. (миттєве значення) визначається за виразом:

$$i_{\gamma}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot k_{\gamma} \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (26)$$

де k_{γ} – ударний коефіцієнт;

– при коротких замиканнях на шинах 35 та 10 кВ підстанцій із напругою вищого ступеня 110 кВ і більше $k_{\gamma} = 1,8$;

– при к.з. на шинах 35 та 10 кВ підстанцій з вищим ступенем напруги 35 кВ $k_y = 1,5$;

– при к.з. у розподільних мережах напругою 10 кВ, на шинах 10 кВ споживчих підстанцій 10/0,4 кВ та в низьковольтних мережах напругою 0,38/0,22 кВ $k_y = 1$.

Діюче значення повного струму трифазного к.з. за перший період визначається за виразом:

$$I_{y}^{(3)} = I_{\kappa}^{(3)} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2}, \quad (27)$$

Для мереж напругою 10 та 0,38 кВ $k_y = 1$, тоді для таких мереж справедливо, що

$$I_{y}^{(3)} = I_{\kappa}^{(3)}$$

Струм двофазного к.з. (мінімальний струм к.з. в мережах напругою 6...35 кВ):

$$I_{y}^{(2)} = 0,87 \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (28)$$

Потужність трифазного к.з. визначається за наступними виразами:

- в практичних одиницях:

$$S_{\kappa}^{(3)} = \sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}} \cdot I_{\kappa}^{(3)}, \quad (29)$$

- у відносних одиницях:

$$S_{\kappa}^{(3)} = \frac{S_{\bar{o}}}{x_{*рез(\bar{o})}}, \quad (30)$$

Для визначення параметрів перехідного процесу при КЗ необхідно використовувати формули:

Повний струм КЗ (з урахуванням аперіодичної складової):

$$I_{\kappa}(t) = I_{пер} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi) + I_{апер} e^{\frac{-t}{T_a}}, \quad (31)$$

де $I_{пер}$ - усталене (періодичне) значення струму КЗ, $I_{апер}$ - початкове значення аперіодичної складової, $\omega = 2\pi f$ - кутова частота, T_a - стала часу аперіодичної складової.

Аперіодична складова струму:

$$I_{анер} = I_{нер} \cdot \frac{X}{\sqrt{X^2 + R^2}}, \quad (32)$$

де X - реактивний опір кола КЗ, R - активний опір (для високовольтних мереж малий, тому його можна знехтувати або взяти наближено $R/X \approx 0,1$).

Часова стала аперіодичної складової:

$$T_a = \frac{L}{R}, \quad (33)$$

де $L = X / \omega$ - індуктивність кола КЗ, R - активний опір.

Ударний струм КЗ:

$$I_{уд} = k_y \cdot I_k, \quad (34)$$

де k_y - коефіцієнт ударного струму (залежить від рівня напруги мережі).

2. Завдання

Споживча ТП 10/0,4 кВ (рис. 1) отримує живлення від районної трансформаторної підстанції (РТП) 35/10 кВ лінією 10 кВ довжиною l_2 , км, що виконана проводом АС перерізом F_2 , мм². РТП 35/10 кВ із n трансформаторами, потужністю $S_{нтр}$, МВА, приєднана до системи електропостачання С, що має потужність к.з. $S_{к.с.}$, МВА, повітряною лінією 35 кВ довжиною l_1 , км, що виконана проводом марки АС перерізом F_1 , мм². Визначити струм трифазного та двофазного к.з, ударний струм та потужність трифазного к.з. в точках К-1 та К-2. Вихідні дані для розрахунку за варіантами наведені в таблиці 4.

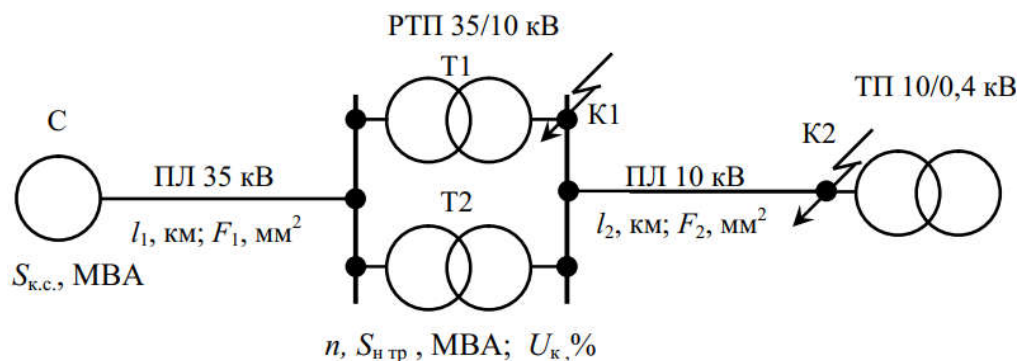


Рис. 1 – Розрахункова схема мережі

3. Приклад виконання завдання

Визначити струм та потужність трифазного короткого замикання в точках К1 та К2 електричної мережі, що наведена на рис. 2. Активним опором елементів мережі знехтувати. Вихідні дані для розрахунку наведені на схемі (рис. 3). Задачу розв'язати методом практичних та відносних одиниць.

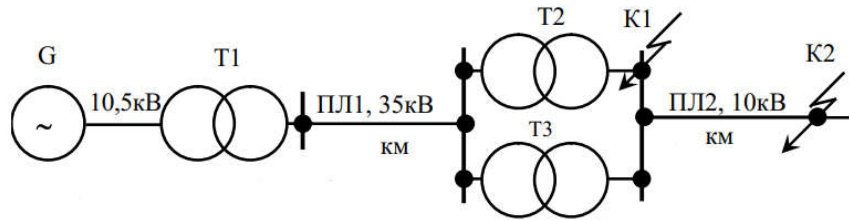


Рис. 2 – Розрахункова схема електричної мережі

1. За розрахунковою схемою (рис. 2) складаємо еквівалентну схему заміщення мережі і зводимо її до простішого виду (рис. 3).

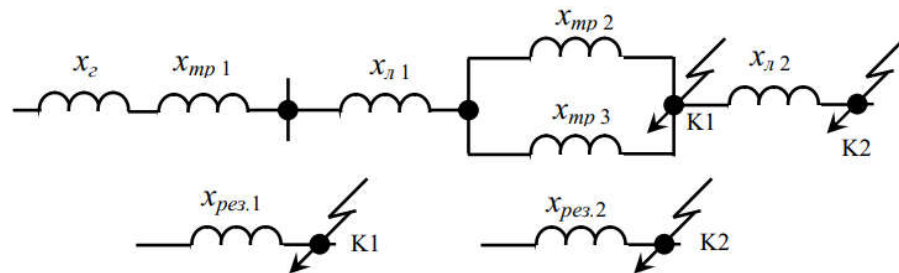


Рис. 3 – Еквівалентні схеми заміщення мережі

Дані для розрахунку з таблиці 1:

Потужність к.з.: $S_{к.з.} = 100$ МВА;

Довжина ПЛ 35 кВ: $l_1 = 20$ км;

Марка проводу ПЛ 35 кВ: АС-120

Кількість трансформаторів: $n = 2$;

Номінальна потужність трансформатора: $S_{н.тр} = 6.3$ МВА;

Напруга короткого замикання трансформатора: $U_k = 7.5\%$;

Довжина ПЛ 10 кВ: $l_2 = 3.0$ км;

Марка проводу ПЛ 10 кВ: АС-35;

2. Виконаємо розрахунок у відносних одиницях.

2.1. Визначення базисних параметрів

Приймаємо базисну потужність: $S_6=100$ МВА.

- базисна напруга на стороні 35 кВ:

$$U_{\delta 1} = 1,05 \cdot 35 = 36,75 \text{ кВ}$$

- базисна напруга на стороні 10 кВ:

$$U_{\delta 2} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ кВ}$$

- базисний струм на стороні 35 кВ:

$$I_{\delta 1} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 36,75} = 1,57 \text{ кА}$$

- на стороні 10 кВ:

$$I_{\delta 2} = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_{\delta 2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,49 \text{ кА}$$

- базисний опір:

$$x_{\delta 1} = \frac{U_{\delta 1}^2}{S_6} = \frac{36,75^2}{100} = 13,51 \text{ Ом}$$

$$x_{\delta 2} = \frac{U_{\delta 2}^2}{S_6} = \frac{10,5^2}{100} = 1,10 \text{ Ом}$$

2.2. Визначення опорів у відносних одиницях

Опір системи електропостачання

$$x_c^* = \frac{S_6}{S_{к.с}} = \frac{100}{100} = 1,0 \text{ у.о.}$$

Опір повітряної лінії 35 кВ

- знаходимо питомий реактивний опір проводу АС-120: $x_0 = 0,4$ Ом/км.

- опір лінії:

$$x_{л1} = x_0 \cdot l_1 = 0,4 \cdot 20 = 8,0 \text{ Ом}$$

- переведемо у відносні одиниці:

$$x_{л1}^* = \frac{x_{л1}}{x_{\delta 1}} = \frac{8,0}{13,51} = 0,59 \text{ у.о.}$$

Опір трансформатора 35/10 Кв

$$x_{mp}^* = \frac{U_{\kappa} \cdot S_{\delta}}{100 \cdot S_{н.мп} \cdot n} = \frac{7,5 \cdot 100}{100 \cdot 6,3 \cdot 2} = 0,0595 \text{ у.о.}$$

Опір повітряної лінії 10 кВ

- для проводу АС-35: $x_0 = 0,4 \text{ Ом/км.}$

$$x_{л2} = x_0 \cdot l_2 = 0,4 \cdot 3,0 = 1,2 \text{ Ом}$$

- переведемо у відносні одиниці:

$$x_{л2}^* = \frac{x_{л2}}{x_{\delta 2}} = \frac{1,2}{1,10} = 1,09 \text{ у.о.}$$

2.3. Визначення результуючих опорів:

- до точки К-1 (35 кВ, шини РТП)

$$x_{рез1}^* = x_c^* + x_{л1}^* + x_{mp}^* = 1,0 + 0,59 + 0,0595 = 1,65 \text{ у.о.}$$

- до точки К-2 (10 кВ, шини ТП)

$$x_{рез2}^* = x_{рез1}^* \cdot x_{л2}^* = 1,65 \cdot 1,09 = 2,74 \text{ у.о.}$$

2.4. Визначення струмів короткого замикання:

Трифазний струм КЗ в точці К-1.

$$I_{\kappa 1}^* = \frac{I_{\delta 1}}{x_{рез1}^*} = \frac{1,57}{1,65} = 0,95$$

- переведемо у реальні значення:

$$I_{\kappa 1} = I_{\kappa 1}^* \cdot I_{\delta 1} = 0,95 \cdot 1,57 = 1,49 \text{ кА}$$

Трифазний струм КЗ в точці К2

$$I_{\kappa 2}^* = \frac{I_{\delta 2}}{x_{рез2}^*} = \frac{5,49}{2,74} = 2,00 \text{ у.о.}$$

- переведемо у реальні значення

$$I_{\kappa 2} = I_{\kappa 2}^* \cdot I_{\delta 2} = 2,00 \cdot 5,49 = 10,98 \text{ кА}$$

Визначення ударного струму КЗ

$$I_{y\delta} = k_y \cdot I_{\kappa 1}^* = 1,8 \cdot 0,95 = 1,71 \text{ у.о.}$$

- переведемо у реальні значення:

$$I_{y\delta} = 1,71 \cdot 1,57 = 2,69 \text{ кА}$$

$$I_{y\partial 2} = k_y \cdot I_{\kappa 2}^* = 1,5 \cdot 2 = 3 \text{ у.о.}$$

- переведемо у реальні значення:

$$I_{y\partial 2} = 3,00 \cdot 5,49 = 16,47 \text{ кА}$$

Визначення потужності короткого замикання:

Потужність КЗ в точці К-1

$$S_{\kappa 1}^* = \frac{S_{\bar{o}}}{x_{*_{\text{рез}1}}} = \frac{100}{1,65} = 60,6 \text{ у.о.}$$

Потужність КЗ в точці К-2

$$S_{\kappa 2}^* = \frac{S_{\bar{o}}}{x_{*_{\text{рез}2}}} = \frac{100}{2,74} = 36,5 \text{ у.о.}$$

- переведемо у реальні значення:

$$S_{\kappa 1} = 60,6 \cdot 100 = 6060 \text{ МВА}$$

$$S_{\kappa 2} = 36,5 \cdot 100 = 3650 \text{ МВА}$$

3. Розрахунок у практичних одиницях

3.1. Визначення базисних параметрів

- базисна напруга

На стороні 35 кВ:

$$U_{\bar{o}1} = 1,05 \cdot 35 = 36,75 \text{ кВ}$$

На стороні 10 кВ:

$$U_{\bar{o}1} = 1,05 \cdot 10 = 10,5 \text{ кВ}$$

- базисна потужність

$$S_{\bar{o}} = 100 \text{ кВ}$$

- базисна струм

для 35 кВ:

$$I_{\bar{o}1} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}1}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 36,75} = 1,57 \text{ кА}$$

для 10 кВ:

$$I_{\bar{o}2} = \frac{S_{\bar{o}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\bar{o}2}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,49 \text{ кА}$$

3.2. Визначення опорів у практичних одиницях:

- опір системи електропостачання

$$x_c = \frac{U_{\delta 1}^2}{S_{к.с}} = \frac{36,75^2}{100} = 13,51 \text{ Ом}$$

