

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА

на тему:

«Розробка моделей схем релейного захисту в програмному
комплексі MathLab»

Спеціальність 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав

студент гр. ЕТ-61

_____ І.О. Крамський

Керівник

к.ф.-м.н., доцент

_____ М.В. Петровський

РЕФЕРАТ

с. 96, рис. 98, табл. 9.

Бібліографічний опис: Крамський І.О. Розробка моделей схем релейного захисту в програмному комплексі MathLab [Текст]: робота на здобуття кваліфікаційного ступеня бакалавр; спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / І.О. Крамський; керівник М.В. Петровський. – Суми: СумДУ, 2020. – 96 с.

Ключові слова:

віртуальний стенд, реле, коротке замикання, релейний захист;
виртуальный стенд, реле, короткое замыкание, релейная защита;
virtual stand, relay, short circuit, relay protection.

Об'єкт дослідження: схеми релейного захисту.

Короткий огляд.

Розроблено віртуальні стенди для проведення досліджень схем релейного захисту. Досліджено основні характеристики реле. Порівняли отримані характеристики з реальними характеристиками реле. Представлено характеристики, принцип дії реле, методики розрахунків коротких замикань, які застосовувались при побудові алгоритмів програм.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
						3
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

1.	Загальні відомості	7
1.1	Призначення релейного захисту	7
1.2	Призначення та основні характеристики реле	8
2.	Дослідження електромагнітного реле струму РТ-40.....	11
2.1	Загальні відомості	11
2.2	Дослідження реле РТ-40	11
2.2.1	Віртуальний стенд для дослідження реле РТ-40.....	11
2.2.2	Виконання дослідіду	14
3.	Дослідження характеристик реле напрямку потужності РБМ-171.....	19
3.1	Загальні відомості	19
3.1.1	Конструкція і принцип дії	19
3.1.2	Основні характеристики	23
3.1.3	Схеми ввімкнення реле напрямку потужності.....	25
3.2	Дослідження реле напрямку потужності	27
3.2.1	Опис віртуальної установки	27
3.2.2	Виконання дослідіду	29
4.	Дослідження максимального струмового захисту лінії електропередач	38
4.1	Загальні відомості	38
4.1.2	Максимальний струмовий захист.....	38
4.1.3	Розрахунок параметрів реле струму.....	43
4.2	Перехідні процеси при порушенні симетрії	45
4.2.1	Загальні відомості	45

					БР 3.6.141.313ПЗ			
<i>Зм</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ док.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>	Розробка моделей схем релейного захисту в програмному комплексі MathLab. Пояснювальна записка.	<i>літ.</i>	<i>арк.</i>	<i>аркушів</i>
<i>Розроб.</i>	<i>Крамський</i>					4	96	
<i>Керівник</i>	<i>Петровський</i>							
<i>Консульт.</i>								
<i>Н. контроль</i>								
<i>Зав. каф.</i>	<i>Лебединський</i>				СумДУ, ЕТ-61			

4.1.5	Метод симетричних складових.....	46
4.1.6	Схеми заміщення для окремих послідовностей.....	50
4.1.7	Двофазне коротке замикання	53
4.3	Дослідження максимального струмового захисту.....	54
4.3.1	Опис віртуального стенда	54
4.3.2	Виконання досліду	57
5.	Дослідження направленої максимальної струмової захисту	61
5.1	Загальні відомості	61
5.1.1	Максимальний струмовий спрямований захист	62
5.1.3	Загальна оцінка струмових спрямованих захистів	65
5.2	Перехідні процеси при трифазних коротких замиканнях.....	66
5.2.1	Коротке замикання в радіальній мережі.....	66
5.2.2	Основні положення.....	70
5.3	Дослідження роботи спрямованого захисту.....	71
5.3.1	Опис віртуального стенда	71
5.3.2	Виконання досліду	74
6.	Охорона праці. Захист повітряних та кабельних ліній у мережах напругою 3 - 10 кВ з ізольованою нейтраллю	89
	ВИСНОВОК.....	93
	СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	95

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Віртуальна лабораторія представляє собою програмно-апаратний комплекс, що дозволяє проводити досліди при повній відсутності реальної установки, так як усі процеси моделюються за допомогою комп'ютера.

Необхідність створення віртуальних лабораторій в освіті виникла в зв'язку з труднощами застосування в деяких випадках реальних лабораторій. Віртуальні лабораторії мають наступні перевагами в порівнянні з реальними:

- відсутність необхідності придбання дорогого устаткування. Через недостатнє фінансування в багатьох лабораторіях встановлено старе обладнання, яке може спотворювати результати дослідів. Зрозуміло, комп'ютерне обладнання та програмне забезпечення також коштує недешево, проте універсальність комп'ютерної техніки і її широке розповсюдження компенсують цей недолік.

- можливість моделювання процесів, протікання яких принципово неможливо в лабораторних умовах. Наочна візуалізація на екрані комп'ютера. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють поспостерігати процеси, важко розрізняються в реальних умовах без застосування додаткової техніки.

- у зв'язку з тим, що управлінням віртуального процесу займається комп'ютер, з'являється можливість швидкого проведення серії дослідів з різними значеннями вхідних параметрів, що часто необхідно для визначення залежностей вихідних параметрів від вхідних.

- можливість використання віртуальної лабораторії в дистанційному навчанні, коли в принципі відсутня можливість роботи в лабораторіях університету.

Звичайно, віртуальним лабораторіям притаманний деякий недолік. Головним з них є відсутність безпосереднього контакту з об'єктом дослідження, приладами та апаратурою. Але за наявності реле в лабораторіях існує можливість спочатку отримати певні навички у віртуальній середовищі, а після приступити до практичних дослідів, знаючи роботу реле.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		6

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ

1.1 Призначення релейного захисту

Сучасна електроенергетична система являє собою складний комплекс електротехнічного обладнання, розміщеного на значній території та об'єднаного єдиним режимом генерування, транспортування та споживання електроенергії.

В електроенергетичній системі відбуваються постійні збурення. Ці збурення можуть мати плановий характер: вимкнення та увімкнення генераторів, добова зміна рівня генерування електричної енергії на електричних станціях, режимні перемикання в електроенергетичній мережі тощо.

Крім цих планових збурень в електроенергетичній системі можуть виникати пошкодження та небезпечні особливі режими, які мають істотний вплив на обладнання та роботу електроенергетичної системи, загалом. Одним з найнебезпечніших пошкоджень, які наявні в електроенергетичній системі, є короткі замикання (КЗ), що виникають внаслідок пошкодження ізоляції струмоведучих частин електричного обладнання. Короткі замикання можуть привести до:

- руйнування пошкодженого елемента струмами КЗ, або дугою, яка може виникати в місці пошкодження;
- можливого руйнування обладнання на суміжних з пошкодженим елементом об'єктах електроенергетичної системи внаслідок теплової та динамічної дії струмів, величина яких перевищує допустимі значення;
- пониження рівня напруги у вузлових точках електроенергетичної системи, що може призвести до порушення технологічних процесів на підприємствах, а також до можливого порушення стійкості роботи електроенергетичної системи, яке, своєю чергою, призведе до повної втрати живлення споживачів електричною енергією.

Отже, після виникнення в електроенергетичній системі КЗ необхідно якомога швидше вимкнути пошкоджений елемент від джерел живлення.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		7

Крім аварій в електроенергетичній системі можуть виникати і особливі режими – перевантаження електротехнічного обладнання робочими струмами, хитання в системі, підвищення напруги вище номінального значення тощо.

Одним з найпоширеніших особливих режимів є режим перевантаження. Під час перевантаження в елементах електроенергетичної мережі виникають струми, величина яких є більшою від їх номінальних значень, хоча не до такого рівня, як під час КЗ. Це спричиняє перегрівання обладнання та передчасного старіння ізоляції, що своєю чергою може привести до виникнення КЗ.

Після виникнення особливих режимів необхідно вживати заходів для усунення таких режимів, а за неможливості таких дій, або у разі неуспішної дії – вимикати обладнання, яке працює в особливому режимі. У такому разі вимикання обладнання від джерел живлення потрібно здійснювати, зазвичай, з витримкою часу.

Вимкнення пошкодженого обладнання або обладнання, яке працює в особливому режимі, здійснюють спеціальні пристрої автоматики – пристрої релейного захисту (РЗ) [3].

1.2 Призначення та основні характеристики реле

Одним з основних елементів пристроїв релейного захисту є реле. Реле являє собою пристрій, в якому вихідний сигнал $y_{вих}$ змінюється стрибкоподібно, в залежності від зміни вхідної величини $y_{вх}$ у (рис. 1.1).

Коли вихідний сигнал змінився стрибкоподібно, кажуть, що реле спрацювало. Тобто є два стійких стани реле: реле в неспрацьованому стані – вихідний сигнал $y_{вих} = 0$, реле в спрацьованому стані $y_{вих} = 1$. Величина вхідного сигналу $y_{вх}$, за якого реле спрацьовує, називають уставкою спрацювання реле.

Розрізняють реле максимальної або мінімальної дії [2]. Реле максимальної дії спрацьовують за збільшення рівня вхідного сигналу до уставки спрацювання. Реле мінімальної дії спрацьовують за зменшення рівня вхідного сигналу до уставки спрацювання.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		8

В залежності від способу увімкнення реле (способу підведення вхідного сигналу) розрізняють первинні та вторинні реле. Первинні реле вмикають безпосередньо в первинне (силове) електричне коло. Вторинні реле вмикають у первинне коло через первинні вимірювальні перетворювачі струму чи напруги. Первинними вимірювальними перетворювачами слугують зазвичай трансформатори струму та трансформатори напруги.

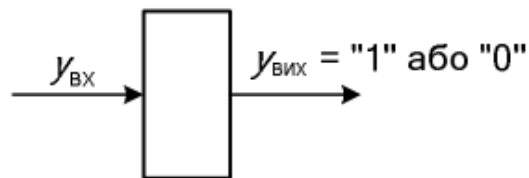


Рисунок. 1.1 – Реле

Залежно від дії на комутаційний апарат розрізняють реле прямої дії та реле посередкованої дії. Реле прямої дії діють безпосередньо на механізм вимкнення комутаційного апарата. Реле опосередкованої дії діють на комутаційний апарат через проміжні елементи, наприклад, через електромагніти вимкнення вимикачів.

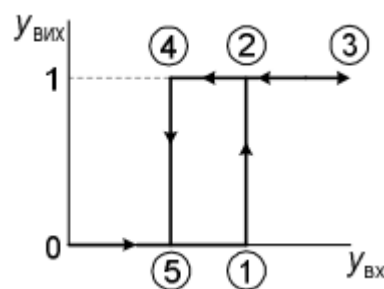


Рисунок 1.2 – Гістерезисна характеристика реле

Ще однією особливістю реле є наявність його гістерезисної характеристики.

Пояснимо сутність гістерезисної характеристики на прикладі реле максимальної дії. У разі збільшення вхідного сигналу $u_{вх}$ до величини, за якою реле

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		9

спрацьовує, тобто до уставки реле – $y_{ex} = y_{c.p.}$ (точка 1 на рис. 1.2) вихідна величина $y_{вих}$ зміниться стрибком (точки 1, 2). За подальшого збільшення вхідного сигналу y_{ex} ніяких змін вихідної величини не відбувається (точки 2, 3). Після зменшення вхідного сигналу y_{ex} до значення $y_{нов.p}$ (точка 5) реле повернеться у вихідний стан (точки 4, 5). Тобто повернення реле у вихідний стан здійснюватиметься за значенням вхідної величини $y_{ex} = y_{нов.p}$, яке є меншим від величини вхідного сигналу, за якого реле спрацьовує – $y_{нов.p} < y_{c.p.}$

Гістерезис характеристики реле визначають коефіцієнтом повернення реле $k_{нов}$, величину якого розраховують з виразу [2, с. 16]

$$k_{нов} = \frac{y_{нов.p}}{y_{c.p}}$$

Для реле максимальної дії $k_{нов} < 1$, для реле мінімальної дії $k_{нов} > 1$.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		10

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РЕЛЕ СТРУМУ РТ-40

2.1 Загальні відомості

Ці реле реагують на зміну струму джерела струму.

За способом увімкнення в первинне коло – це вторинні реле, їх під'єднують до вторинних кіл трансформаторів струму. За способом дії – опосередкові – діють на привід вимикачів через додаткові проміжні реле.

Електромагнітні реле струму застосовують у струмових захистах (струмова відсічка, струмова відсічка з витримкою часу, максимальний струмовий захист, диференційний захист, захисти від замикань на землю тощо).

Реле серії РТ-40 виготовляють в таких модифікаціях:

- РТ-40/Н, де Н – максимальне значення уставки за струмом;
- РТ-40/1Д – реле з великою кратністю тривалого допустимого перевантаження струмом;
- РТ-40/Ф – реле з пониженою чутливістю до вищих гармонік у струмі;
- РТ-40/Р-1, РТ-40/Р-5 – реле з суматором струмів для спеціальних захистів, а також пристрою резервування відмови вимикачів (ПРВВ).

Серійно виготовляють такі струмові реле серії РТ-40: РТ-40/0.2; РТ-40/0.6; РТ-40/2; РТ-40/6; РТ-40/10; РТ-40/20; РТ-40/50; РТ-40/100; РТ-40/200; де цифри після риски означають найбільший струм спрацювання, а також реле РТ-40/Р-1; РТ-40/Р-5; РТ-40/1Д; РТ-40/Ф.

2.2 Дослідження реле РТ-40

2.2.1 Віртуальний стенд для дослідження реле РТ-40

Програма «Дослідження електромагнітного реле струму РТ-40» створена в програмному комплексі MATLAB. Однією із переваг є те, що її установка на комп'ютер виконується, як установка звичайної програми, що дозволяє не завантажувати MATLAB. Інтерфейс при запуску представлено на рис. 2.1.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		11

Стенд складається з таких елементів: вмикач 1, регульоване джерело змінної напруги 24 В 2, вольтметр 3, реостат 4, амперметр 5, реле струму 6, контактів реле 7. Лампа над вимикачем 1 свідчить про підключення джерела до кола – зелений колір або відсутність – білий колір. Індикаторні лампи навпроти контактів показують контакти реле є замкнутими (зелений колір) або розімкненими (білий колір). Вимикач 1 є інтерактивним елементом, тобто під час моделювання його положення можна змінювати, що дає змогу дослідити характеристику часу спрацювання від струму.

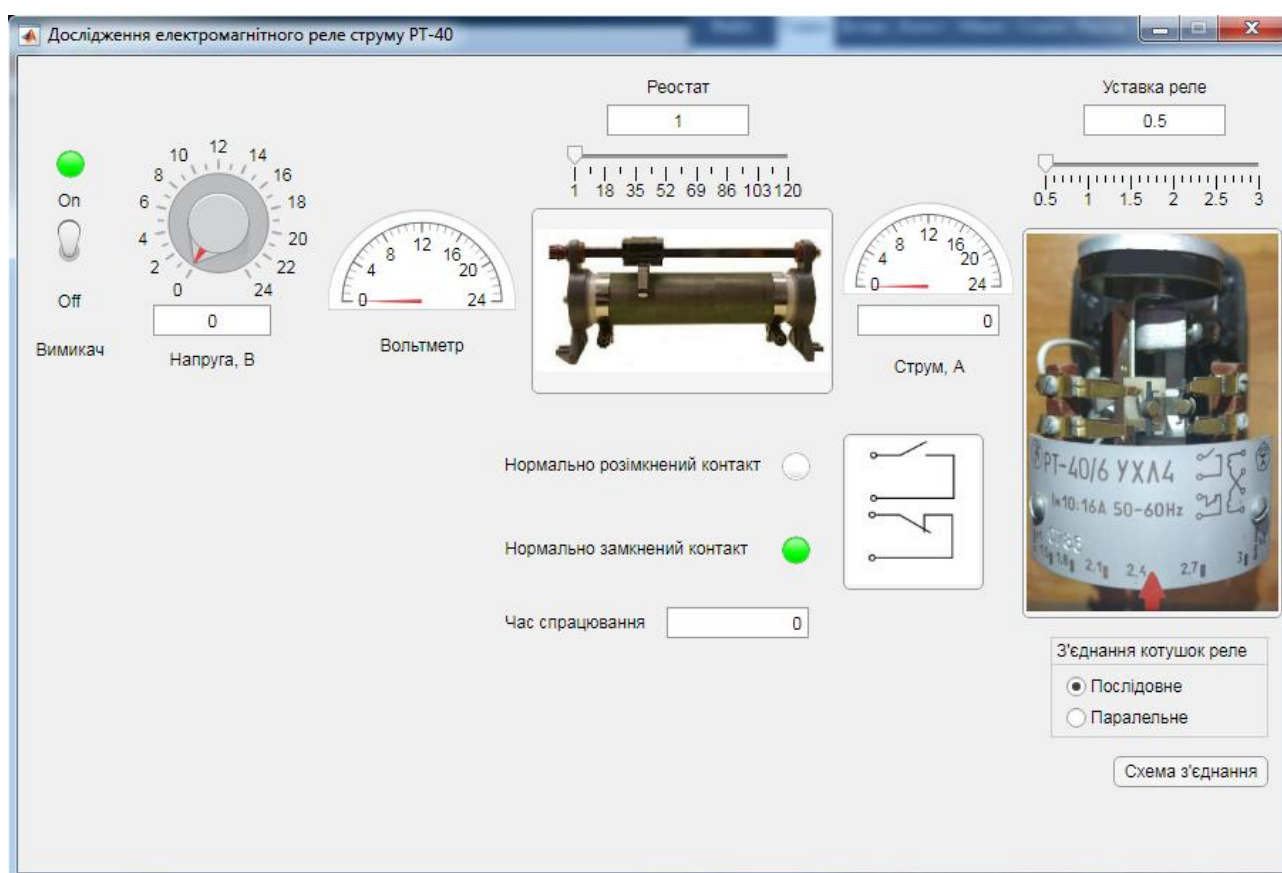


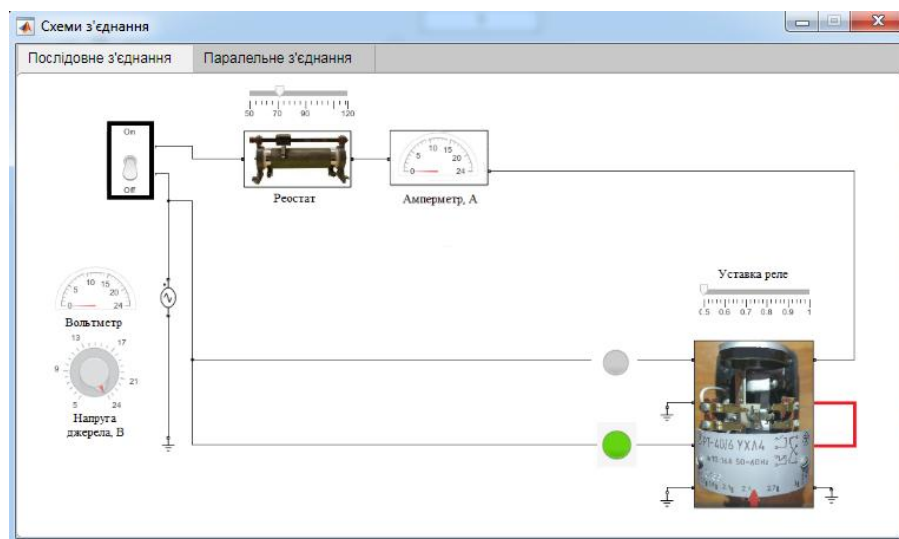
Рисунок 2.1 – Інтерфейс програми «Дослідження електромагнітного реле струму РТ-40»

За допомогою інтерактивних повзунків 8 та 9 можна змінювати значення опору реостата та величину уставки реле відповідно. Так як при застосуванні даних елементів виникають певні незручності, а саме неможливість встановлення точного значення параметра елемента, то над ними розташовані поля для ручного вводу.

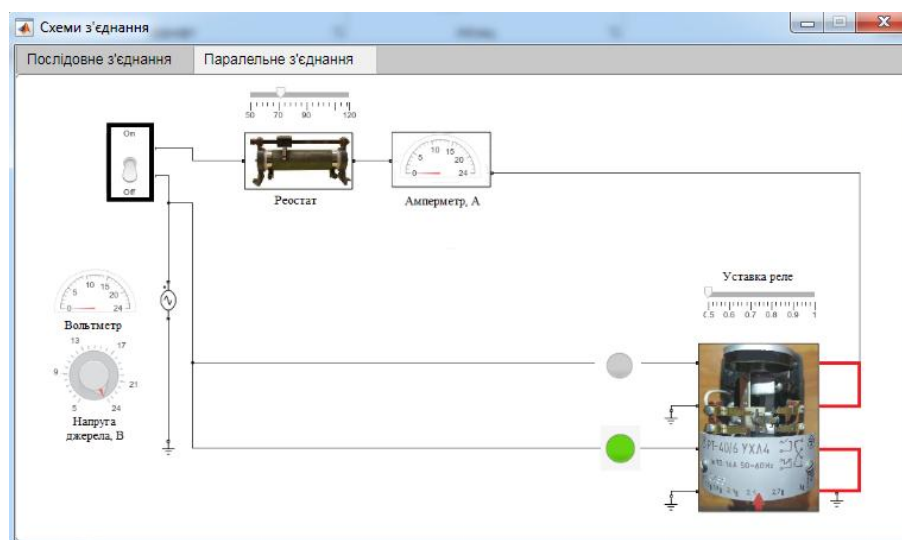
					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		12

У реле РТ-40 котушки можна підключити двома способами: паралельно та послідовно. Для реалізації цієї дії у програмі передбачено панель «З'єднання котушок».

Для перегляду схем підключення елементів необхідно натиснути кнопку «Схема з'єднання». Після чого з'явиться вікно (рис. 2.2). У даному вікні існує дві вкладки – «Послідовне з'єднання» (рис. 2.3, а) та «Паралельне з'єднання» (рис. 2.3, б). При переході на вкладки відображаються схеми з'єднання котушок.



а)



б)

Рисунок 2.3 – Вікно «Схеми з'єднання»

2.2.2 Виконання досліду

1. Дослідимо роботу реле РТ-40/6 при двох значеннях струму уставки $I_{уст} = 1,8 А$, $I_{уст} = 3,6 А$.
2. Виставимо за допомогою інтерактивного повзунка або запишемо в полі значення опору реостата 10 Ом.
3. Встановимо значення уставки рівне $I_{уст} = 1,8 А$.
4. При уставці реле $I_{уст} = 1,8 А$ з'єднання котушок на панелі обираємо «Послідовне».

