

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ
УКРАЇНИХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного
обладнання

**МЕТОДИЧНІ МАТЕРІАЛИ
ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ**

із навчальної дисципліни

«Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(Електромеханіка)***

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Методичною радою
Кременчуцького льотного коледжу
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 28.08.2023 № 1

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023р № 1.

Розробник:

Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, викладач вищої категорії, Шокарьов Д.А.

Рецензенти:

- 1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю. М.;*
- 2. К.т.н., професор, завідувач кафедрою електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Лазуренко О.П.*

1. Розподіл часу навчальної дисципліни за темами

1.1. Розподіл часу навчальної дисципліни за темами (заочна форма навчання)

Номер та назва навчальної теми	Кількість годин відведених на вивчення навчальної дисципліни						Вид контролю
	Всього	з них:					
		Лекції	Семінарські заняття	Практичні заняття	Лабораторні заняття	Самостійна робота	
Семестр № 5							
Тема № 1 Принципи побудови релейного захисту	12	1		1		10	
Тема № 2 Принцип дії та особливості виконання електромеханічних реле	13			1	2	10	
Тема № 3 Структура релейного захисту	11			1		10	
Тема № 4 Первинні вимірювальні перетворювачі струму та напруги	13			1	2	10	
Тема № 5 Струмові захисти ліній з одностороннім живленням	11	1				10	
Тема № 6 Струмові захисти ліній з двостороннім живленням (струмові спрямовані захисти). Диференційні струмові захисти	11	1				10	
Тема № 7 Дистанційні захисти ЛЕП. Високочастотні захисти ліній	11	1				10	
Тема № 8 Релейний захист силових трансформаторів і автотрансформаторів	11	1				10	
Тема № 9 Релейний захист електродвигунів	14	1		1		12	
Тема № 10 Релейний захист збірних шин електростанцій та підстанцій	13			1		12	
Всього за семестр № 5:	120	6		6	4	104	екзамен

2. Методичні вказівки до лабораторних занять

Тема № 5 Струмові захисти ліній з одностороннім живленням.

Лабораторне заняття: Моделювання схеми електропостачання для розрахунку струмів короткого замикання в мережі вище 1000 В.

Навчальна мета заняття: оволодіння методикою математичного моделювання і розрахунку струмів КЗ в мережах вище 1000 В.

Кількість годин - 4 (денна форма); 2 (заочна форма).

Місце проведення: аудиторія коледжу.

Навчальні питання:

1. Особливості розрахунку.
2. Приклад розрахунку.
3. Завдання до розрахунку.

Література: 1 - 7.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.



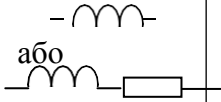
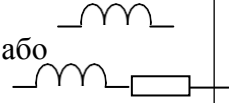
При розрахунку струмів КЗ в мережах вище 1000 В обов'язковий облік індуктивних опорів елементів мережі: електродвигунів, трансформаторів, реакторів, повітряних і кабельних ліній, струмопроводів. Активний опір враховується для повітряних ЛЕП з малим перетином проводів і зі сталевими проводами, а також для кабельних ліній великої протяжності з малим перетином жил. Доцільно враховувати активний опір, якщо $r_{\Sigma} \geq x_{\Sigma} / 3$, де r_{Σ} , x_{Σ} - сумарні активний і реактивний опори мережі від джерела живлення до місця КЗ.

Активний опір трансформаторів також необхідно враховувати в розрахунках струмів КЗ, якщо $r_{\text{тр}} \geq 0,3x_{\text{тр}}$. Крім цього, на опір впливає зміна числа витків обмоток пристроями регулювання напруги. Врахувати дійсний стан відгалужень кожного трансформатора в розподільних мережах практично неможливо, оскільки їх положення змінюється в залежності від значення навантаження, схеми і режиму роботи мережі. Тому при розрахунках приймається, що всі трансформатори включені на основне відгалуження, що відповідає їхній номінальній напрузі.

Все опори схеми заміщення підраховують в іменованих (Ом) або в відносних одиницях. При розрахунку у відносних одиницях задаються базовими величинами: напругою U_6 і потужністю S_6 .

Розрахункові формули для моделювання елементів системи електропостачання наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Розрахункові формули для визначення опорів

Елемент ЕУ, його схема та вихідний параметр	Схема заміщення	Розрахункові формули	
		Іменовані одиниці, Ом	відносні одиниці
Генератор, $X_d, \%$		$x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{ном}}}$ $x = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{откл.ном}}}$	$x = \frac{X_d \%}{100} \cdot \frac{S_6}{S_{\text{ном}}}$ $x = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} I_{\text{откл.ном}}}$
Енергосистема $I_{\text{откл.ном.}}$ $S_{\text{кз.сист}}$ $x_{\text{сист}}$		или $x = \frac{U_{\text{ном}}^2}{S_{\text{кз.сист}}}$	или $x = \frac{S_6}{S_{\text{кз.сист}}}$
Двообмоточний трансформатор $u_{\text{кз}}, \%$		$x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{S_{\text{ном.тр}}}$ $x = x_p \frac{U_{\text{ном}}^2}{U_{\text{ср}}^2}$	$x = \frac{u_{\text{кз}} \%}{100} \cdot \frac{\delta}{S_{\text{ном.тр}}}$ $x = x_p \frac{S_{\text{ном}}}{U_{\text{ср.6}}^2}$ $x = x_0 l \frac{U_{\text{ср.ном}}^2}{U_{\text{ср.ном}}^2}$
Реактор $x_p, \text{Ом}$			
Лінія r_0, x_0		$x = x_0 l$ $r = r_0 l$	$r = r_0 l \frac{S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2}$

$S_{\text{ном}}$ – номінальні потужності елементів, МВА;

S_6 – базова потужність, МВА;

$S_{\text{кз.сист}}$ – потужність КЗ енергосистеми, МВА;

$I_{\text{откл.ном.}}$ – номінальний струм відключення вимикача, кА;

$u_{\text{кз}}$ – напруга КЗ трансформатора, %;

x_p – опір реактора, Ом;

r_0, x_0 – активний та індуктивний опори лінії на 1 км довжини;

l – довжина лінії, км;

X_d – надперехідний індуктивний опір генератора;

$U_{\text{ср}}$ – середня напруга у місті установки даного елемента, кВ.

Приклад розрахунку

Для схеми електропостачання цехової підстанції (рис. 1) потрібно скласти схему заміщення для розрахунку струмів КЗ; визначити опори елементів схеми електропостачання; намітити і позначити на розрахунковій схемі і схемі заміщення точки розрахунку струмів КЗ; визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ».

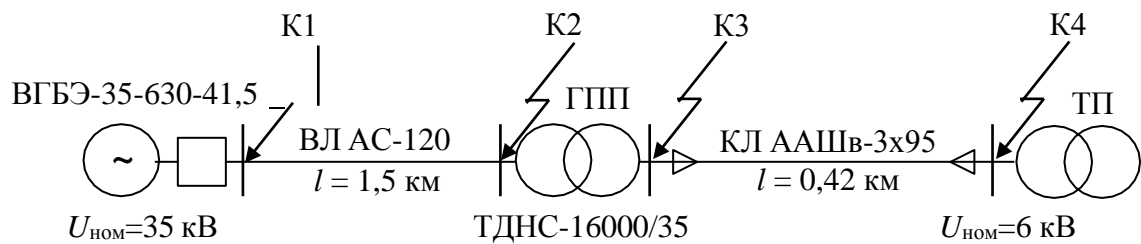


Рисунок 1 – Розрахункова схема розподільної мережі

Визначення опорів

На підстанції енергосистеми встановлений вимикач високої напруги ВГБЕ-35-630-41,5 з номінальним струмом відключення КЗ $I_{откл.ном} = 41,5$ кА.

Приймаємо $U_{ср.ном} = 37$ кВ.

Визначаємо потужність КЗ системи;

$$S_{кз.сист} = \sqrt{3} \cdot U_{ср.ном} \cdot I_{откл.ном} = \sqrt{3} \cdot 37 \cdot 41,5 = 2660 \text{ МВА.}$$

Розрахунок ведемо в відносних одиницях. Виконуємо розрахунок опорів мережі, приймаючи базисну потужність $S_б = 100$ МВА.

1. Опір енергосистеми:

$$x_{сист} = \frac{S_б}{S_{кз.сист}} = \frac{100}{2660} = 0,038$$

$$r_{вл} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_б}{U_{ср.ном}^2} = \frac{0,27 \cdot 1,5 \cdot 100}{37^2} = 0,03$$

$$x_{вл} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_б}{U_{ср.ном}^2} = \frac{0,309 \cdot 1,5 \cdot 100}{37^2} = 0,034$$

де: $l = 1,5$ км - довжина повітряної лінії;

$U_{ср.ном}$ - базисна напруга даного ступеня трансформації, кВ;

$r_0 = 0,27$ Ом / км - активний опір проводу АС-120 (табл.А.6);

$x_0 = 0,309$ Ом / км - індуктивний опір проводу АС-120 (табл.А.12).

3. Опір трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x_{тр} = \frac{u_{кз}^2}{100} \cdot \frac{S_б}{S_{ном.тр}} = \frac{10,5^2}{100} \cdot \frac{100}{16} = 0,656$$

Активним опором нехтуємо, так як трансформатор великої потужності.

де $S_{ном.тр} = 16$ МВА- номінальна потужність трансформатора;

$u_{кз} = 10,5\%$ - напруга короткого замикання трансформатора;

$$4. \text{Опір кабельної лінії: } r_{кл} = \frac{r_0 \cdot l \cdot S_б}{U_{ср.ном}^2} = \frac{0,329 \cdot 0,42 \cdot 100}{6,3^2} = 0,348$$

;

$$x_{\text{кл}} = \frac{x_0 \cdot l \cdot S_6}{U_{\text{ср.ном}}^2} = \frac{0,0602 \cdot 0,42 \cdot 100}{6,3^2} = 0,064$$

де: $l = 0,42$ км - довжина кабельної лінії;

$U_{\text{ср.ном}} = 6,3$ кВ - базисне напруга даному ступені трансформації;

$r_0 = 0,329$ Ом / км - активний опір кабелю ААШВ- (3х95) (табл.А.6);

$x_0 = 0,0602$ Ом / км - індуктивний опір кабелю ААШВ- (3х95) (табл.А.5)

Складаємо схему заміщення - рис. 2.

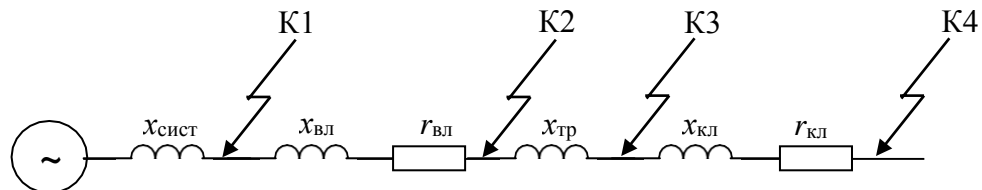


Рисунок 2 – Схема заміщення ділянки розподільної мережі

Розрахунок струмів КЗ

У мережах середньої напруги (6-35 кВ) зазвичай застосовують ізольовану нейтраль. Струм однофазного замикання на землю в таких мережах невеликий, його величина визначається ємністю лінії (залежить від напруги, довжини і типу лінії), і цей режим не є аварійним. Відповідно, розраховувати струми однофазного КЗ в мережах середньої напруги немає необхідності.