- опір повітряної лінії 35 кВ

Дано: АС-120, питомий реактивний опір $x_0 = 0.4 \text{ Ом/км}$, довжина $l_1 = 20 \text{ км}$.

$$x_{л1} = x_0 \cdot l_1 = 0,4 \cdot 20 = 8,0 \text{ Ом}$$

- опір трансформатора 35/10 кВ

Дано: $S_{н.тр} = 6.3 \text{ МВА}$, $U_k = 7.5\%$, кількість трансформаторів $n=2$.

$$x_{тр} = \frac{U_k}{100} \cdot \frac{U_{\delta 1}^2}{S_{н.тр} \cdot n} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{36,75^2}{6,3 \cdot 2} = 0,8 \text{ Ом}$$

- опір повітряної лінії 10 кВ

Дано: АС-35, питомий реактивний опір $x_0 = 0.4 \text{ Ом/км}$, довжина $l_2 = 3.0 \text{ км}$.

$$x_{л2} = x_0 \cdot l_2 = 0,4 \cdot 3,0 = 1,2 \text{ Ом}$$

3.3. Визначення результуючих опорів

до точки К1К1К1 (35 кВ, шини РТП)

$$x_{рез1} = x_c + x_{л1} + x_{тр} = 13,51 + 8,0 + 0,8 = 22,31 \text{ Ом}$$

до точки К2К2К2 (10 кВ, шини ТП)

$$x_{рез2} = x_{рез1} + x_{л2} = 22,31 + 1,2 = 23,51 \text{ Ом}$$

3.4. Визначення струмів короткого замикання

- трифазний струм КЗ в точці К1

$$I_{к1} = \frac{U_{\delta 1}}{\sqrt{3} \cdot x_{рез1}} = \frac{36,75}{\sqrt{3} \cdot 22,31} = 0,95 \text{ кА}$$

- трифазний струм КЗ в точці К2

$$I_{к2} = \frac{U_{\delta 2}}{\sqrt{3} \cdot x_{рез2}} = \frac{10,5}{\sqrt{3} \cdot 23,51} = 0,26 \text{ кА}$$

3.5. Визначення ударного струму КЗ

$$I_{y\delta 1} = k_y \cdot I_{к1} = 1,8 \cdot 0,95 = 1,71 \text{ кА}$$

$$I_{y\partial 2} = k_y \cdot I_{\kappa 2} = 1,5 \cdot 0,26 = 0,39 \text{ кА}$$

3.6. Визначення потужності короткого замикання

- потужність КЗ в точці К1

$$S_{\kappa 1} = \frac{U_{\bar{6}1}^2}{x_{рез1}} = \frac{36,75^2}{22,31} = 60,6 \text{ МВА}$$

- потужність КЗ в точці К2

$$S_{\kappa 2} = \frac{U_{\bar{6}2}^2}{x_{рез2}} = \frac{10,5^2}{23,51} = 4,7 \text{ МВА}$$

Таблиця 1 – Підсумкові результати для обох методів

Величина	Практичні одиниці	Відносні одиниці
Ik1 (трифазний струм КЗ)	0.95 кА	0.95 у.о.
Ik2 (трифазний струм КЗ)	0.26 кА	2.00 у.о.
Iуд1 (ударний струм КЗ)	1.71 кА	1.71 у.о.
Iуд2 (ударний струм КЗ)	0.39 кА	3.00 у.о.
Sk1 (потужність КЗ)	60.6 МВА	60.6 у.о.
Sk2 (потужність КЗ)	4.7 МВА	36.5 у.о.

Таким чином, ми отримали однакові результати в практичних і відносних одиницях, що підтверджує правильність розрахунків.

4. Визначення перехідного процесу для точок К1 та К2.

4.1. Для точки К1 (35 кВ, шини РТП):

-трифазний струм КЗ: $I_{\kappa 1} = 0.95 \text{ кА}$;

-реактивний опір: $X_{рез1} = 22.31 \text{ Ом}$;

-активний опір: $R_{рез1} \approx X_{рез1} \times 0.1 = 2.23 \text{ Ом}$

Аперіодична складова:

$$I_{анеп,1} = 0,95 \cdot \frac{22,31}{\sqrt{22,31^2 + 2,23^2}}, \quad (35)$$

$$I_{анеп,1} = 0,95 \cdot \frac{22,31}{\sqrt{497,7 + 4,97}} = 0,95 \cdot \frac{22,31}{22,44} = 0,95 \cdot 0,994 = 0,94 \text{ кА}$$

Часова стала аперіодичної складової:

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{22,31}{314 \cdot 2,23} = \frac{22,31}{700,02} = 0,032 \text{ с}$$

Ударний струм:

$$I_{уд,1} = 1,8 \cdot 0,95 = 1,71 \text{ кА}$$

Отже, струм в точці К1 змінюється за законом:

$$I_{\kappa 1}(t) = 0,95 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + \varphi) + 0,94e^{\frac{-t}{0,032}}$$

4.2. Для точки К2 (10 кВ, шини ТП)

- трифазний струм КЗ: $I_{\kappa 2} = 0.26 \text{ кА}$;

- реактивний опір: $X_{рез2} = 23.51 \text{ Ом}$;

- активний опір: $R_{рез2} \approx X_{рез2} \times 0.1 = 2.35 \text{ Ом}$;

Аперіодична складова:

$$I_{анеп,2} = 0,26 \cdot \frac{23,51}{\sqrt{23,51^2 + 2,35^2}}, \quad (36)$$

$$I_{анеп,2} = 0,26 \cdot \frac{23,51}{\sqrt{23,51^2 + 2,35^2}} = 0,26 \cdot \frac{23,51}{23,63} = 0,26 \cdot 0,995 = 0,26 \text{ кА}$$

Часова стала аперіодичної складової:

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{23,51}{314 \cdot 2,35} = \frac{23,51}{737,9} = 0,032 \text{ с}$$

Ударний струм:

$$I_{уд,2} = 1,5 \cdot 0,26 = 0,39 \text{ кА}$$

Отже, струм в точці К2 змінюється за законом:

$$I_{\kappa 2}(t) = 0,26 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314t + \varphi) + 0,26e^{\frac{-t}{0,032}}$$

Таблиця 2. – Результати розрахунку

Величина	Точка К1 (35 кВ)	Точка К2 (10 кВ)
Трифазний струм КЗ I_k	0.95 кА	0.26 кА
Аперіодична складова $I_{апер}$	0.94 кА	0.26 кА
Часова стала T_a	0.032 с	0.032 с
Ударний струм $I_{уд}$	1.71 кА	0.39 кА

5. Розрахунок перехідного струму короткого замикання в розрахункових точках, виконується аналогічно попередній практичній роботі ПРЗ, пункт 5., з обраними моментами часу.

Моменти часу: $t = 0$, $t = 0.01$ с, $t = 0.05$ с.

- для точки К1:

- При $t=0$:

$$I_{к1}(0) = 0,95 \cdot 0 + 0,94 \cdot 1 = 0,94 \text{ кА}$$

- При $t = 0.01$ с:

$$I_{к1}(0,01) = 0,95 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(314 \cdot 0,01) + 0,94 e^{\frac{-0,01}{0,032}}$$

$$I_{к1}(0,01) \approx 0,95 \cdot 1,414 \cdot 0,309 + 0,94 \cdot 0,727 = 0,415 + 0,684 \approx 1,099 \text{ кА}$$

- При $t = 0.05$ с:

$$I_{к1}(0,05) \approx 0,95 \cdot 1,414 \cdot 0,951 + 0,94 \cdot 0,223 = 1,267 + 0,21 \approx 1,477 \text{ кА}$$

Аналогічно розраховуємо для точки К2.

Таблиця 3. - Результатів зміни струму в точках К1 і К2 при короткому замиканні для вибраних моментів часу

Час t , с	Струм у точці К1, кА	Струм у точці К2, кА
0.0	0.94	0.26
0.010	1.10	0.33
0.050	1.48	0.46

Час t , с	Струм у точці К1, кА	Струм у точці К2, кА
0.100	1.51	0.50

Отримані результати дозволяють аналізувати зміну струму після КЗ, що важливо для вибору комутаційної апаратури та релейного захисту.

4. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися порядком та методом виконання практичного завдання;
3. За вихідними даними, визначити струм та потужність трифазного короткого замикання в точках К1 та К2.
4. Виконати розрахунок перехідного струм короткого замикання в розрахункових точках;
5. Проаналізувати результати виконаної роботи;
6. Відповісти на контрольні питання;
7. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
8. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні питання

1. Що називається коротким замиканням?
2. Які наслідки виникнення струмів к.з. в мережі?
3. Які є види коротких замикань?
4. З якою метою розраховують струми к.з. в електричних мережах?
5. Які методи розрахунку струмів к.з. існують?
6. В яких випадках для розрахунку струмів к.з. використовують метод іменованих (практичних) одиниць?

7. В яких випадках для розрахунку струмів к.з. використовують метод відносних (умовних) одиниць?
8. Порядок розрахунку струмів к.з.
9. Як приводяться опри мережі до базисних умов.
10. Що таке розрахункова схема мережі?
11. Що таке еквівалентна схема мережі?
12. Як враховується активний опір елементів при розрахунку струмів к.з. в мережах напругою понад 1000В?
13. Як визначаються опори окремих елементів мережі?
14. Як враховується опір системи електропостачання?

Таблиця 4 – Вихідні дані для розрахунку

Варіант	$S_{к.с.}$, мВА	l_1 , км	F , мм ² 1	n , шт	$S_{нтр}$, мВА	U_k , %	l_2 , км	F , мм ² 2
0	100	20,0	АС-120	2	6,3	7,5	3,0	АС-35
1	130	15,0	АС-120	1	10,0	7,5	4,0	АС-50
2	160	10,0	АС-95	2	2,5	6,5	6,0	АС-35
3	190	4,0	АС-70	1	6,3	7,5	8,0	АС-70
4	220	30,0	АС-120	2	1,0	6,5	10,0	АС-95
5	250	26,0	АС-120	1	2,5	6,5	12,0	АС-95
6	280	35,0	АС-95	2	1,6	6,5	14,0	АС-70
7	310	17,0	АС-95	1	1,0	6,5	16,0	АС-50
8	340	33,0	АС-150	2	10,0	7,5	17,0	АС-120
9	370	11,0	АС-95	1	1,0	6,5	2,0	АС-70
10	400	23,0	АС-150	2	4,0	7,5	15,0	АС-50
11	430	21,0	АС-95	1	1,6	6,5	3,0	АС-50
12	460	15,0	АС-95	2	6,3	7,5	13,0	АС-70

13	295	10,0	AC-95	1	4,0	7,5	7,0	AC-35
14	265	5,0	AC-70	2	2,5	6,5	11,0	AC-50
15	235	30,0	AC-150	1	6,3	7,5	9,0	AC-95
16	205	25,0	AC-120	2	1,0	6,5	7,0	AC-95
17	175	35,0	AC-150	1	2,5	6,5	5,0	AC-35
18	145	18,0	AC-95	2	1,6	6,5	12,0	AC-50
19	115	33,0	AC-95	1	1,0	6,5	10,0	AC-70
20	80	12,0	AC-70	2	10,0	7,5	8,0	AC-50

ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

Тема: Аналіз трифазного короткого замикання за допомогою MS Excel

Мета: дослідження методів чисельних розрахунків режиму ТФКЗ із реалізацією алгоритмів розрахунків у середовищі електронних таблиць MS Excel.

1. Теоретичні відомості

Трифазне коротке замикання (ТФКЗ) є одним із найпоширеніших аварійних режимів роботи електроенергетичних систем. Аналіз ТФКЗ є ключовим при виборі комутаційної та захисної апаратури, а також для оцінки перехідних процесів у мережі.

У цій роботі розглядається розрахунок ударного струму при трифазному короткому замиканні та визначення моменту комутації, за якого цей струм буде максимальним.

Аналіз режимів коротких замикань – це одне з найбільш поширених завдань при дослідженні і проектуванні електроенергетичних систем. Трифазне коротке замикання (ТФКЗ) в нерозгалуженому колі є базовим для вибору комутаційної і захисної апаратури, а також для оцінки параметрів інших видів коротких замикань. При розрахунках ТФКЗ зазвичай розглядають симетричну систему з індуктивно-активним навантаженням і активно-індуктивному характері опору лінії передачі. Такі допущення дозволяють розглядати ТФКЗ на прикладі однофазної еквівалентної схеми. Навіть при таких допущеннях аналітичне рішення приводить до досить громіздких виразів, які доводиться табулювати за допомогою комп'ютера. В решті решт, для оцінки ударного струму пропонуються наближені математичні вирази, що передбачають знаходження максимального значення ударного струму для найбільш важкого режиму ТФКЗ.

На рис.1 наведено еквівалентну розрахункову схему для аналізу ТФКЗ в разі повної симетрії, що представлена в однофазному варіанті.