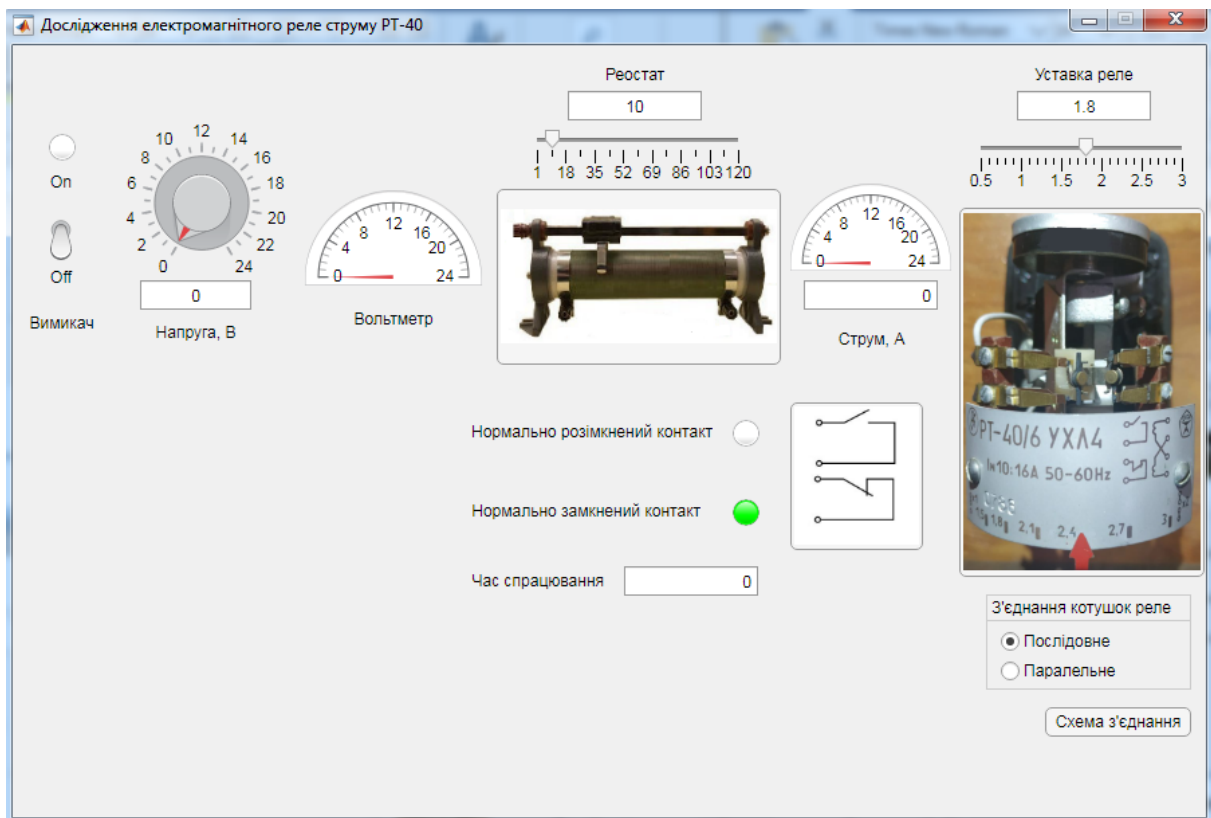


Рисунок 2.4 – Стенд до вмикання вимикача

5. За допомогою вимикача 1 (рис. 2.1) ввімкнемо джерело змінної напруги і плавно підвищуємо напругу до спрацювання реле (рис. 2.5). Визначаємо величину струму спрацювання. Проводимо п'ять вимірів та заносимо до табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Визначення струму спрацювання

$I_{с.р.}, A$	1,806	1,803	1,808	1,802	1,803
---------------	-------	-------	-------	-------	-------

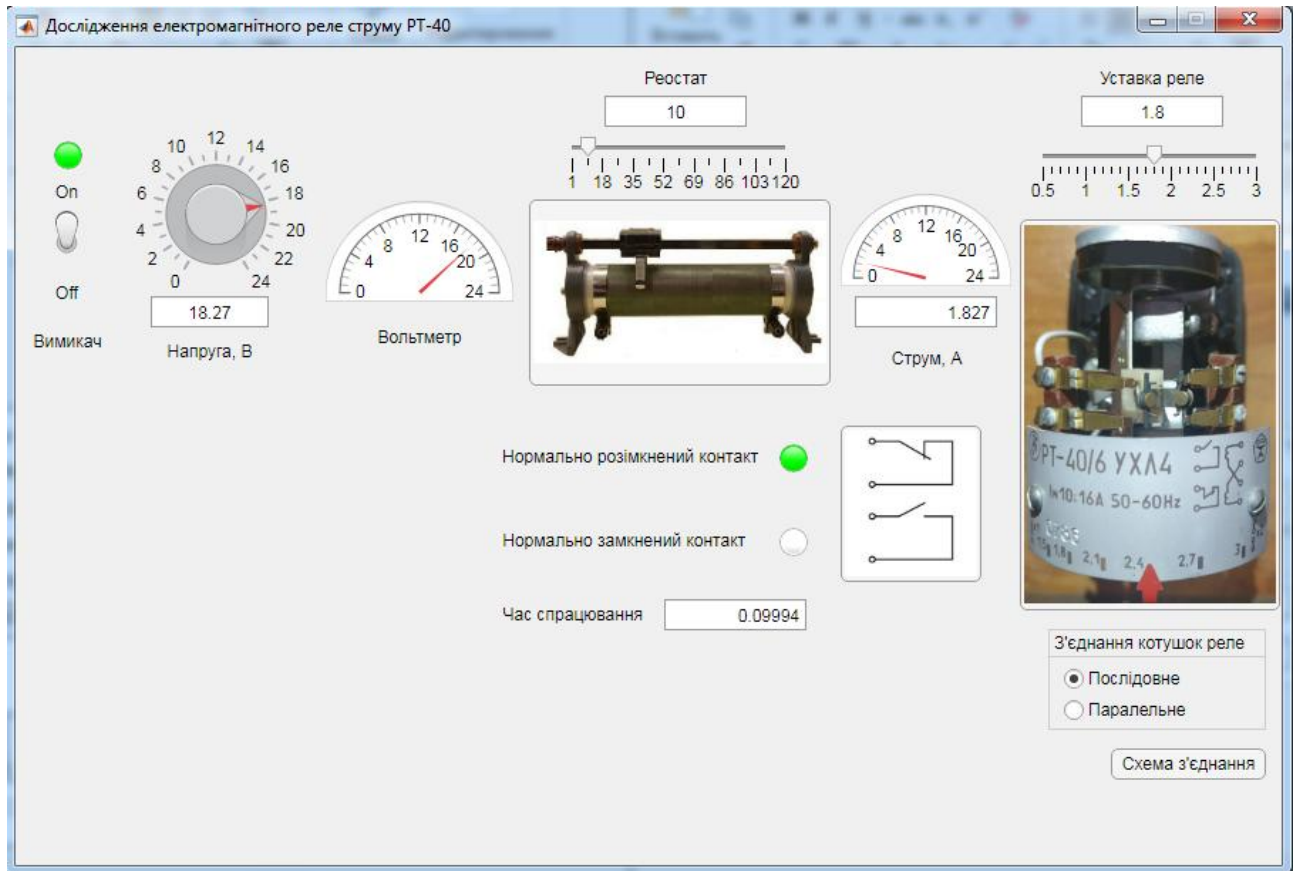


Рисунок 2.4 – Стенд при дослідженні струму спрацювання

6. Визначимо параметри відпускання реле серії РТ–40/6 (рис. 2.4). Визначаємо струм відпускання при плавному зменшенні струму та коефіцієнт повернення. Проводимо п’ять вимірів.

Таблиця 2.2 – Визначення параметрів відпускання реле

$I_{нов}, A$	1,439	1,436	1,436	1,433	1,434
$k_{нов} = I_{нов} / I_{с.р.}$	0,796	0,798	0,794	0,795	0,795

7. Побудуємо криву залежності часу спрацювання реле серії РТ-40/6 при послідовному з’єднанні обмоток від співвідношення $I_p / I_{ср}$ для одного значення струму спрацювання 1,8 А (рис. 2.5).

Таблиця 2.3 – Залежність часу спрацювання від співвідношення $I_p / I_{спр}$

$I_p / I_{спр}$	1	1,6	2,2	2,8	3,4	4
t, c	0,1	0,079	0,058	0,037	0,03	0,03

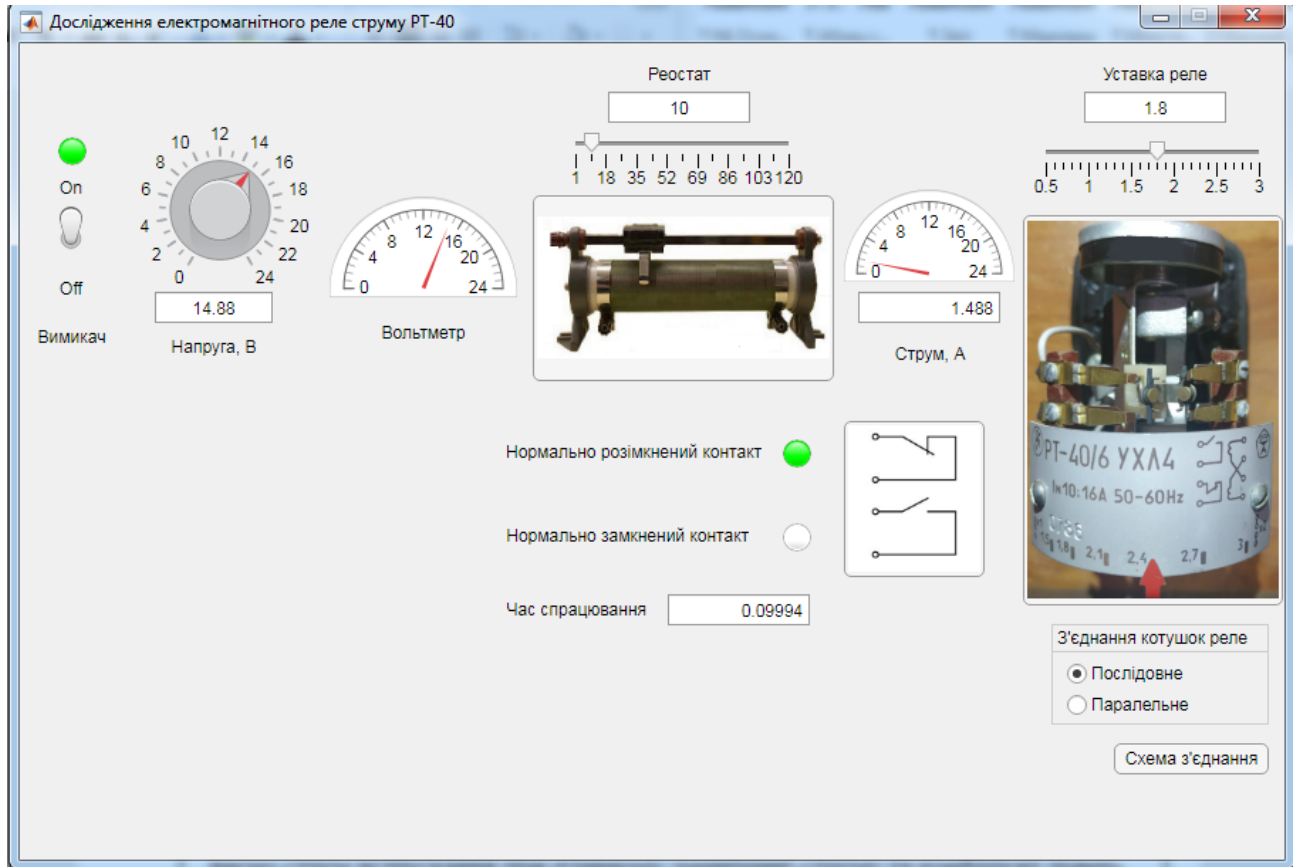


Рисунок 2.4 – Стенд при дослідженні струму відпускання

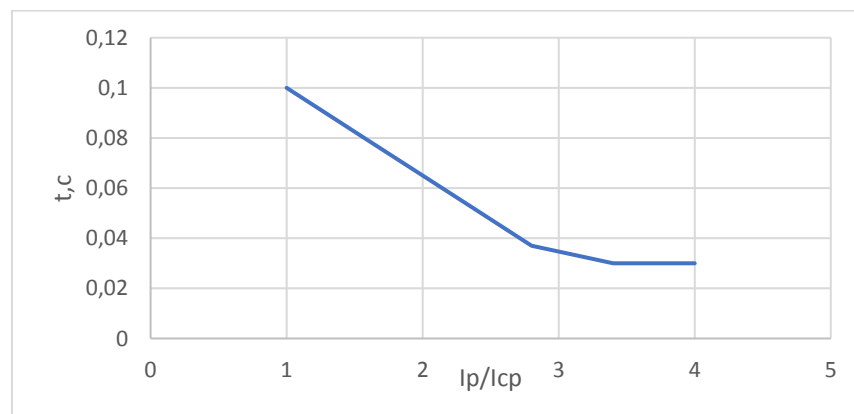


Рисунок 2.5 – Залежність часу спрацювання реле від співвідношення

$$I_p / I_{спр}$$

8. Наступний дослід виконаємо при уставці реле $I_{уст} = 3,6 \text{ А}$. Максимальне значення на уставці реле серії РТ-40/6 – 3 А. Для того щоб провести дослід, необхідно вибрати на панелі «З'єднання котушок реле» – паралельне, Встановити значення опору реостата 5 Ом, ввімкнути вимикач. Після чого виконаємо пункти 5-6 (рис. 2.6). Та заносимо результати до таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Результати дослідження

$I_{с.р.}, \text{А}$	3,613	3,601	3,613	3,606	3,608
$I_{нов}, \text{А}$	2,867	2,88	2,874	2,877	2,872
$k_{нов} = I_{нов} / I_{с.р.}$	0,794	0,8	0,795	0,798	0,796

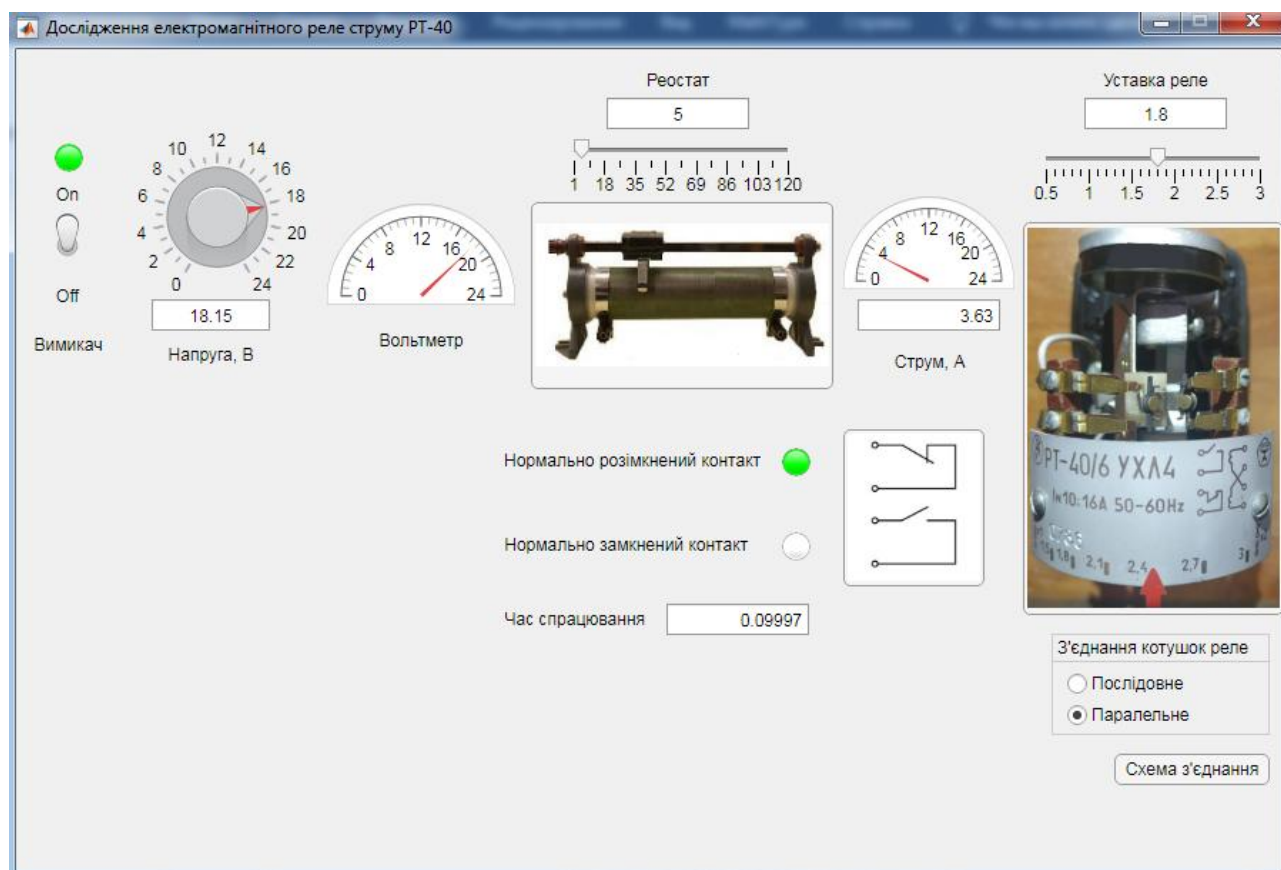


Рисунок 2.6 – Дослідження реле при паралельному з'єднанні котушок для визначення струму спрацювання

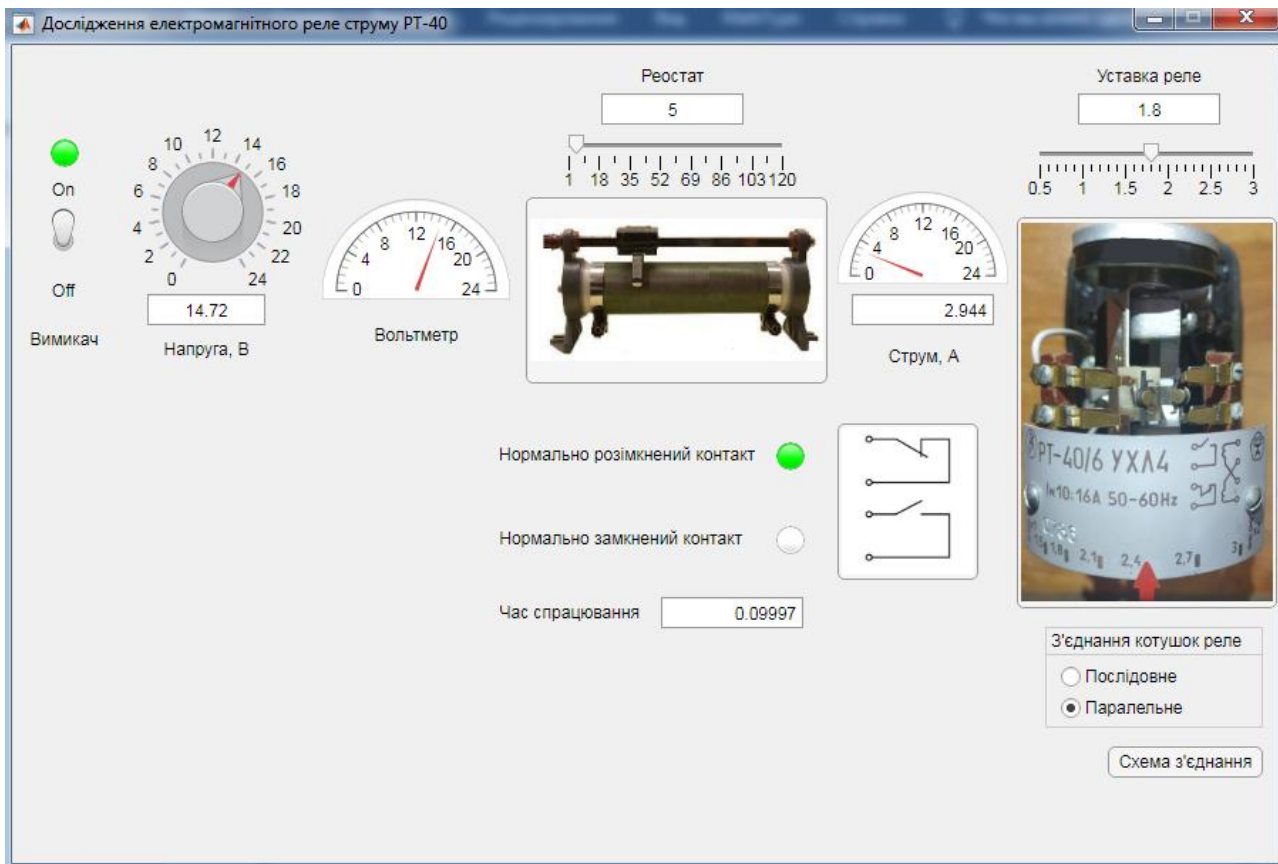


Рисунок 2.7 – Дослідження реле при паралельному з'єднанні котушок для визначення струму відпускання

3. ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЕ НАПРЯМКУ ПОТУЖНОСТІ

РБМ-171

3.1 Загальні відомості

Реле напрямку потужності (РБМ) реагують на значення і знак потужності S , підведеної до їх затискачів. Вони використовуються в схемах в якості органа, який по напрямку (знаку) потужності, що протікає по елементу, що захищається, визначає місце, в якому відбулося ушкодження (рис. 1, а).

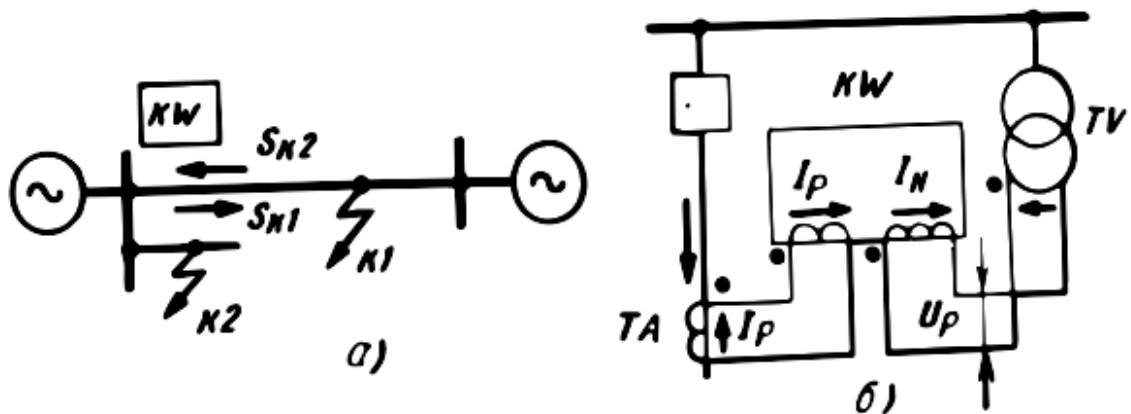


Рисунок 3.1 – Реле напрямку потужності:

а) принцип дії; б) схема включення

У першому випадку (при КЗ в точці K1) потужність КЗ S_{k1} спрямована від шин в лінію і вважається позитивною. В цьому випадку РБМ має спрацювати і замикати свої контакти. У другому випадку (при КЗ в точці K2) потужність КЗ S_{k2} спрямована від лінії в шину. У цьому випадку реле РБМ не повинне спрацювати.

3.1.1 Конструкція і принцип дії

Реле напрямку потужності індукційного типу має два вимірювальних органа: вимірювальний орган струму (ВОС) і вимірювальний орган напруги (ВОН).

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		19

Реле має дві обмотки: одна живиться напругою U_p , а інша – струмом I_p (рис. 3.1, б). Взаємодія струмів, що проходять по обмотках такого реле, створює електромагнітний момент, значення і знак якого залежать від напруги U_p , струму I_p і кута зсуву φ_p між ними.

Реле напрямку потужності (на відміну від індукційних реле струму) виконуються миттєвими. Час їх дії повинно бути мінімальним і практично складає величину 0,04 с [5].

Індукційні реле потужності виконуються з рухомою системою у вигляді циліндричного ротора (рис. 3.2, а). Вони мають замкнений чотирьохполюсний магнітопровід 1 з виступаючими всередину полюсами. Між полюсами встановлений сталевий циліндр (сердечник) 2, призначений для підвищення магнітної проникності міжполюсного простору. Алюмінієвий циліндр (ротор) 3 може повертатися в зазорі між сталевим сердечником і полюсами. При повороті ротора 3 відбувається замикання контактів реле б.