Струм двофазного КЗ легко визначається за розрахунком струму трифазного:

$$I_{\text{кз}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{кз}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{кз}}^{(3)}$$

Струм трифазного КЗ визначається за формулою:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{\text{ф}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \text{ кА.}$$

де $Z_{\text{рез}}$ - повний опір до точки КЗ, Ом.

При розрахунку в системі відносних одиниць спочатку знаходять базисний струм КЗ на розглянутій ступені трансформації:

$$I_6 = \frac{U_{\text{ф}}}{\sqrt{3} U_{\text{ср.ном}}}, \text{ кА}$$

а потім визначають реальне значення періодичної складової струму КЗ:

$$I_{\text{кз}} = \frac{I_6}{Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}$$

Будемо визначати струми трифазного КЗ за наміченими точками.

Точка К1:

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,038} = 41,05 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = x_{\text{сист}} = 0,038$$

Ударний струм КЗ —

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 41,05 = 104,5 \text{ кА}$$

$$k_{\text{уд}} = 1,8 \text{ по таблиці А.1.}$$

Точка К00

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 37} = 1,56 \text{ кА}$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{1,56}{0,078} = 20 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034)^2 + (0,03)^2} = 0,078$$

Ударний струм КЗ —

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 20 = 50,91 \text{ кА}$$

$$k_{\text{уд}} = 1,8 \text{ по таблиці А.1.}$$

Точка К00

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА}$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{9,16}{0,729} = 12,57 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}})^2 + (r_{\text{вл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656)^2 + (0,03)^2} = 0,729$$

Ударний струм КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{кз}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 12,57 = 31,99 \text{ кА}$$

$$k_{\text{уд}} = 1,8 \text{ по таблиці А.1.}$$

Точка К00

$$I_6 = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 6,3} = 9,16 \text{ кА}$$

$$I_{\text{кз}}^{(3)} = \frac{9,16}{0,876} = 10,46 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(x_{\text{сист}} + x_{\text{вл}} + x_{\text{тр}} + x_{\text{кл}})^2 + (r_{\text{вл}} + r_{\text{кл}})^2} = \sqrt{(0,038 + 0,034 + 0,656 + 0,064)^2 + (0,03 + 0,348)^2} = 0,876$$

Ударний струм КЗ

$$i_{уд} = \sqrt{2} k_{уд} I_{кз}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1,8 \cdot 10,46 = 26,83 \text{ кА}$$

$k_{уд} = 1,8$ по таблиці А.1.

Таблиця 2 – Зведена відомість струмів КЗ

Розрахункові точки		К1	К2	К3	К4
Струми КЗ, кА	$I_{кз}^{(3)}$	41,05	20,0	12,57	10,46
	$i_{уд}$	104,5	50,91	31,99	26,83

Завдання

Для схеми електричної мережі вище 1000 В (рис. 1.4) потрібно скласти схему заміщення для розрахунку струмів КЗ; визначити опори елементів схеми електропостачання; намітити і позначити на розрахунковій схемі і схемі заміщення точки розрахунку струмів КЗ; визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ». Кабельні лінії до цехової ТП і високовольтного синхронного двигуна (СД) виконані кабелями з паперової поясною ізоляцією. Середня геометрична відстань між проводами повітряної лінії електропередачі (ПЛ) приймається будь-якою, відповідно до табл.А.11.

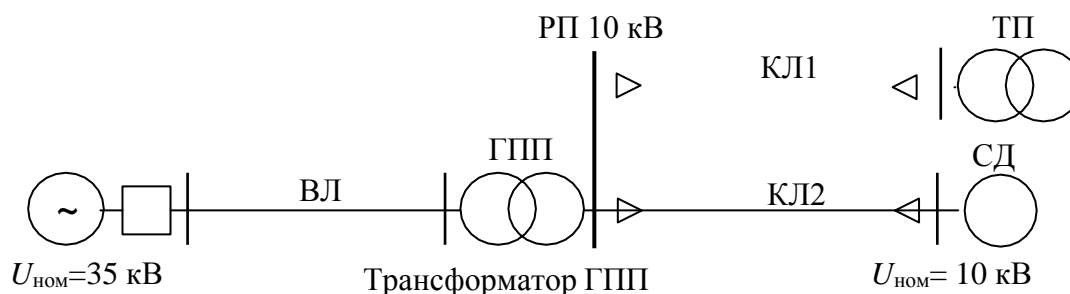


Рисунок 3 – Розрахункова схема розподільної мережі

Варианти завдань наведені в таблиці 3.

Таблиця 3 – Варианти заданих

№ вар	Система	ВЛ		Трансформатор ГПП		КЛ1		КЛ2	
	$S_{кз}$, МВА	S , мм ²	l , км	S , МВА	$u_{кз}$, %	S , мм ²	l , км	S , мм ²	l , км
1	5000	АС-240	5,6	40	11	150	1,2	95	0,5
2	4000	АС-185	10,2	32	10,5	120	0,6	70	1,2
3	3000	АС-150	5,4	25	10,5	120	0,8	95	0,6
4	2000	АС-120	6,8	16	10,5	95	1,2	50	0,8
5	2000	АС-150	10,5	25	11	95	1,2	120	0,3
6	3000	АС-120	4,1	32	11	70	0,4	70	0,2
7	1000	АС-95	2,2	16	10,5	50	0,2	70	0,5
8	1000	АС-70	3,4	10	10,5	35	0,4	50	0,2
9	2000	АС-240	12,5	32	11	120	2,2	95	1,1
10	3000	АС-185	5	25	10,5	70	3,5	50	0,4

III. Заключна частина заняття. Перевірка і оцінювання виконаних завдань. Підведення підсумків лабораторного заняття, акцентування уваги на основних помилках при його виконанні.

Тема № 5 Струмові захисти ліній з одностороннім живленням.

Лабораторне заняття: Моделювання схеми електропостачання для розрахунку струмів короткого замикання в мережі вище 1000 В в середовищі Electronics Workbench.

Навчальна мета заняття: оволодіння методикою математичного моделювання і розрахунку струмів КЗ в мережах вище 1000 В в середовищі Electronics Workbench.

Кількість годин - 2 (денна форма); 2 (заочна форма).

Місце проведення: аудиторія коледжу.

Навчальні питання:

1. Побудова моделі системи електропостачання в Electronics Workbench.
2. Приклад розрахунку.
3. Завдання до розрахунку.

Література: 1 - 7.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

При побудові математичної моделі системи електропостачання для розрахунку струмів КЗ в середовищі схемотехнічного моделювання Electronics Workbench слід звернути увагу на наступні чинники:

1. За замовчуванням тип вимірювальних приладів в програмі встановлений на «постійний струм» - DC. Так як моделювання проводиться для системи змінного струму потрібно змінити тип використовуваних вимірювальних приладів на «змінний струм» - AC. Для цього, відкривши подвійним клацанням миші, вікно властивостей вимірювального приладу, виберіть вкладку «Value», і в розкривається списку «Mode» встановіть AC (рис. 4). Для зменшення похибки вимірювань можна виставити величину внутрішнього опору амперметра в $1 \cdot 10^{-12}$ Ом (Resistance - 1 pΩ).

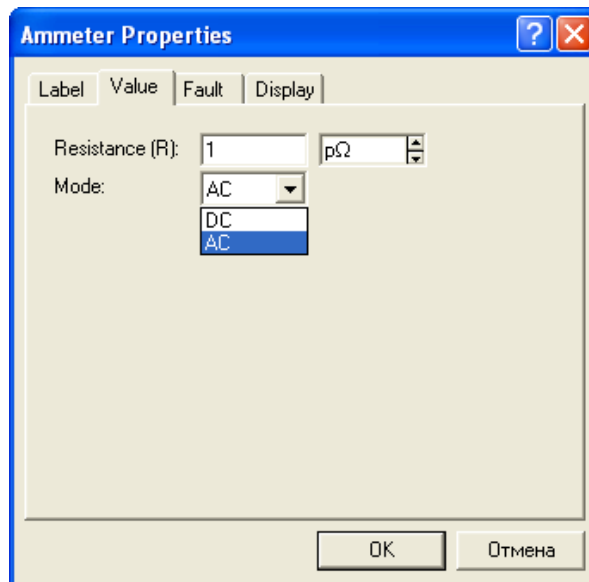


Рисунок 4 – Вікно властивостей амперметра в редакторі Electronics Workbench

2. Величина індуктивних опорів в програмі задається не в Ом, а в Гн. Для переходу від величини індуктивного опору, заданого в Ом, до індуктивності в Гн потрібно скористатися відомою формулою:

$$L = \frac{X}{2\pi f}, \text{ де } f - \text{частота мережі, Гц.}$$

Приклад розрахунку

Для схеми електропостачання (лаб. робота №1, рис. 2) потрібно скласти схему заміщення в редакторі Electronics Workbench; визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ».

Визначення опорів

Складаємо схему заміщення для розрахунку струмів КЗ в абсолютних одиницях. Так як трифазна система симетрична, досить скласти однолінійну схему заміщення однієї фази мережі.

1. Опір енергосистеми:

Енергосистема моделюється незмінною ЕРС за індуктивним опором $x_{\text{сист}}$.

Визначаємо фазну ЕРС енергосистеми:

$$e = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3}} = \frac{37}{\sqrt{3}} = 21,362 \text{ кВ}$$

$$\text{Визначаємо опір системи: } x_{\text{сист}} = \frac{U_{\text{ср.ном}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{откл.ном}}} = \frac{37}{\sqrt{3} \cdot 41,5} = 0,515 \text{ Ом}$$

Переходимо до індуктивності

$$L = \frac{x_{\text{сист}}}{2\pi f} = \frac{0,515}{2\pi \cdot 50} = 1,639 \text{ мГн}$$

2. Опір повітряної лінії 35 кВ:

$$r_{\text{ВЛ}} = r_0 \cdot l = 0,27 \cdot 1,5 = 0,405 \text{ Ом}$$

$$x_{\text{ВЛ}} = x_0 \cdot l = 0,309 \cdot 1,5 = 0,4635 \text{ Ом}$$

де: $l = 1,5$ км - довжина повітряної лінії;

$r_0 = 0,27$ Ом / км - активний опір проводу АС-120 (табл.А.6);

$x_0 = 0,309$ Ом / км - індуктивний опір проводу АС-120 (табл.А.12).

Переходимо до індуктивності

$$L = \frac{x_{\text{ВЛ}}}{2\pi f} = \frac{0,4635}{2\pi \cdot 50} = 1,476 \text{ мГн}$$

3. Опір трансформатора ТДНС-16000/35 кВА:

$$x = \frac{u_{\text{КЗ}}}{100} \cdot \frac{S_{\text{ном.тр}}}{S_{\text{ном.тр}}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{16}{16} = 8,984 \text{ Ом.}$$

$$L = \frac{x_{\text{тр}}}{2\pi f} = \frac{8,984}{2\pi \cdot 50} = 28,61 \text{ мГн.}$$

Опір трансформатора можна приводити до будь-якої обмотці (вищого або нижчого напруги). Відповідно опори трансформатора в схемі заміщення повинні знаходитися на тій же напрузі, до якої наведено трансформатор.