При нормальному режимі ключ K розімкнений, і джерело живить мережу і навантаження, що представляють послідовно сполучену індуктивність з резистором, які визначаються виразами:

$$L = L_K + L_H,$$

(1)

$$R = r_K + R_H, \quad (2)$$

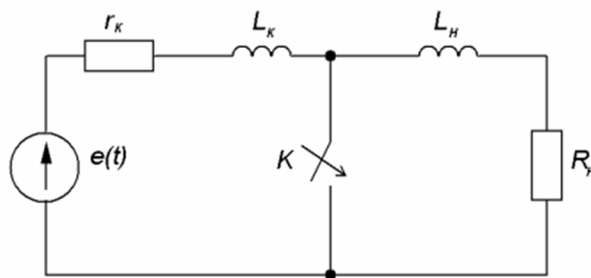


Рис. 1 – Однофазна еквівалентна схема, де навантаження представлено як активний та індуктивний опір

При короткому замиканні ключ K замикається, процеси в навантаженні визначаються затухаючою експонентою з постійною часу:

$$\tau_H = \frac{L_H}{R_H} \quad (3)$$

Величини індуктивності та опору визначаються виразами:

$$L = L_K; R = r_K; \quad (4)$$

Процес у лівій частині схеми, що містить джерело синусоїдальної напруги, можна представити вільною й змущеною складовими струмів. Змущена складова може бути визначена як сталий процес при роботі джерела на навантаження з опором

$$z_K = r_K + j\omega L_K, \quad (5)$$

де ω - частота живильної мережі.

Вільна складова визначається загасаючою експонентою з постійної часу

$$\tau_n = \frac{L_K}{R_K}, \quad (6)$$

При аналізі режиму ТФКЗ у такий спосіб слід вирішити наступні завдання:

- 1) забезпечення розрахунків попереднього режиму живлення навантаження;
- 2) зміна параметрів кола в заданий момент часу;
- 3) визначення величини ударного струму з урахуванням заданого моменту ТФКЗ;
- 4) визначення моменту часу виникнення режиму ТФКЗ, відповідного до максимальної величини ударного струму.

Диференціальні рівняння перед аварійного режиму записуються у вигляді:

$$L \cdot \frac{di}{dt} + r \cdot i = E_m \cdot \sin \omega t, \quad (7)$$

де E_m і ω - відповідно амплітуда і частота напруги живильної мережі.

При чисельному інтегруванні необхідно задати початкове значення струму $I(0)$, яке можна безпосередньо обчислити методом комплексних амплітуд. Комплексний опір кола нормального режиму:

Амплітуда струму нормального режиму:

$$z = (r_K + R_H) + j\omega(L_K + L_H), \quad (8)$$

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{(r_K + R_H)^2 + \omega^2(L_K + L_H)^2}}, \quad (9)$$

а фаза струму нормального режиму

$$\varphi_K = \arctg \frac{\omega(L_K + L_H)}{r_K + R_H} = \arccos \frac{r_K + R_H}{\sqrt{(r_K + R_H)^2 + \omega^2(L_K + L_H)^2}}, \quad (10)$$

Струм попереднього режиму:

$$I(0) = -I_m \cdot \sin \varphi_K, \quad (11)$$

Струм має індуктивний характер і відстає від напруги на кут φ_K , звідси можна знайти початкове значення струму:

$$I(0) = -I_m \cdot \sin \varphi_K, \quad (12)$$

При побудові електронної таблиці використовуємо для інтегрування метод Ейлера, що відповідає рекурентному співвідношенню

$$i_i(t_k + \Delta t) = i_{i-1}(t_k) + \Delta t \cdot \frac{di_{i-1}(t_k)}{dt}, \quad (13)$$

де $i_i(t_k + \Delta t)$ стан системи в майбутньому; $i_{i-1}(t_k)$ стан системи в даному проміжку часу; $\Delta t \cdot \frac{di_{i-1}(t_k)}{dt}$ крок і швидкість зміни параметра відповідно.

Похідні $\frac{di}{dt}$ обчислюються по правій частині диференціального рівняння (7), представленого у формі завдання Коші. Це рівняння, як для нормального режиму, так і для режиму короткого замикання, можна представити в єдиній формі зі змінними параметрами:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (E_m \cdot \sin \omega t - R \cdot i), \quad (14)$$

Тут для нормального режиму $L = L_K + L_H$; $R = r_K + R_H$, а для режиму короткого замикання $L = L_K$; $R = r_K$.

Момент виникнення короткого замикання будемо задавати моментом t_k , причому $t_k > T = \frac{2\pi}{\omega}$, що дозволить відстежити період нормального режиму, що встановився. Розрахунки режиму ТФКЗ слід здійснювати до загасання перехідного процесу, тривалість інтервалу цього процесу може бути визначена орієнтовно як:

$$(3/5)\tau_m = (3/5)\frac{L_K}{r_K} \quad (15)$$

Задача визначення максимуму ударного струму може розглядатися як задача чисельної параметричної оптимізації. В цій задачі як критерій оптимізації на досягнення максимуму використовується величина ударного струму, що визначається за допомогою функції МАКСИМУМ(), а параметром оптимізації є момент виникнення ТФКЗ. Ця оптимізаційна задача в такій постановці може бути вирішена в електронних таблицях MS Excel за допомогою функції «Пошук рішення»

2. Завдання

Завдання: Досліджується трифазне коротке замикання в нерозгалуженій мережі. Розглядається питання пошуку моменту комутації, при якому ударний струм при короткому замиканні буде максимальним. Оптимізація здійснюється в електронних таблицях MS Excel за допомогою надбудови «Пошук розв'язання».

3. Хід виконання практичної роботи

Процедура рішення поставленої задачі може бути виконана поетапно:

1. Введення вихідних даних у клітини й присвоєння цим клітинам власних імен – стовпці A(1:8) і B(1:8) рис. 2:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Вихідні дані			Амплітуда тока нормального режима				15,767648		
2	Em	100		Начальное значение тока нормального режима					-15,57	
3	Lk	0,2		Ударный Ток		248,88531				
4	Ln	1								
5	rk	0,1								
6	Rn	5								
7	w	3,141592654		time	i	Em sin wt	Imax	di/dt	L	R
8	dlt	0,001		0	-15,57166424	0	15,767648	66,179573	1,2	5,1
9	Час виникнення КЗ			0,001	-15,50548466	0,3141587	15,767648	66,160109	1,2	5,1
10	tk	2,022967596		0,002	-15,43932456	0,6283144	15,767648	66,140725	1,2	5,1
11	Параметри аварійного режиму			0,003	-15,37318383	0,9424638	15,767648	66,121418	1,2	5,1
12	zk	0,636226513		0,004	-15,30706241	1,256604	15,767648	66,102185	1,2	5,1
13	flk	1,412965137		0,005	-15,24096023	1,5707317	15,767648	66,083024	1,2	5,1
14	cos flk	0,157176725		0,006	-15,1748772	1,884844	15,767648	66,063931	1,2	5,1
15	Параметри нормального режиму			0,007	-15,10881327	2,1989376	15,767648	66,044904	1,2	5,1
16	zn	5,90504906		0,008	-15,04276837	2,5130095	15,767648	66,02594	1,2	5,1
17	fin	0,560982116		0,009	-14,97674243	2,8270567	15,767648	66,007036	1,2	5,1
18	cos fin	0,846733016		0,01	-14,91073539	3,1410759	15,767648	65,988189	1,2	5,1
19	Опори системи			0,011	-14,8447472	3,4550641	15,767648	65,969396	1,2	5,1
20	L	1,2		0,012	-14,77877781	3,7690183	15,767648	65,950654	1,2	5,1
21	R	5,1		0,013	-14,71282715	4,0829352	15,767648	65,931961	1,2	5,1
22	Час максимуму ударного струму			0,014	-14,64689519	4,3968118	15,767648	65,913314	1,2	5,1
23	tуд	2,92		0,015	-14,58098188	4,7106451	15,767648	65,894711	1,2	5,1

Рис. 2.

2. Задання тимчасових параметрів –моменту виникнення ТФКЗ –рис. 2, рис. 3 - Рядок Час виникнення КЗ.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Вихідні дані			Амплітуда струму нормального режиму				15,76765		
2	Em	100								
3	Lk	0,2		Початкове значення струму нормального режиму					-15,5717	
4	Lh	1								
5	rk	0,1		Ударний струм			-248,86696			
6	Rh	5								
7	w	3,141592654		time	i	Em sin wt	Imax	di/dt	L	R
8	dlt	0,001		0	-15,57166424	0	15,767648	66,17957	1,2	5,1
9	Час виникнення КЗ			0,001	-15,50548466	0,31415875	15,767648	66,16011	1,2	5,1
10	tk	3,017950632		0,002	-15,43932456	0,6283144	15,767648	66,14072	1,2	5,1
11	Параметри аварійного режиму			0,003	-15,37318383	0,94246384	15,767648	66,12142	1,2	5,1
12	zk	0,636226513		0,004	-15,30706241	1,25660399	15,767648	66,10219	1,2	5,1
13	flk	1,412965137		0,005	-15,24096023	1,57073173	15,767648	66,08302	1,2	5,1
14	cos flk	0,157176725		0,006	-15,1748772	1,88484397	15,767648	66,06393	1,2	5,1
15	Параметри нормального режиму			0,007	-15,10881327	2,19893761	15,767648	66,0449	1,2	5,1
16	zh	5,90504906		0,008	-15,04276837	2,51300954	15,767648	66,02594	1,2	5,1
17	fin	0,560982116		0,009	-14,97674243	2,82705668	15,767648	66,00704	1,2	5,1
18	cos fin	0,846733016		0,01	-14,91073539	3,14107591	15,767648	65,98819	1,2	5,1
19	Опори системи			0,011	-14,8447472	3,45506414	15,767648	65,9694	1,2	5,1
20	L	1,2		0,012	-14,77877781	3,76901827	15,767648	65,95065	1,2	5,1
21	R	5,1		0,013	-14,71282715	4,0829352	15,767648	65,93196	1,2	5,1
22	Час максимуму ударного струму			0,014	-14,64689519	4,39681183	15,767648	65,91331	1,2	5,1
23	tyd	3,92		0,015	-14,58098188	4,71064507	15,767648	65,89471	1,2	5,1

Рис. 3.

3. Обчислення косинусів фазних кутів для нормального й аварійного режимів (орієнтовно для нормального режиму $\cos\varphi = 0,8$, для аварійного 1).
Стовпці A(12:14;16:18) і B(12:14;16:18) за формулами (5), (10), (8):

12	zk	=КОРЕНЬ(B5^2+(B7*B3)^2)
13	flk	=ACOS((B5)/(КОРЕНЬ((B5)^2+B7^2*(B3)^2)))
14	cos flk	=COS(B13)

Рис. 4.

І теж саме для нормального режиму з урахуванням відповідних вихідних даних.

4. Обчислення початкового значення струму нормального режиму $i(0)$ – стовпець I(3) за формулою (12) (рис. 2, рис. 3).

5. Створення стовпців дискрет часу і напруги живильної мережі – стовпці D і F, із відповідним наростаючим кроком $\Delta t = 0,001$. Напруга живильної мережі визначається так як зображено на рис.5 як складова частина формули 6.4, відносно вихідних даних і зміни часу по стовпцю D:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Вихідні дані					Амплітуда струму нормального режиму		15,76765		
2	Em	100								
3	Lk	0,2				Початкове значення струму нормального режиму		-15,5717		
4	Ln	1								
5	rk	0,1				Ударний струм	-248,86696			
6	Rn	5								
7	w	3,141592654		time	i	Em sin wt	I _{max}	di/dt	L	R
8	dlt	0,001		0	-15,57166424	=B\$2*SIN(\$B\$7*D8)	66,17957		1,2	5,1
9	Час виникнення КЗ			0,001	-15,50548466	0,31415875	15,767648	66,16011	1,2	5,1
10	tk	3,017950632		0,002	-15,43932456	0,6283144	15,767648	66,14072	1,2	5,1
11	Параметри аварійного режиму			0,003	-15,37318383	0,94246384	15,767648	66,12142	1,2	5,1
12	zk	0,636226513		0,004	-15,30706241	1,25660399	15,767648	66,10219	1,2	5,1
13	flk	1,412965137		0,005	-15,24096023	1,57073173	15,767648	66,08302	1,2	5,1
14	cos flk	0,157176725		0,006	-15,1748772	1,88484397	15,767648	66,06393	1,2	5,1
15	Параметри нормального режиму			0,007	-15,10881327	2,19893761	15,767648	66,0449	1,2	5,1
16	zn	5,90504906		0,008	-15,04276837	2,51300954	15,767648	66,02594	1,2	5,1
17	fin	0,560982116		0,009	-14,97674243	2,82705668	15,767648	66,00704	1,2	5,1
18	cos fin	0,846733016		0,01	-14,91073539	3,14107591	15,767648	65,98819	1,2	5,1
19	Опори системи			0,011	-14,8447472	3,45506414	15,767648	65,9694	1,2	5,1
20	L	1,2		0,012	-14,77877781	3,76901827	15,767648	65,95065	1,2	5,1
21	R	5,1		0,013	-14,71282715	4,0829352	15,767648	65,93196	1,2	5,1
22	Час максимуму ударного струму			0,014	-14,64689519	4,39681183	15,767648	65,91331	1,2	5,1
23	tуд	3,92		0,015	-14,58098188	4,71064507	15,767648	65,89471	1,2	5,1

Рис. 5.