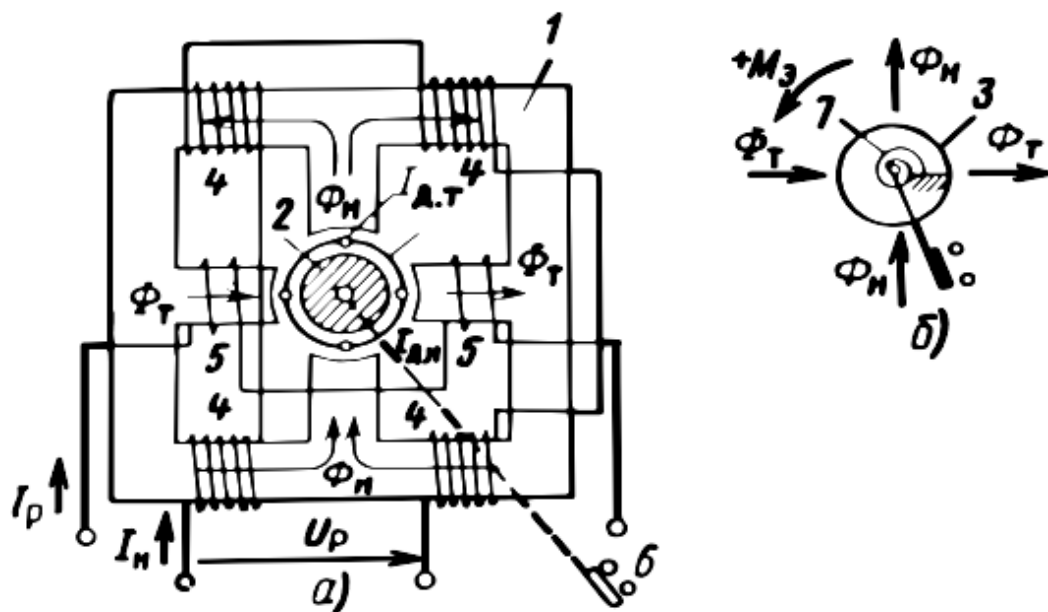


Рисунок 3.2 – Реле напрямку потужності

а – з циліндричним ротором;

б – ротор реле і напрямок позитивного момента M_z ,

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		20

Для повернення ротора і контактів в початкове положення застосовується протидіюча пружина 7 (рис. 3.2, б). Обмотка напруги 4 живиться напругою $U_p = U_C / K_U$, а обмотка струму 5 – струмом $I_p = I_C / K_I$, де U_C і I_C – напруга і струм первинної мережі (елемента, що захищається), K_U , K_I – коефіцієнти трансформації вимірювального трансформатора напруги і вимірювального трансформатора струму відповідно. Струм $I_H = U_p / Z_H$, що проходить по обмотці напруги 4, створює магнітний потік напруги Φ_H . Струм I_p , що проходить по обмотці струму 5, створює магнітний (робочий) потік Φ_T .

На рис. 3.3 зображена векторна діаграма струмів (потоків) індукційного реле. За вихідний для її побудови прийнятий вектор напруги U_p . Струм I_H відстає по фазі щодо напруги U_p на кут α , а струм I_p – на кут зсуву по фазі φ_p .

Кут α визначається співвідношенням між індуктивним і активним опором обмотки 4, що живиться напругою. Він називається кутом внутрішнього зсуву реле і залежить від параметрів мережі і фаз, які підводяться до реле U_C і I_C .

Магнітні потоки Φ_H і Φ_T зображені на діаграмі збігаються із струмами I_H та I_p , що створюють магнітні потоки.

З векторної діаграми слідує, що потоки Φ_H і Φ_T , а також струми I_H та I_p зміщені по фазі на кут $\psi \equiv \alpha - \varphi_p$, електромагнітний момент обертання M_E дорівнює: $M_E = k \Phi_H \Phi_T \sin \psi$, де k - коефіцієнт пропорційності.

Виразивши Φ_H і Φ_T , через струм і напруга, які створюють магнітні потоки, отримаємо

$$M_E = k_1 U_p I_p \sin (\alpha - \varphi_p) = k_1 S_p,$$

де $S_p = U_p I_p \sin (\alpha - \varphi_p)$ – потужність, підведена до реле.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
						21
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

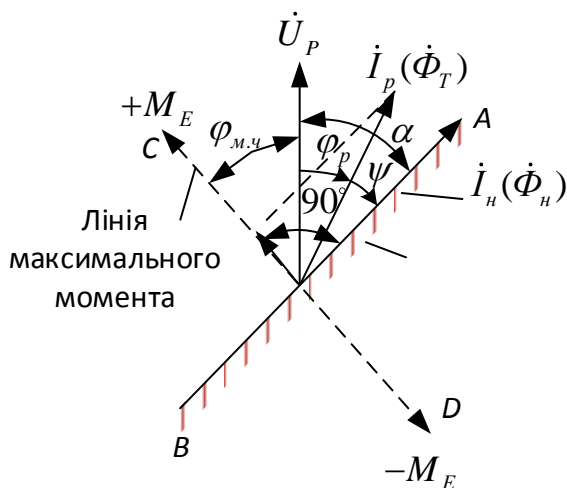


Рисунок 3.3 – Векторна діаграма реле потужності

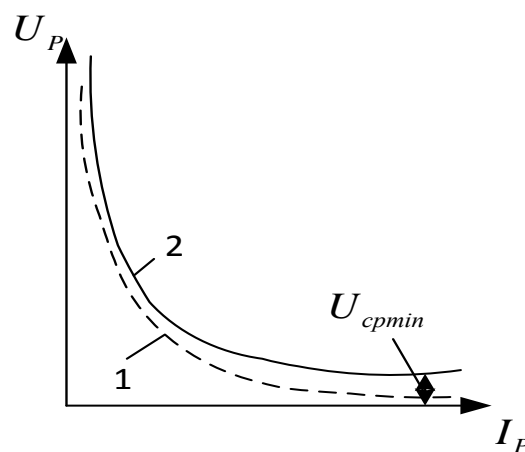


Рисунок 3.4 – Характеристика чутливості реле потужності: 1 – теоретична, 2 – дійсна

Аналізуючи вираз, можна зробити наступні висновки:

- електромагнітний момент (обертання) реле пропорційний потужності на його затискачах;
- знак електромагнітного моменту реле визначається знаком множника $\sin(\alpha - \varphi_p)$ і залежить від значення φ_p і кута внутрішнього зсуву α .

Це ілюструється рис. 3.3, де зона негативних моментів заштрихована. Незаштриховані частина діаграми відповідає області позитивних моментів (де Φ_T випереджає Φ_n), а φ_p і його синус, що має позитивний знак.

Лінія АВ називається лінією зміни знака моменту. Вона завжди розташована під кутом α до вектора U_P . збігається з напрямком векторів I_n і Φ_n .

Лінія CD (перпендикулярна лінії АВ) називається лінією максимальних моментів. Електромагнітний момент M_E досягає максимуму при $\alpha - \varphi_p = 90^\circ$, коли I_p випереджає I_n на 90° . Кут φ_p , при якому M_E досягає максимального значення, називається кутом максимальної чутливості $\varphi_{mч}$. Він утворюється лінією максимальних моментів і вектором підведеного до реле напруги (залежить від величини кута внутрішнього зсуву α).

Реле не діє, якщо в ньому відсутня напруга або струм, а також якщо $\sin(\alpha - \varphi_p) = 0$. Остання умова має місце при $\varphi_p = \alpha$ або $\varphi_p = \alpha + 180^\circ$.

Таким чином рис. 3.3 показують, що реле даної конструкції реагує на знак потужності S до або, іншими словами, – на кут зсуву φ_p між напругою U_p і струмом I_p .

3.1.2 Основні характеристики

Мінімальна підведена до реле потужність, при якій воно спрацьовує (замикає свої контакти), називається потужністю спрацьовування реле S_{cp} [5]. Залежність потужності спрацьовування реле від струму I_p і кута φ_p прийнято оцінювати характеристикою чутливості і кутовою характеристикою.

Характеристика чутливості являє собою залежність $U_{cp} = f(I_p)$ при незмінному φ_p (рис. 3.6). U_{cpmin} – найменше значення напруги, необхідне для дії реле (при даних значеннях I_p і φ_p). Зазвичай ця характеристика знімається при φ_p , що дорівнює куту максимальної чутливості, для випадка, коли $\sin(\alpha - \varphi_p) = 1$.

Кутова характеристика являє собою залежність $U_{cp} = f(\varphi_p)$ при незмінному значенні I_p . На рис. 3.6 вона показана для реле типу з $\alpha = -30^\circ$.

Кутова характеристика дозволяє визначити:

- зміна чутливості реле (що характеризується величиною U_{cp}) при різних значеннях кута φ_p ;
- мінімальне значення напруги U_{cpmin} і найбільш вигідну зону кутів φ_p , в межах якої U_{cp} близько до U_{cpmin} ;
- при яких кутах φ_p змінюється знак електромагнітного моменту і межі кутів φ_p , яким відповідають позитивні і негативні моменти.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		23

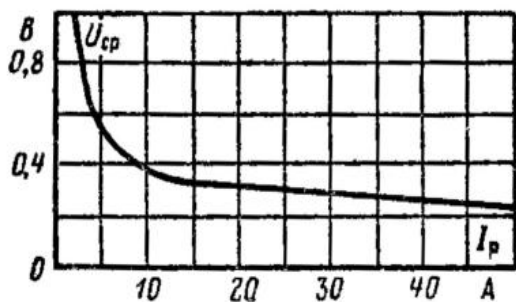


Рисунок 3.5 – Характеристика чутливості (вольт-амперна характеристика) реле РБМ–171

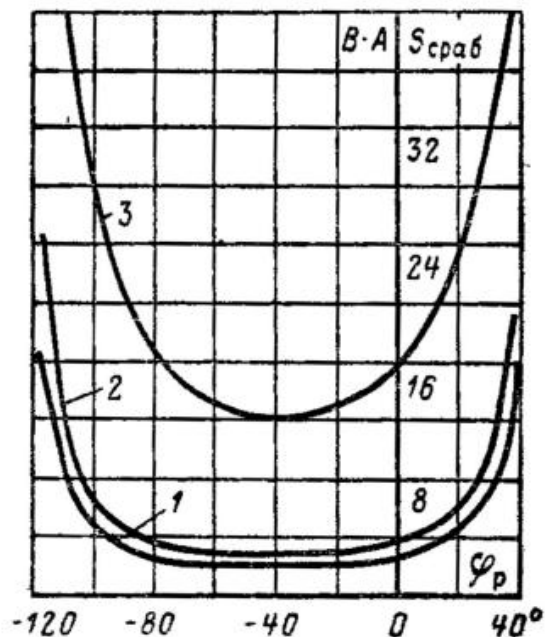


Рисунок 3.6 – Кутові характеристики реле РБМ–171:

1 – $I_p = 0,1I_{ном}$; 2 – $I_p = I_{ном}$; 3 – $I_p = 10I_{ном}$

Знак електромагнітного моменту реле залежить від відносного напрямку струмів I_p і I_H в його обмотках. Прийнято виготовляти реле напрямку потужності так, щоб реле замикала свої контакти при однаковому напрямку струмів в обмотках напруги і струму. Однаковим називається напрямок струму в обох обмотках від початку до кінця обмотки або навпаки. При виготовленні реле вказують однополярні затискачі обмоток, відзначаючи їх початок умовним знаком (крапкою).

Реле РБМ підключається до трансформатора струму (струмова обмотка) і до трансформатора напруги (обмотка напруги) з урахуванням полярності обмоток так, щоб при КЗ в об'єкті реле замикало свої контакти (спрацьовувало).

Самоходом РБМ називають спрацьовування його при проходженні струму тільки в одній його обмотці – струмовій або обмотці напруги. Реле, що має самохід від струму, може неправильно спрацьовувати при зворотному напрямку потужності, коли пошкодження виникає в безпосередній близькості від реле в зоні його недії, в результаті чого напруга на його затискачах дорівнюватиме нулю.

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

Причиною самоходу зазвичай є несиметрія магнітних систем реле щодо циліндричного ротора.

3.1.3 Схеми ввімкнення реле напрямку потужності

Реле напрямку потужності включаються, як правило, на фазний струм і міжфазну напругу. Поєднання фаз струму і напруги реле, назване його схемою включення, має бути таким, щоб реле правильно визначало знак потужності КЗ при всіх можливих випадках і видах ушкоджень. При цьому до нього повинна підводитися якомога більша потужність. Потужність, що підводиться до реле, в загальному випадку може мати недостатнє для дії РБМ значення при КЗ, близьких до місця установки реле [5]. Цей факт може бути обумовлений:

- зниженням напруги U_p ;
- значенням кута φ_p , при якому $\sin(\alpha - \varphi_p)$ дорівнює або близький до нуля.

Практично в схемах застосовується включення РБМ по так званій 90-градусній схемі поєднання струмів і напруг [5].

Назва схеми (90-градусна) носить умовний характер. У ньому відбивається величина кута φ_p між напругою і струмом, підведеними до РБМ в симетричному трифазному режимі за умови, що струми в фазах збігаються з однойменними фазними напругами.

Діаграми роботи РБМ типу РБМ-171 з кутом максимальної чутливості $\varphi_{мч} = -30^\circ$, включеного по 90-градусній схемі, показані на рис. 3.7.

Кут внутрішнього зсуву цього реле $\alpha = 90^\circ + \varphi_{мч} = 90^\circ - 30^\circ = 60^\circ$. Потужність на затискачах такого реле дорівнює $S_p = k_p U_p I_p \cos(\varphi_p + 30^\circ)$. РБМ включено на струм $I_p = I_A$ і напругу $U_p = U_{BC}$.

На рис. 3.7, б зображена векторна діаграма напруг і струму I_A при трифазному КЗ на ЛЕП. Струм I_A відстає від напруги U_A на кут φ_k .

									арк.
									25
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата	БР 3.6.141.313 ПЗ				

Вектор I_A має два граничних положення: I_A' – при КЗ за чисто реактивним опором X , коли $\varphi_k = 90^\circ$, I_A'' – при КЗ через дугу в напочатку, коли $\varphi_k \approx 0^\circ$.

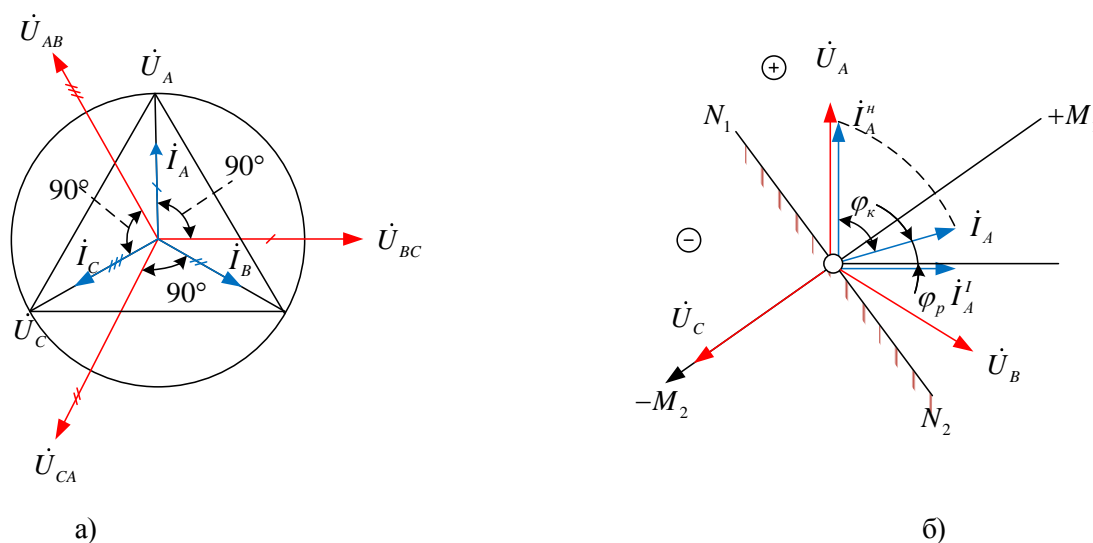


Рисунок 3.7 – Векторні діаграми струмів і напруг для реле потужності при 90-градусній схемою включення

За знайденим значенням φ_p визначають знак і значення потужності на вході РБМ. З цією метою будують діаграми струму і напруги на затискачах РБМ для розглянутого випадку КЗ (рис. 3.7, б). З цією метою на ній щодо U_p для даного типу РБМ будують лінію N_1N_2 (зміни знака потужності S_p) і лінію M_1M_2 (максимальної потужності S_p).

Проекція вектора I_A на лінію максимальної потужності, що дорівнює $I_A = \sin(\alpha - \varphi_p)$, характеризує значення і знак потужності.

При КЗ в зоні проекція вектора I_A має позитивний знак, а в випадку КЗ поза зоною – негативний. Значення потужності на реле досягає максимуму S_{pmax} при $\varphi_{мч} = -30^\circ$ (чому відповідає $\varphi_k = 60^\circ$).

З діаграми і характеристики реле РБМ слідує, що поведінка реле напрямку потужності при трифазному короткому замиканні в зоні і поза зоною буде правильним і значення S_p достатнім для його дії.

3.2 Дослідження реле напрямку потужності

3.2.1 Опис віртуальної установки

Головною метою стенда є дослідити основні характеристики реле РБМ – 171 описані в пункті 3.3.

Стенд складається з двох симетричних джерел живлення 1, 2 (рис.3.8) G1 та G2 напругою 10 кВ, що з'єднані із лінією електропередач W1 вимикачами, Q1 та Q2, що входять до складу ПС1 та ПС2. До підстанції ПС1 також входять вимикачі Q3. Від цієї підстанції отримує живлення регульоване навантаження S_1 3. За допомогою інтерактивного повзунка 5 або поля для вводу, можна встановити значення навантаження, а за допомогою регулятора 6 можна встановити фазовий зсув. Аналогічно можна налаштувати навантаження S_2 за допомогою елементів 7, 8. Встановити необхідне значення напруги на виході трансформатора напруги, треба ввести значення в полі або за допомогою бігунка 10.

Керування роботою схеми відбувається за рахунок групи вимикачів 9. Під час вмикання одного із джерел залишається лише один активний вимикач, що відповідає навантаженні, яке необхідно підключити. При ввімкненні вимикача навантаження елементи 7, 8 або 5, 6 стають активними (рис. 3.9). Всі значення виводяться на панель «Результати досліду», де можна спостерігати, такі параметри реле, як: струм, напругу, кут реле.

Для підключення реле РБМ–171 до електричної мережі використано 90-градусну схему ввімкнення. Обмотка напруги реле підключена через трансформатор напруги до лінійної напруги U_{BC} , а струмова через трансформатор струма, первинна обмотка якого встановлено в фазі А.

Для спостереження за станом контакту реле в схемі передбачено лампа-індикатор 11 та контакт 12.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		27

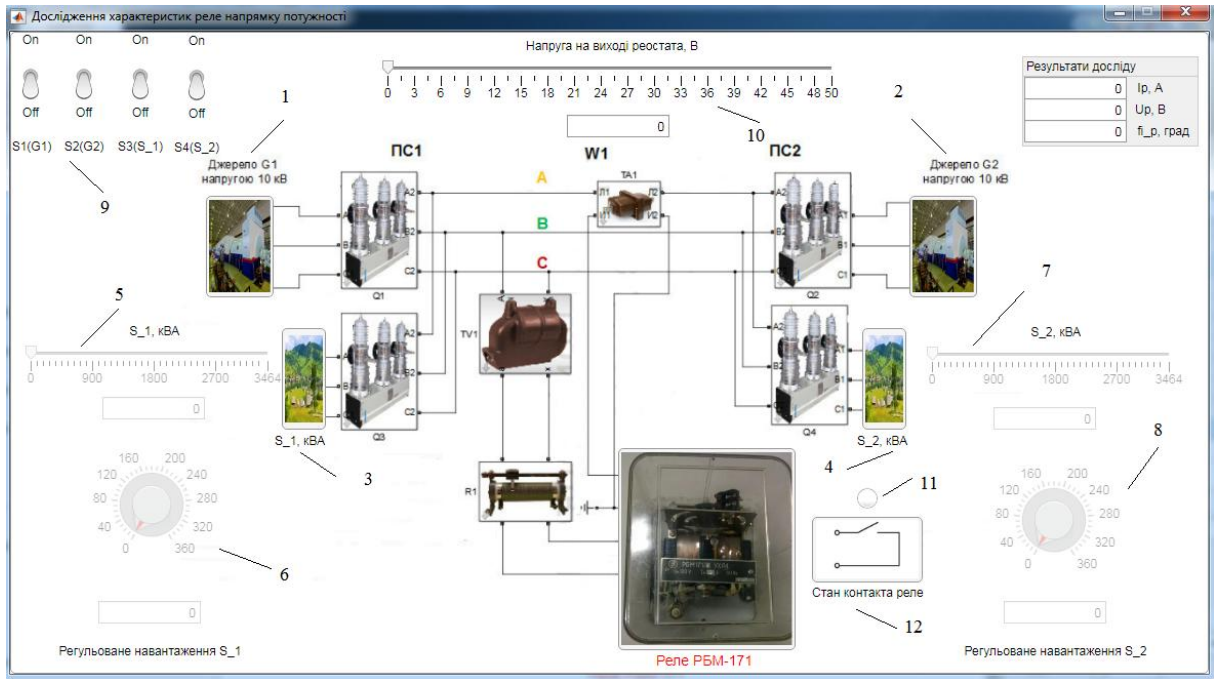


Рисунок 3.8 – Інтерфейс програми «Дослідження характеристик реле напрямку потужності»

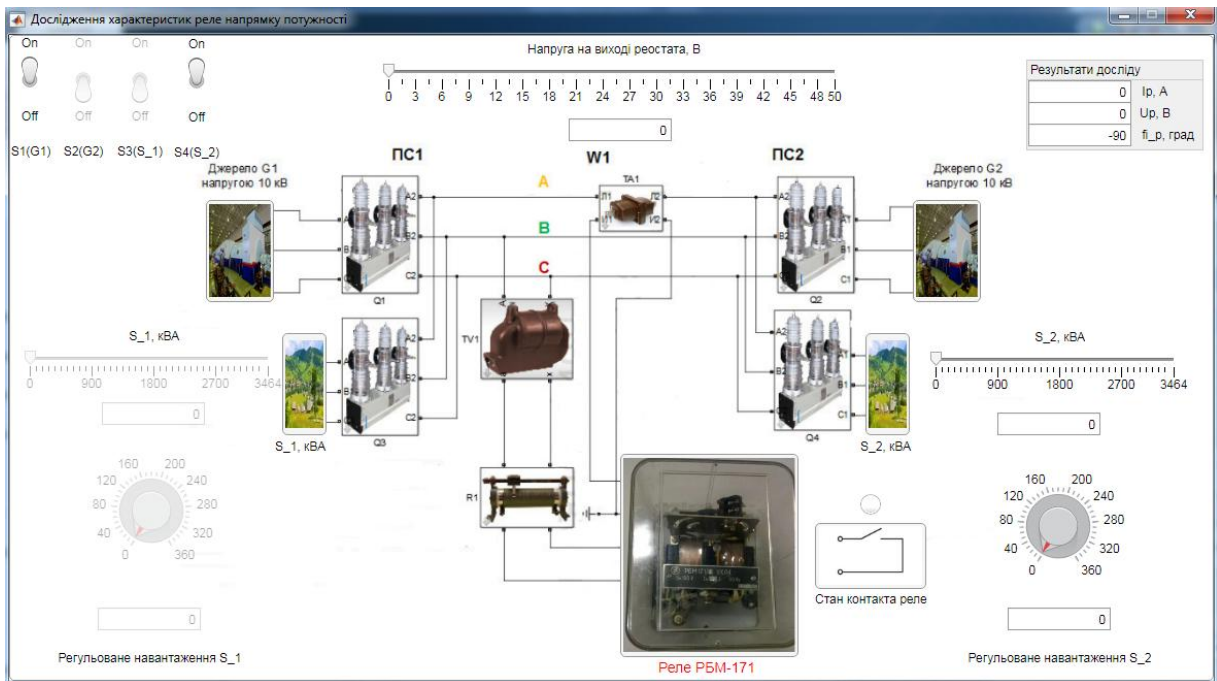


Рисунок 3.9 – Стан схеми при ввімкненні вимикача джерела S1(G1) та вимикача S4(S_2)

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

БР 3.6.141.313 ПЗ

арк.

28

3.2.2 Виконання дослідів

1. Ввімкнемо вимикачі S1(G1) та S4(S₂).

2. Перевіримо відсутність самоходу по струму. Регулятором 10 перевести в ліве положення (0 В). За допомогою повзунка 7 збільшуємо значення потужності навантаження, щоб досягти значення струму реле 5 А. Повзунком 10 встановимо напругу 20 В. Фазорегулятором 8, встановлюємо кут, що відповідає куту максимальної чутливості реле $\varphi_p = \varphi_{мч} = -30^\circ$ (на панелі «Результати дослід»). Напругу встановлюємо 0 В.

3. Перевіримо відсутність самоходу по напрузі. Регулятором 10 перевести в ліве положення (0 В). За допомогою повзунка 7 збільшуємо значення потужності навантаження, щоб досягти значення струму реле 2 А. Повзунком 10 встановити напругу 20 В. Фазорегулятором 8, встановлюємо кут, що відповідає куту максимальної чутливості реле $\varphi_p = \varphi_{мч} = -30^\circ$ (на панелі «Результати дослід»). Перевести повзунок 7 в крайнє ліве положення.