$S_{\text{ном.тр}} = 16$ МВА- номінальна потужність трансформатора;

$u_{\text{КЗ}} = 10,5\%$ - напруга короткого замикання трансформатора;

Опору трансформатора приведені до обмотці вищої напруги.

Для моделювання силового трансформатора при розрахунку струмів КЗ в середовищі Electronics Workbench зручно використовувати його лінійну модель, вікно властивостей якої представлено на рис.5.

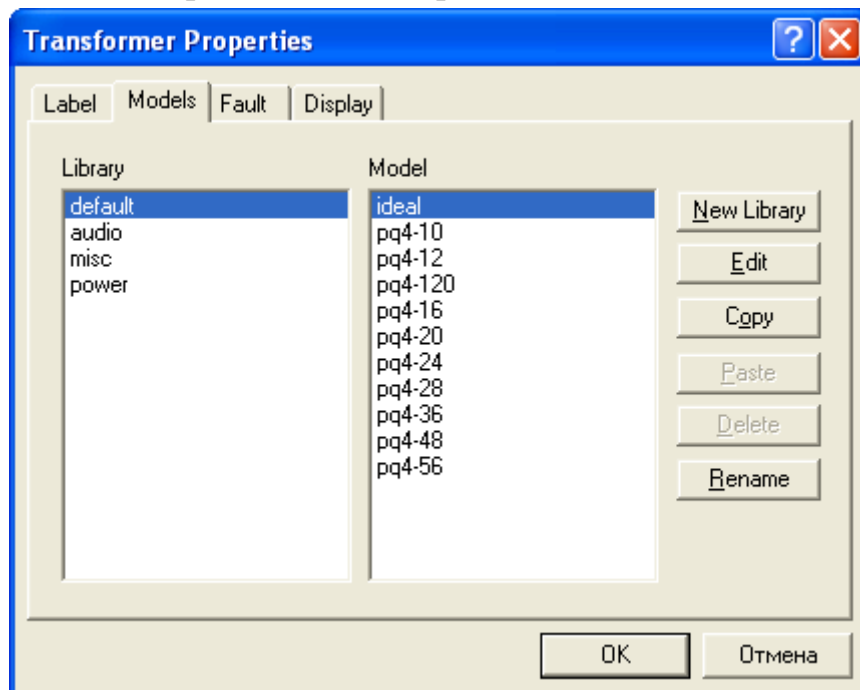


Рисунок 5 – Вікно властивостей лінійного трансформатора в редакторі Electronics Workbench

Визначимо коефіцієнт трансформації трансформатора, у вікні властивостей на вкладці «Models» з запропонованої бібліотеки (Library) трансформаторів виберемо силовий (power), з запропонованої бази моделей (Model) силових трансформаторів виберемо ідеальний (ideal) і натиснемо кнопку редагування його властивостей - Edit. Відкриється вікно властивостей ідеального силового трансформатора (рис. 6), в яке потрібно ввести розрахований нами коефіцієнт трансформації (primary-to-secondary turns ratio)

$$k_{тр} = \frac{U_{ср.ном.ВН}}{U_{ср.ном.НН}} = \frac{37}{6.3} = 5.873$$

Решту значень параметрів трансформатора змінювати немає необхідності.

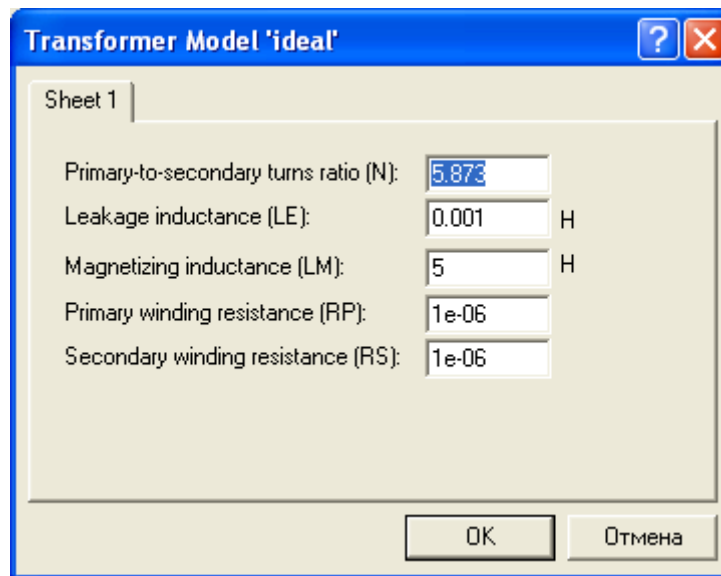


Рисунок 6 – Вікно властивостей ідеального силового трансформатора в редакторі Electronics Workbench

4. Опір кабельної лінії 6,3 кВ:

$$r_{кл} = r_0 \cdot l = 0.329 \cdot 0.42 = 0.138 \text{ Ом}$$

$$x_{кл} = x_0 \cdot l = 0.0602 \cdot 0.42 = 0.0263 \text{ Ом}$$

де: $l = 0.42$ км - довжина кабельної лінії;

$r_0 = 0.329$ Ом / км - активний опір кабелю ААШв- (3х95) (табл.А.6);

$x_0 = 0.0602$ Ом / км - індуктивний опір кабелю ААШв- (3х95) (табл.А.5)

Переходимо до індуктивності

$$L = \frac{x_{кл}}{2\pi f} = \frac{0.0263}{2\pi \cdot 50} = 0.081 \text{ мГн}$$

У вікні схемотехнічного редактора збираємо схему заміщення для розрахунку струмів КЗ. Для повноти дослідження введемо в розрахункову схему опір навантаження.

Визначимо опір навантаження для однієї фази трансформатора, прийнявши за коефіцієнт завантаження силового трансформатора по активній потужності найбільш типовий випадок - $K_3 = 0,7$

$$P_{\phi.tr} = K_3 \cdot S_{tr.\phi.ном} = \frac{U_{\phi.ном}^2}{R_H} \quad , \text{ звідки } R_H = 3,21 \text{ Ом}$$

Математична модель схеми електропостачання для розрахунку струмів КЗ в середовищі Electronics Workbench представлена на рис.7.

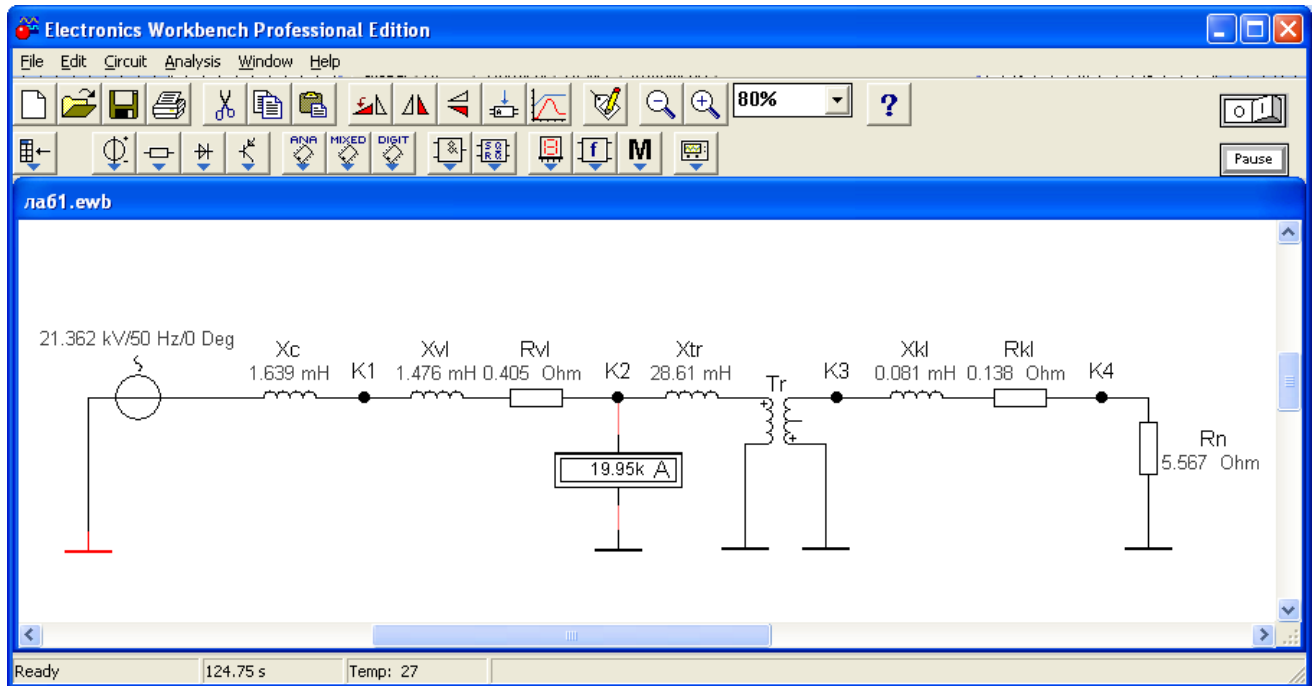


Рисунок 7 – Математична модель схеми електропостачання для розрахунку струмів КЗ в середовищі Electronics Workbench

Показання амперметра, підключеного між точкою К2 і землею, ілюструють стає значення струму КЗ в цій точці. Однак, на відміну від лінійної математичної моделі системи електропостачання, представленої в лабораторній роботі №1, дана модель дозволяє не тільки визначити усталені значення струмів КЗ в намічених точках, але вивчити поведінку системи в перехідних процесах.

Додамо в кожен гілку досліджуваної схеми по одному шунтуючому опору невеликого номіналу (наприклад 0,001 Ом) і ключ К для замикання електричного кола по команді клавіші клавіатури ПК. Підключимо до шунта електронний осцилограф. Подамо живлення на схему і замкнемо ключ К.

Модифікована схема досліджень приведена на рис.8, екран осцилографа з кривою струму КЗ в розрахунковій точці К4 на рис.9.

Так як, криві струму і напруги на активному елементі збігаються, ми можемо візуально спостерігати перехідний процес зміни струму в процесі

короткого замикання. За допомогою наявних в арсеналі осцилографа візирів (на рис.9 червона і сині лінії), легко визначити величину миттєвого значення напруги на шунтуючих резисторах в довільний момент часу, а потім визначити і величину струму.