6. Створення стовпців індуктивності L і опору R, значення яких повинні обчислюватися за допомогою логічної функції MS Excel ЕСЛИ() таким чином, щоб до моменту ТФКЗ ці значення були рівні відповідно $L = L_K + L_H$; $R = r_K + R_H$, а після моменту $t_K L = L_K$; $R = r_K$.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	Вихідні дані					Амплітуда струму нормального режиму		15,76765					
2	Em	100											
3	Lk	0,2				Початкове значення струму нормального режиму		-15,5717					
4	Ln	1											
5	rk	0,1				Ударний струм	-248,86696						
6	Rn	5											
7	w	3,141592654		time	i	Em sin wt	I _{max}	di/dt	L	R			
8	dlt	0,001		0	-15,57166424	0	15,767648	66,17957	=ЕСЛИ(D8>=\$B\$10;\$B\$3;\$B\$20)				
9	Час виникнення КЗ			0,001	-15,50548466	0,31415875	15,767648	66,16011	1,2	=ЕСЛИ(D9>=\$B\$10;\$B\$5;\$B\$21)			
10	tk	3,017950632		0,002	-15,43932456	0,6283144	15,767648	66,14072	1,2	5,1			
11	Параметри аварійного режиму			0,003	-15,37318383	0,94246384	15,767648	66,12142	1,2	5,1			
12	zk	0,636226513		0,004	-15,30706241	1,25660399	15,767648	66,10219	1,2	5,1			
13	flk	1,412965137		0,005	-15,24096023	1,57073173	15,767648	66,08302	1,2	5,1			
14	cos flk	0,157176725		0,006	-15,1748772	1,88484397	15,767648	66,06393	1,2	5,1			
15	Параметри нормального режиму			0,007	-15,10881327	2,19893761	15,767648	66,0449	1,2	5,1			
16	zn	5,90504906		0,008	-15,04276837	2,51300954	15,767648	66,02594	1,2	5,1			
17	fin	0,560982116		0,009	-14,97674243	2,82705668	15,767648	66,00704	1,2	5,1			
18	cos fin	0,846733016		0,01	-14,91073539	3,14107591	15,767648	65,98819	1,2	5,1			
19	Опори системи			0,011	-14,8447472	3,45506414	15,767648	65,9694	1,2	5,1			
20	L	1,2		0,012	-14,77877781	3,76901827	15,767648	65,95065	1,2	5,1			
21	R	5,1		0,013	-14,71282715	4,0829352	15,767648	65,93196	1,2	5,1			
22	Час максимуму ударного струму			0,014	-14,64689519	4,39681183	15,767648	65,91331	1,2	5,1			
23	tуд	3,92		0,015	-14,58098188	4,71064507	15,767648	65,89471	1,2	5,1			

Рис. 6.

7. Створення стовпця струму з початковим значенням $i(0)$, яке вже було обчислено раніше (пункт-4), і з розрахунками на наступному кроці за формулою Ейлера для інтегрування диференціального рівняння (13), стовпець Е.

8. Створення стовпця для похідної струму, обчислюють за відповідними формулами правої частини диференціального рівняння (14), стовпець Н.

9. Побудова і перевірка діаграм напруги і струму й залежності їх вигляду від моменту ТФКЗ відповідно за значеннями стовпців часу (D), струму (E), напруги (F).

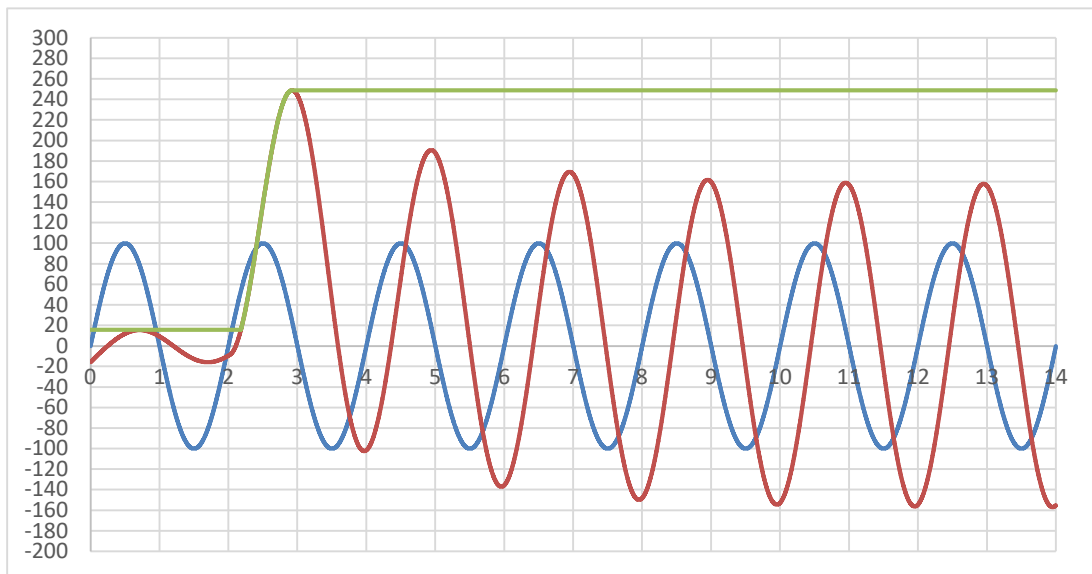


Рис. 7. а

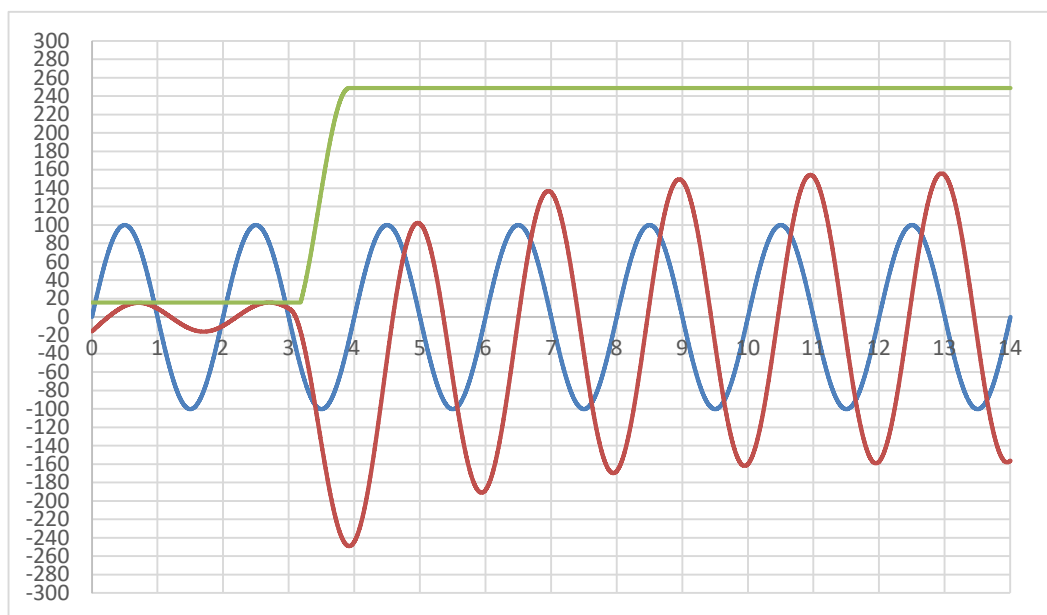
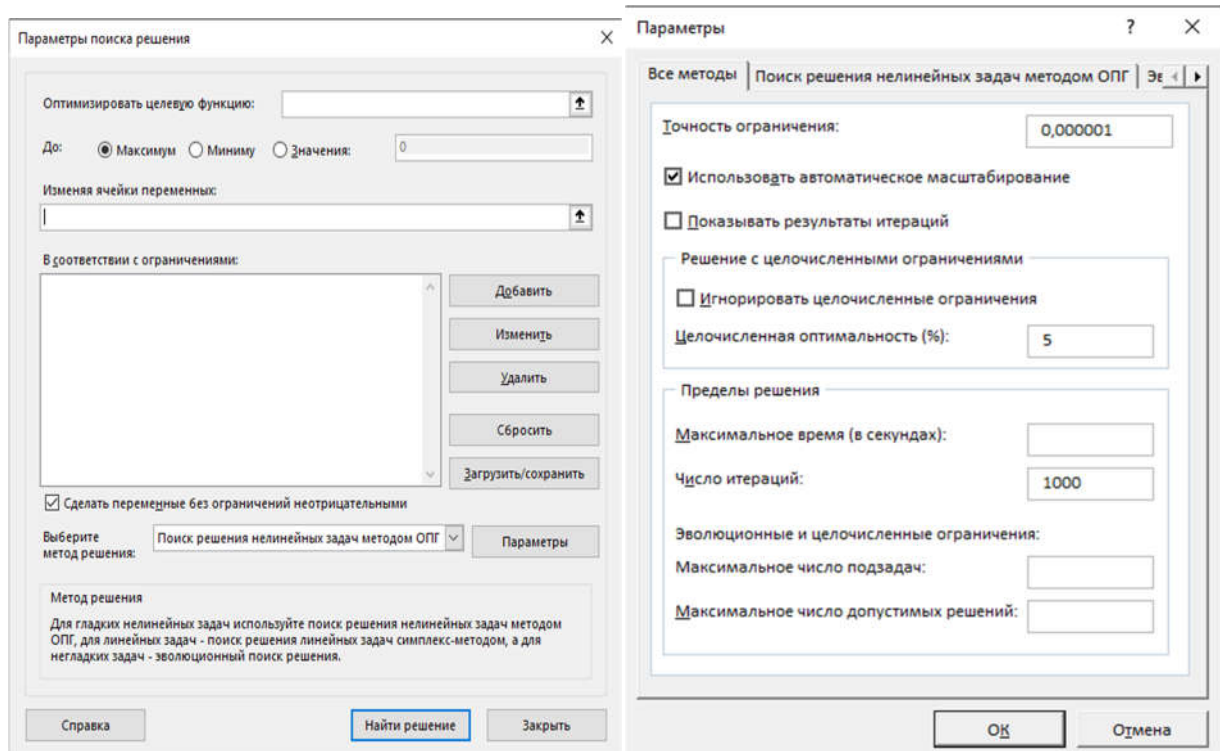


Рис.7. 6

10. Створення стовпця, що відбирає максимальне значення струму ТФКЗ залежно від графіку і стовпця струму (Е), яке й приймемо за величину ударного струму – стовпець F(5)

11. Використання функції "Пошук розв'язку" для визначення моменту виникнення ТФКЗ, який приводить до максимального значення ударного струму короткого замикання. Шлях виконання наступний – Данные – Анализ-Поиск Решения.

У параметрах функції "Поиск Решения" було встановлено: граничне число ітерацій – 1000, припустиме відхилення – 0,5 %, похідні – центральні. У рядку оптимізації цільової функції вставляється значення ударного струму, а у рядку зміни комірки значення часу виникнення КЗ. Звідси знаходяться максимальні значення ударного струму при заданні різних моментів короткого замикання з використанням функції "Поиск Решения".



Для заданого розрахунку було встановлено, що при завданні $t_{кз} = 2,1$ після оптимізації ця величина встановлюється $t_{кз} = 2,022$, значення ударного струму при цьому стає позитивним і рівним 248,88, при цьому перехідний процес носить спадаючий характер, як це наведено на рис.7, а. При завданні $t_{кз} = 2,7$ після оптимізації ця величина встановлюється $t_{кз} = 3,017$ і значення ударного струму при цьому стає від'ємним, рівним -248,86, при цьому перехідний процес носить зростаючий характер (рис.7, б).

Таким чином, наведена методика аналізу режиму трифазного короткого замикання в нерозгалуженому ланцюзі дозволяє зробити відповідні розрахунки в електронних таблицях MS Excel. При аналізі було забезпечено розрахунки попереднього режиму живлення навантаження й режиму короткого замикання, наочно відображених на рис. 3. Було вирішено завдання пошуку моменту короткого замикання, при якому ударний струм є максимальним.

4. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися порядком та методом виконання практичного завдання;
3. За вихідними даними,
4. Виконати аналіз трифазного короткого замикання у середовищі електронних таблиць MS Excel;
5. Проаналізувати результати виконаної роботи;
6. Відповісти на контрольні питання;
7. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
8. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні питання

1. Що таке коротке замикання, і які його основні види?
2. Чим відрізняється трифазне коротке замикання від одно- і двофазного?
3. Яке значення має аналіз коротких замикань при проектуванні електроенергетичних систем?
4. Які основні складові струму короткого замикання?
5. Як визначається ударний струм трифазного короткого замикання?
6. Що таке аперіодична складова струму короткого замикання, і як вона змінюється з часом?
7. Які параметри електричного кола впливають на величину ударного струму?
8. Як використовується метод Ейлера для чисельного розрахунку струму короткого замикання?
9. Яке фізичне значення сталої часу τ у розрахунках короткого замикання?
10. Чому ударний струм ТФКЗ максимальний при комутації у певний момент часу?
11. Як можна знайти момент комутації, що дає максимальний ударний струм, використовуючи MS Excel?
12. Яка роль надбудови «Пошук розв'язання» у розрахунках короткого замикання?
13. Як змінюється перехідний процес у мережі після виникнення короткого замикання?
14. Чому розрахунки короткого замикання проводяться з урахуванням еквівалентної схеми електричної мережі?
15. Як результати розрахунків короткого замикання можуть вплинути на вибір електрообладнання та заходи захисту?