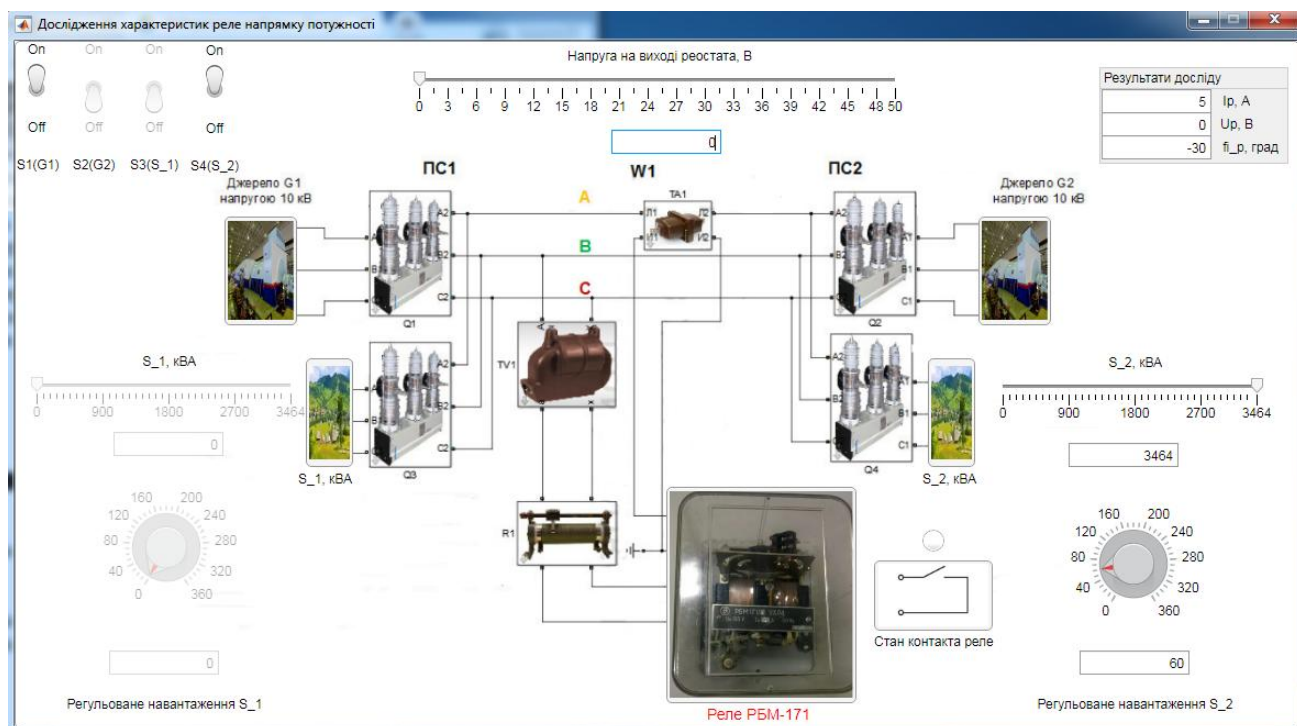


Рисунок 3.10 – Перевірка відсутності самоходу по струму

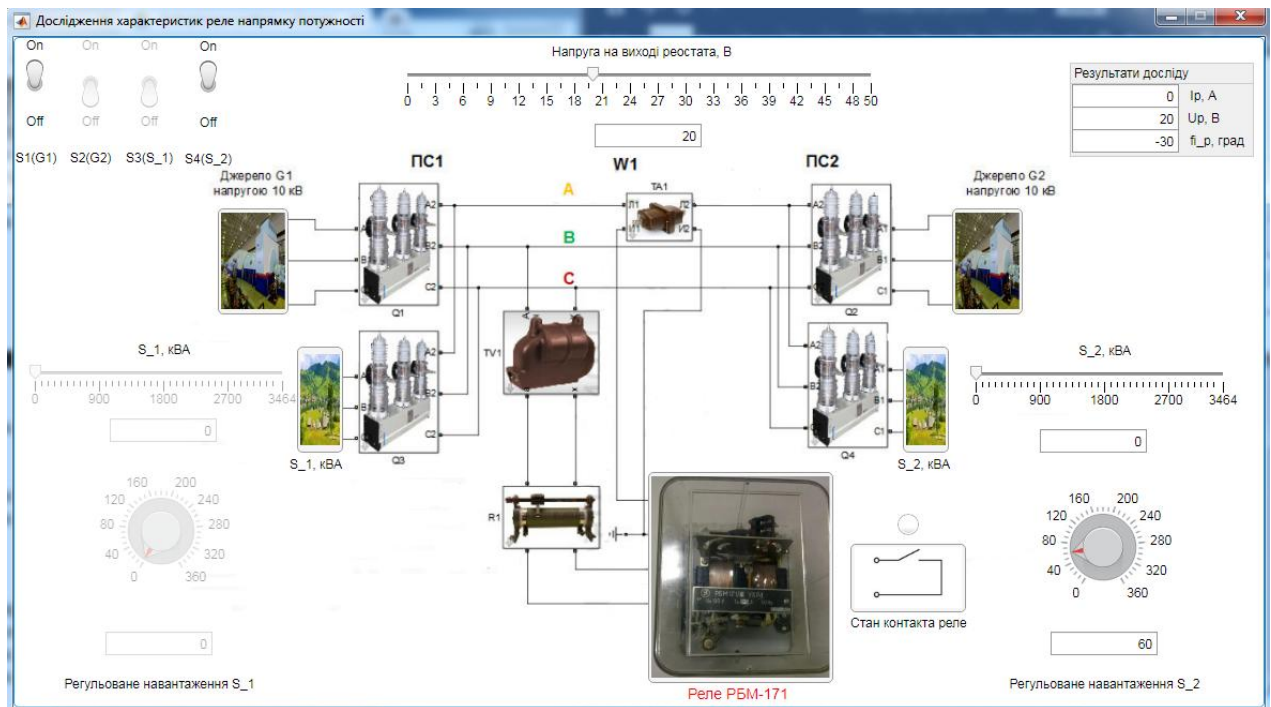


Рисунок 3.11 – Перевірка відсутності самоходу по напрузі

4. Знімемо кутову характеристики характеристику та порівняємо її з реальною характеристикою. Зніматимемо характеристику при струмі реле рівному 0,5 А та 5 А та побудуємо графіки. Для виконання досліді необхідно ввімкнути вимикачі S1(G1) та S1(S_2). За допомогою повзунка встановити значення потужності, щоб струм реле мало значення реле $I_p = 0,5 \text{ A}$. Змінюємо значення регулятора фазного зсуву навантаження, та напругу на виході реостата, та фіксуємо значення необхідних параметрів для побудови кутової характеристики.

Таблиця 3.1 – Кутові характеристики отримані в досліді

$\varphi_p, \text{град}$	-117	-100	-80	-60	-40	-20	0	20	40
$S_p, \text{B} \cdot \text{A}$, при $I_p = 0,5 \text{ A}$	15,53	4,93	2,87	2,3	2,29	2,18	2,29	4,48	15,73
$S_p, \text{B} \cdot \text{A}$, при $I_p = 5 \text{ A}$	24,25	6,45	3,9	2,85	2,7	2,65	2,75	4,3	17,5

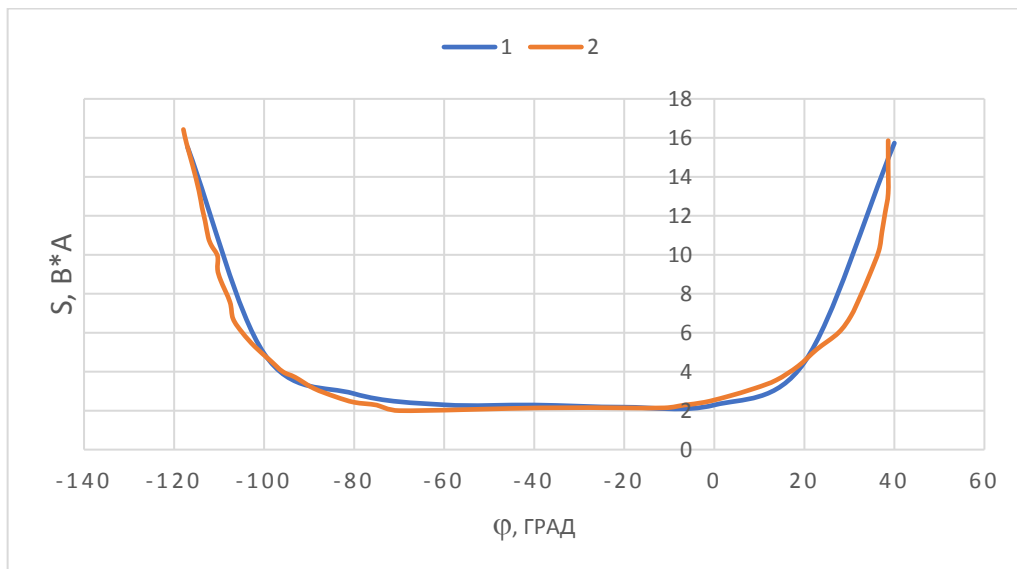


Рисунок 3.12 – Кутова характеристика при $I_p = 0,5 A$:

1 – характеристика знята під час дослідів;

2 – реальна характеристика

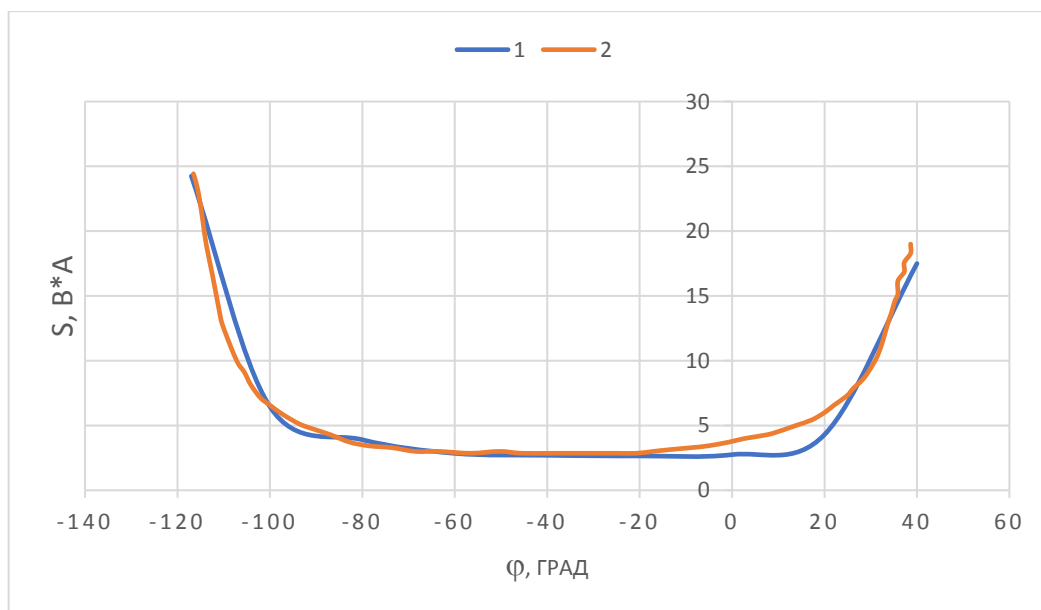


Рисунок 3.13 – Кутова характеристика при $I_p = 5 A$:

1 – характеристика знята під час дослідів;

2 – реальна характеристика

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

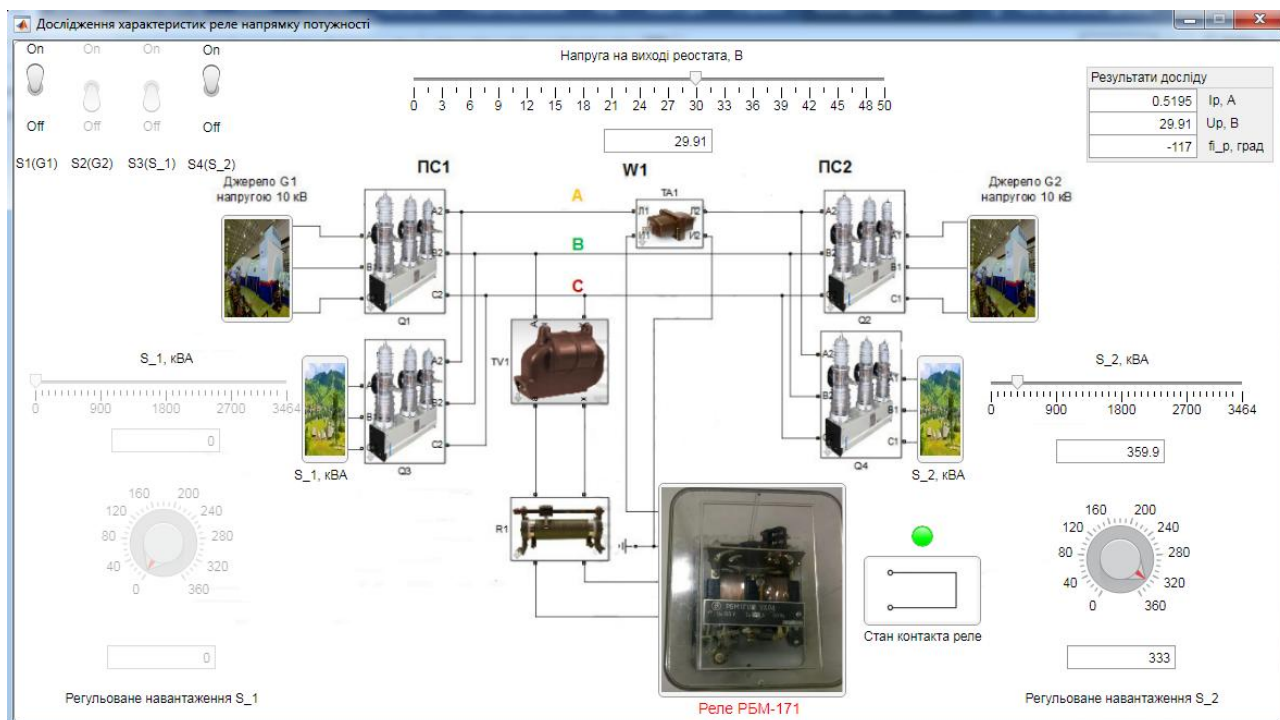


Рисунок 3.14 – Виконання досліду для встановлення кутової характеристики

5. Порівняємо характеристику чутливості отриману в досліді з характеристикою реле РБМ–171 із $\varphi_{мч} = -30^\circ$ зазначеною в технічному документі. Повзунком, що регулює фазний зсув встановити в таке положення, щоб кут φ_p , відповідав значенню куту максимальної чутливості $\varphi_{мч} = -30^\circ$. За допомогою повзунків замінюємо величини навантаження та напруги, фіксуємо їх значення у випадку спрацювання. Будуємо залежність (рис. 3.15).

Таблиця 3.2 – Характеристика чутливості

$U_{c.p}, B$	2,403	2,61	2,835	2,99	3,33	3,55	3,9	4,286	4,524
$I_{c.p}, A$	0,988	0,914	0,85	0,807	0,733	0,696	0,637	0,592	0,562

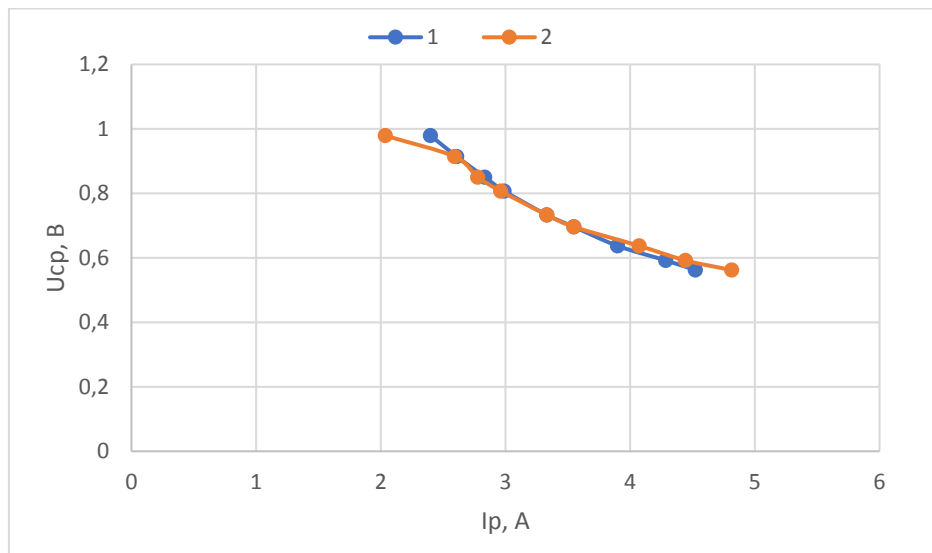


Рисунок 3.15 – Характеристика чутливості:
 1 – характеристика знята під час досліду;
 2 – реальна характеристика

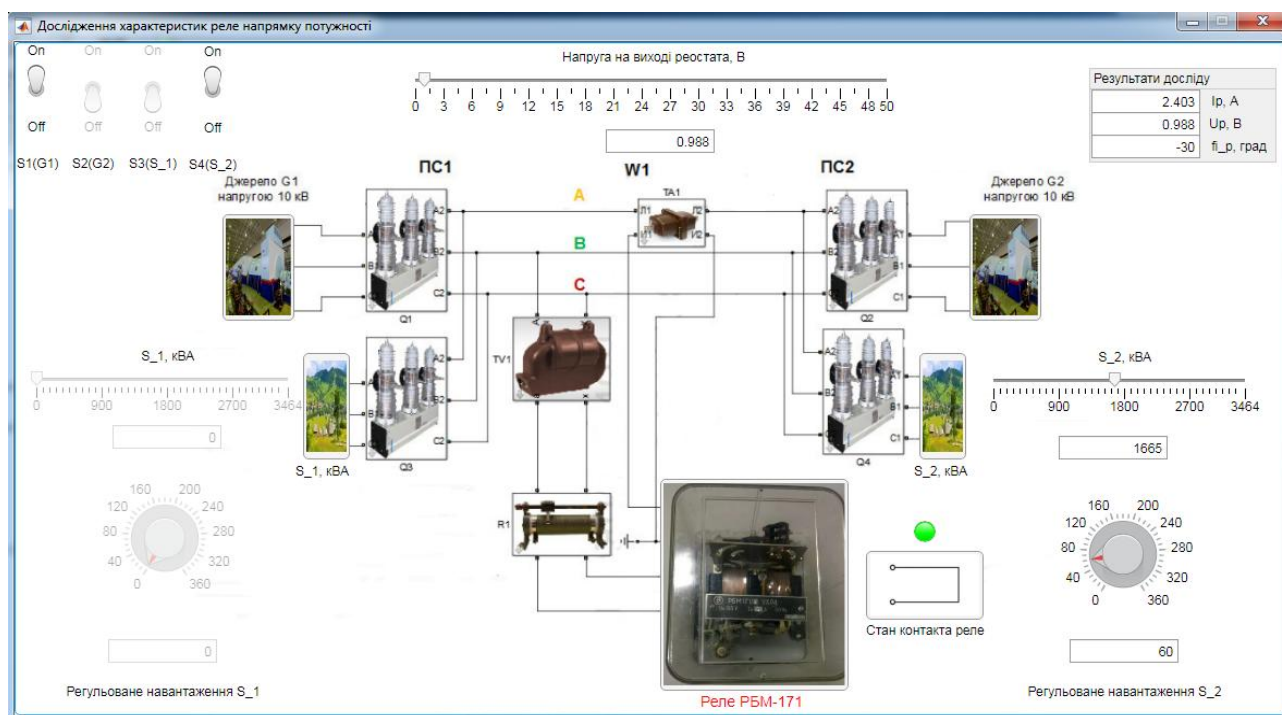


Рисунок 3.16 – Виконання досліду для знімання характеристики чутливості

6. Визначимо коефіцієнт повернення. Повзунок реостата перевести в нульове положення (0 В). Підключити джерело тумблером S1 та навантаження – S4. Регулятором фазового зсуву навантаження встановити значення 60°, за допомогою повзунка встановити значення потужності таким щоб струм реле мало

значення 0,5 А. Плавно підвищуємо напругу на виході реостата до спрацювання реле. Фіксуємо значення напруги спрацювання $U_{c.p}$. Після спрацювання реле повільно зменшуємо напругу до моменту, коли контакти реле розімкнуться та фіксуємо напругу $U_{нов}$.

Таблиця 3.2 – Визначення коефіцієнта повернення

$U_{c.p}, B$	4,619	4,503	4,503	4,501	4,506
$U_{нов}, B$	4,042	4,042	4,042	4,043	4,042
$k_{нов} = U_{нов} / U_{c.p}$	0,88	0,897	0,897	0,898	0,897

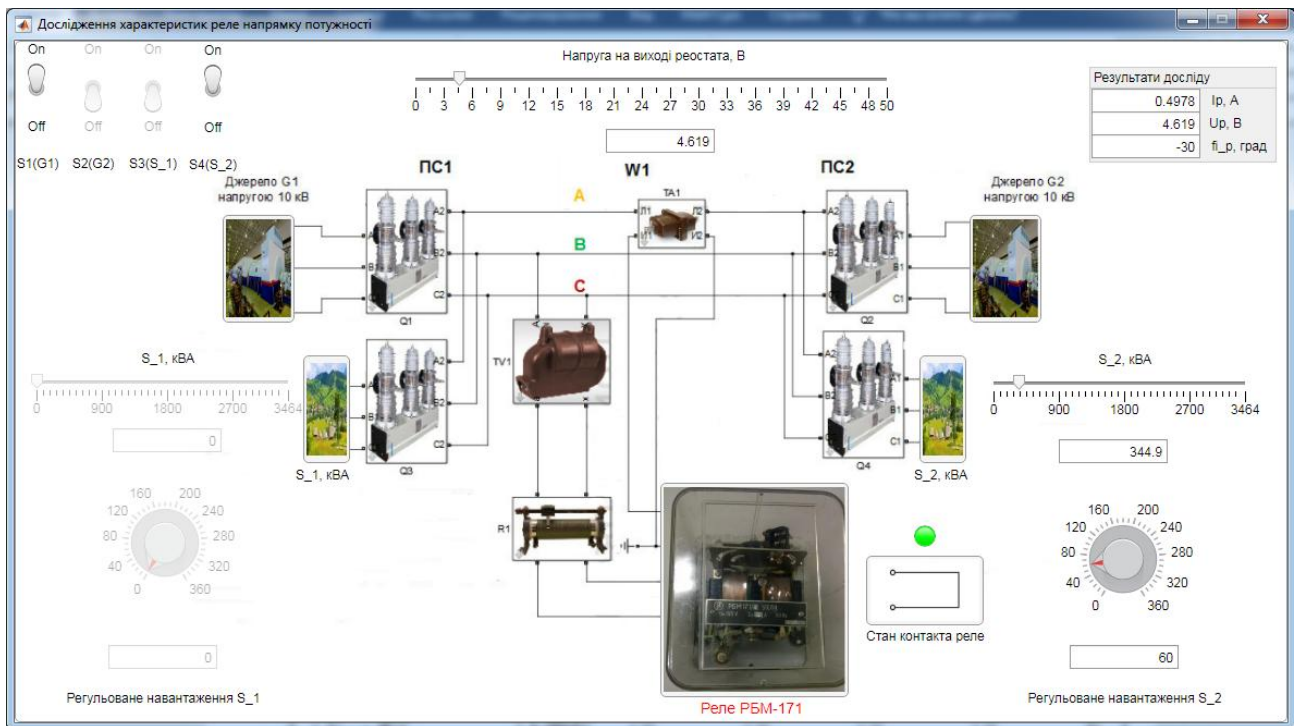


Рисунок 3.17 – Виконання дослідів для визначення коефіцієнту повернення

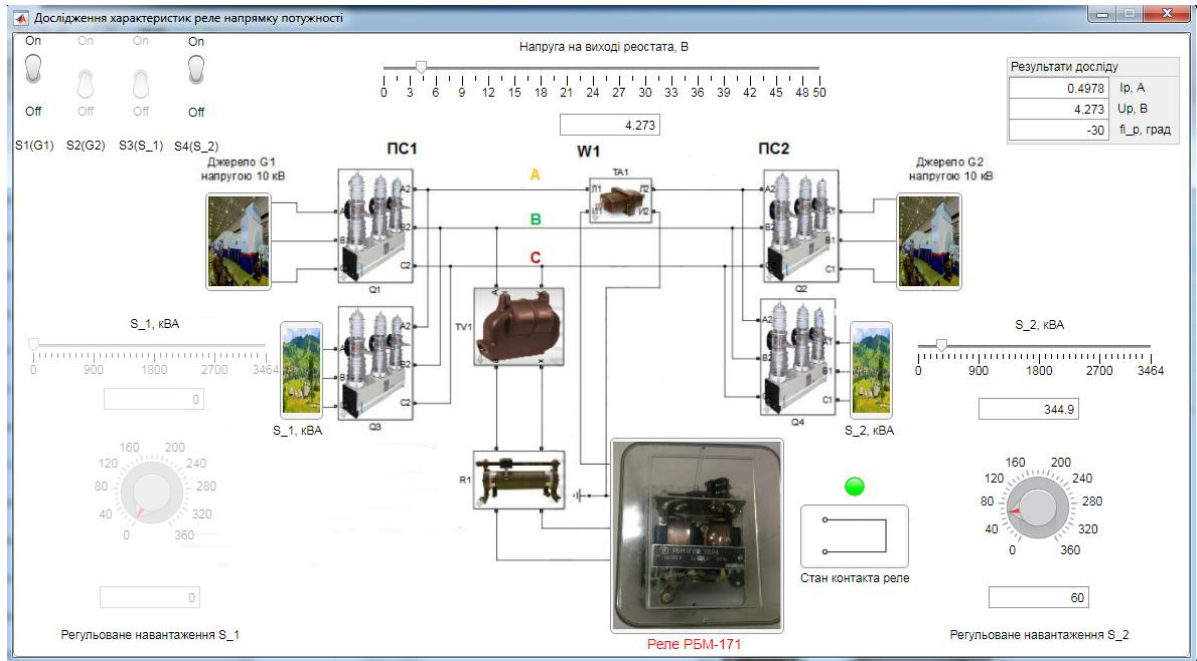


Рисунок 3.18 – Виконання досліду для визначення коефіцієнту повернення

7. Визначимо напрямок потужності, на яке реагує реле. Тумблери S1 та S4 перевести в положення «On». Повзунок потужності перевести в крайнє ліве положення, регулятори фазових зсувів навантаження встановити на 0° . Збільшуємо потужність навантаження S_2 до досягнення струмом реле I_p 5 А. Визначимо наступні параметри: I_p , U_p , φ_p , S_p та стан при фазовому зсуві $\varphi_{k2} = 0^\circ$. Занесямо до таблиці значення параметрів роботи реле для фазових зсувів φ_{k2} навантаження S_2 – 30° , 60° , 90° . Аналогічно зробимо для ввімкнених тумблерів S2, S3.