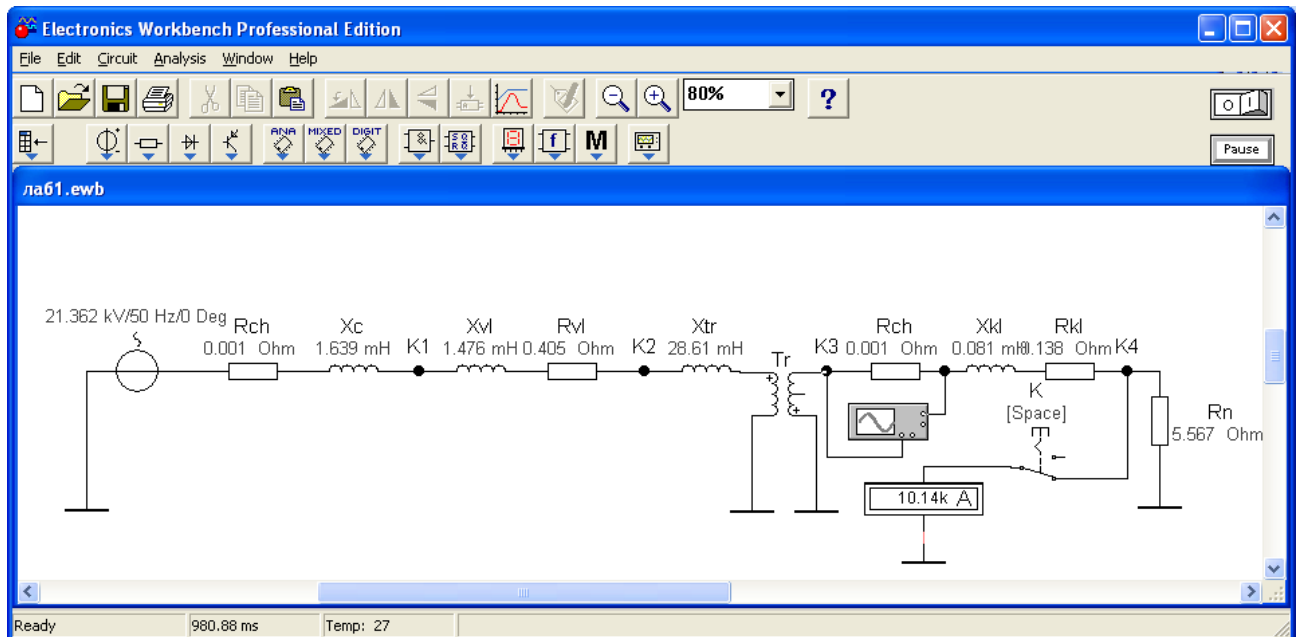


Рисунок 8 – Математична модель схеми електропостачання для дослідження перехідних процесів КЗ

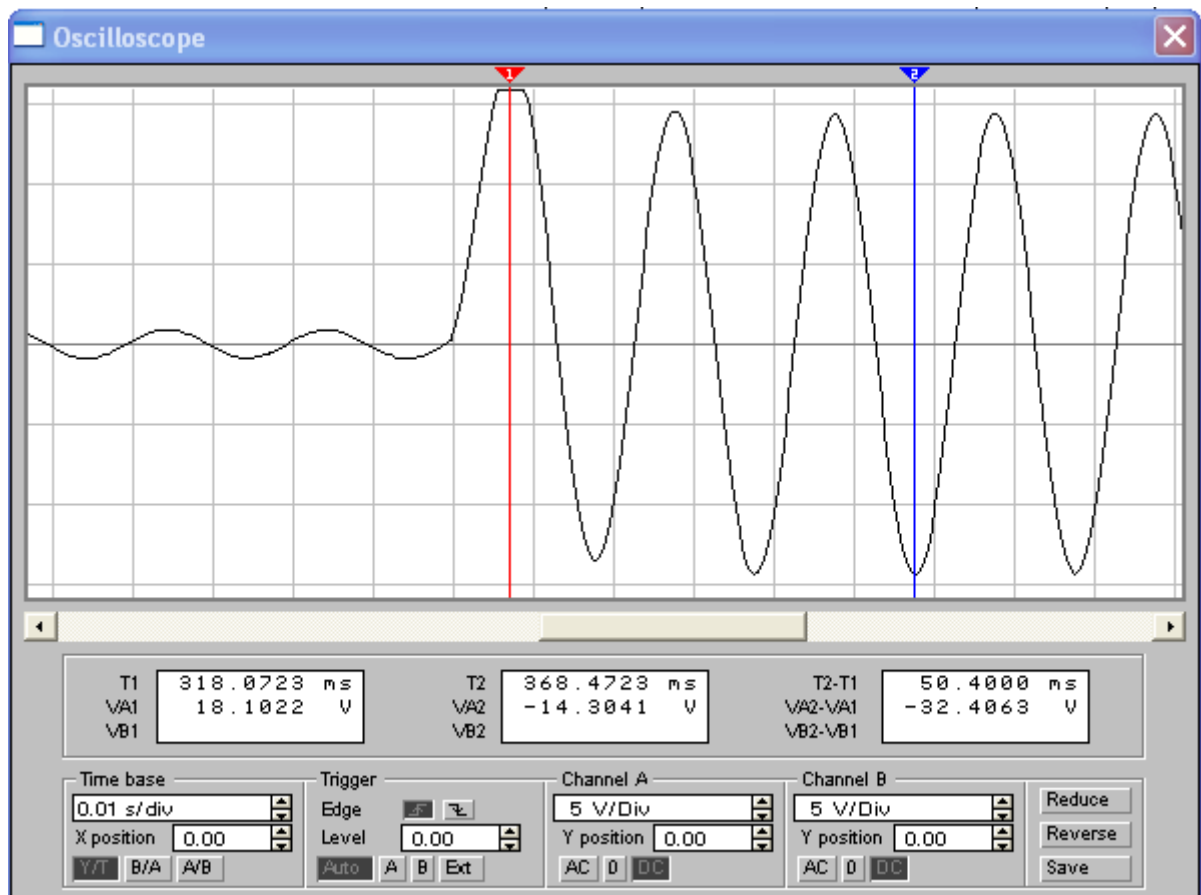


Рисунок 9 – Крива зміни струму в точці К4 під час перехідного процесу КЗ

Завдання до розрахунку

Для схеми електричної мережі вище 1000 В (рис. 3) потрібно скласти схему заміщення для визначення струмів КЗ в програмі схемотехнічного моделювання Electronics Workbench; визначити опору елементів схеми електропостачання; намітити і позначити на розрахунковій схемі і схемі заміщення точки розрахунку струмів КЗ; визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ».

Провести дослідження перехідних процесів зміни струмів під час КЗ, визначити за осцилографом значення ударного струму КЗ в кожній точці і тривалість перехідного процесу КЗ. Порівняти і проаналізувати результати моделювання схеми електропостачання з результатами, отриманими в лабораторній роботі №1.

III. Заключна частина заняття. Перевірка і оцінювання виконаних завдань. Підведення підсумків лабораторного заняття, акцентування уваги на основних помилках при його виконанні.

Тема № 5 Струмові захисти ліній з одностороннім живленням.

Лабораторне заняття: Моделювання схеми електропостачання для розрахунку струмів короткого замикання в мережі до 1000 В.

Навчальна мета заняття: оволодіння методикою математичного моделювання і розрахунку струмів КЗ в мережах до 1000 В.

Кількість годин - 4 (денна форма); 0 (заочна форма).

Місце проведення: аудиторія коледжу.

Навчальні питання:

1. Особливості розрахунку.
2. Приклад розрахунку.
3. Завдання до розрахунку.

Література: 1 - 7.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

У більшості практичних випадках можна вважати, що КЗ в мережах до 1000 В живиться від системи з необмеженою потужністю, тобто періодична складова струму КЗ незмінна протягом всього часу існування режиму КЗ:

$$I_{nt}^{(3)} = I_{KЗ}^{(3)}$$

При розрахунках струмів КЗ в установках напругою до 1000 В необхідно враховувати активні та індуктивні опори до точки КЗ всіх елементів короткозамкненої мережі: силового трансформатора, проводів, кабелів і шин,

струмових котушок розмикачів автоматичних вимикачів, первинних обмоток трансформаторів струму, перехідних контактів апаратів.

Опір електричної дуги, що виникає в місці КЗ, розраховується (зазвичай при визначенні чутливості релейних захистів) за співвідношенням:

$$r_d = \frac{1000}{I_d},$$

де I_d - струм, що проходить через дугу (приймається струм, визначений без урахування опору дуги при КЗ в тому ж місці); l_d - довжина дуги (м), дорівнює відстані між струмоведучими частинами.

При розрахунку однофазних струмів КЗ значення питомих індуктивних опорів петлі «фаза-нуль» приймається рівним:

$x_0 = 0,15$ мОм / м - для КЛ до 1 кВ і проводів в трубах;

$x_0 = 0,6$ мОм / м - для ПЛ до 1 кВ;

$x_0 = 0,4$ мОм / м - для ізолюваних відкрито прокладених проводів;

$x_0 = 0,2$ мОм / м - для шинопроводів.

Розрахунок параметрів ланцюга і струмів КЗ виконується в іменованих одиницях, напруга приймається на 5% вище номінальної напруги мережі (тобто $U_{\text{ср. ном}}$)

2. Приклад розрахунку

Для схеми електропостачання цехової мережі (рис. 10) визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ». Живлення розподільної шафи ШР виконано кабелем АНРГ з відкритою прокладкою по стіні; для живлення окремих електроприймачів цеху використовуються дроти АВВГ з прокладкою в трубах. Для підключення вимірювальних приладів в схемі електропостачання встановлені трансформатори струму ТА 1 і ТА2 з класом точності 1,0.

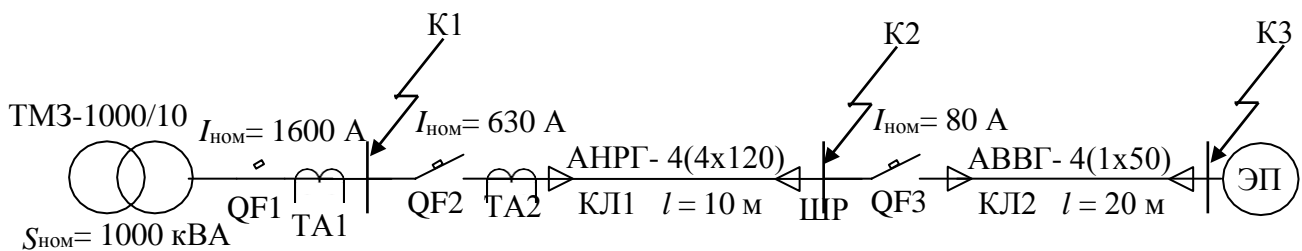


Рисунок 10 – Розрахункова схема розподільної мережі

Розрахунок ведемо в абсолютних одиницях. Опори елементів схеми електропостачання наводимо до номінальної напруги вторинної обмотки 0,4 кВ.

Визначаємо опори для розрахунку трифазного КЗ

1. Опори трансформатора (табл. А.2):

$$R_{\text{тр}} = 2,0 \text{ мОм} \quad X_{\text{тр}} = 8,5 \text{ мОм}$$

2. Опори автоматичного вимикача QF1 (табл. А.10):

$$R_{QF1} = 0.08 \text{ мОм} \quad X_{QF1} = 0.08 \text{ мОм} \quad R_{kQF1} = 0.1 \text{ мОм}$$

3. Опору автоматичного вимикача QF2 (табл.А.10):

$$R_{QF2} = 0.12 \text{ мОм} \quad X_{QF2} = 0.13 \text{ мОм} \quad R_{kQF2} = 0.25 \text{ мОм}$$

4. Опори первинної обмотки трансформатора струму ТА 2 (табл.А.9):

$$R_{ТА2} = 0.07 \text{ мОм} \quad X_{ТА2} = 0.05 \text{ мОм}$$

Примітка: опору трансформатора струму ТА 1 можна не враховувати через їхнє невелике значення.