Таблиця 1. – Вихідні дані для розрахунку

№	E_m	L_k	L_n	r_k	R_n	w	Δt
1	100	0,5	2	0,125	5	3,14	0,001

2	100	0,2	2	0,1	5	3,14	0,001
3	100	0,4	2	0,2	5	3,14	0,001
4	100	0,5	2	0,25	4,8	3,14	0,001
5	100	0,56	2	0,3	4,8	3,14	0,001
6	100	0,22	2	0,11	4,8	3,14	0,001
7	120	0,22	1,8	0,11	4,7	3,14	0,001
8	120	0,25	1,8	1	4,6	3,14	0,001
9	120	0,27	1,8	1,5	4,6	3,14	0,001
10	120	1	1,6	0,5	4,6	3,14	0,001
11	120	0,8	1,6	0,45	4,6	3,14	0,001
12	120	0,9	1,6	0,3	4,4	3,14	0,001
13	130	1,2	1,5	0,7	4,4	3,14	0,001
14	130	0,5	1,4	0,125	4,4	3,14	0,001
15	130	0,2	1,4	0,1	4,4	3,14	0,001
16	130	0,4	1,4	0,2	4,4	3,14	0,001
17	150	0,5	1,4	0,25	4,4	3,14	0,001
18	150	0,56	1,2	0,3	4,2	3,14	0,001
19	150	0,22	1,2	0,11	4,2	3,14	0,001
20	150	0,5	1,2	0,125	4,2	3,14	0,001

ПРАКТИЧНА РОБОТА №6

Тема: Аналіз перехідних процесів в електричних ланцюгах з використанням Mathcad.

Мета: дослідження перехідного процесу в ланцюгах постійного струму операторним методом із застосуванням ЕОМ.

1. Теоретичні відомості

При комутації в електричних колах виникають перехідні процеси, пов'язані з накопиченням і розрядкою енергії в індуктивних та ємнісних елементах. Визначення цих процесів є важливим для аналізу динамічної поведінки електричних кіл, що використовується при проектуванні та експлуатації електроенергетичних систем.

У цій роботі досліджується операторний метод аналізу перехідних процесів, який базується на перетворенні Лапласа. Для розрахунків застосовується Mathcad, що дозволяє спростити аналітичні та чисельні обчислення.

Сутність операторного методу полягає в тому, що розв'язання задачі аналізу ланцюга переноситься з області функцій дійсного змінного t в область комплексних функцій змінного $p = \sigma + j\omega$. В результаті система інтегро-диференціальних рівнянь змінної t замінюється системою рівнянь алгебри комплексної змінної p . Далі за отриманим результатом розв'язання рівнянь алгебри виконується зворотний перехід в область функцій дійсного змінного. Базується операторний метод на перетворення Лапласа.

З курсу математичного аналізу відомо, що якщо $f(t)$ має обмежене зростання, то інтеграл сходиться абсолютно і є аналітичною функцією комплексного змінного $p = \sigma + j\omega$.

$$F(p) = \int_0^{\infty} f(t) \cdot e^{pt} dt, \quad (1)$$

Інтегральне рівняння (1) є прямим перетворенням Лапласа; функція $f(t)$ називається оригіналом, а $F(p)$ - зображенням за Лапласом.

Таблиця 1. – Зображення типових функцій

$f(t)$	A	e^{at}	$\sin \omega t$	$\cos \omega t$	$\frac{df(t)}{dt}$	$\int_0^t f(t)dt$
$F(p)$	$\frac{A}{p}$	$\frac{1}{p-a}$	$\frac{\omega}{\omega^2 + p^2}$	$\frac{p}{\omega^2 + p^2}$	$pF(p) - f(0)$	$\frac{F(p)}{p}$

Для знаходження зображення функції в середовищі Mathcad використовується команда "laplace", розташована в панелі інструментів символічної.

Формат запису команди: Зауважимо, що для програми Mathcad оператор записується буквою s, а чи не p! $e^{at} \text{laplace} \rightarrow -\frac{1}{a-s}$

Для знаходження невідомих величин операторним методом можна користуватися відомими електротехнічними законами та методиками: закони Ома, Кірхгофа, метод контурних струмів, вузлових напруг тощо. Для складання рівнянь в операторному вигляді спочатку електричну схему перетворюють до операторної форми з урахуванням наступних зображень:

- зображення напруги на індуктивному елементі

$$u_L(t) \Rightarrow Lp \cdot i(p) - Li(0), \quad (2)$$

де $i(0)$ - початкові умови.

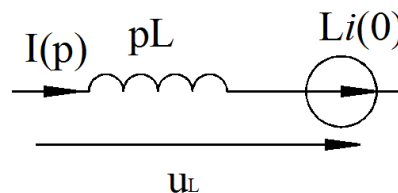


Рис.1 – Схема заміщення індуктивного елемента в операторній формі

- зображення напруги на ємнісному елементі

$$u_c(t) \Rightarrow \frac{l(p)}{Cp} + \frac{u_c(0)}{p}, \quad (3)$$

де - $u_c(0)$ початкова умова (напруга яка була на ємності до комутації).

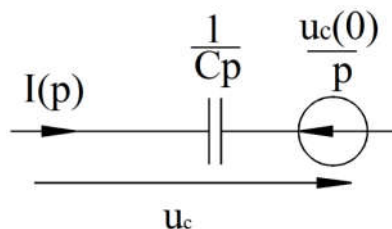


Рис. 2 – Схема заміщення ємнісного елемента в операторній формі

Закон Ома в операторній формі:

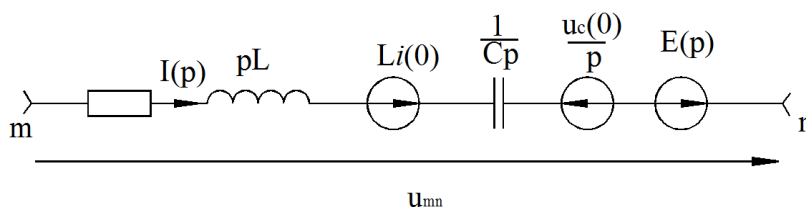


Рис. 3 – Схема заміщення гілки

$$U_{mn}(p) = I_p(p)R + I_p(p)Lp + I_p(p)\frac{1}{Cp} - Li(0) + \frac{u_c(0)}{p} - E(p)$$

$$I(p) = \frac{U_{mn}(p) + Li(0)Lp - \frac{u_c(0)}{p} - E(p)}{R + Lp + \frac{1}{Cp}}, \quad (4)$$

Перший закон Кірхгофа

$$\sum_{k=1}^n I(p) = 0, \quad (5)$$

Другий закон Кірхгофа

$$\sum_{k=1}^m \left[E_k(p) + L_k i_k(0) - \frac{u_{ck}(0)}{p} \right] = \sum_{k=1}^m \left[R + pL - \frac{1}{Cp} \right] \cdot I_k(p), \quad (6)$$

Перехід від зображення до оригіналу здійснюється або за табличними даними для стандартних функцій, або з використанням формули розкладання. Для виконання лабораторної роботи в середовищі Matcad перехід від зображення

до оригіналу здійснюється командою `invlaplace`, розташована в символній панелі інструментів.

Формат запису команди: $-\frac{1}{\alpha - s} \text{invlaplace} \rightarrow e^{\alpha t}$.

2. Завдання

Дослідити перехідні процеси в електричних ланцюгах постійного струму операторним методом із застосуванням Mathcad. Ознайомитися з основами операторного методу та перетворення Лапласа, розглянути закони Кірхгофа в операторній формі та вивчити відповідні команди Mathcad.

Використовуючи задані параметри електричного кола (джерело ЕРС E , індуктивність L , опір R і ємність C), див. табл. 2, скласти операторні рівняння за законами Кірхгофа, визначити струм $I(s)$ та напругу на ємності $U_C(s)$, виконати зворотне перетворення Лапласа для отримання залежностей $i(t)$ і $U_C(t)$ у часовій області. Побудувати графіки струму та напруги в Mathcad на інтервалі $t \in [0, 0.02]$, проаналізувати згасання перехідного процесу та порівняти отримані результати для різних варіантів. Оформити розрахунки, зробити висновки та відповісти на контрольні питання.

3. Приклад виконання завдання

Визначити струм у галузі джерела ЕРС і напруга на ємності після замикання ключа. Вихідні дані: $E = 10$, $L = 20 \cdot 10^{-3}$ Гн, $R = 10$ Ом, $C = 500$ мкФ, $R_H = 5$ Ом. Початкові умови нульові.

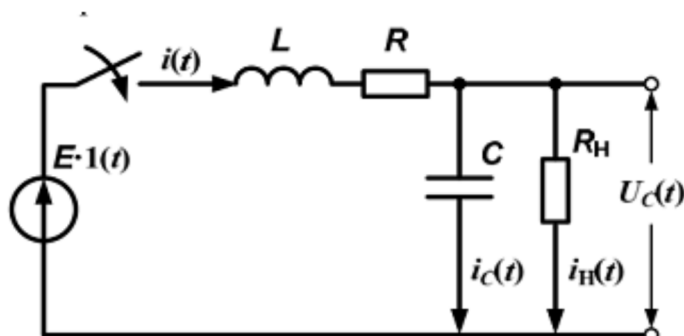


Рис. 4 – Розгалужена схема

Диференціальне рівняння за II законом Кірхгофа

$$E \cdot 1(t) = i(t) \cdot R + L \frac{di(t)}{dt} + U_c(t), \quad (7)$$

Диференціальне рівняння за I законом Кірхгофа

$$i(t) = i_c(t) + i_{H(t)}, \quad (8)$$

Враховуючи, що дане рівняння запишеться у вигляді

$$i_c(t) = C \frac{du_c(t)}{dt}, \quad i_H(t) = \frac{u_c(t)}{R_H}, \quad (9)$$

$$i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} + \frac{u_c(t)}{R_H}, \quad (10)$$

СДУ у формі Коші

$$\begin{cases} \frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{L} [E \cdot 1(t) - i(t) \cdot R - U_c(t)] \\ \frac{du_c(t)}{dt} = \frac{1}{C} \left[i(t) - \frac{U_c(t)}{R_H} \right] \end{cases}, \quad (11)$$

У матричній формі

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_H C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot 1(t), \quad (12)$$

Застосуємо до СДУ пряме перетворення Лапласа за нульових початкових умов:

$$p \cdot \begin{bmatrix} I(p) \\ U_c(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{R_H C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i(p) \\ U_c(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{pL} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

Перенесемо доданки з невідомими до лівої частини отриманої СЛАУ

$$\begin{bmatrix} p + \frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & p + \frac{1}{R_H C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i(p) \\ U_c(p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{pL} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

Метод Крамера — спосіб вирішення систем лінійних рівнянь алгебри з числом рівнянь рівним числу невідомих. Використовуючи Mathcad знайдемо невідомі та визначимо коріння характеристичного рівняння. Операції з визначниками необхідно виконувати у символьній формі $I(p)$ и $U_c(p)$.

Рішення

Згідно вихідних даних складаємо стовпець з проіменованими величинами:

Дано
$E := 10$
$L := 20 \cdot 10^{-3}$
$R := 10$
$C := 500 \cdot 10^{-6}$
$R_n := 5$

Рис. 5 – Вихідні дані

Далі складемо матриці коефіцієнтів на основі приведених раніше кроків приведення системи диференціальних рівнянь до матричної форми. Спершу знаходиться головний визначник системи. Для цього на рядку функцій маткаду вибираємо вкладку матриці і вибираємо вставити матрицю:

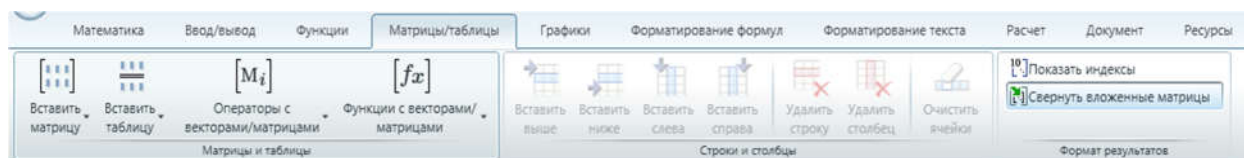


Рис. 6 – Складання матриці

Записуємо відповідне позначення для визначника, через комбінацію клавіш Shift + Ж(; , :) задаємо визначення для нього. Далі вставляємо до

рівності матрицю розміром 2 на 2. У матриці головного визначника враховуються відповідні невідомі:

$$\Delta := \begin{bmatrix} s + \frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s + \frac{1}{R_H \cdot C} \end{bmatrix} \quad |\Delta| \rightarrow s^2 + 900 \cdot s + 300000$$

Рис.7 – Заповнення матриці

Визначник цієї матриці знаходиться за допомогою оператора “Визначник” у блоці Математика:

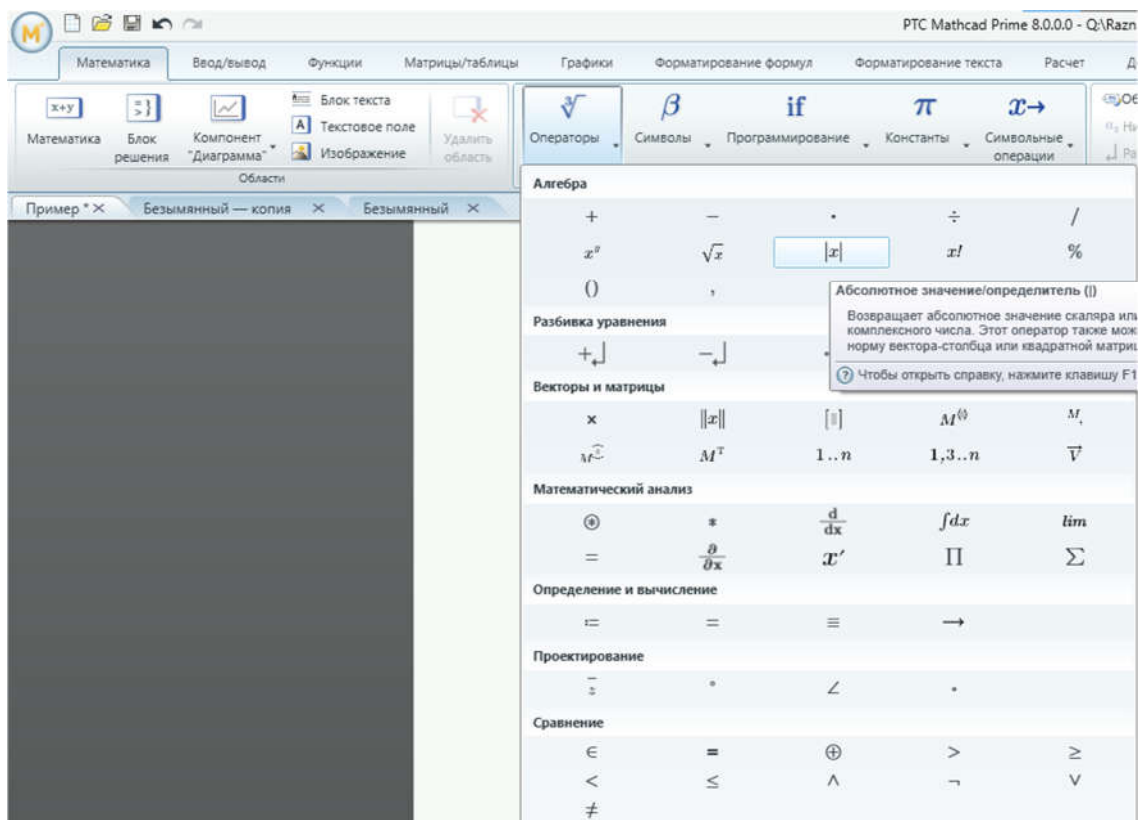


Рис.8 – Знаходження операції визначення визначника

Далі знаходимо визначники для відповідних невідомих аналогічним шляхом, але з врахуванням того, що у визначниках стовпець коефіцієнтів за відповідної невідомої замінюється стовпцем вільних членів системи, відповідно до приведень вище.

$$\Delta_i := \begin{bmatrix} \frac{E}{s \cdot L} & \frac{1}{L} \\ 0 & s + \frac{1}{R_H \cdot C} \end{bmatrix} \quad |\Delta_i| \rightarrow \frac{500 \cdot s + 200000}{s}$$

І так само для другої невідомої:

$$\Delta_{uc} := \begin{bmatrix} s + \frac{R}{L} & \frac{E}{s \cdot L} \\ \frac{-1}{C} & 0 \end{bmatrix} \quad |\Delta_{uc}| \rightarrow \frac{1000000}{s}$$

Відповідні корені рівнянь невідомих знаходимо наступним чином

$$\frac{|\Delta_i|}{|\Delta|} \rightarrow \frac{500 \cdot s + 200000}{s \cdot (s^2 + 900 \cdot s + 300000)}$$

$$\frac{|\Delta_{uc}|}{|\Delta|} \rightarrow \frac{1000000}{s \cdot (s^2 + 900 \cdot s + 300000)}$$

Де стрілочка є символьною операцією і знаходиться в блоці математика:

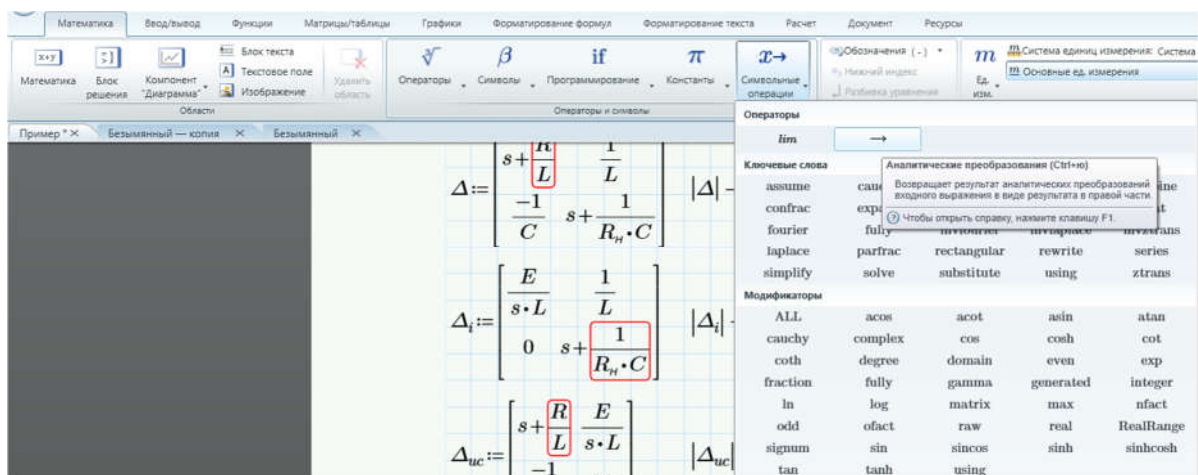


Рис. 9 – Перехід до символьних операцій

Знаходимо корені характеристичного рівняння за допомогою Дискримінанту:

$$s^2 + 900 \cdot s + 300000 = 0$$

$$a := 1 \quad b := 900 \quad c := 300000$$

$$d := b^2 - 4 \cdot a \cdot c = -3.9 \cdot 10^5$$

$$s1 := \frac{-b - \sqrt{d}}{2} = -450 - 312.25i \quad s2 := \frac{-b + \sqrt{d}}{2} = -450 + 312.25i$$

$$\alpha := -450 \quad \beta := 312.25$$

Рис. 10 – Визначення коренів рівняння

Отримали два комплексних спряжених кореня $\alpha = -450$; $\beta = 312.25$

Отримавши співвідношення поліномів знайдемо оригінали струму у галузі ЕРС та напруги на ємнісному елементі $\frac{|\Delta i|}{|\Delta|}$ і $\frac{|\Delta u_c|}{|\Delta|}$. Дана операція виконується за допомогою команди `invlaplace`, яка знаходиться в блоці символьних операцій.

$$\frac{|\Delta i|}{|\Delta|} \xrightarrow{\text{invlaplace}} \frac{4 \cdot \sqrt{39} \cdot e^{-(450 \cdot t)} \cdot \sin(50 \cdot \sqrt{39} \cdot t) + (26 - 26 \cdot \cos(50 \cdot \sqrt{39} \cdot t)) \cdot e^{-(450 \cdot t)}}{39}$$

$$\frac{|\Delta u_c|}{|\Delta|} \xrightarrow{\text{invlaplace}} \frac{-(30 \cdot \sqrt{39} \cdot e^{-(450 \cdot t)} \cdot \sin(50 \cdot \sqrt{39} \cdot t)) + (130 - 130 \cdot \cos(50 \cdot \sqrt{39} \cdot t)) \cdot e^{-(450 \cdot t)}}{39}$$

Після того як ми отримали оригінали від зображень спростимо ці вирази. Після спрощення виразів оригіналів побудуємо залежності змінної від часу на інтервалі $[0-0.02]$. Інтервал у маткаді задається через знак “,” при латинській розкладці:

$$t := \square, \square \dots \square$$

Де перша ячейка це початковий момент, друга це величина кроку цього інтервалу і третя це кінцеве значення часу.

Відповідно до спрощених оригіналів записуємо рівність для складання залежності відповідних змінних від часу.

Значення комплексних коренів у данному випадку відповідають відповідно ступеню експоненти і значення $\sin/\cos$ в оригіналі зображення

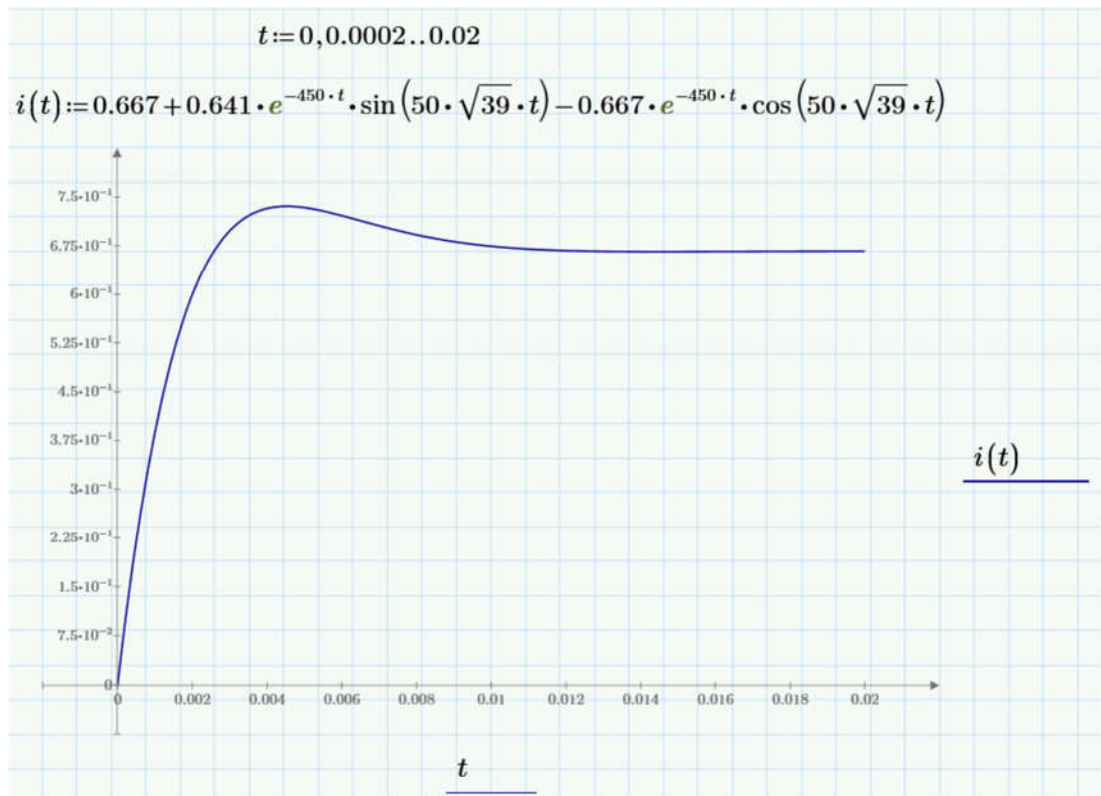


Рис.11 – Залежність струму у гілці від часу $i(t)$.

Далі робимо теж саме для напруги:

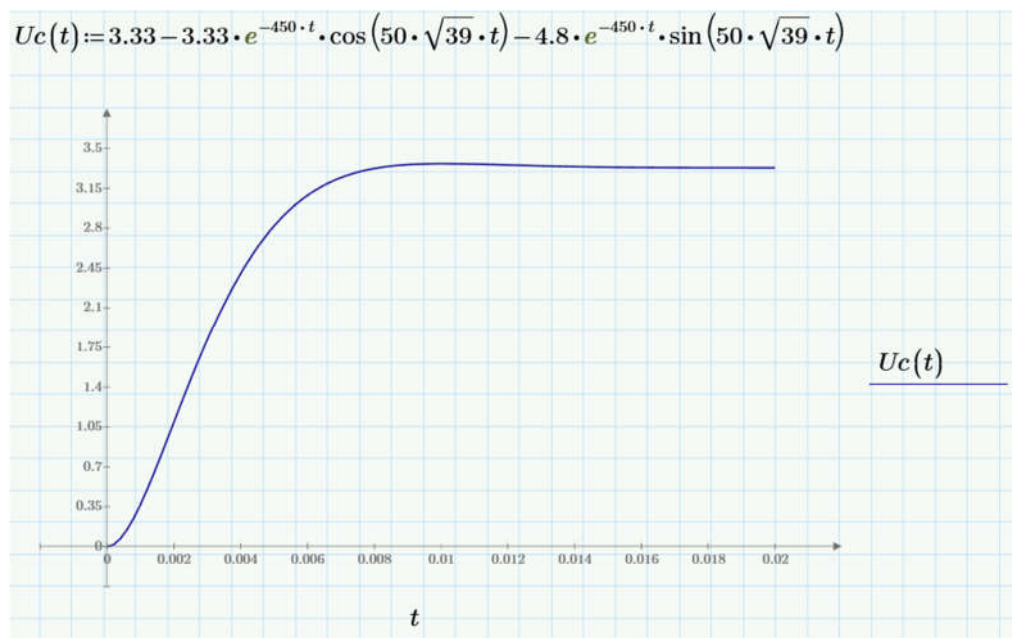


Рис.12 – Залежність напруги на ємнісному елементі $u_c(t)$.

4. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися порядком та методом виконання практичного завдання;
3. Освоїти використання Mathcad для аналізу електричних схем із застосуванням перетворення Лапласа;
4. Побудувати графіки зміни струму та напруги в часі;
5. Проаналізувати результати виконаної роботи;
6. Відповісти на контрольні питання;
7. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
8. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні питання

1. Що таке перехідний процес в електричних колах, і які його основні причини?
2. У чому полягає суть операторного методу аналізу електричних кіл?
3. Яке фізичне значення перетворення Лапласа, і як воно використовується для аналізу електричних схем?
4. Які операторні вирази використовуються для зображення індуктивності, ємності та опору?
5. Як змінюються диференціальні рівняння електричних кіл після застосування перетворення Лапласа?
6. Які переваги має операторний метод у порівнянні з класичним диференціальним методом?
7. Як записуються закони Кірхгофа в операторній формі?
8. У чому полягає процедура зворотного перетворення Лапласа, і як вона реалізується в Mathcad?
9. Які команди Mathcad використовуються для виконання прямого та зворотного перетворення Лапласа?