Таблиця 3.3 – Параметри реле при ввімкнених тумблерах S1 та S4

φ_{k2}	I_p, A	U_p, B	$\varphi_p, град$	Стан реле
0	5	0,924	-90	спрацювало
30	5	0,577	-60	спрацювало
60	5	0,52	-30	спрацювало
90	5	0,693	0	спрацювало

Таблиця 3.4 – Параметри реле при ввімкнених тумблерах S2 та S3

φ_{k2}	I_p, A	U_p, B	$\varphi_p, град$	Стан реле
0	5	50	90	не спрацювало
30	5	50	120	не спрацювало
60	5	50	150	не спрацювало
90	5	50	180	не спрацювало

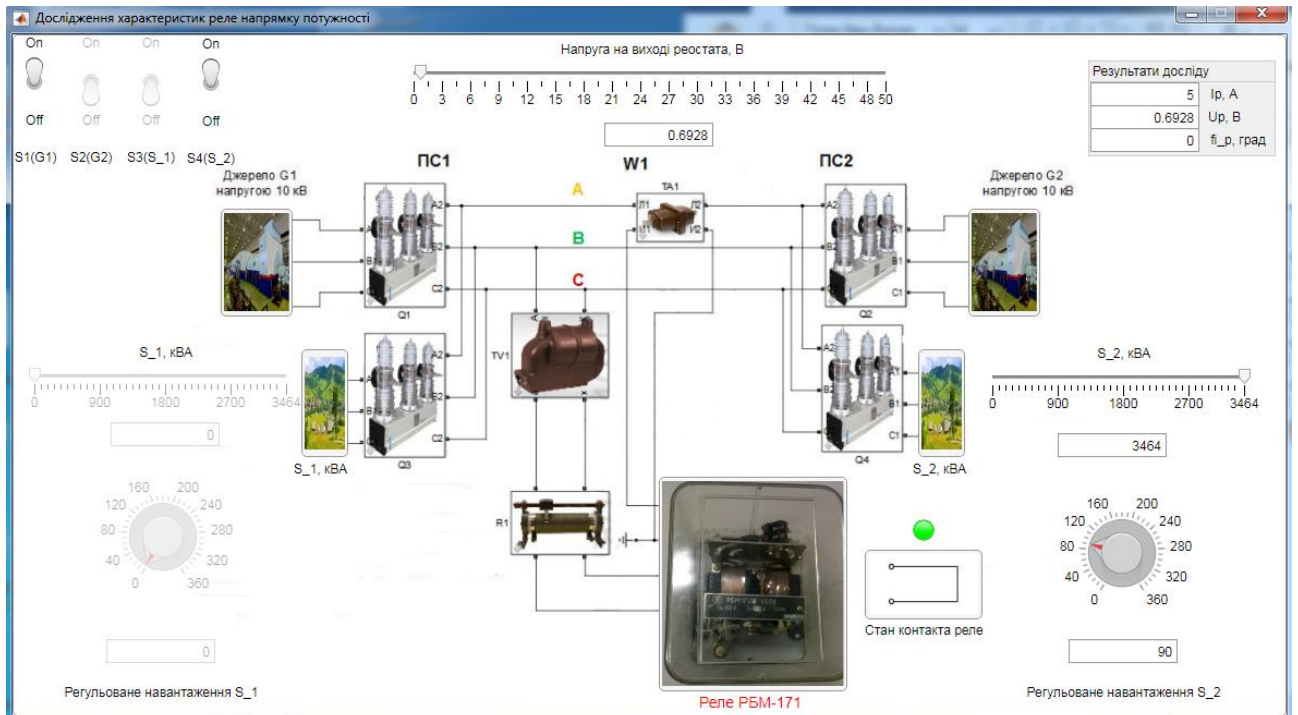


Рисунок 3.19 – Виконання дослід з визначення напрямку потужності при ввімкнених тумблерах S1, S4

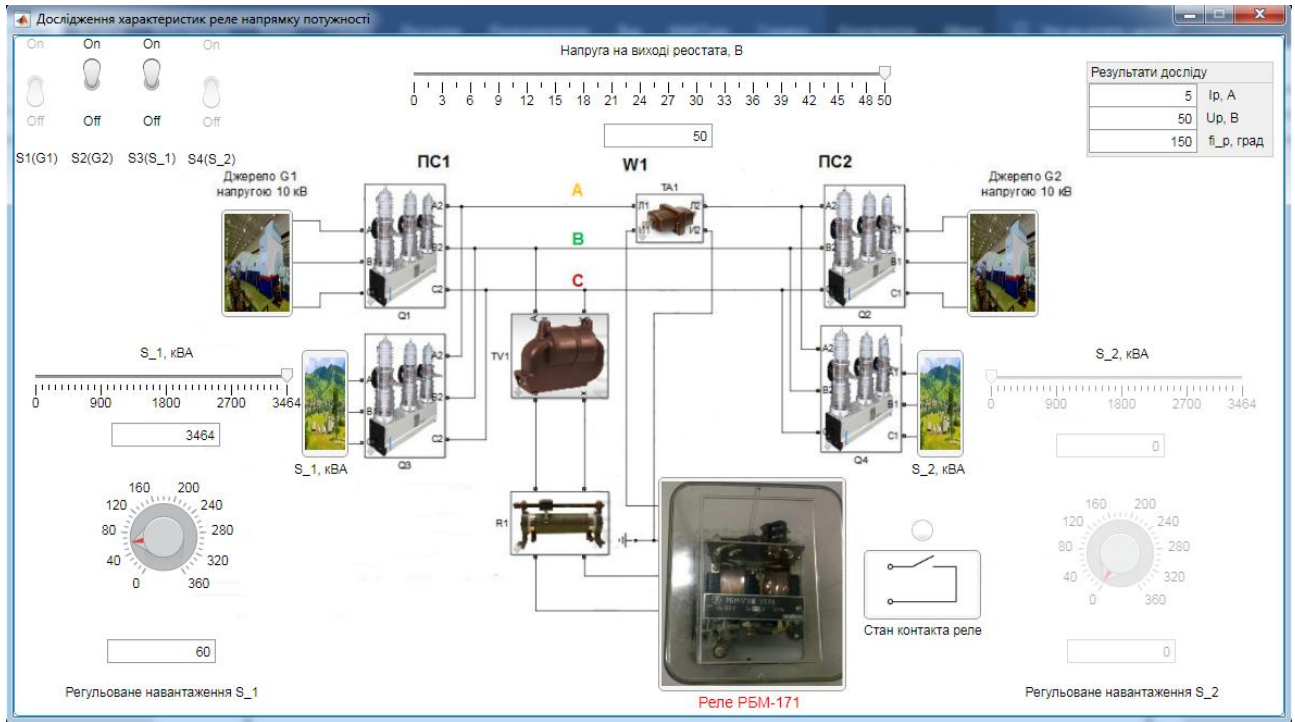


Рисунок 3.20 – Виконання досліду з визначення напрямку потужності при ввімкнених тумблерах S2, S3

4. ДОСЛІДЖЕННЯ МАКСИМАЛЬНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ

4.1 Загальні відомості

Струмові захисти – це захисти з відносною селективністю, які реагують на струм – тому і назва "струмові". Залежно від способу забезпечення селективності є три види струмових захистів [2]:

- максимальний струмовий захист (МСЗ);
- струмова відсічка (СВ);
- струмова відсічка з витримкою часу.

У максимальному струмовому захисті селективність забезпечується вибором часу спрацювання, в струмовій відсічці селективність забезпечується вибором струму спрацювання, у струмовій відсічці з витримкою часу – вибором струму та часу спрацювання.

Струмові захисти від міжфазних КЗ застосовують для захисту ліній до 35 кВ включно. Для мереж 6 та 10 кВ ці захисти є основними. Для мереж вищого класу напруг струмові захисти використовують, переважно, для захисту ліній від однофазних КЗ на землю, а також резервують дію основних захистів від міжфазних КЗ

4.1.2 Максимальний струмовий захист

Принципова схема максимального струмового захисту (МСЗ) показана на рис. 4.1. Вимірним органом МСЗ є реле максимального струму КА. Це реле спрацьовує за струму у первинному колі і відповідно – у вторинному, більшому від струму спрацювання реле – уставки реле.

Після спрацювання реле КА замикає свої контакти і подає живлення на обмотку реле часу КТ, що затримує спрацювання захисту. Затримка необхідна для забезпечення селективної роботи МСЗ. Реле часу спрацьовує та з витримкою часу подає живлення на послідовно увімкнені обмотки реле – вказівного КН та

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		38

проміжного KL. Вказівне реле КН сигналізує про спрацювання МСЗ. Реле КН залишається у спрацьованому стані навіть після припинення живлення його обмотки, тобто після повернення схеми у вихідний (доаварійний) стан після спрацювання. Якір реле можна повернути у вихідне положення тільки вручну. Це необхідно для того, щоби обслуговуючий персонал міг встановити, який саме захист спрацював, тому що вся схема після вимкнення пошкодження повернеться у вихідний (доаварійний) стан. Реле KL призначене для розмноження контактів (якщо потрібно комутувати одночасно декілька кіл) та для комутації кіл зі значними струмами. Наприклад, для спрацювання електромагніту вимкнення вимикача 10 кВ потрібен струм 1–4 А. Тому реле KL виконують з багатьма потужними контактами. Після спрацювання проміжне реле замикає свої контакти KL, що подають (через замкнені блок-контакти увімкненого вимикача Q) живлення на електромагніт вимкнення вимикача YAT, тоді електромагніт спрацьовує, вимикач Q вимикається. Щоб запобігти згорянню котушки електромагніту вимкнення YAT за рахунок тривалого протікання по ній струму (після вимкнення КЗ – у разі залипання якоря, контактів проміжного реле KL), – послідовно в колі живлення електромагніту YAT передбачені блок-контакти вимикача Q. Ці блок-контакти розмикаються після вимкнення вимикача.

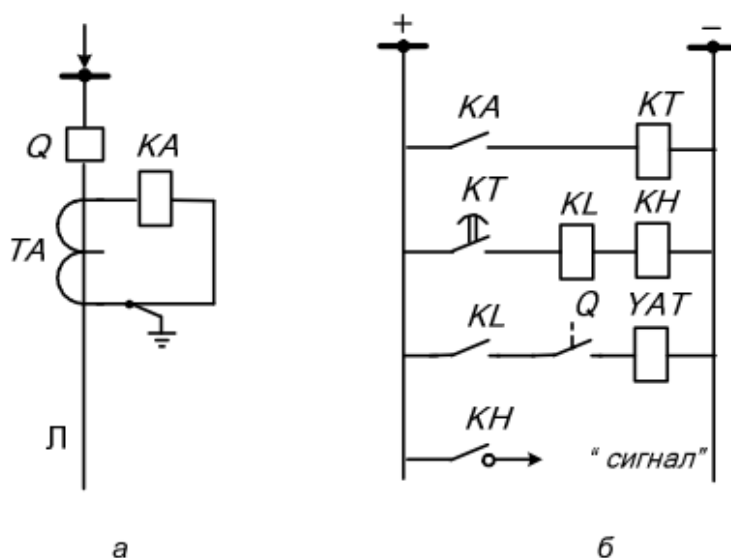


Рисунок 4.1 – Принципова схема МСЗ

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		39

Розрахунок МСЗ зводять до визначення:

- первинного струму спрацювання;
- вторинного струму спрацювання, залежно від прийнятої схеми захисту та типу реле;
- часу спрацювання. Для захистів із залежною витримкою часу – вибору характеристики спрацювання.

Крім розрахунку основних параметрів спрацювання МСЗ перевіряють трансформатори струму, а також термічну стійкість лінії під час протікання струму КЗ протягом вибраного часу спрацювання МСЗ.

Параметрами спрацювання МСЗ є струм та час спрацювання.

Вибір часу спрацювання МСЗ

МСЗ можна виконувати з незалежною або залежною від величини струму витримкою часу.

Селективність МСЗ А1 та А2 (рис. 4.2) забезпечують так [2]: час спрацювання захисту, розташованого ближче до джерела живлення (захист А1), має бути більшим за час спрацювання захисту, віддаленішого від джерела живлення (захист А2), на величину Δt , що називають ступенем селективності. Ця умова буде забезпечуватись, коли

$$t_1 = t_2 + \Delta t,$$

де t_1, t_2 – час спрацювання захистів відповідно А1 та А2.

У разі КЗ на лінії Л2 (рис. 4.2) спрацьовують вимірні органи двох захистів – А1 та А2, але за рахунок того, що t_1 є більшим від t_2 , швидше спрацює захист А2 і вимкне вимикач Q2. Після вимкнення пошкодженої лінії вимикачем Q2 вимірний орган захисту А1 повернеться у вихідний стан і непошкоджена лінія Л1 не вимкнеться.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		40

Ступінь селективності залежить від таких факторів:

$$\Delta t = t_{Q2} + t_{n1} + t_{n2} + t_{in1} + t_{зан},$$

де t_{Q2} – час спрацювання вимикача Q2 (0,05÷0,3 с); t_{n1} , t_{n2} – похибки у часі дії захистів відповідно А1 та А2 (для реле серії РТ-80 похибка становить 0,05–0,1 с; для реле РТВ становить: 0,3 с – для незалежної частини характеристики, 0,8–1 с – для залежної частини характеристики); t_{in1} – інерційна похибка в дії захисту А1 з індукційним реле, що внаслідок сили інерції деякий час продовжує працювати навіть після вимкнення КЗ захистом А2 на попередньому об'єкті (лінія Л2). Значення ступеня селективності Δt захистів з електромеханічними та напівпровідниковими реле, зазвичай, є в межах 0,4 – 1 с. Для цифрових захистів ступінь селективності Δt можна зменшити до 0,3 с.

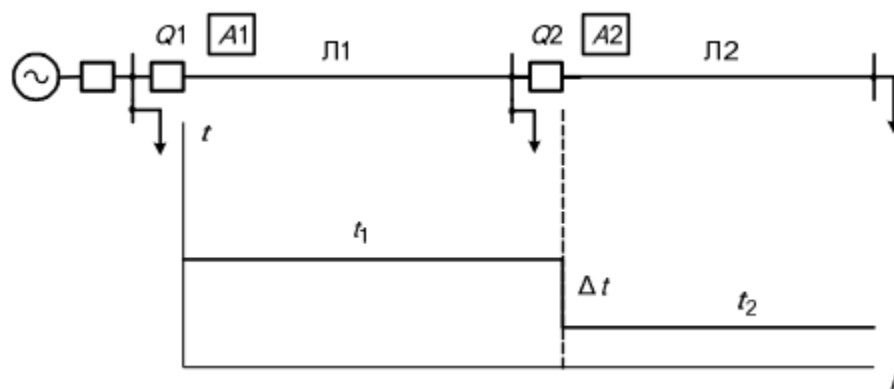


Рисунок 4.2 – Ступінчаті витримки часу спрацювання МСЗ ліній з одностороннім живленням

Якщо захист попереднього об'єкта (для лінії Л1 попереднім об'єктом є лінія Л2, рис. 4.2) виконаний без витримки часу, то приймають $\Delta t = 0,4$ с. Також для узгоджуваних МСЗ можна приймати: $\Delta t = 0,4$ с – за застосування реле часу типу ЭВ-120 (шкала 3,5 с) та ЭВ-110 (шкала до 1,3 с); $\Delta t = 0,6$ с – за застосування реле часу типу ЭВ-130. Для узгоджуваних МСЗ з реле типу РВМ - 12 та РВМ-13 приймають $\Delta t = 0,5 - 0,6$ с.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
						41
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

Отже, вибирають час спрацювання максимальних струмових захистів послідовних ділянок мережі (рис. 4.2) за ступінчатим принципом. Починають вибирання із найвіддаленішої від джерела живлення ділянки. Час спрацювання МСЗ цієї ділянки вибирають на ступінь селективності більшим від максимального часу спрацювання захисту об'єктів, що живляться від підстанції, яку своєю чергою живить ця лінія. Час спрацювання МСЗ наступної ділянки вибирають на ступінь селективності більшим від часу спрацювання захисту попередньої ділянки. Тобто час спрацювання МСЗ послідовних ділянок мережі збільшують з наближенням до джерела живлення.

Отже, для вибору часу спрацювання МСЗ мережі з одностороннім живленням необхідно користуватись таким правилом: час спрацювання МСЗ наступної ділянки мережі (ближчої до джерела живлення) вибирають на ступінь селективності більшим від часу спрацювання МСЗ попередньої ділянки мережі (віддаленішого від джерела живлення).

Вибір струму спрацювання

Уставку МСЗ за струмом вибирають з умови забезпечення таких вимог:

- неспрацювання захисту під час виникнення післяаварійних перевантажень;
- узгодження за чутливістю з захистами суміжних ліній;
- узгодження дії МСЗ з електромагнітами вимкнення та додатковими реле (останнє – для схем захистів на змінному оперативному струмі з дешунтуванням електромагнітів вимкнення).

Струм спрацювання МСЗ вибирають з умови відведення від робочого максимального струму лінії.

Зазвичай, розрахунковими є післяаварійні режими, що супроводжуються значними перевантаженнями. Так, під час КЗ на лінії Л2 (рис. 4.2) спрацьовують пускові органи захистів А1 та А2. Після селективного вимкнення цього пошкодження захистом А2 пусковий орган А1 повинен повернутись у вихідне положення. Тому струм повернення пускового органа МСЗ А1 повинен бути більшим

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		42

від струму, який протікає через лінію Л1 після вимкнення пошкодження захистом А2.

Під час КЗ понижується напруга на шинах підстанції і двигуни, що живляться від цієї підстанції, загальмовуються. Після вимкнення КЗ та відновлення напруги на шинах підстанції двигуни починають самозапускатись. У такому разі в лінії Л1 (рис. 4.2), що живить підстанцію, зростає струм, який досягає значення, більшого від робочого максимального струму – струм самозапуску $I_{с.зап}$ (рис. 4.3).

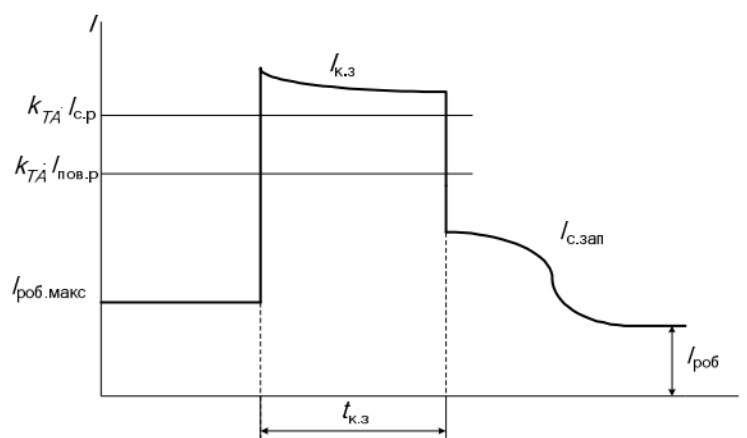


Рисунок 4.3 – Зміна струму в лінії під час та після вимкнення КЗ

4.1.3 Розрахунок параметрів реле струму

Максимальний робочий струм лінії ($I_{роб.макс}$) за відсутності офіційних даних може бути визначений приблизно за максимальною сумарною потужністю силових трансформаторів, які можуть живитися від лінії, що захищається, у нормальному, ремонтному або післяаварійному режимах:

$$I_{роб.макс} = \frac{1,4 \cdot P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n},$$

де P_n – номінальна активна потужність навантаження, Вт;

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
						43
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

U_n – номінальна лінійна напруга мережі, В;

$\cos \varphi_n$ – коефіцієнт потужності навантаження в номінальному режимі.

Трансформатор струму слід обирати на первинний струм I_{TA1n} , який є найближчим до значення $I_{p.макс}$ зі стандартного ряду: 5, 10, 15, 20, 30, 50, 75, 100, 150, 200, 250, 300, 400, 600, 750, 800, 1000, 1500, 2000. Вторинний струм I_{TA2n} трансформатора струму становить 5 А.

Для визначення струму спрацювання максимального струмового захисту з умови неспрацювання захисту при надмірних струмах післяаварійних перевантажень, використаємо вираз [7, с. 22]:

$$I_{с.з} = \frac{k_n k_{сзн}}{k_{нов}} I_{роб.макс},$$

де k_n – коефіцієнт надійності, що враховує похибку реле й необхідний запас, залежно від типу реле може братися 1,1-1,2 (реле РТ-40, РТ-80, РТ-90) або 1,2 - 1,4 (реле РТВ);

$k_{нов}$ – коефіцієнт повернення реле залежно від типу реле може бути 0,8 - 0,85 (реле РТ-40, РТ-80, РТ-90) або 0,6-0,7 (реле РТВ) або близько 1 (напівпровідникові максимальні реле струму або пристрою захисту типу ЛТЗ, ЯРЭ, ТЗВР, УЗА-10, SPAC 801);

$k_{сзн}$ – коефіцієнт самозапуску, значення якого залежить від виду навантаження і його параметрів, від схеми й параметрів живильної мережі, від обраних параметрів спрацьовування захисту й автоматики;

$I_{роб.макс}$ – максимальний робочий струм (струм навантаження) елемента, для якого розраховують захист, величина якого визначається в конкретних умовах головним чином залежно від виду елемента (повітряна лінія, кабельна лінія, трансформатор і т.п.) і можливих режимів його роботи.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		44

Вторинний струм спрацювання реле, А:

$$I_{c.p} = \frac{k_{cx}}{n_T} I_{c.з},$$

де k_{cx} – схемний коефіцієнт, що враховує схему з'єднання трансформаторів струму.

n_T – коефіцієнт трансформації трансформатора струму

Після визначення $I_{c.p}$ необхідно обрати тип струмового реле РТ–40 та тип з'єднання його обмоток.