5. Опори кабельної лінії КЛ1 (питомі опори з табл.А.5):

$R_{КЛ1} = r_0 \cdot l / n = 0,261 \cdot 10 / 4 = 0,653 \text{ мОм}$ (з урахуванням 4 паралельно прокладених кабелів)

$$X_{КЛ1} = x_0 \cdot l = 0,08 \cdot 10 = 0,8 \text{ мОм}$$

6. Опори автоматичного вимикача QF3 (табл.А.10):

$$R_{QF3} = 2,4 \text{ мОм} \quad X_{QF3} = 2,0 \text{ мОм} \quad R_{kQF3} = 1,0 \text{ мОм}$$

7. Опори кабельної лінії КЛ2 (питомі опори з табл.А.5):

$$R_{КЛ2} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм} \quad X_{КЛ2} = x_0 \cdot l = 0,085 \cdot 20 = 1,7 \text{ мОм}$$

8. Перехідні опори ступенів розподілу (табл. А.4):

$$R_{ру\text{ нн}} = 15 \text{ мОм} \quad R_{ШР} = 25 \text{ мОм}$$

9. Активні перехідні опори нерухомих контактних з'єднань (табл.А.8):

$$R_{kКЛ1} = 0.024 \text{ мОм} \quad R_{kКЛ2} = 0.043 \text{ мОм}$$

Схема заміщення цехової мережі для розрахунку струмів трифазного і двофазного КЗ представлена на рис.11.

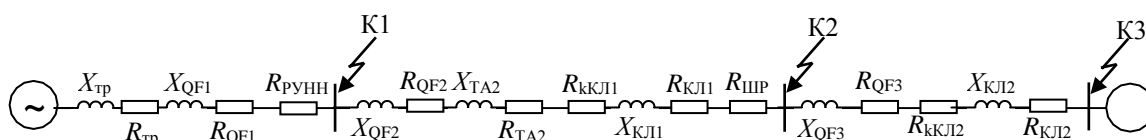


Рисунок 11 – Схема заміщення цехової мережі

Спростимо схему заміщення, визначивши еквівалентні опори на ділянках схеми між точками КЗ

$$R_1 = R_{тр} + R_{QF1} + R_{ру\text{ нн}} = 2 + 0,08 + 15 = 17,08 \text{ мОм}$$

$$X_1 = X_{тр} + X_{QF1} = 8,5 + 0,08 = 8,58 \text{ мОм}$$

$$R_2 = R_{QF2} + R_{ТА2} + R_{kКЛ1} + R_{КЛ1} + R_{ШР} = 0,12 + 0,07 + 0,024 + 0,653 + 25 = 25,87 \text{ мОм}$$

$$X_2 = X_{QF2} + X_{ТА2} + X_{КЛ1} = 0,13 + 0,05 + 0,8 = 8,98 \text{ мОм}$$

$$R_3 = R_{QF3} + R_{kКЛ2} + R_{КЛ2} = 2,4 + 0,043 + 12,5 = 14,943 \text{ мОм}$$

$$X_3 = X_{QF3} + X_{КЛ2} = 2,0 + 1,7 = 3,7 \text{ мОм}$$

Спрощена схема заміщення представлена на рис. 12.

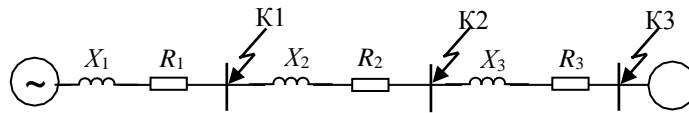


Рисунок 12 – Спрощена схема заміщення цехової мережі

Розрахунок трифазних і двофазних струмів КЗ

Струм трифазного КЗ визначається за формулою:

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{U_{\text{ном}}}{\sqrt{3} Z_{\text{рез}}}, \text{ кА}$$

де $Z_{\text{рез}}$ - повний опір до точки КЗ, Ом.

Точка К1:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{17.08^2 + 8.08^2} = 18.88 \text{ мОм}$$

Періодична складова струму трифазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 18.88} = 12.77 \text{ кА}$$

За рис.А.1 визначимо $k_{\text{уд}}$. Для цього потрібно визначити $X_1 / R_1 = 0.47$, звідки $k_{\text{уд}} = 1.0$

Ударний струм КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1.0 \cdot 12.77 = 18.1 \text{ кА}$$

Струм двофазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0.87 I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0.87 \cdot 12.77 = 11.1 \text{ кА}$$

Точка К2:

$$Z_{\text{рез}} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \sqrt{(17.08 + 25.87)^2 + (8.08 + 8.18)^2} = 45.9 \text{ мОм}$$

Періодична складова струму трифазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 45.9} = 5.0 \text{ кА}$$

За рис.А.1 визначимо $k_{\text{уд}}$. Для цього потрібно визначити $X / R \leq 0.5$, звідки $k_{\text{уд}} = 1.0$

Ударний струм КЗ

$$i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = \sqrt{2} \cdot 1.0 \cdot 5.0 = 7.1 \text{ кА}$$

Струм двофазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0,87 \cdot 5,0 = 4,35 \text{ кА}$$

$$Z_{\text{екв}} = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2} = \sqrt{(17,08 + 25,87 + 14,94)^2 + (8,08 + 8,18 + 3,7)^2} = 61,2 \text{ мОм}$$

Періодична складова струму трифазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 61,2}{3,77} = 3,77 \text{ кА}$$

За рис.А.1 визначимо $k_{\text{уд}}$. Для цього потрібно визначити $X / R \leq 0,5$, звідки $k_{\text{уд}} = 1,0$

$$\text{Ударний струм КЗ } i_{\text{уд}} = \sqrt{2} k_{\text{уд}} I_{\text{КЗ}} = \sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 3,77 = 5,33 \text{ кА}$$

Струм двофазного КЗ

$$I_{\text{КЗ}}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0,87 I_{\text{КЗ}}^{(3)} = 0,87 \cdot 3,77 = 3,28 \text{ кА.}$$

Розрахунок однофазних КЗ.

Визначимо опори і складемо схему заміщення для розрахунку струмів однофазного КЗ

$$\text{Опору трансформатора по табл. А.2 } Z_{\text{тр}}^{(1)} = 81 \text{ мОм}$$

До схеми заміщення, зображеної на рис. 11 потрібно додати опори нульових провідників.

Опори нульової жили кабельних ліній КЛ1 і КЛ2 (питомі опору з табл.А.5):

$$R_{0\text{-КЛ1}} = r_0 \cdot l / n = 0,261 \cdot 10 / 4 = 0,653 \text{ мОм (з урахуванням 4 паралельно прокладених кабелів)}$$

$$R_{0\text{-КЛ2}} = r_0 \cdot l = 0,625 \cdot 20 = 12,5 \text{ мОм}$$

Крім цього зміняться індуктивні опору кабельних ліній

$$X_{\text{КЛ1}} = x_0 \cdot l = 0,4 \cdot 10 = 4 \text{ мОм}$$

$$X_{\text{КЛ2}} = x_0 \cdot l = 0,15 \cdot 20 = 3 \text{ мОм}$$

Схема заміщення цехової мережі для розрахунку струмів однофазного КЗ представлена на рис.13.

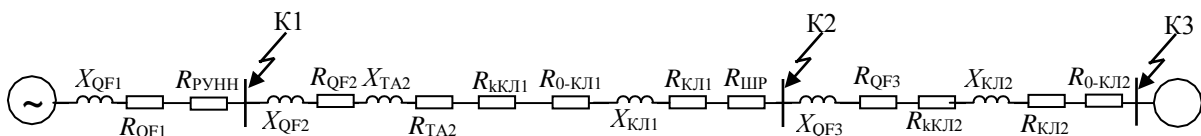


Рисунок 13 – Схема заміщення цехової мережі для розрахунку однофазних

Спростимо схему заміщення, визначивши еквівалентні опори на ділянках схеми між точками КЗ

$$R_1 = R_{QF1} + R_{РУНН} = 0,08 + 15 = 15,08 \text{ мОм}$$

$$X_1 = X_{QF1} = 0,08 = 8,08 \text{ мОм}$$

$$R_2 = R_{QF2} + R_{ТА2} + R_{ккЛ1} + R_{КЛ1} + R_{ШР} + R_{0-КЛ1} = \\ = 0,12 + 0,07 + 0,024 + 0,653 + 25 + 0,653 = 26,52 \text{ мОм}$$

$$X_2 = X_{QF2} + X_{ТА2} + X_{КЛ1} = 0,13 + 0,05 + 0,8 = 8,18 \text{ мОм}$$

$$R_3 = R_{QF3} + R_{ккЛ2} + R_{КЛ2} + R_{0-КЛ2} = 2,4 + 0,043 + 12,5 + 12,5 = 27,44 \text{ мОм}$$

$$X_3 = X_{QF3} + X_{КЛ2} = 2,0 + 1,7 = 3,7 \text{ мОм}$$

Спрощена схема заміщення цехової мережі для розрахунку струмів однофазних КЗ не зміниться (рис. 12), однак значення опорів будуть іншими. Струм однофазного КЗ визначається за формулою

$$\frac{Z_{тр}}{3} + Z_{ф-0}$$

де U_{ϕ} - фазна напруга в точці КЗ, кВ;

$Z_{ф-0}^{(1)}$ - повне опір петлі «фаза нуль» до точки КЗ, Ом;

$Z_{тр}^{(1)}$ - повний опір трансформатора при однофазному КЗ, Ом.

Точка К1:

$$Z_{ф-0}^{(1)} = \sqrt{R_1^2 + X_1^2} = \sqrt{15,08^2 + 8,08^2} = 17,1 \text{ мОм}$$

$$I_{КЗ} = \frac{81}{3 + 17,1} = 5,2 \text{ кА}$$

Точка К2:

$$Z_{ф-0} = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2} = \sqrt{(15,08 + 26,52)^2 + (8,08 + 8,18)^2} = 44,67 \text{ мОм}$$

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{27 + 44,67} = 3,2 \text{ кА}$$

$$Z_{ф-0} = \sqrt{(R_1 + R_2 + R_3)^2 + (X_1 + X_2 + X_3)^2} =$$

$$\sqrt{(15,08 + 26,52 + 27,44)^2 + (8,08 + 8,18 + 3,7)^2} = 71,9 \text{ мОм}$$

$$I_{КЗ}^{(1)} = \frac{230 \cdot 10^3}{27 + 71,9} = 2,3 \text{ кА}$$

Таблиця 4 – Зведена відомість струмів КЗ

Розрахункові точки		K1	K2	K3
Струми КЗ, кА	$I_{\text{КЗ}}^{(1)}$	5,2	3,2	2,3
	$I_{\text{КЗ}}^{(2)}$	11,1	4,35	3,28
	$I_{\text{КЗ}}^{(3)}$	12,8	5,0	3,8
	$i_{\text{уд}}$	18,1	7,1	5,3

2. Завдання

Для схеми цехової мережі до 1000 В (рис. 14) визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ». Живлення розподільної шафи ШР від розподільного пристрою РУ цехової підстанції виконано шинопроводом ШНП. Для живлення окремих електроприймачів використовуються чотири одножильних дроти марки АПРТО однакового перетину з прокладкою в трубах.