10. Як змінюється струм у колі після замикання ключа та як впливають параметри елементів на форму перехідного процесу?
11. Як знайти сталі часу для перехідного процесу та що вони характеризують?
12. Чому струм в індуктивності не може змінюватися миттєво після комутації?
13. Як можна оцінити затухання перехідного процесу за отриманими графіками?
14. Як впливають значення ємності та індуктивності на тривалість перехідного процесу?
15. Які практичні застосування має операторний метод у розрахунках електротехнічних систем?

Таблиця 2. – Вихідні данні до виконання практичної роботи

№	E	L, Гн	R, Ом	C, мкФ	R _н , Ом
1	10	$20 \cdot 10^{-3}$	10	500	5
2	11	$21 \cdot 10^{-3}$	11,5	600	6
3	12	$22 \cdot 10^{-3}$	12	700	7
4	13	$23 \cdot 10^{-3}$	13	800	8
5	14	$24 \cdot 10^{-3}$	14,5	900	9
6	15	$25 \cdot 10^{-3}$	15,6	950	10
7	16	$26 \cdot 10^{-3}$	16	1050	11
8	17	$27 \cdot 10^{-3}$	17	1100	12
9	18	$28 \cdot 10^{-3}$	18	1150	13
10	19	$29 \cdot 10^{-3}$	19	1200	14
11	10	$20 \cdot 10^{-3}$	10	500	9
12	11	$21 \cdot 10^{-3}$	11.5	600	10
13	12	$22 \cdot 10^{-3}$	12	700	11
14	13	$23 \cdot 10^{-3}$	13	800	12
15	14	$24 \cdot 10^{-3}$	14.5	900	9

ПРАКТИЧНА РОБОТА №7

Тема: Розрахунок перехідних процесів при порушенні симетрії у трифазній мережі

Мета: дослідити особливості перехідних процесів у трифазній мережі при порушенні симетрії.

1. Теоретичні відомості

Трифазні електричні мережі широко застосовуються в енергосистемах завдяки їхній ефективності, рівномірному навантаженню та можливості передавати значну потужність. В ідеальних умовах трифазна система є симетричною, тобто напруги та струми в фазах мають однакову амплітуду та зсунуті одна відносно одної на 120° .

Однак у реальних умовах можуть виникати несиметричні режими, спричинені різними факторами, такими як:

- обрив однієї з фаз (відключення лінії, аварія на підстанції);
- однофазне або двофазне коротке замикання;
- розбалансоване навантаження (нерівномірний розподіл споживачів між фазами).

При порушенні симетрії виникають перехідні процеси, які можуть призвести до перегріву обладнання, нестабільності напруги та зниження надійності роботи мережі.

У трифазній системі фазні струми та напруги зазвичай описуються у вигляді векторних величин:

$$U_A, U_B, U_C \text{ та } I_A, I_B, I_C, \quad (1)$$

де А, В, С - позначення фаз.

Симетрія означає, що:

$$|U_A| = |U_B| = |U_C|, \quad |I_A| = |I_B| = |I_C|, \quad (2)$$

та зсув між фазами становить 120° .

Якщо хоча б одна з цих умов порушується, система стає несиметричною.

Для аналізу несиметричних режимів використовується метод симетричних складових, запропонований Чарльзом Фортеस्क'ю. Його суть полягає в тому, що будь-яку несиметричну трифазну систему можна розкласти на три симетричні системи:

1) Пряма (основна) послідовність:

- відповідає нормальному режиму трифазної мережі;
- вектори обертаються проти годинникової стрілки;

2) Зворотна послідовність:

- виникає при несиметрії (наприклад, обрив однієї з фаз);
- вектори обертаються у протилежному напрямку;

3) Нульова послідовність:

- виникає при замиканнях на землю або за відсутності нейтралі;
- всі три фазні величини мають однаковий напрямок та фазу;

Формули перетворення:

$$\begin{aligned}I_{np} &= \frac{1}{3}(I_A + aI_B + a^2I_C) \\I_{звор} &= \frac{1}{3}(I_A + a^2I_B + aI_C), \\I_{нуль} &= \frac{1}{3}(I_A + I_B + I_C),\end{aligned}\tag{3}$$

де $a = e^{j120^\circ} = -0.5 + j0.866$ – оператор фазового зсуву.

Зворотне перетворення:

$$\begin{aligned}I_A &= I_{np} + I_{звор} + I_{нуль} \\I_B &= a^2I_{np} + aI_{звор} + I_{нуль} \\I_C &= aI_{np} + a^2I_{звор} + I_{нуль},\end{aligned}\tag{4}$$

При порушенні симетрії у трифазній системі виникають перехідні процеси, які можна описати рівняннями:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = u(t),\tag{5}$$

де L - індуктивність, R - активний опір, i - струм, $u(t)$ - напруга, що змінюється з часом.

Розв'язок цього рівняння у загальному вигляді складається з:

1) Змущеної (усталеної) складової – визначає кінцевий встановлений режим.

2) Вільної (перехідної) складової – затухаюча експоненційна функція:

$$i_{nep}(t) = I_0 e^{-\frac{R}{L}t}, \quad (6)$$

де $\tau = \frac{L}{R}$ – стала часу розряду.

Для знаходження струмів у фазах застосовують перетворення Лапласа, яке дозволяє спростити розрахунок диференціальних рівнянь у операторній формі.

Для аналізу несиметричних режимів застосовується метод симетричних складових, який дозволяє представити несиметричну трифазну систему у вигляді трьох симетричних:

Пряма (основна) послідовність – відповідає нормальній роботі мережі.

Зворотна послідовність – відображає ефект обертання у протилежний бік, викликаний несправностями.

Нульова послідовність – характеризує струми, що виникають при однофазних замиканнях на землю.

2. Завдання

Дослідити перехідні процеси у трифазній мережі при порушенні симетрії, використовуючи метод симетричних складових та операторний метод. Ознайомитися з основними причинами виникнення несиметричних режимів, зокрема однофазного короткого замикання, розбалансування навантаження та обриву фаз. Скласти операторні рівняння для аналізу трифазної системи, визначити симетричні складові напруг і струмів, виконати розрахунок у комплексній формі та знайти залежності струмів у часовій області за допомогою зворотного перетворення Лапласа. Реалізувати чисельний розрахунок у Mathcad або Excel, побудувати графіки зміни фазних струмів та напруг під час

перехідного процесу та проаналізувати їх вплив на роботу мережі. Оформити результати розрахунків, зробити висновки та відповісти на контрольні питання.

3. Приклад виконання завдання

Вихідні дані:

Тип порушення симетрії: однофазне коротке замикання (КЗ);

Лінійна напруга: $U_{\text{л}} = 380\text{В}$;

Опір фази: $Z_{\text{ф}} = 5 + j2 \text{ Ом}$;

Опір нульової послідовності: $Z_{\text{н}} = 10 + j3 \text{ Ом}$;

1. Формування рівнянь для однофазного КЗ.

Однофазне коротке замикання (наприклад, фази А на землю) можна аналізувати методом симетричних складових.

При такому КЗ:

- струм у фазі А зростає різко через зменшення загального опору.
- фази В і С залишаються в нормальному режимі.
- виникають симетричні складові струмів: пряма, зворотна і нульова послідовності.

Згідно з методом симетричних складових, струм у фазі А можна розкласти так:

$$I_A = I_{\text{пр}} + I_{\text{звор}} + I_{\text{нуль}}$$

Фази В і С залишаються у нормальному режимі, тому їх струми:

$$I_B = a^2 I_{\text{пр}} + a I_{\text{звор}} + I_{\text{нуль}}$$

$$I_C = a I_{\text{пр}} + a^2 I_{\text{звор}} + I_{\text{нуль}}$$

де $a = e^{j120^\circ} = -0.5 + j0.866$ - оператор повороту фаз.

Умова короткого замикання на землю:

$$I_A + I_B + I_C = 0$$

2. Визначення симетричних складових напруги.

Симетричні складові фазних напруг визначаються як:

$$U_{np} = \frac{1}{3}(U_A + aU_B + a^2U_C)$$

$$U_{звор} = \frac{1}{3}(U_A + a^2U_B + aU_C)$$

$$U_{нуль} = \frac{1}{3}(U_A + U_B + U_C),$$

При однофазному КЗ напруга фази А $U_A = 0$, а напруги фаз В і С залишаються рівними фазній напрузі:

$$U_B = U_C = \frac{U_{\phi}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} \approx 219,4$$

Підставляючи ці значення, знаходимо:

$$U_{np} = \frac{1}{3}(0 + a \cdot 219,4 + a^2 \cdot 219,4) = 146,27 \text{ В}$$

$$U_{звор} = \frac{1}{3}(0 + a^2 \cdot 219,4 + a \cdot 219,4) = 0 \text{ В}$$

$$U_{нуль} = \frac{1}{3}(0 + 219,4 + 219,4) = 146,27 \text{ В}$$

3. Визначення струмів у послідовностях

Згідно з законом Ома в операторній формі:

$$I_{np} = \frac{U_{np}}{Z_{\phi}} = \frac{146,27}{5 + j2}$$

$$I_{звор} = \frac{U_{звор}}{Z_{\phi}} = \frac{0}{5 + j2} = 0$$

$$I_{нуль} = \frac{U_{нуль}}{Z_n} = \frac{146,27}{10 + j3}$$

Розрахуємо струми.

Розділимо комплексне число $5+j2$:

$$|Z_{\phi}| = \sqrt{5^2 + 2^2} = \sqrt{25 + 4} = \sqrt{29} \approx 5,39$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{2}{5}\right) \approx 21,8^\circ$$

Отже, струм у прямій послідовності:

$$I_{np} = \frac{146,27}{5,39} \cdot e^{-j21,8^\circ} = 27,14e^{-j21,8^\circ}$$

Аналогічно для нульової послідовності:

$$|Z_H| = \sqrt{10^2 + 3^2} = \sqrt{109} \approx 10,44$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{3}{10}\right) \approx 16,7^\circ$$

$$I_{\text{нуль}} = \frac{146,27}{10,44} \cdot e^{-j16,7^\circ} = 14,01e^{-j16,7^\circ}$$

4. Визначення струмів у фазах.

Підставимо знайдені значення у рівняння фазних струмів:

$$I_A = I_{np} + I_{звор} + I_{нуль} = 27,14e^{-j21,8^\circ} + 0 + 14,01e^{-j16,7^\circ}$$

$$I_B = a^2 I_{np} + a I_{звор} + I_{нуль}$$

$$I_C = a I_{np} + a^2 I_{звор} + I_{нуль}$$

Використовуючи значення $a = -0,5 + j0,866$, знаходимо комплексні значення I_B та I_C у Mathcad або вручну.

Знайдемо комплексні значення струмів I_B та I_C , використовуючи значення оператора повороту фаз:

$$a = -0,5 + j0,866$$

$$a^2 = (-0,5 + j0,866)^2 = -0,5 - j0,866$$

Згідно з попередніми розрахунками, ми маємо:

$$I_{np} = 27,14e^{-j21,8^\circ}$$

$$I_{звор} = 0$$

$$I_{нуль} = 14,01e^{-j16,7^\circ}$$

Формули для визначення струмів у фазах:

$$I_B = a^2 I_{np} + a I_{звор} + I_{нуль}$$

$$I_C = a I_{np} + a^2 I_{звор} + I_{нуль}$$

Обчислення I_B :

$$I_B = (-0,5 - j0,866)I_{np} + I_{нуль}$$

Підставимо числові значення:

$$I_B = (-0,5 - j0,866) \cdot (27,14e^{-j21,8^\circ}) + 14,01e^{-j16,7^\circ}$$

Розпишемо у вигляді дійсної та уявної частин:

$$I_B = (-0,5 - j0,866 \cdot 27,14)e^{-j21,8^\circ} + 14,01e^{-j16,7^\circ}$$

Знайдемо дійсну та уявну частини окремо:

$$-0,5 \cdot 27,14 = -13,57$$

$$-j0,866 \cdot 27,14 = -j23,49$$

З урахуванням кута $e^{-j21,8^\circ}$, отримаємо:

$$I_B = (-13,57 - j23,49)e^{-j21,8^\circ} + 14,01e^{-j16,7^\circ}$$

Перевівши у стандартний вигляд, знайдемо підсумкове значення I_B у вигляді модуля і фази.

Обчислення I_C :

$$I_C = aI_{np} + a^2I_{звор} + I_{нуль}$$

$$I_C = (-0,5 - j0,866)I_{np} + I_{нуль}$$

Підставимо числові значення:

$$I_C = (-0,5 + j0,866) \cdot (27,14e^{-j21,8^\circ}) + 14,01e^{-j16,7^\circ}$$

Виконавши аналогічні перетворення, отримаємо підсумкове значення I_C у вигляді комплексного числа.

Отримані значення I_B та I_C відображають розподіл струмів у трифазній системі при порушенні симетрії через однофазне КЗ. Аналізуючи ці результати, можна оцінити вплив асиметрії на систему та розробити заходи для її компенсації.

5. Побудова графіків струмів у часі.