4.2 Перехідні процеси при порушенні симетрії

4.2.1 Загальні відомості

У системі електропостачання за трифазного КЗ усі фази мережі – в однакових умовах. Вектори періодичних складових струмів та напруг фаз відповідно рівні за значенням модуля і зміщені у просторі на 120° , утворюючи зрівноважені системи. Тому еквівалентну схему заміщення короткозамкненого трифазного контура подають в однолінійному зображенні й розраховують лише одну з фаз [4].

Через появу пошкоджень (несиметричні КЗ, обриви або несиметричне навантаження фаз) модулі фазних струмів і напруг, а також кути їх взаємного зміщення стають різними за значеннями. Вектори фазних струмів та напруг утворюють несиметричні і загалом незрівноважені системи. Розрахунки при цьому слід здійснювати із складанням схем заміщення для всіх трьох фаз з урахуванням взаємоіндукції між ними. Кількість необхідних для їх опису рівнянь значно зростає, трудомісткість та обсяг обчислень (навіть за умови простої схеми СЕП) збільшуються.

Розглянемо перехідні процеси, зумовлені одноразовою несиметрією, тобто виникненням несиметричного пошкодження лише в одному місці мережі електричної системи, у той час як загалом вона залишається симетричною. Така

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		45

одноразова несиметрія може бути поперечною (будь-який вид несиметричних КЗ) чи поздовжньою (розрив однієї або двох фаз чи неоднаковий опір навантаження фаз трифазної мережі).

Аналіз перехідних процесів при несиметричних пошкодженнях істотно утруднений тим, що у мережах з синхронними машинами в останніх утворюється пульсуюче магнітне поле ротора, яке викликає, як показано далі, повний спектр вищих гармонік. Перехід від фазних змінних до змінних у координатах d, q при цьому не звільняє диференціальні рівняння опису таких процесів від періодичних коефіцієнтів. Для стаціонарних умов переважно визначають лише основні гармоніки шуканих величин. Саме за такого обмеження можливе застосування методу симетричних складових для мереж з синхронними машинами. Розрахунки роблять для трьох однолінійних взаємно незалежних схем заміщення прямої, зворотної та нульової послідовностей, до яких еквівалентують синхронні машини з відповідними параметрами.

4.1.5 Метод симетричних складових

Цей метод дає можливість подати будь-яку несиметричну систему з трьох векторів у вигляді складових симетричних систем векторів: прямої, зворотної та нульової послідовностей. У кожній з систем векторів окремих послідовностей явища у фазах подібні, що дозволяє користуватися однолінійними схемами заміщення для кожної послідовності та розраховувати одну з фаз. Вибирається фаза (так звана особлива), у відмітних від двох інших умовах.

Основні положення методу.

Один з трьох векторів симетричної системи можна виразити однойменним вектором іншої фази з використанням оператора повороту a (передається ком-

плексним числом $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$) та таких співвідношень [4, с. 204]:

									арк.
									46
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата					

$$\left\{ \begin{array}{l} a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{-j120^\circ} = e^{j240^\circ} \\ a^3 = e^{j360^\circ} = 1 \\ a^2 + a + 1 = 0 \\ a^2 - a = \sqrt{3}e^{-j90^\circ} = -j\sqrt{3} \\ a - a^2 = j\sqrt{3} \\ 1 - a = \sqrt{3}e^{-j30^\circ} = 1\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 1 - a^2 = \sqrt{3}e^{j30^\circ} = 1\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \end{array} \right.$$

У симетричній трифазній системі векторів (рис. 4.4) кожен з них можна подати:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{N}_A = a\dot{N}_B = a^2\dot{N}_C \\ \dot{N}_B = a\dot{N}_C = a^2\dot{N}_A \\ \dot{N}_C = a\dot{N}_A = a^2\dot{N}_B \end{array} \right.$$

Множення вектора на оператор a означає його поворот на 120° у позитивному напрямку (проти руху годинникової стрілки). Множення на a^2 відповідає повороту на 240° у тому ж напрямку або на 120° – у протилежному.

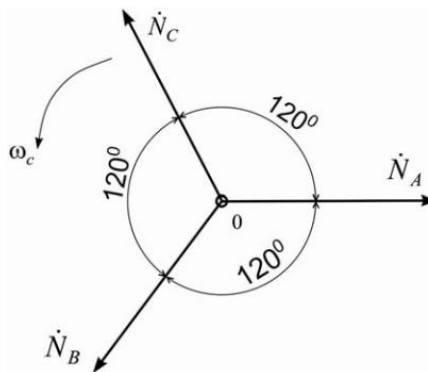


Рисунок 4.4 – Симетрична трифазна система фазних векторів параметра режиму

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		47

Несиметричну систему з трьох векторів можна розкласти на складові [4]:

– прямої послідовності (індекс 1) – з трьох рівних за модулем векторів, що зсунуті відносно один одного на 120° та чергуються, як і в основній симетричній системі (рис. 4.5,а);

– зворотної послідовності (індекс 2) – також з трьох рівних за модулем векторів, зсунутих відносно один одного на 120° . Чергування цих векторів протилежне основній симетричній системі (рис. 4.5,б). Оскільки сума векторів прямої (зворотної) послідовності дорівнює нулю, ці системи векторів сприймають як зрівноважені:

$$\dot{N}_{A1} + \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{C1} = \dot{N}_{A1}(1 + a^2 + a) = 0;$$

$$\dot{N}_{A2} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{C2} = \dot{N}_{A2}(1 + a + a^2) = 0$$

– нульової послідовності – з трьома рівними за модулем векторами, що збігаються і за напрямком (рис. 4.5,в) та позначаються індексом 0. Система векторів цієї послідовності симетрична, але незрівноважена:

$$\dot{N}_{A0} + \dot{N}_{B0} + \dot{N}_{C0} = 3N_{A0} \neq 0$$

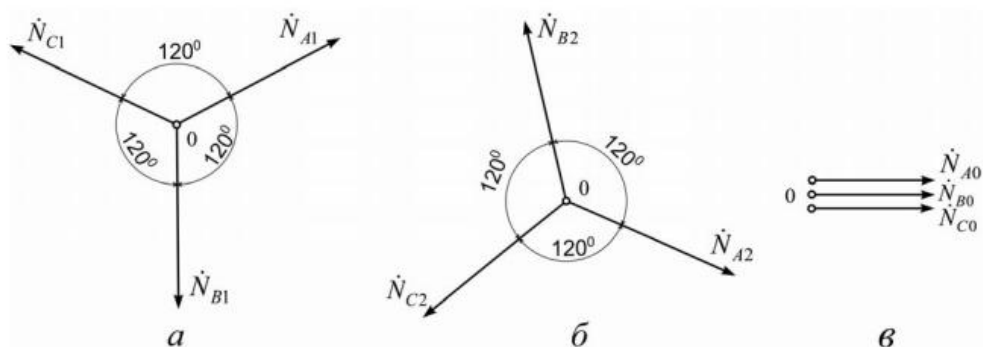


Рисунок 4.5. Складові симетричні системи фазних векторів послідовностей:

а – прямої; б – зворотної; в – нульової

За складовими (векторами прямої, зворотної та нульової послідовностей) можна відновити первинну несиметричну систему векторів [4, с. 205]:

$$\begin{cases} \dot{N}_A = \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \\ \dot{N}_B = \dot{N}_{B1} + \dot{N}_{B2} + \dot{N}_{B0} \\ \dot{N}_C = \dot{N}_{C1} + \dot{N}_{C2} + \dot{N}_{C0} \end{cases}$$

Якщо за особливу взяти фазу А, то з урахуванням вище зазначеної системи рівнянь та рис. 4.5 запишемо через симетричні складові вектора особливої фази:

$$\begin{cases} \dot{N}_A = \dot{N}_{A1} + \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \\ \dot{N}_B = a^2 \dot{N}_{A1} + a \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \\ \dot{N}_C = a \dot{N}_{A1} + a^2 \dot{N}_{A2} + \dot{N}_{A0} \end{cases}$$

Отримані рівняння дають змогу виділити з несиметричної системи векторів їх симетричні складові, для чого слід скласти всі рівняння, попередньо вирівнявши коефіцієнти при шуканій складовій. Наприклад, щоб виділити складову (вектор прямої послідовності), достатньо рівняння (6.4) помножити на коефіцієнти 1, a , a^2 відповідно, а потім скласти.

Складові вектори \dot{N}_{A1} , \dot{N}_{A2} , \dot{N}_{A0} отримаємо через фазні \dot{N}_A , \dot{N}_B , \dot{N}_C :

$$\begin{cases} \dot{N}_{A1} = \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a\dot{N}_B + a^2\dot{N}_C) \\ \dot{N}_{A2} = \frac{1}{3}(\dot{N}_A + a^2\dot{N}_B + a\dot{N}_C) \\ \dot{N}_{A0} = \frac{1}{3}(\dot{N}_A + \dot{N}_B + \dot{N}_C) \end{cases}$$

Це формули розкладання несиметричної системи векторів \dot{N}_A , \dot{N}_B , \dot{N}_C на три симетричні складові векторів особливої фази \dot{N}_{A1} , \dot{N}_{A2} , \dot{N}_{A0} .

На рис. 4.6,а графічно визначені складові \dot{N}_{A1} , \dot{N}_{A2} , \dot{N}_{A0} системи векторів \dot{N}_A , \dot{N}_B , \dot{N}_C , а на рис. 4.6,б за знайденими складовими знову отримані первинні фазні вектори \dot{N}_A , \dot{N}_B , \dot{N}_C .

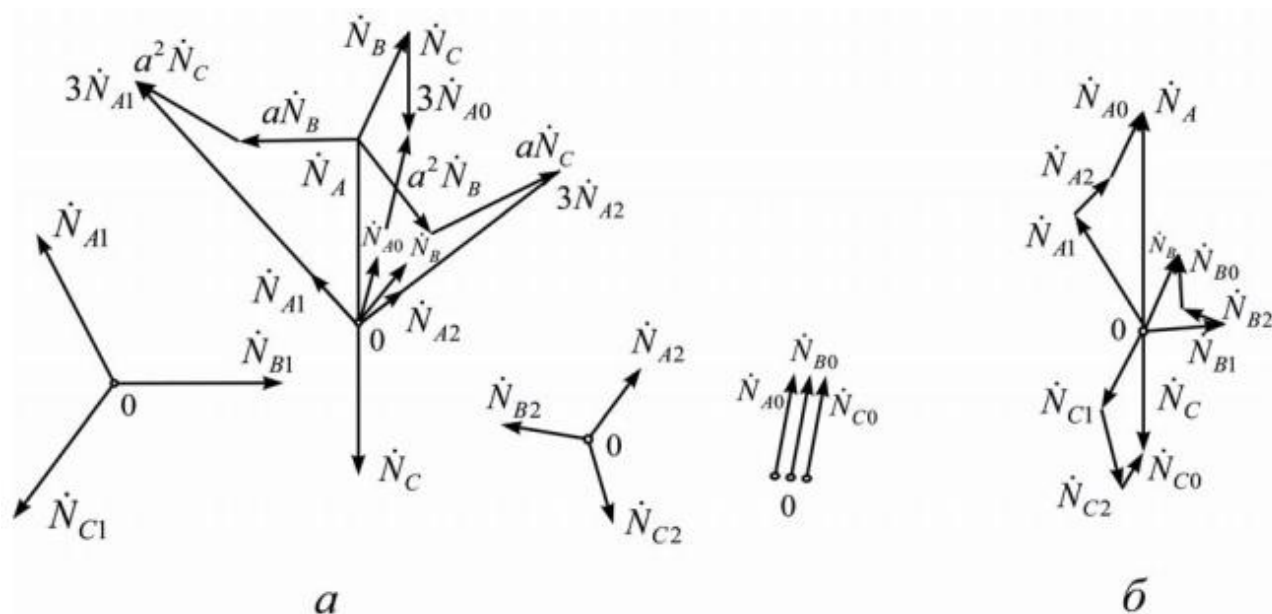


Рисунок 4.6 – Розкладання несиметричної трифазної системи векторів параметра режиму: а – симетричні складові; б – отримання початкової несиметричної системи фазних векторів

4.1.6 Схеми заміщення для окремих послідовностей

Під час розрахунку будь-якого режиму з несиметричним пошкодженням методом симетричних складових початковим етапом вважається складання схем заміщення, а у загальному випадку – для всіх послідовностей [4]: прямої, зворотної та нульової. Схеми заміщення окремих послідовностей містять еквіваленти елементів мережі, якими при даній несиметрії перебігає струм відповідної послідовності. Параметри еквівалентів схем заміщення окремих послідовностей відображають, звівши їх відповідно до напруги основного ступеня або базисних умов в іменованих чи відносних одиницях виміру. При аналітичному вирішенні завдання за цими схемами знаходять результуючий опір кожної послідовності

відносно місця, де сталася несиметрія. Для схеми заміщення прямої послідовності виявляють також результуючу ЕРС.

Схема заміщення для прямої послідовності повинна містити еквіваленти всіх елементів розрахункової схеми електроустановки, якими перебігає струм прямої послідовності. Синхронні генератори, компенсатори і синхронні та асинхронні двигуни, які належить урахувати, під час обчислення початкового значення струму несиметричного КЗ вводять до схеми заміщення прямої послідовності надперехідними ЕРС і опорами. Решту елементів подають до схеми заміщення у вигляді тільки електричних опорів.

Схема заміщення для зворотної послідовності за структурою аналогічна схемі заміщення для прямої послідовності, оскільки струми прямої та зворотної послідовностей перебігають одними й тими ж шляхами. Щоб отримати схему заміщення зворотної послідовності, треба перетворити схему заміщення прямої послідовності – е.р.с. усіх генеруючих джерел взяти рівними нулю, а індуктивний опір синхронних машин та навантажень замінити індуктивним опором зворотної послідовності цих елементів. У спрощених практичних розрахунках допускається брати рівність опорів елементів у схемах прямої та зворотної послідовностей.

Початком схеми заміщення для зворотної послідовності вважають точку нульового потенціалу всіх генеруючих та навантажувальних віток. Кінцем схеми заміщення для зворотної послідовності визнають точку, де виникла зазначена несиметрія. До кінця схем заміщення прикладені напруги відповідних послідовностей.

Схема заміщення для нульової послідовності різниться від схем заміщення інших послідовностей, адже струм нульової послідовності перебігає шляхами, відмітними від шляхів перебігу струмів симетричних режимів. Тому схема заміщення для нульової послідовності значною мірою визначається схемами з'єднання обмоток трансформаторів та автотрансформаторів і станом їх нейтралей.

Складання названої схеми заміщення розпочинають від точки, де виникла несиметрія, вважаючи, що саме в ній прикладена напруга нульової

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		51

послідовності. Залежно від виду несиметрії цю напругу прикладають відносно землі (поперечна несиметрія, рис. 4.7,а) або послідовно у точку розсічення фазних проводів (поздовжня несиметрія, рис. 4.7,б). Далі у межах кожного електрично зв'язаного кола виявляють можливі шляхи циркуляції струмів нульової послідовності.

Джерело напруги нульової послідовності $\dot{U}_{\kappa 0}$ ввімкнено відносно землі у місці пошкодження. У разі відсутності ємнісної провідності на землю для циркуляції струму нульової послідовності необхідна щонайменше одна заземлена нейтраль у тому ж електрично зв'язаному колі. При кількох заземлених нейтралях у цьому колі утворюються відповідно паралельні контури циркуляції струму нульової послідовності.

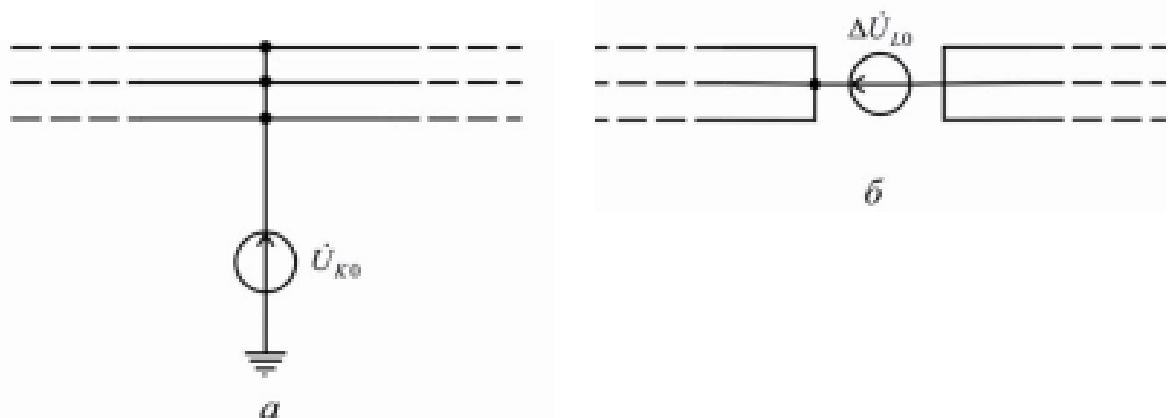


Рисунок 4.7 – Ввімкнення джерела напруги нульової послідовності: а – при поперечній несиметрії; б – при поздовжній несиметрії

Внаслідок поздовжньої несиметрії, коли напруга нульової послідовності введена у фазні проводи послідовно, циркуляція струму нульової послідовності можлива навіть при відсутності заземлених нейтралей, якщо існує контур його перебігу. З відсутністю такого контура перебіг струму нульової послідовності у зазначених умовах тоді можливий, коли в тому ж електрично зв'язаному колі існують заземлені нейтралі з обох боків місця прикладання напруги нульової послідовності $\Delta \dot{U}_{L0}$.

Під час складання схеми заміщення для нульової послідовності керуються такими обставинами:

- якщо обмотка трансформатора з боку несиметричного пошкодження з'єднана на трикутник чи зірку з незаземленою нейтраллю, то трансформатор та елементи, що за ним (до точки пошкодження), не треба вводити до схеми заміщення;
- якщо обмотки трансформатора сполучені за схемою Y_0 / Δ , причому обмотка, з'єднана на зірку із заземленою нейтраллю, звернена в бік несиметричного пошкодження, то до схеми заміщення слід вводити лише елементи, ввімкнені між точкою пошкодження та трансформатором, а також сам трансформатор;
- якщо декілька повітряних ліній електропередачі прокладені однією трасою, то необхідно враховувати взаємоіндукцію між лініями;
- якщо нейтраль трансформатора (генератора, двигуна, навантаження) заземлена через елемент, то до схеми заміщення еквівалент слід вводити потроєним значенням опору цього елемента. Схему заміщення складають для однієї фази, а через опір нейтралі перебігає сума струмів нульової послідовності від усіх трьох фаз. Щоб визначити дійсний спад напруги в нейтралі, збільшують утричі опір.

4.1.7 Двофазне коротке замикання

Розрахункову схему двофазного короткого замикання $K^{(2)}$ (рис.4.9) отримуємо при значеннях опорів: Z_A – нескінченності, а Z_B та Z_C – нулю (рис. 4.8).

Граничні умови у фазних величинах [4, с. 243]:

$$\begin{cases} \dot{i}_{\kappa A}^{(2)} = 0 \\ \dot{i}_{\kappa B}^{(2)} = -\dot{i}_{\kappa C}^{(2)} \\ \dot{U}_{\kappa B} = \dot{U}_{\kappa C} \end{cases}$$

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		53

Тоді маємо:

$$\begin{cases} I_{\kappa A1}^{(2)} = \dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{Z}_{1pez} + \underline{Z}_{2pez}) \\ I_{\kappa A2}^{(2)} = -I_{\kappa A1}^{(2)} = -\dot{E}_{A\Sigma} / (\underline{Z}_{1pez} + \underline{Z}_{2pez}) \\ I_{\kappa A0}^{(2)} = 0 \end{cases}$$

Напруги окремих послідовностей для особливої фази А у місці КЗ визначаємо:

$$\begin{cases} \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} = \underline{Z}_{1pez} \dot{I}_{\kappa A1}^{(2)} \\ \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} = -\underline{Z}_{2pez} \dot{I}_{\kappa A2}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} \\ \dot{U}_{\kappa A0}^{(2)} = 0 \end{cases}$$

Струми та напруги фаз:

$$\begin{cases} \dot{i}_{\kappa A}^{(2)} = 0 \\ \dot{i}_{\kappa B}^{(2)} = a^2 \dot{i}_{\kappa A1}^{(2)} + a \dot{i}_{\kappa A2}^{(2)} = (a - a^2) \dot{i}_{\kappa A1}^{(2)} = -j\sqrt{3} \dot{i}_{\kappa A1}^{(2)} \\ \dot{i}_{\kappa C}^{(2)} = a \dot{i}_{\kappa A1}^{(2)} + a^2 \dot{i}_{\kappa A2}^{(2)} = (a - a^2) \dot{i}_{\kappa A1}^{(2)} = j\sqrt{3} \dot{i}_{\kappa A1}^{(2)} = -\dot{i}_{\kappa B}^{(2)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{\kappa A}^{(2)} = \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} + \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} + \dot{U}_{\kappa A0}^{(2)} \\ \dot{U}_{\kappa B}^{(2)} = a^2 \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} + a \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} + \dot{U}_{\kappa A0}^{(2)} = -\dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} \\ \dot{U}_{\kappa C}^{(2)} = a \dot{U}_{\kappa A1}^{(2)} + a^2 \dot{U}_{\kappa A2}^{(2)} + \dot{U}_{\kappa A0}^{(2)} = -\dot{U}_{\kappa B1}^{(2)} \end{cases}$$

4.3 Дослідження максимального струмового захисту

4.3.1 Опис віртуального стенда

Даний стенд імітує роботу електричної мережі 10 кВ. Живлення електричною електричною енергією споживача 1 (рис. 4.8), здійснюється від трифазного

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
						54
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

джерела змінної напруги 2, через високовольтний вимикач 3 та лінію електропередач 4.

На початку ЛЕП у фазах А та С встановлено трансформатори струму (ТС) ТА1 та ТА2 відповідно. ТС з'єднанні за схемою неповна зірка. До їх вторинних кіл підключено струмові реле КА1, КА2 типу РТ-40. Контакти відповідних реле (КА1.1 та КА2.2) ввімкнені паралельно в коло живлення реле часу КТ1 (типу РВ - 100) постійним оперативним струмом. Нормально розімкнений контакт КТ1.1 реле включений послідовно з проміжним реле РП-23, нормально розімкнений контакт КЛ1.1 ввімкнено в коло живлення вказівного реле та електромагніта відключення УАТ1 вимикача Q1 через блокувальний допоміжний контакт SQ1 вимикача Q1.