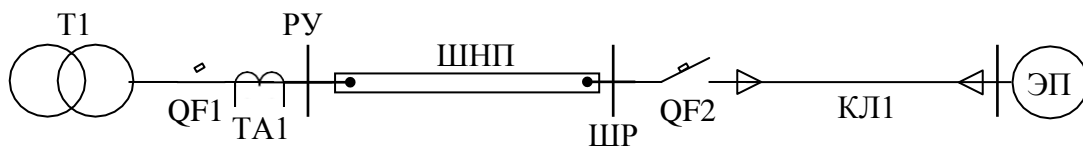


Рисунок 14 – Схема електропостачання цехової мережі

Варіанти завдань наведені в таблиці 5.

Таблиця 5 – Варіанти завдань

№ вар	T1	QF1	ШНП		QF2	КЛ1		№ вар	T1	QF1	ШНП		QF2	КЛ1	
	$S_{\text{НОМ}},$ кВА	$I_{\text{НОМ}},$ А	$I_{\text{НОМ}},$ А	$l, \text{ м}$	$I_{\text{НОМ}},$ А	$S,$ мм^2	$l, \text{ м}$		$S_{\text{НОМ}},$ кВА	$I_{\text{НОМ}},$ А	$I_{\text{НОМ}},$ А	$l, \text{ м}$	$I_{\text{НОМ}},$ А	$S,$ мм^2	$l, \text{ м}$
1	1600	2500	2500	30	250	120	10	11	1600	2500	2500	10	80	25	20
2	1000	1600	1600	25	200	95	15	12	1000	1600	1600	20	100	35	10
3	630	1000	1250	20	160	70	5	13	630	1000	1250	30	125	50	20
4	400	630	630	15	125	50	10	14	400	630	630	20	160	70	25
5	250	400	400	10	100	35	15	15	250	400	400	10	200	95	25
6	1600	2500	3200	10	80	25	20	16	1600	2500	3200	20	250	120	10
7	1000	1600	2500	15	250	120	10	17	1000	1600	2500	30	250	120	5
8	630	1000	1600	20	200	95	5	18	630	1000	1600	15	160	95	15
9	400	630	1000	25	160	95	20	19	400	630	1000	20	125	70	10
10	250	400	630	30	125	70	10	20	250	400	630	25	100	50	20

III. Заключна частина заняття. Перевірка і оцінювання виконаних завдань.
Підведення підсумків лабораторного заняття, акцентування уваги на основних помилках при його виконанні.

Тема № 5 Струмові захисти ліній з одностороннім живленням.

Лабораторне заняття: Моделювання схеми електропостачання для розрахунку струмів короткого замикання в мережі до 1000 В в середовищі Electronics Workbench.

Навчальна мета заняття: оволодіння методикою математичного моделювання і розрахунку струмів КЗ в мережах до 1000 В в середовищі Electronics Workbench.

Кількість годин - 2 (денна форма); 0 (заочна форма).

Місце проведення: аудиторія коледжу.

Навчальні питання:

1. Побудова моделі системи електропостачання в Electronics Workbench.
2. Приклад розрахунку.
3. Завдання до розрахунку.

Література: 1 - 7.

План проведення заняття:

I. Вступ до заняття. Проведення попереднього контролю теоретичних знань, практичних умінь і навичок здобувачів вищої освіти.

II. Основна частина заняття.

Для схеми електропостачання (лаб. робота №3, рис. 10) потрібно скласти схеми заміщення в редакторі Electronics Workbench; визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ».

1. Моделювання схеми цехової мережі для розрахунку струмів трифазного і двофазного КЗ

Схема заміщення однієї фази мережі для розрахунку струмів КЗ визначена в попередній лабораторній роботі (рис. 12). Зберемо дану схему в схемотехнічному редакторі, доповнивши її амперметром на виведенні джерела живлення і активним опором навантаження.

Визначимо опір навантаження для однієї фази цехового трансформатора, прийнявши за коефіцієнт завантаження силового трансформатора по активній потужності найбільш типовий випадок - $K_z = 0,7$.

$$R_H = \frac{P_{ф.тр}}{K_z \cdot S_{тр.ф.ном}} = \frac{U_{ф.ном}^2}{233} = 0,21 \text{ Ом}$$

кВт, звідки $R_H = 0,21 \text{ Ом}$

У вікні редактора виділимо всі елементи схеми заміщення для однієї фази мережі, скопіюємо їх в буфер обміну і зробимо дві вставки. Зберемо схему модельованої системи електропостачання в трифазному виконанні, для чого виконаємо необхідні з'єднання. Зробимо систему живлення ЕРС симетричною, встановивши кут зсуву фаз В і С 120 та 240 градусів відповідно. Для цього потрібно відкрити вікно редактора властивостей джерела змінної напруги (AC Voltage Source) та внести відповідні зміни (рис. 15).

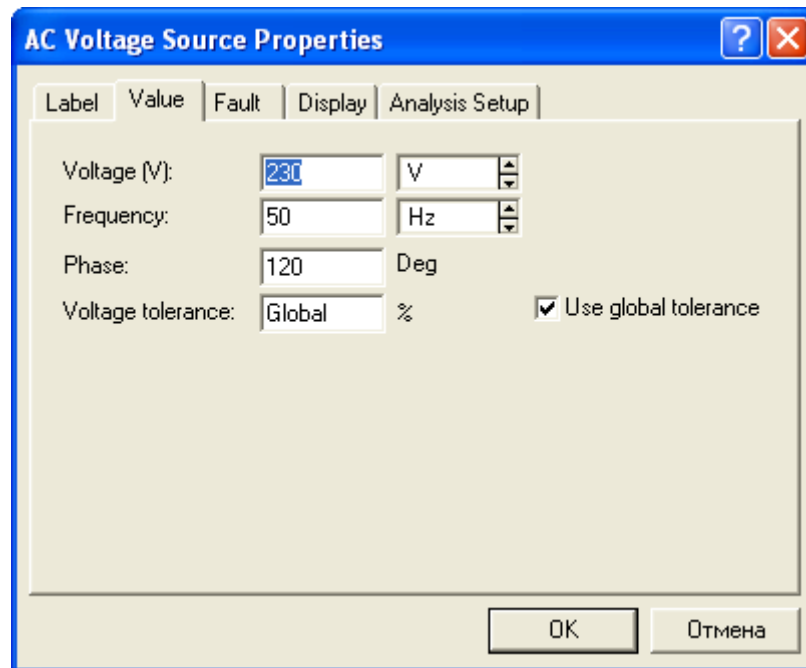


Рисунок 15 – Вікно властивостей джерела змінної напруги

Математична модель схеми електропостачання для розрахунку струмів трифазних і двофазних КЗ в середовищі Electronics Workbench представлена на рис.16.

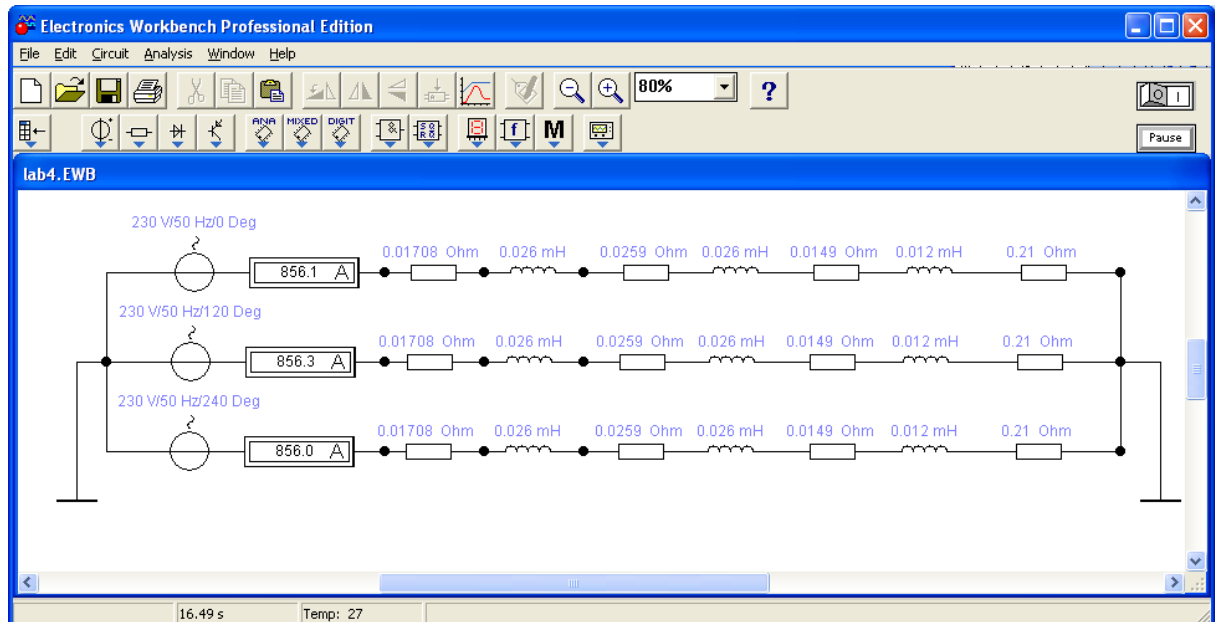


Рисунок 16 – Схема цехової мережі в режимі номінального навантаження

Для зручності дослідження доповнимо математичну модель комутаційними ключами (Switch), керованими клавішами з клавіатури і для кожного ключа призначимо свою клавішу. Для цього потрібно відкрити вікно властивостей кожного ключа і внести необхідні зміни (рис. 17).

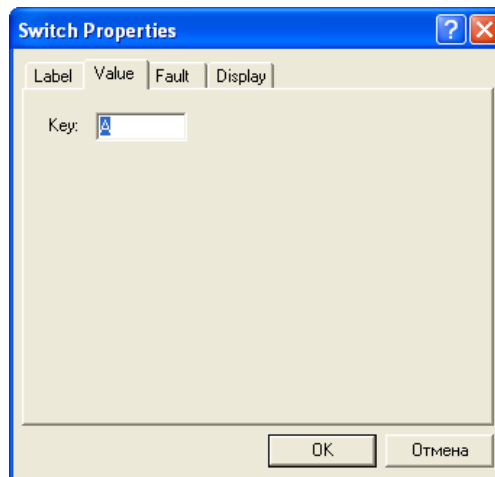


Рисунок 17 – Вікно властивостей ключа

На рис. 18 представлена математична модель системи електропостачання для дослідження режимів трьох-, двофазних КЗ. На рисунку показана схема в режимі трифазного КЗ в точці К1.