Використовуючи попередні розраховані значення симетричних складових струмів I_{np} , $I_{звор}$, $I_{нуль}$, а також знайдені фазні струми $I_A(t)$, $I_B(t)$, $I_C(t)$, побудуємо графіки залежності струмів від часу.

Для побудови графіків використаємо Mathcad або MATLAB, але розглянемо основні кроки незалежно від програмного забезпечення.

5.1. Перехідні процеси у часовій області

Струм у кожній фазі складається з трьох складових:

$$I_A(t) = I_{np}(t) + I_{звор}(t) + I_{нуль}(t)$$

$$I_B(t) = a^2I_{np}(t) + aI_{звор}(t) + I_{нуль}(t)$$

$$I_C(t) = aI_{np}(t) + a^2I_{звор}(t) + I_{нуль}(t)$$

Де перехідний процес кожної складової має вигляд:

$$i_{np}(t) = I_{np}e^{-\alpha t} + \sin(\omega t + \phi)$$

$$i_{звop}(t) = I_{звop} e^{-\alpha t} + \sin(\omega t + \phi)$$

$$i_{нуль}(t) = I_{нуль} e^{-\alpha t} + \sin(\omega t + \phi)$$

де $\alpha = \frac{R}{2L}$ - коефіцієнт затухання, $\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2}$ - резонансна частота, ϕ - початковий фазовий кут.

5.2. Визначення числових значень.

Використовуючи попередні розрахунки:

$$I_{np} = 27,14 e^{-j21,8^\circ}$$

$$I_{звop} = 0$$

$$I_{нуль} = 14,01 e^{-j16,7^\circ}$$

$$R = 5 \text{ Ом}, L = 2 \text{ Гн}$$

знайдемо параметри:

$$\alpha = \frac{5}{2 \cdot 2} = 1,25 c^{-1}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 500 \cdot 10^{-6}} - (1,25)^2} \approx 1000 \text{ рад/с}$$

Формули для струмів у фазах у часовій області:

$$i_A(t) = 27,14 e^{-1,25t} \cdot \sin(1000t - 21,8^\circ) + 14,01 e^{-1,25t} \cdot \sin(1000t - 16,7^\circ)$$

$$i_B(t) = (-0,5 - j0,866) \cdot i_A(t)$$

$$i_C(t) = (-0,5 + j0,866) \cdot i_A(t)$$

5.3. Реалізація в Mathcad

1) Відкриваємо Mathcad.

2) Визначаємо часовий інтервал:

```
mathcad

t := 0, 0.0001 .. 0.02
```

3) Записуємо рівняння для фазних струмів:

```
mathcad

i_A(t) := 27.14 * exp(-1.25 * t) * sin(1000 * t - 21.8°) +
```

Копировать Редактировать

```
+ 14.01 * exp(-1.25 * t) * sin(1000 * t - 16.7°)
```

mathcad

```
i_B(t) := (-0.5 - j * 0.866) * i_A(t)
```

mathcad

```
i_C(t) := (-0.5 + j * 0.866) * i_A(t)
```

4) Будуємо графіки:

mathcad

```
plot(t, i_A(t), "Час, с", "Струм, А")  
plot(t, i_B(t), "Час, с", "Струм, А")  
plot(t, i_C(t), "Час, с", "Струм, А")
```

- Відкрийте Mathcad (будь-яку версію, що підтримує .mcdx або .xmcd).
- Створіть новий документ.
- Вставте наведений код у порожній файл Mathcad.
- Натисніть Enter після кожного рядка, щоб Mathcad обчислив значення.
- Побудуйте графіки, натиснувши Ctrl + Shift + P або використовуючи меню вставки графіків.

6. Реалізація в MATLAB

6.1. Відкриваємо MATLAB і задаємо часовий інтервал:

matlab

```
t = 0:0.0001:0.02;
```

6.2. Визначаємо рівняння струмів у фазах:

matlab

Копировати

```
i_A = 27.14 * exp(-1.25 * t) .* sin(1000 * t - deg2rad(21.8)) + ...  
      14.01 * exp(-1.25 * t) .* sin(1000 * t - deg2rad(16.7));
```

matlab

Копировати

```
a = -0.5 + 1j * 0.866;  
i_B = a^2 * i_A;  
i_C = a * i_A;
```

6.3. Побудова графіків:

matlab

```
figure;  
plot(t, real(i_A), 'r', 'LineWidth', 1.5);  
hold on;  
plot(t, real(i_B), 'b', 'LineWidth', 1.5);  
plot(t, real(i_C), 'g', 'LineWidth', 1.5);  
xlabel('Час, c');  
ylabel('Струм, A');  
title('Залежність струмів у фазах від часу');  
legend('i_A', 'i_B', 'i_C');  
grid on;
```

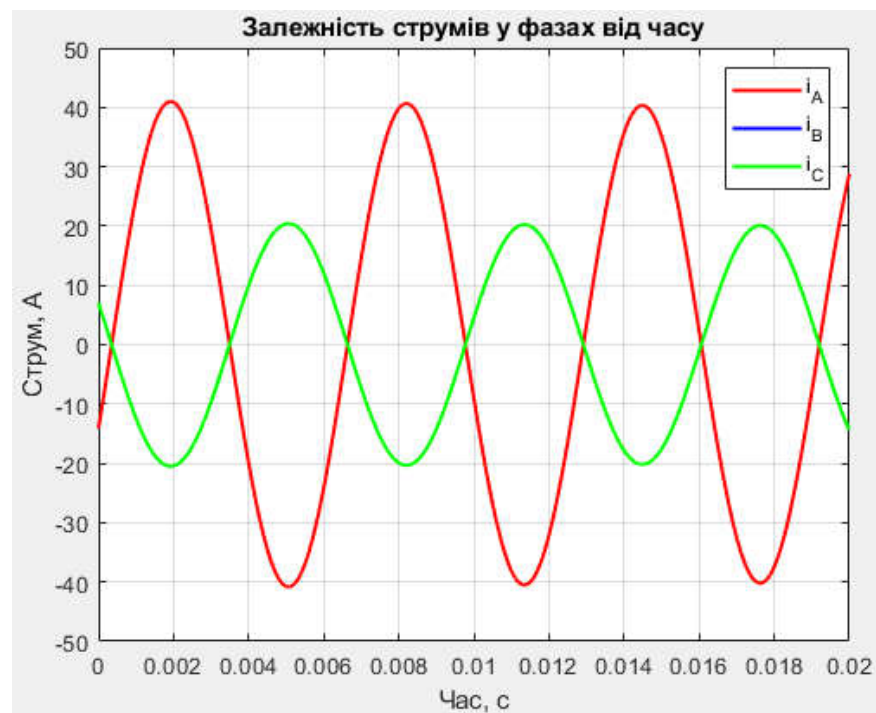


Рис. 1 – Результати розрахунків

Струм у фазі А миттєво зростає, після чого експоненційно спадає через затухання перехідного процесу. У фазах В і С струми мають фазовий зсув відносно один одного відповідно до методу симетричних складових. Через однофазне КЗ виникає значний перебіс струмів, що видно на графіках.

4. Вказівки щодо оформлення звіту

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися порядком та методом виконання практичного завдання;
3. Ознайомитися з методами аналізу перехідних процесів у трифазних мережах;
4. Вивчити метод симетричних складових для розрахунку несиметричних режимів;
5. Дослідити перетворення Лапласа для розрахунку струмів і напруг у перехідному режимі;
6. Проаналізувати результати виконаної роботи;
7. Відповісти на контрольні питання;
8. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
9. Зробити висновок про виконану роботу.

5. Контрольні питання

1. Що таке симетрія та несиметрія у трифазних електричних мережах?
2. Які основні причини порушення симетрії у трифазній системі?
3. У чому полягає метод симетричних складових і як він використовується для аналізу несиметричних режимів?

4. Які існують типи симетричних складових і які їхні фізичні характеристики?
5. Як визначається пряма, зворотна та нульова складові напруги у трифазній системі?
6. Які особливості протікання перехідних процесів при однофазному короткому замиканні?
7. Як записуються рівняння для визначення струмів у несиметричних режимах роботи мережі?
8. Як впливають параметри елементів мережі (RRR, LLL, CCC) на тривалість і форму перехідного процесу?
9. Яке значення має перетворення Лапласа для розрахунку перехідних процесів у трифазних мережах?
10. Які математичні методи можна використовувати для чисельного розрахунку перехідних процесів у несиметричних режимах?
11. Які програмні засоби можна використовувати для моделювання несиметричних режимів у трифазних мережах?
12. Як розраховуються фазні струми при порушенні симетрії мережі?
13. Як здійснюється побудова графіків струмів і напруг у часі після виникнення несиметричного режиму?
14. Як враховується вплив заземлення при аналізі перехідних процесів у трифазній системі?
15. Яким чином результати аналізу перехідних процесів можуть бути використані для вибору засобів релейного захисту?

Таблиця 1. – Вихідні данні до виконання практичної роботи

Варіант	Ул, В	Z_{ϕ} (Ом)	Z_H (Ом)	Тип порушення симетрії
1	380	$5+j2$	$10+j3$	Однофазне КЗ
2	380	$4+j2$	$8+j2$	Двофазне КЗ
3	380	$6+j3$	$12+j4$	Відключення фази

Варіант	Uл, В	Zф (Ом)	Zн (Ом)	Тип порушення симетрії
4	400	5+j2.5	9+j3	Розбалансування навантаження
5	400	4.5+j3	11+j3.5	Однофазне КЗ
6	400	6+j2	10+j2.5	Двофазне КЗ
7	400	5.5+j2.5	9+j2	Відключення фази
8	415	5+j2	10+j3	Однофазне КЗ
9	415	4+j2.5	9+j3.5	Розбалансування навантаження
10	415	6.5+j3	12+j4	Двофазне КЗ
11	415	5.5+j2.5	10+j3	Відключення фази
12	415	5+j3	10+j3.5	Однофазне КЗ
13	420	5.5+j2	11+j3.5	Двофазне КЗ
14	420	6+j3	12+j4	Відключення фази
15	420	5+j2.5	9.5+j3	Розбалансування навантаження
16	430	6.5+j3	13+j4	Однофазне КЗ
17	430	5+j2	10+j3	Двофазне КЗ
18	430	4.5+j2.5	9+j3.5	Відключення фази
19	430	6+j2	10+j2.5	Розбалансування навантаження
20	440	5.5+j2.5	9+j2	Однофазне КЗ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тептя В. В., Кулик В. В. Електромеханічні перехідні процеси в електроенергетичних системах : електронний конспект лекцій. Вінниця : ВНТУ, 2021. 183 с.
2. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник / Г. Г. Півняк, І. В. Жежеленко, Ю. А. Папаїка, Л. І. Несен. Дніпро : НГУ, 2016. 600 с.
3. Черемісін М. М., Мороз О. М., Єгоров О. Б., Швець С. В. Перехідні процеси в системах електропостачання : підручник. Харків, 2016. 260 с.
4. Гай О. В., Бодунов В. М. Електромеханічні перехідні процеси в електричних системах : навч. посіб. Київ, 2020. 327 с.
5. Карпов Ю. О., Ведміцький Ю. Г., Кухарчук В. В., Кацив С. Ш. Перехідні процеси в лінійних колах. Синтез лінійних кіл. Електричні та магнітні нелінійні кола : підручник. Херсон: Олді-Плюс, 2017. 456 с.
6. Яценко І. В., Самойлик О. В. Методичні рекомендації до практичних робіт та самостійної роботи з дисципліни «Перехідні процеси в системах електропостачання» / І. В. Яценко, О. В. Самойлик. Черкаси : ЧДТУ, 2021. URL: <https://elib.chdtu.edu.ua/vocabulary4/6304>
7. Курило І. А., Грудська В. П., Спінул Л. Ю., Щерба М. А. Розрахунок перехідних процесів у лінійних електричних колах : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2013. 289 с.
8. Бардик Є. І., Вожаков Р. В., Болотний М. П. Перехідні електромеханічні процеси в електроенергетичних системах: навч. посіб. для здобувачів ступеня магістра спец. 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2023. 100 с.
9. Кубрик Б. І., Костюков І. О., Кропачек О. Ю. Аналіз перехідних процесів в лінійних електричних колах: навч. посіб. / НТУ «ХПІ». Харків, 2023. 276 с.

10. Bachiller Soler A. Solved Problems for Transient Electrical Circuits / A. Bachiller Soler, R. Cano Gonzalez, M. A. González Cagigal. Cham : Springer, 2022. 223 p. (Lecture Notes in Electrical Engineering ; Vol. 809).

11. Dinavahi V. Parallel Dynamic and Transient Simulation of Large-Scale Power Systems: A High Performance Computing Solution / V. Dinavahi, N. Lin. Cham : Springer, 2022. 478 p.

ДОДАТОК

Додаток 1

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ПРОКТИЧНА РОБОТА №1

з дисципліни

“ Перехідні процеси в системах електропостачання ”
на тему: “Розрахунок КЗ лінії”

Допуск до виконання _____

Допуск до захисту _____

Захист _____

Виконав студент групи: Ен 1/1 м

(підпис)

Олексій ХАРИТОНОВ

(імя, прізвище)

Керівник:

(підпис)

Віталій МАРДЗЯВКО

(імя, прізвище)

2025

					141 Ен 1/1. 11. ПР01. ПП	104	Лист
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

Навчальне видання

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

Методичні рекомендації

Укладач: **Кошкін** Дмитро Леонідович
Мардзявко Віталій Анатолійович

Формат 60x84 1/16. Ум. друк. арк. 6,5.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.