Для встановлення параметрів елементів зазначених вище в програмі передбачено панель «Блок управління схемою». Натиснувши кнопку «Параметри RL1» вводимо параметри навантаження (рис.4.9). Після підтвердження вибору, з'являється повідомлення «Натисніть кнопку рекомендації!». Натиснувши кнопку «Рекомендації», з'являється вікно (рис.4.10), у якому запропоновано параметри інших елементів стенду. Параметри розраховано згідно п. 4.1.3. Кнопки «Пуск» та «Стоп», призначені для запуску та зупинки симуляції. При переведенні вимикача в положення «Оп», у схемі відбувається двофазне коротке замикання фаз АС. Математична модель КЗ базується на методі симетричних складових згідно п. 4.2.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		55

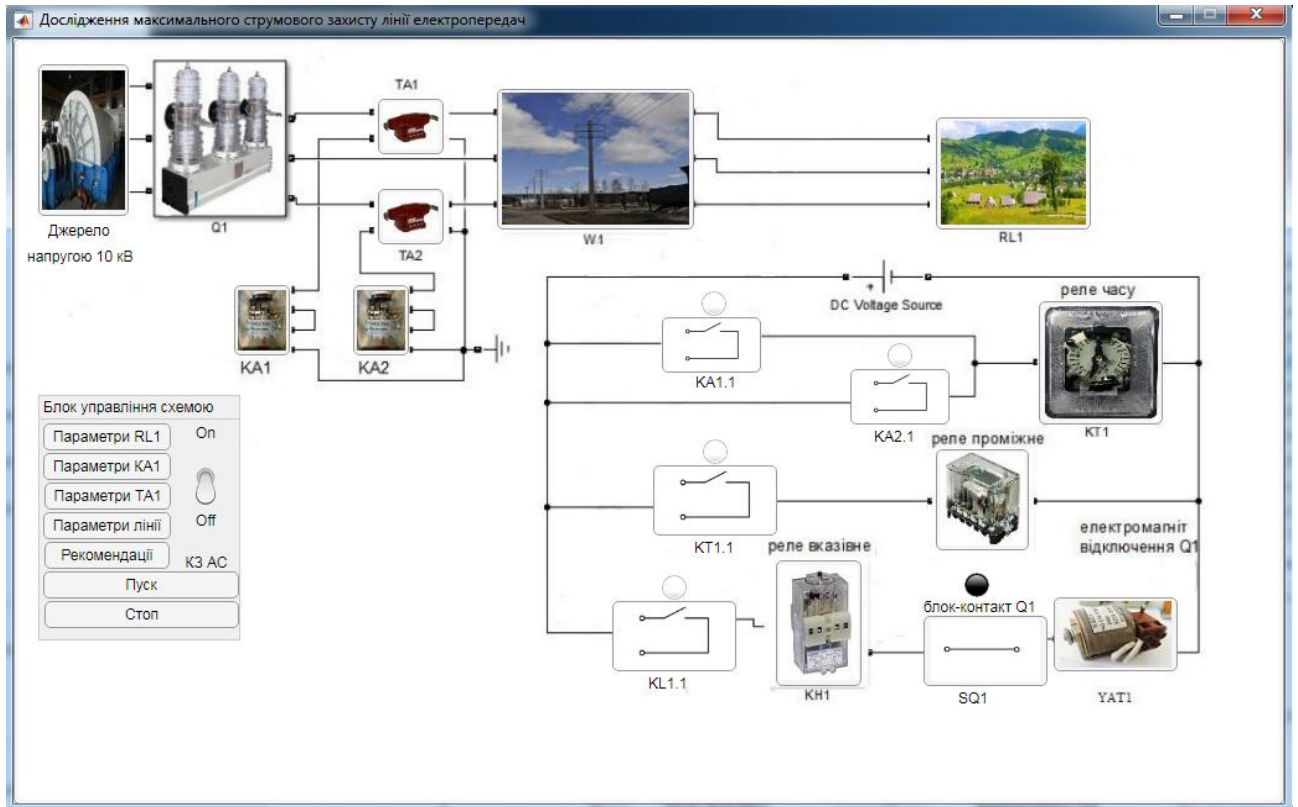


Рисунок 4.8 – Інтерфейс програми «Дослідження максимального струмового захисту лінії електропередач»

При запусці моделі автоматично з'являються вікна, в яких у вигляді анімації будуються графіки залежності струмів, що протікають у кожній фазі та стан елементів від часу. Про стан контакта свідчить лампа-індикатор розташована над контактом. Якщо контакт нормально замкнений то при спрацюванні реле загорається відповідна лампа. Колір лампи відповідає стану реле на графіку. Крім загорання лампи, можна наглядно побачити замкнений стан контакт. Аналогічно з нормально замкненим контактом.

Дану програму, як і попередні можна встановити на комп'ютер без установки MATLAB. Усі побудовані графіки можна зберегти у вигляді рисунків або роздрукувати.

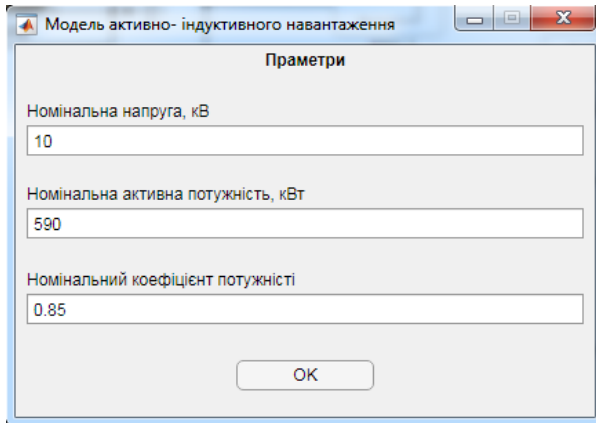


Рисунок 4.9 – Введення параметрів навантаження

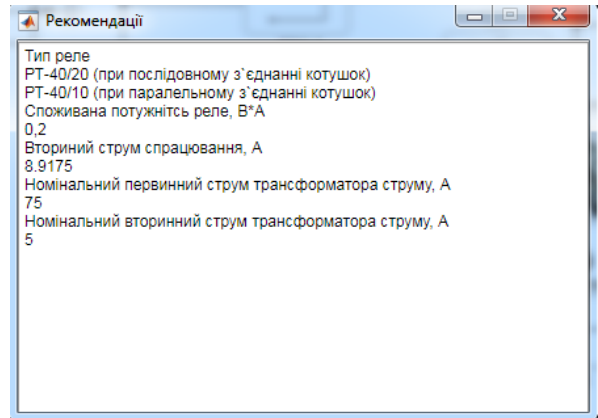


Рисунок 4.10 – Рекомендовані параметри інших елементів

4.3.2 Виконання досліду

1. Обираємо вихідні дані: $P_n = 920 \text{ кВт}$, $\cos \varphi_n = 0,91$. Натиснемо кнопку «Параметри RL1» та введемо дані. Після натиснемо «Рекомендації».

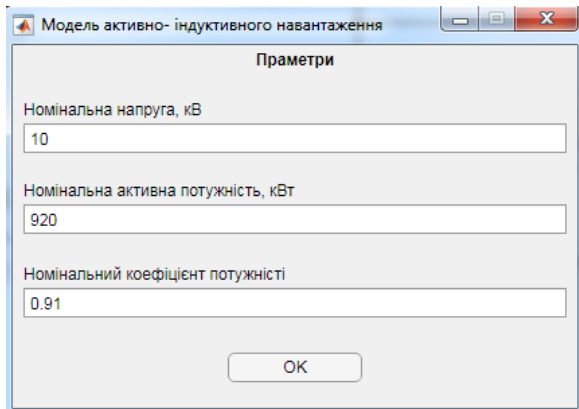


Рисунок 4.11 – Параметри навантаження

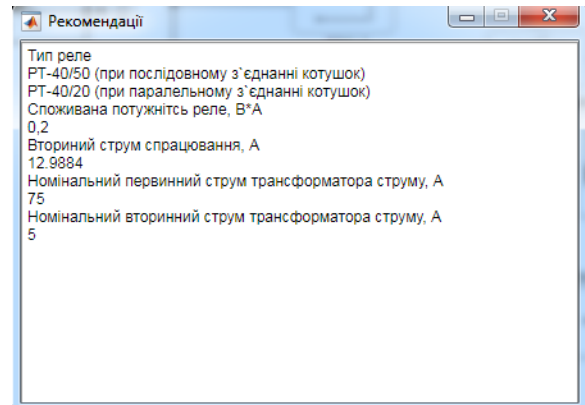


Рисунок 4.12 – Вікно «Рекомендації»

2. Згідно рекомендацій введемо параметри реле струму, трансформаторів струму та ЛЕП.

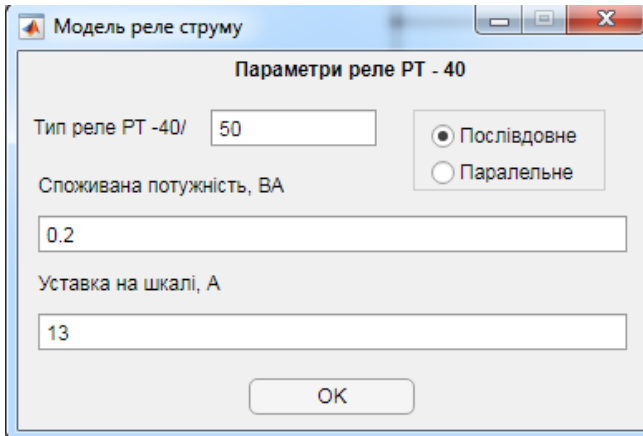


Рисунок 4.13 – Параметри реле струму

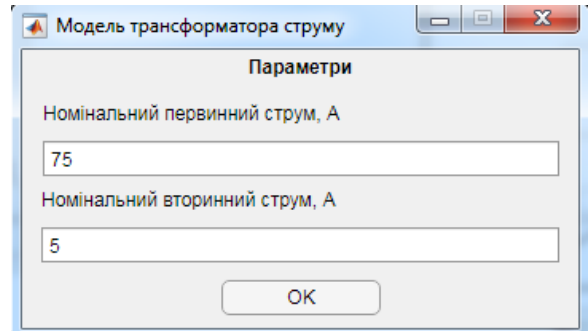


Рисунок 4.14 – Параметри трансформаторів струму

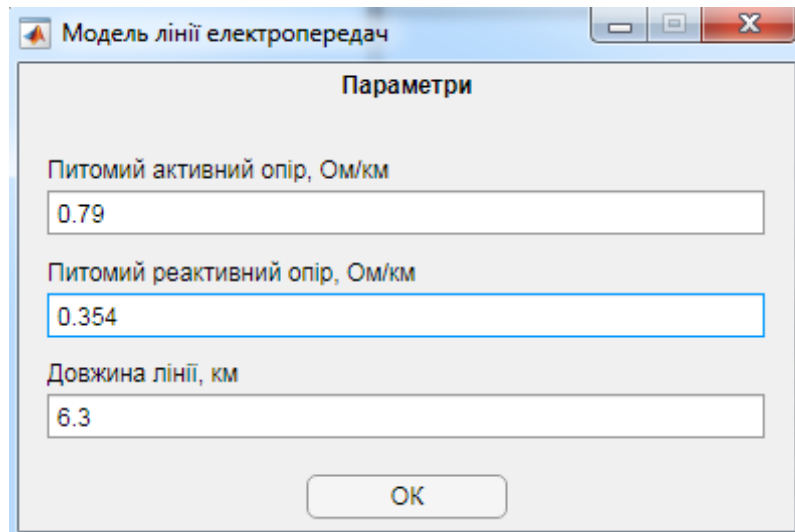
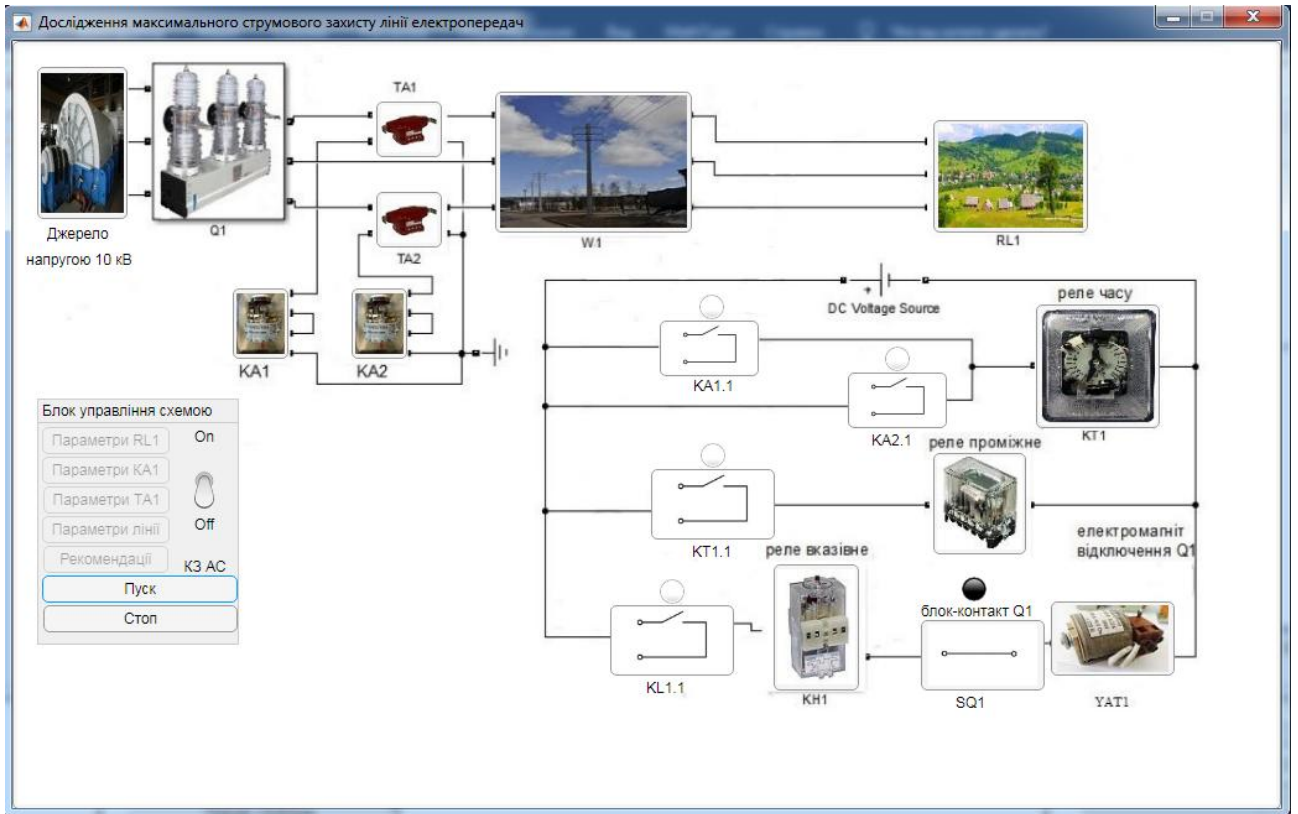
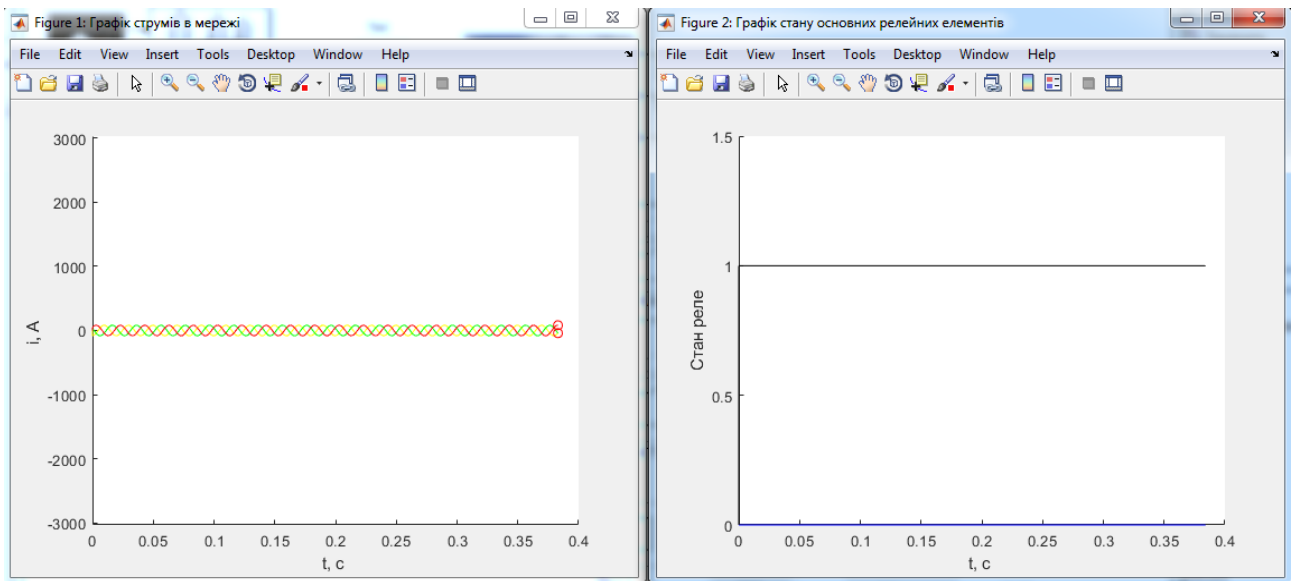


Рисунок 4.14 – Параметри ЛЕП

3. Запускаємо модель натиснувши кнопку «Пуск». Так, як положення вимикача «Off», то в мережі нормальний режим (рис. 4.14). Потім переводимо вимикач в положення «On», що призводить до виникнення режиму КЗ в фазах А та С (рис. 4.15).



а)

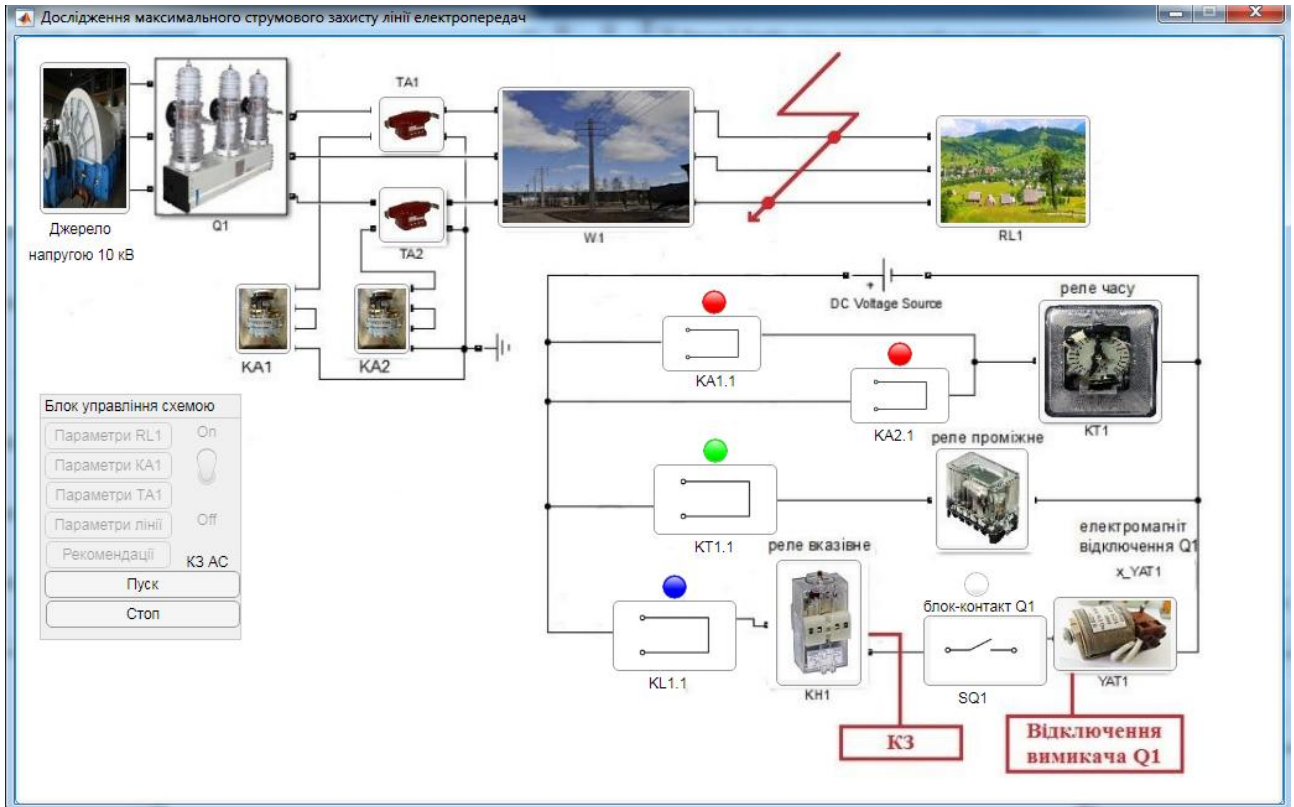


б)

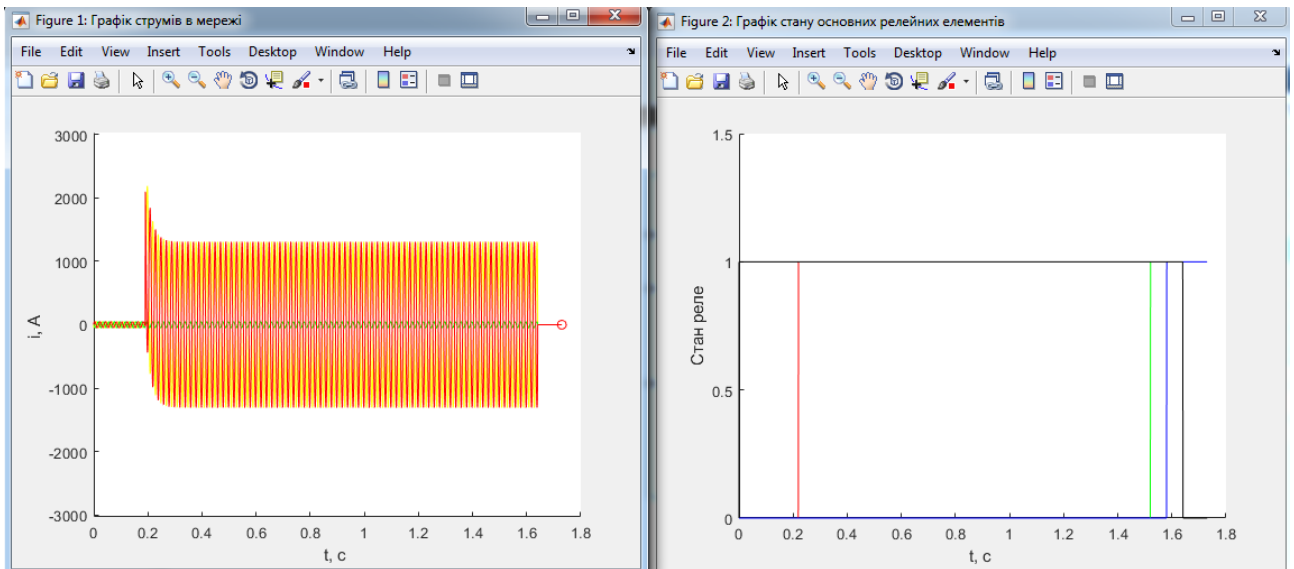
Рисунок 4.14 – Нормальний режим мережі:

а – вигляд програми, б – графіки залежності струму та стан елементів від часу

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата



а)



б)

Рисунок 4.15 – Аварійний режим:

а – вигляд програми, б – графіки залежності струму та стан елементів від часу

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

5. ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРАВЛЕНОГО МАКСИМАЛЬНОГО СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ

5.1 Загальні відомості

Селективність роботи струмових захистів не забезпечується без контролю напрямку протікання струмів у лініях з двостороннім живленням, а також у складних мережах з декількома джерелами живлення [2], наприклад, у міських мережах.

Продемонструємо це на конкретному прикладі. На рис. 5.1 наведена мережа з двостороннім живленням, що захищають максимальними струмовими захистами без контролю напрямку протікання струмів у цій мережі. Під час КЗ в точці К1 на лінії Л1 для забезпечення селективної роботи МСЗ необхідно, щоб час t_2 спрацювання МСЗ лінії Л1 (А2) був меншим від часу t_3 спрацювання МСЗ лінії Л2 (А3) ($t_2 < t_3$). А під час КЗ в точці К2 на суміжній лінії Л2 для забезпечення селективності необхідно, щоб час t_2 спрацювання МСЗ лінії Л1 (А2) був більшим від часу t_3 спрацювання МСЗ лінії Л2 (А3) ($t_2 > t_3$). Тобто до МСЗ А2 та А3 висунуті взаємовиключні вимоги: $t_2 < t_3$ та $t_2 > t_3$, що є неможливим.