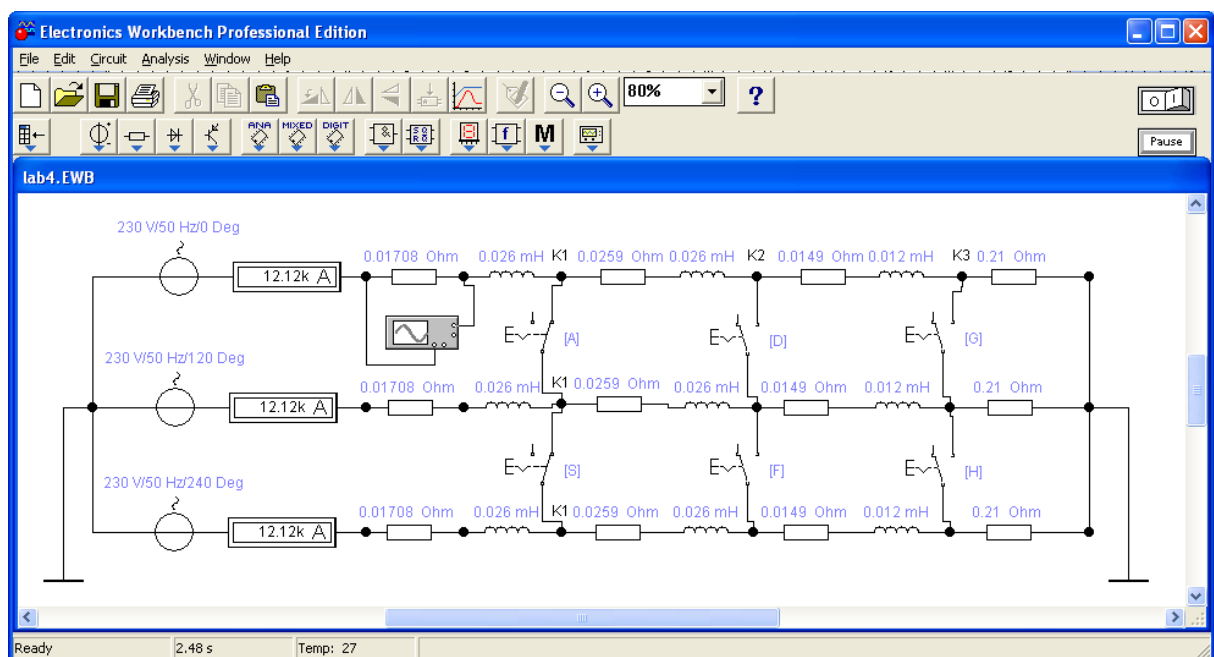


Рисунок 18 – Схема цехової мережі в режимі трифазного КЗ в точці К1

Замикаючи відповідні ключі можна провести дослідження цехової системи електропостачання в режимах трифазних і двофазних КЗ.

Моделювання схеми цехової мережі для аналізу режиму однофазного КЗ

Принципова відмінність режиму однофазного КЗ від дво-, трифазних полягає в тому, що режим роботи мережі в цьому випадку є несиметричним. І якщо в режимах трьох-, двофазних КЗ нульовий провід залишається ненавантаженим, то в режимі однофазного КЗ по нульовому проводу протікає

струм короткого замикання. Це легко побачити на математичній моделі, підключивши між загальною точкою фазних ЕРС і землею амперметр.

Для дослідження схеми електропостачання в режимах однофазного КЗ потрібно додати в математичну модель опору нульових провідників і врахувати зміну опору трансформатора.

Опір силового трансформатора при завантаженні однієї фази (однофазне КЗ) за табл. А.2 $Z_{\text{тр}}^{(1)} = 81 \text{ мОм}$

Наведемо до однієї фази $Z_{\text{тр.ф}}^{(1)} = Z_{\text{тр}}^{(1)} / 3 = 27 \text{ мОм}$

Будемо вважати опір силового трансформатору чисто індуктивним.

Опори нульових жил кабельних ліній КЛ1 і КЛ2 визначені в лабораторній роботі № 3:

$$R_{0\text{-КЛ1}} = 0,653 \text{ мОм},$$

$$R_{0\text{-КЛ2}} = 12,5 \text{ мОм}$$

Доповнимо математичну модель двома опорами: активним $R_0 = R_{0\text{-КЛ1}} + R_{0\text{-КЛ2}} = 13,15 \text{ мОм}$ і реактивним $X_0 = 27 \text{ мОм}$.

Підключимо ці опору між загальною точкою ЕРС і землею і додамо ще три ключа. Математична модель готова до дослідження режимів однофазних КЗ.

На рис. 19 представлена математична модель системи електропостачання для дослідження всіх можливих режимів КЗ. На рисунку представлена модель схеми цехової мережі в режимі однофазного КЗ на землю фази С в точці К1.

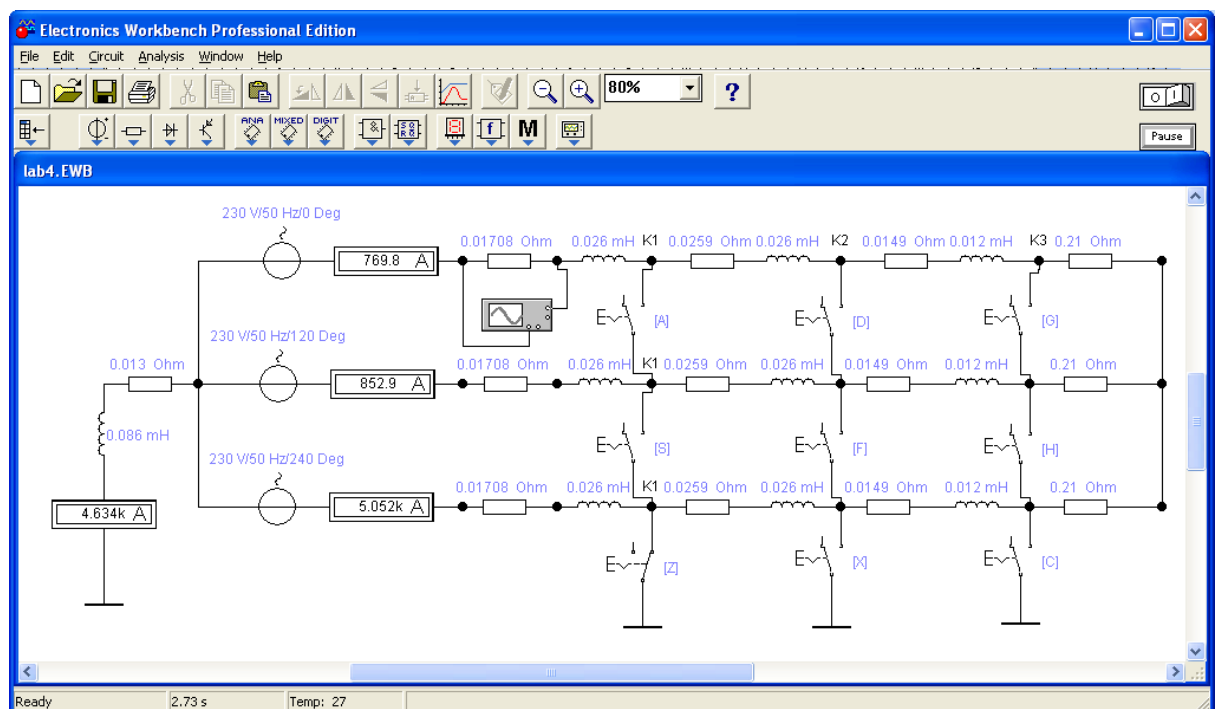


Рисунок 19 – Схема цехової мережі в режимі однофазного КЗ фази С в точці К1

Завдання

Для схеми електричної мережі до 1000 В (рис. 14) потрібно скласти математичну модель цехової системи електропостачання для дослідження режимів КЗ в програмі схемотехнічного моделювання Electronics Workbench; визначити струми КЗ і скласти «зведену відомість струмів КЗ».

Провести дослідження перехідних процесів зміни струмів під час КЗ, визначити за осцилографом значення ударного струму КЗ в кожній точці і тривалість перехідного процесу КЗ. Порівняти і проаналізувати результати моделювання схеми електропостачання з результатами, отриманими в лабораторній роботі 3.

III. Заключна частина заняття. Перевірка і оцінювання виконаних завдань. Підведення підсумків лабораторного заняття, акцентування уваги на основних помилках при його виконанні.

3. Рекомендована література

Основна література:

1. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник.- Львів:Вид-во НУ «Львівська політехніка», 2013. – 533 с.
2. Чернобровов Н.В. Релейная защита энергетических систем/ Чернобровов Н.В., Семенов В.А. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 800 с.
3. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита/ Шнеерсон Э.М. – М.: Энергоатомиздат, 2007. -549.

Допоміжна література:

1. Андрев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: учеб.для вузов/ В.А.Андреев. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш.шк., 2006 – 639 с.
2. Басс Э.И. Релейная защита электроэнергетических систем: учеб.пособие/ Басс Э.И., Дорогунцев В.Г.; под ред. А.Ф.Дьякова. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 296 с.
3. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная автоматикаи рлейная защита электроэнергетических систем: учеб. пособие для вузов./ А.Ф.Дьяков, Н.И.Овчаренко. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008. – 336 с.
4. Циглер Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение/ Циглер Г.; пер. с англ. под ред. Дьякова А.Ф. – м.: Энергоиздат, 2005. – 322 с.
5. Перехідні процеси в системах електропостачання/ [Півняк Г.Г., Винославський В.М., Рибалко А.Я., Несен Л.І.]; за ред. академіка НАН України Г.Г.Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2002. – 597 с.
6. Куликов Ю.А. Переходные процессы в электрических системах: учеб.пособие/ Куликов Ю.А. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 283 с.
7. Reimert D.Protective relaying for power generation/ Donald Reimert/ - USA, FL, Boca Raton: CRC Press, 2006/ - 561 p.
8. Preve C. protection of electrical networks/ Christophe Preve/ - GB: Antony Rowe Ltd, Chippenham, Wiltshire, 2006. – 508 p.

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. Офіційний сайт Міністерство енергетики та вугільної промисловості України <http://mpe.kmu.gov.ua/>
2. Сервер Верховної Ради України. – Режим доступу : www.rada.gov.ua.

Таблиця А.1 – Ударні коефіцієнти в залежності від мсця КЗ

Місце короткого замикання	$K_{уд}$
Виводи явнополюсного генератора с заспокоючою обмоткою	1,93
Виводи турбогенератора	1,91
В колі без урахування активного опору	1,8
На стороні до 1000 В трансформаторів потужністю: 1600, 2500 кВ·А	1,4
630, 1000 кВ·А	1,3
100, 250, 400 кВ·А	1,2
Віддалені точки КЗ с урахуванням активного опору	по рис.1

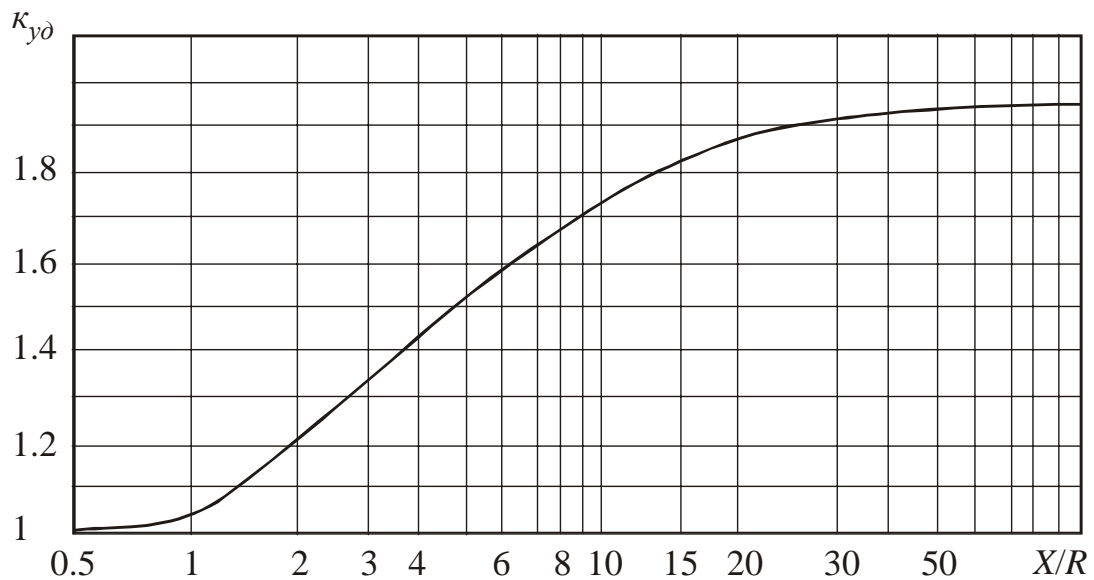


Рисунок А.1 – Кривая для определения ударного коэффициента

Таблиця А.2 – Сопротивления понижающих трансформаторов мощностью до 1600 кВ·А, приведенные к вторичному напряжению 0,4/0,23 кВ

Потужність, кВА	Верхня межа первинної напруги, кВ	Схема з'єднань обмоток	$\Delta P_{кз},$ кВт	$u_{кз},$ %	$R_{тр},$ мОм	$X_{тр},$ мОм	$Z_{тр},$ мОм	$Z_{тр}^{(1)},$ мОм
63	10	Y/Y _H	1,28	4,5	52	102	114	1237
100	10	Y/Y _H	1,97	4,5	31,5	64,7	72	779
160	10	Y/Y _H	2,65	4,5	16,6	41,7	45	487
250	10	Y/Y _H	3,7	4,5	9,4	27,2	28,7	312
400	10	Y/Y _H	5,5	4,5	5,5	17,1	18	195
630	10	Y/Y _H	7,6	5,5	3,1	13,6	14	129
1000	10	Y/Y _H	12,2	5,5	2	8,5	8,8	81
1600	10	Y/Y _H	18	5,5	1	5,4	5,4	54

Таблиця 1.3 – Питомий опір комплектних шинопроводів

Параметри	Тип комплектного шинопровода						
	ШМА				ШРА		
$I_{\text{ном}}, \text{А}$	1250	1600	2500	3200	250	400	630
$r_0, \text{мОм/м}$	0,034	0,030	0,017	0,015	0,21	0,15	0,10
$x_0, \text{мОм/м}$	0,016	0,014	0,008	0,007	0,21	0,17	0,13
$r_{0(\phi-0)}, \text{мОм/м}$	0,068	0,060	0,034	0,030	0,42	0,30	0,20
$x_{0(\phi-0)}, \text{мОм/м}$	0,053	0,060	0,075	0,044	0,42	0,24	0,26
$z_{0(\phi-0)}, \text{мОм/м}$	0,086	0,087	0,082	0,053	0,59	0,38	0,33

Таблиця А.4 – Перехідні опори на ступінях розподілення

Ступінь	Місце	$R_{\text{ступ.}}, \text{мОм}$	Додаткові відомості
1	Пристрої розподілення підстанції	15	Використовуються при відсутності достовірних даних про контакти та їх перехідні опори в мережах, що живляться від цехових трансформаторів потужністю до 2500 кВА включно
2	Первинні розподільчі цехові пункти	20	
3	Вторинні розподільчі цехові пункти	25	
4	Аппаратура управління електроприймачів, що отримують живлення від вторинних РП	30	

Таблиця А.5 – Активний та індуктивний опори проводів та кабелів с алюмінієвими та мідними жилами

Перетин, мм^2	Опір, мОм/м					
	активне		індуктивне			
	алюміній	мідь	провода відкрито проложені	кабель з паперовою поясною ізоляцією	провода в трубах, кабель з довільною ізоляцією (окрім паперової)	повітряна лінія до 1000 В
2,5	12,5	7,4	0,358	0,104	0,116	—
4,0	7,81	4,63	0,343	0,095	0,107	—
6,0	5,21	3,09	0,330	0,09	0,1	—
10	3,12	1,84	0,307	0,073	0,099	—
16	1,95	1,16	0,293	0,0675	0,095	0,354
25	1,25	0,74	0,278	0,0662	0,091	0,339
35	0,894	0,53	0,268	0,0637	0,088	0,330
50	0,625	0,37	0,256	0,0625	0,085	0,317
70	0,447	0,265	0,245	0,0612	0,082	0,307
95	0,329	0,195	0,236	0,0602	0,081	0,297
120	0,261	0,154	0,229	0,0602	0,080	0,293
150	0,208	0,124	0,21	0,0596	0,079	—
185	0,169	0,1	0,21	0,0596	0,078	—
240	0,130	0,077	0,20	0,0587	0,077	—

Таблиця А.6 – Активний опір 1 км кабельних та повітряних ліній, Ом/км

Площа перетину, мм ²	Жила трижильного кабеля		Фаза, виконана проводом марки			
	алюмінієва	мідна	А	АС и АСО	АСУ	М
1	—	18,5	—	—	—	—
1,5	—	12,5	—	—	—	—
2,5	12,5	7,4	—	—	—	—
4	7,81	4,63	—	—	—	—
6	5,21	3,09	—	—	—	3,06
10	3,12	1,84	—	—	—	1,84
16	1,95	1,16	1,98	2,06	—	1,2
25	1,25	0,74	1,28	1,31	—	0,74
35	0,894	0,53	0,92	0,85	—	0,54
50	0,625	0,37	0,64	0,65	—	0,39
70	0,447	0,265	0,46	0,46	—	0,28
95	0,329	0,195	0,34	0,37	—	0,2
120	0,261	0,154	0,27	0,27	0,28	0,158
150	0,208	0,124	0,21	0,21	0,21	0,128
185	0,169	0,1	0,185	0,17	0,17	0,103
240	0,13	0,077	—	0,132	0,131	0,078
300	—	—	—	0,107	0,106	—
400	—	—	—	0,08	0,079	—

Таблиця А.7 – Середнє значення погонних реактивних опорів ліній мережі

Характеристика ліній	x_0 , мОм/м
Кабельні лінії з напругою: до 1000 В	0,06
6–10 кВ	0,08
Ізольовані проводи внутрішньої проводки	0,11
Шинопроводи	0,15
Повітряні лінії з напругою: до 1000 В	0,31
6–10 кВ	0,38
35–220 кВ	0,40
500 кВ (с трьома проводами у фазі)	0,29

Таблиця А.8 – Активні перехідні опори нерухомих контактних з'єднань

Кабель		Комплектний шинопровід	
S , мм ²	R_k , мОм	$I_{ном}$, А	R_k , мОм
16	0,085	<i>Розподільний</i>	
25	0,064	250	0,009
35	0,056	400	0,006
50	0,043	630	0,0037
70	0,029	<i>Магістральний</i>	
95	0,027	1600	0,0034
120	0,024	2500	0,0024
185	0,021	3200	0,0012
240	0,012	4000	0,0011

Таблиця А.9 – Середні значення опорів первинних обмоток трансформаторів струму

Коефіцієнт трансформації	Опори, мОм, трансформаторів струму класу точності			
	1		3	
	$X_{т.т}$	$R_{т.т}$	$X_{т.т}$	$R_{т.т}$
20/5	67	42	17	19
30/5	30	20	8	8,2
40/5	17	11	4,2	4,8
50/5	11	7	2,8	3
75/5	4,8	3	1,2	1,3
100/5	1,7	2,7	0,7	0,75
150/5	1,2	0,75	0,3	0,33
200/5	0,67	0,42	0,17	0,19
300/5	0,3	0,2	0,08	0,09
400/5	0,17	0,11	0,04	0,05
600/5	0,07	0,05	0,02	0,02

Таблиця А.10 – Середні значення опорів вимикаючих апаратів

Номинальний струм, А	Опір роз'єднувачів автоматичних вимикачів при 65°C, мОм		Перехідні опори контактів, R_k , мОм		
	R_a	X_a	автоматичних вимикачів	рубильників	роз'єднувачів
50	5,50	4,50	1,3	—	—
70	2,40	2,00	1,00	—	—
100	1,30	1,20	0,75	0,50	—
150	0,70	0,70	0,70	0,45	—
200	0,40	0,50	0,60	0,40	—
400	0,15	0,17	0,40	0,20	0,20
600	0,12	0,13	0,25	0,15	0,15
1000	0,10	0,10	0,15	0,08	0,08
1600	0,08	0,08	0,10	—	0,06
2000	0,07	0,08	0,08	—	0,03
2500	0,06	0,07	0,07	—	0,03
3000	0,05	0,07	0,06	—	0,02
4000	0,04	0,05	0,05	—	—

Таблиця 1.11 – Реактивний опір неізольованих алюмінієвих та сталюалюмінієвих проводів, Ом/км

Марка	При середній геометричній відстані меж проводами, мм									
	800	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
A-35	0,352	0,366	0,391	0,410	—	—	—	—	—	—
A-50	0,341	0,355	0,380	0,398	0,413	0,423	0,433	0,442	—	—
A-70	0,331	0,345	0,370	0,388	0,402	0,413	0,423	0,431	—	—
A-95	0,319	0,333	0,358	0,377	0,393	0,402	0,413	0,421	—	—
A-120	0,313	0,327	0,352	0,371	0,385	0,396	0,405	0,414	—	—
A-150	0,305	0,315	0,344	0,363	0,376	0,388	0,398	0,406	0,416	0,422
A-185	0,298	0,311	0,339	0,355	0,370	0,382	0,391	0,399	0,409	0,416
A-240	—	0,304	0,329	0,347	0,361	0,372	0,382	0,391	0,401	0,406
A-300	—	0,297	0,322	0,340	0,354	0,366	0,376	0,381	0,394	0,401
A-400	—	0,289	0,315	0,331	0,344	0,356	0,366	0,374	0,386	0,391
A-500	—	0,281	0,305	0,324	0,337	0,348	0,389	0,366	0,377	0,383
A-600	—	0,275	0,300	0,318	0,330	0,343	0,353	0,361	0,370	0,377
AC-16	0,374	0,389	0,411	0,430	0,442	—	—	—	—	—
AC-25	0,362	0,376	0,398	0,407	0,417	0,431	—	—	—	—
AC-35	0,346	0,362	0,385	0,403	0,412	0,429	0,438	0,446	—	—
AC-50	0,338	0,353	0,374	0,392	0,406	0,418	0,427	0,435	—	—
AC-70	0,327	0,341	0,364	0,382	0,396	0,408	0,417	0,425	0,433	0,440
AC-95	0,317	0,331	0,353	0,371	0,385	0,397	0,406	0,414	0,422	0,429
AC-120	0,309	0,323	0,347	0,365	0,379	0,391	0,400	0,408	0,416	0,423
AC-150	—	—	—	0,358	0,372	0,384	0,398	0,401	0,409	0,416
AC-185	—	—	—	—	0,365	0,377	0,386	0,394	0,402	0,409
AC-240	—	—	—	—	—	0,369	0,378	0,386	0,394	0,401
AC-300	—	—	—	—	—	0,358	0,368	0,379	0,385	0,395