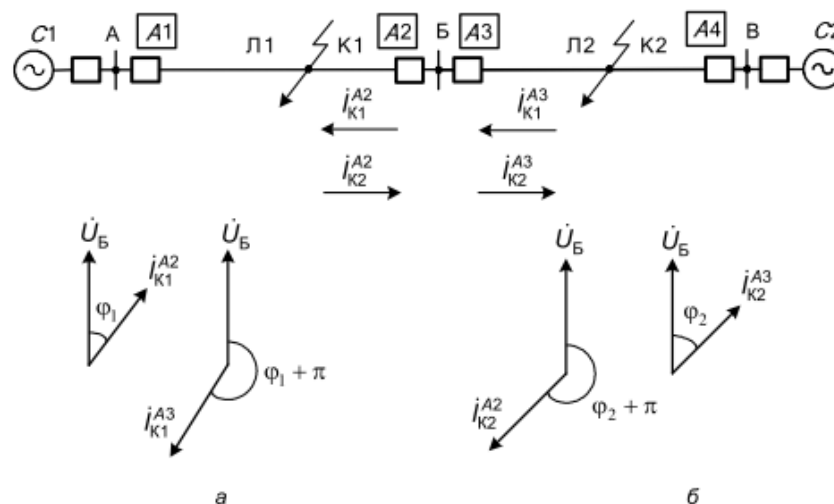


Рисунок 5.1 – Максимальний струмовий спрямований захист:

а – векторна діаграма при замиканні в т. К1; б – векторна діаграма при замиканні в т. К2

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		61

Для захисту АЗ за короткого замикання в точці К1 потужність КЗ протікає від лінії до шин, а за короткого замикання в точці К2 – від шин у лінію.

Отже, для забезпечення селективності захист повинен діяти за спрямування потужності КЗ від шин у лінію. Захист, який забезпечує цю умову, називають струмовим спрямованим захистом.

На відміну від МСЗ не спрямовані струмові відсічки та не спрямовані струмові відсічки з витримкою часу можна застосовувати в мережах з двостороннім живленням, але в цьому разі їх чутливість не завжди забезпечується. Тому в таких мережах застосовують спеціальні струмові захисти – максимальні струмові спрямовані захисти та спрямовані струмові відсічки.

5.1.1 Максимальний струмовий спрямований захист

Принципова схема максимального струмового спрямованого захисту (МССЗ) показана на рис. 5.2. Вимірний орган захисту складається з двох елементів – максимального струмового реле КА та реле спрямування потужності КВ. Логічний елемент (реле часу КТ) пускатимуться у разі одночасного спрацювання обох реле – КА та КВ. Якщо час тривання КЗ буде більший за витримку часу реле КТ, то останнє забезпечить спрацювання електромагніту УАТ вимкнення вимикача Q.

Як видно з векторної діаграми (рис. 5.1, а), за короткого замикання в точці К1 для захисту А2 кут $\varphi_1 < 90^\circ$, а для захисту А3 цей кут становить $\varphi_1 + 180^\circ$, за короткого замикання в точці К2 для захисту А3 (рис. 5.1, б) цей кут становить $\varphi_2 < 90^\circ$, а для захисту А3 – становить $\varphi_2 + 180^\circ$.

Отже, для забезпечення селективної роботи спрямованого МСЗ необхідно, щоб захист працював за кута між напругою та струмом КЗ $\varphi < 90^\circ$. За таким кутом повинен працювати орган спрямування потужності – реле КВ. За кутом $\varphi > 180^\circ$ цей орган не повинен працювати, а повинен блокувати роботу захисту.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		62

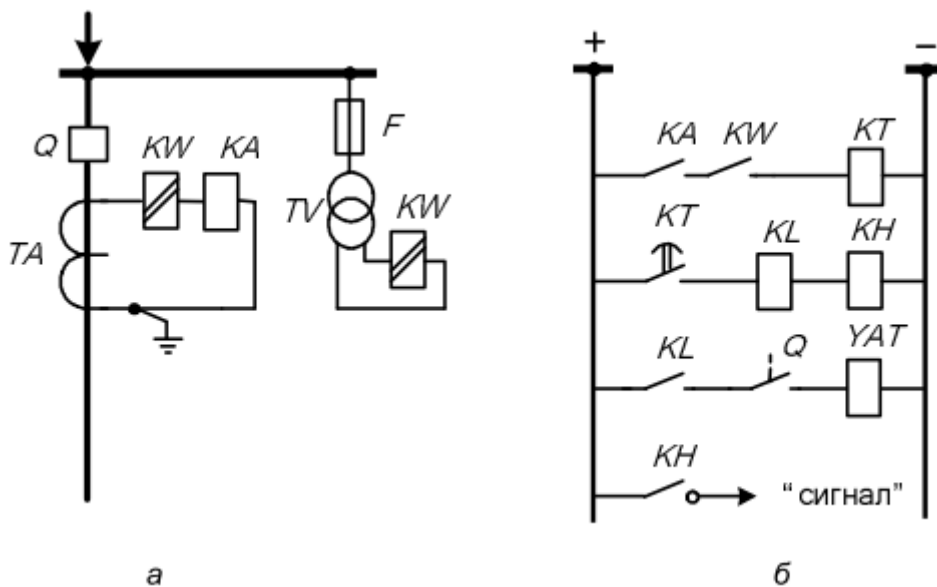


Рисунок 5.2 – Принципова схема МССЗ: а – струмові кола; б – оперативні кола

Отже, для забезпечення селективності роботи захисту орган спрямування потужності повинен спрацьовувати у разі спрямування струму (потужності) від шин у лінію.

Органи спрямування потужності можна вмикати на повні струми фаз лінії, або на нульову чи обернену послідовності струмів та напруг. Типовою схемою увімкнення органа спрямування потужності на повні струми фаз є, так звана, 90-градусна схема. Назва схеми свідчить про кут 90° між векторами напруги та струму (за активного навантаження приєднання), що підводять до реле (рис. 5.3). Для цієї схеми можливі три варіанти під'єднання реле спрямування потужності:

Реле	<i>KW1</i>	<i>KW2</i>	<i>KW3</i>
Струм I_p	I_A	I_B	I_C
Напруга U_p	U_{BC}	U_{CA}	U_{AB}

За трьох варіантів увімкнення 90° – схеми реле спрацьовує за усіх видів міжфазних КЗ за винятком однофазних та двофазних КЗ на землю (коли реле увімкнене на струм непошкодженої фази). Реле також має "мертву" зону – не спрацьовує під час близьких до місця встановлення захисту трифазних металічних КЗ. Для спрацювання реле спрямування потужності необхідно, щоб

підведена до нього напруга була більша від мінімальної напруги $U_{p.min}$, необхідної для спрацювання реле. "Мертву" зону реле визначають з залишкової напруги на шинах підстанції за трифазного КЗ на лінії

$$U_{зал}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}I_{к.з}^{(3)}z_0l_{к.з}}{k_{TV}}$$

$$l_{к.з} = \frac{k_{TV}U_{зал}^{(3)}}{\sqrt{3}I_{к.з}^{(3)}z_0}$$

де $U_{зал}^{(3)}$ – залишкова напруга на шинах підстанції за короткого замикання на лінії.

$I_{к.з}^{(3)}$ – струм трифазного КЗ в лінії.

z_0 – питомий опір лінії.

k_{TV} – коефіцієнт трансформації трансформатора напруги.

$l_{к.з}$ – відстань від шин до місця КЗ

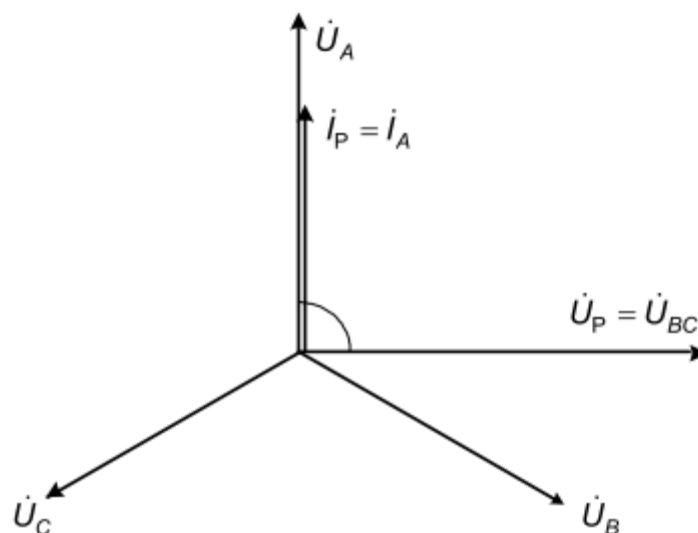


Рисунок 5.3 – Векторна діаграма напруг та струмів за 90-градусної схеми увімкнення

Наявність органа спрямування потужності дає змогу не узгоджувати між собою МССЗ А2 та А3 суміжних ліній, під'єднаних до спільної системи шин (рис. 5.1).

Для селективної роботи МССЗ у цій мережі необхідно узгодити між собою захисти в кожній з двох груп А2, А4 та А1, А3. Вибір витримок часу спрацювання захистів у кожній з цих груп здійснюють як і для МСЗ ліній з одностороннім живленням за ступінчатим ступеневим принципом, а саме: час спрацювання МССЗ $t_4 = t_2 + \Delta t$, а час спрацювання МССЗ А1 $t_1 = t_3 + \Delta t$. Такий принцип вибору часу спрацювання МССЗ називають зустрічно ступінчатим.

5.1.3 Загальна оцінка струмових спрямованих захистів

Основні особливості спрямованих струмових захистів [2]:

- ці захисти, зазвичай, забезпечують селективну роботу в мережі з двостороннім живленням, що складається з послідовно увімкнених ланок – окремих ліній; в кільцевій мережі з одностороннім живленням, в мережах з послідовним з'єднанням ланок (ліній) з будь-якою кількістю транзитних підстанцій з джерелами живлення;
- селективність роботи спрямованих струмових захистів не забезпечується в кільцевих мережах з кількома джерелами живлення, а також в кільцевих мережах з одним джерелом живлення, коли є “діагональні” лінії, що не з'єднані з джерелом живлення;
- струмові відсічки та струмові відсічки з витримкою часу можна виконувати неспрямованими, але тоді погіршується чутливість окремих комплектів захисту. Максимальні струмові захисти обов'язково виконують спрямованими;
- у разі виникнення аварійних перевантажень (наприклад, за вимкнення частини генераторів в одній зі систем, до якої під'єднана ця лінія) може не забезпечуватись необхідна чутливість;

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		65

- за виникнення хитань у системі можлива хибна робота струмових спрямованих захистів;
- струмові спрямовані захисти від міжфазних КЗ застосовують у мережах до 35 кВ включно. У мережах вищого класу напруг їх, зазвичай, застосовують як захисти нульової послідовності від КЗ на землю.

5.2 Перехідні процеси при трифазних коротких замиканнях

5.2.1 Коротке замикання в радіальній мережі

Для з'ясування змін струму при трифазному КЗ спочатку розглянемо найпростішу радіальну мережу (без трансформаторних зв'язків), яка живиться від джерела з незмінною напругою. Таке джерело називають джерелом необмеженої потужності; його граничне значення потужності теоретично не залежить від впливу зовнішніх умов (змін навантаження, кількості ввімкнених споживачів тощо). Практично це можливо при живленні СЕП від потужних ЕЕС і якщо КЗ виникає в малопотужних електроустановках або віддалених мережах.

На рис. 5.4 зображено радіальну мережу, в якій раптово сталося трифазне КЗ та її трифазну схему заміщення із зосередженими опорами мережі і навантаження. Мережа живиться від джерела необмеженої потужності з фазними напругами $\dot{U}_{\max A}$, $\dot{U}_{\max B}$, $\dot{U}_{\max C}$. До виникнення КЗ у мережі перебігають струми, миттєві значення яких i_A , i_B , i_C обумовлені напругою мережі.

У момент виникнення КЗ мережа практично розпадається на дві частини: права шунтується від джерела точкою КЗ і залишається без зовнішнього живлення, а ліва продовжує живитися від джерела необмеженої потужності з незмінною напругою [4].

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		66

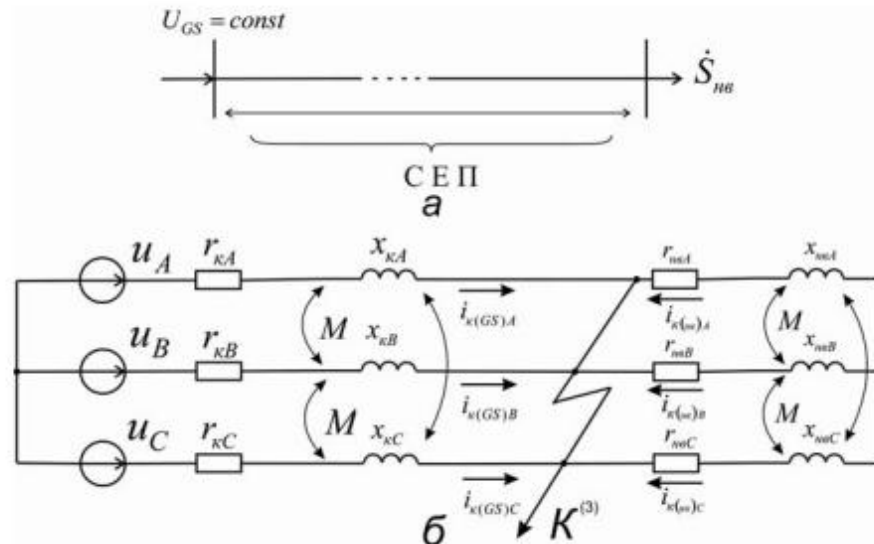


Рисунок 5.4 – Еквівалентне уявлення найпростішої електричної мережі:
 а – розрахункова схема; б – трифазна схема заміщення при трифазному
 КЗ

Струм в зашунтованій частині мережі перебігає доти, поки запас електромагнітної енергії перетвориться на тепло в опорах елементів. Для будь-якої фази можна записати рівняння, наприклад для фази А.

$$u_A = i_A r_{нвA} + L_{нвA} di_A / dt + M di_B / dt + M di_C / dt,$$

яке з урахуванням умов

$$u_A = 0;$$

$$i_A = -(i_B + i_C);$$

$$L_{нв} = L_{нвA} - M; r_{нвA} = r_{нвB} = r_{нвC} = r_{нв}$$

перетвориться на рівняння універсального виду для кожної фази

$$i_{к нв} r_{нв} + L_{нв} di_{к нв} / dt = 0$$

Розв'язок рівняння відносно струму [2, с. 93]

$$i_{к нв} = i_{ат0} \exp(-t / T_{а нв}),$$

який є вільним струмом і затухає за експонентним законом з постійною часу

$$T_{а нв} = x_{нв} / (\omega r_{нв})$$

Початкові значення вільного струму в фазах А, В, С зашунтованої ділянки мережі дорівнюють їх попереднім миттєвим значенням, оскільки з наявністю індуктивності в контурі раптової зміни струму не може статися. Незважаючи на те, що вільні струми в фазах затухають з однаковою постійною часу, їх початкове значення різне. Це визначається кутом зсуву між фазними струмами. Якщо, наприклад, у момент КЗ попередній струм в одній із фаз проходив через нуль, то вільний струм у такій фазі відсутній, а в інших двох вільні струми будуть однаковими, але протилежного спрямування.

На ділянці СЕП з системним джерелом живлення при КЗ (рис. 5.4.) виникає, окрім вільного струму, новий вимушений струм, обумовлений напругою джерела. У зв'язку зі зменшенням внаслідок КЗ результуючого опору мережі порівняно з опором попереднього режиму нові вимушені струми $I_{II \max A}$, $I_{II \max B}$, $I_{II \max C}$ більші струмів попереднього режиму та різняться один від одного зсувом за фазою. Рівняння напруг для будь-якої фази короткозамкненої ділянки мережі

$$u = i_{к GS} r_k + L_k di_{к GS} / dt,$$

де $L_k = L_{кА} - M$ – результуюча індуктивність фази (з урахуванням впливу двох інших фаз).

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
						68
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

Розв'язок рівняння має вигляд $i_{kGS t} = i_{II GS t} + i_{aGS t}$ чи розгорнено

$$i_{kGS t} = i_{II GS t} + i_{aGS t} = (U_{\max} / Z_{\kappa}) \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{\kappa}) + i_a \exp(-t / T_{aGS}),$$

де Z_{κ} – повний опір кола КЗ.

φ_{κ} – кут зсуву струму відносно напруги в цьому колі.

$T_{aGS} = x_{\kappa} / (\omega r_{\kappa})$ – постійна часу кола КЗ.

Перший член правої частини являє собою вимушену (періодичну) складову струму $I_{II GS t} \equiv I_{II}$ з постійною амплітудою $I_{II \max} = U_{\max} / Z_{\kappa}$, а другий член – вільну (аперіодичну) складову струму $i_{aGS t} = i_{at}$, затухаючу за експонентою з постійною часу $T_{aGS} = T_{a\kappa}$.

На рис. 5.5 подані залежності зміни у часі струму та його складових у фазах короткозамкненої ділянки мережі при трифазному КЗ.

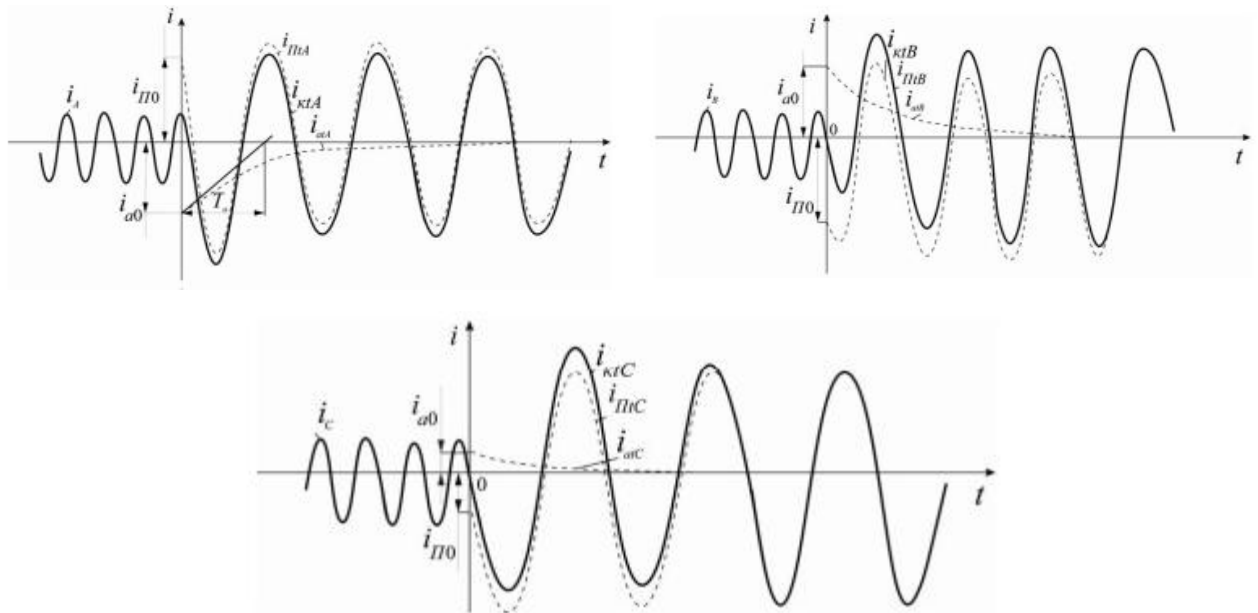


Рисунок 5.5 – Залежності зміни у часі повного струму та його складових у фазах А, В, С при трифазному КЗ у найпростішій електричній мережі

5.2.2 Основні положення

При складанні розрахункової схеми електропостачання підприємства для аварійного режиму роботи з коротким замиканням її еквівалентно подають відносно місця КЗ з двох частин за джерелами енергії [4]:

- генератори електричної системи;
- електроспоживачі із запасом енергії до моменту часу виникнення аварійного режиму.

Через різний характер електромагнітних процесів ці частини СЕП слід розглядати нарізно.

У складанні схем заміщення зазначених частин СЕП керуються таким:

- для моменту часу $t = 0$ активні елементи СЕП (генератори, двигуни) еквівалентуються джерелами е.р.с. $E_t = const$ з внутрішнім опором x_d'' або x_d' , а пасивні (трансформатори, ЛЕП, реактори) – лише електричними опорами;
- для часу $t > 0$ у еквівалентів активних елементів $E_t = var$ та $x_t = var$, а пасивних елементів $x_t = const$ (не враховуємо зміну значення частоти в аварійному режимі) і $r_t = var$ (через нагрівання провідників перебігом струму КЗ, що характерно в електричних мережах напругою до 1 кВ з переважним значенням активної складової опору).

Перетворення схем заміщення та обчислення параметрів аварійного режиму відбувається з урахуванням електромагнітної (розмагнічувальної) реакції джерел на виникнення КЗ. Міра впливу останньої оцінюється безпосередньо за електричною віддаленістю. Названі особливості впливають на вибір та використання способів визначення характеристик перехідного процесу і параметрів аварійного режиму.

Розрахунки з високою точністю значень характеристик та параметрів аварійного режиму в СЕП, що виникає внаслідок КЗ, для $t > 0$ вимагають великого обсягу обчислень. Вони значно ускладнюються, якщо врахувати автоматичне регулювання збудження генераторів, відмінності параметрів синхронних машин у поздовжній та поперечній осях, невизначеність поведінки двигунів приєднаних

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		70

навантажень. При проектуванні та експлуатації СЕП в основному використовують спрощені способи визначення показників перехідного процесу. У ряді випадків за допомогою найпростіших оцінок треба визначити лише рівень значень шуканих величин, достатніх для з'ясування умов роботи електроустаткування або обґрунтування практичного вирішення завдань його експлуатації.

Спрощення розрахунку (для простоти обчислень, очевидної порівнянності та контролю результатів розрахунку з фізичною картиною явища) базується на певних припущеннях. Останні беруться для конкретних умов відповідно до поставленого завдання та кінцевої мети розрахунку.

Основна відмінність між практичними способами розрахунку параметрів аварійного режиму, що виникає внаслідок КЗ, полягає у визначенні періодичної складової струму КЗ залежно від вимог та призначення розрахунків, узятих припущень. Наприклад, якщо значення струму у місці КЗ обчислюється для вибору електроустаткування, придатні одні припущення, а при розв'язанні завдань захисту елементів та налаштування засобів автоматизації СЕП – інші, що потребують розрахунків з порівняно меншими похибками.

5.3 Дослідження роботи спрямованого захисту

5.3.1 Опис віртуального стенда

На стенді (рис.5.6) наведена мережа з двостороннім живленням, до якої входять: симетричні трифазні джерела змінної напруги G1 та G2, лінії електропередач W1, W2, W3, W4, високовольтні вимикачі Q1, Q2, Q3, Q4, споживачі RL1, RL2, RL3. Джерело G1 навантаження RL1, вимикач Q1 входять до першої підстанції ПС1. Джерело G2 навантаження RL3, вимикач Q4 – ПС3. Вимикачі Q2 та Q3, навантаження RL2 – ПС2.

У місці підключення вимикача Q1 та ЛЕП W1 встановлено направлений струмовий захист А1, до якого входять трансформатори напруги (ТН) TV1, TV2, підключені на лінійну напругу фаз АВ та ВС відповідно, трансформатори струмів (ТС) ТА1, ТА2 у фазах А та С, реле струму КА1, КА2, реле напрямку

					<i>БР 3.6.141.313 ПЗ</i>	<i>арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ док.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		71

потужності KW1 та KW2, що ввімкнені за 90° -градусною схемою. Захист A2 встановлено у місці з'єднання вимикача Q2 та лінії W2, містить аналогічні елементи, що й захист A1. Відмінність даних захистів у тому, що вони підключені таки чином, що реагують, якщо потужність, що протікає в лінії збігається з напрямком дії захисту. Для підтвердження введених параметрів треба натиснути кнопку «ОК».

Для вводу необхідних параметрів елементів необхідно натиснути на відповідний елемент, після чого з'являється вікно (рис.5.7), що має вкладки «Елемент» та «Параметри». Перша вкладка призначена для перегляду елемента, а інша для задання необхідних даних.

За допомогою групи вимикачів можна в схемі промоделювати трифазне КЗ та двофазне КЗ у т. K1 та т.К2. Коротке замикання у т. K1 знаходиться між лінією W1 та W2, у т. K2 – W3 та W4.

Для запуску моделі необхідно натиснути кнопку «Пуск». Якщо усі вимикачі знаходяться в положенні «Off» в системі моделюється нормальний режим. При ввімкненні вимикача відбувається необхідне КЗ у потрібній точці. Після того як захист спрацював пошкоджена лінія відключається вимикачами. Потім з'являється вікно у якому можна переглянути графіки струмів у фазах де встановлено ТС та графіки станів елементів. Щоб зупинити моделювання необхідно натиснути кнопку «Стоп».

Розрахунок перехідних процесів у електричних мережах при двофазних та трифазних КЗ проводився згідно методів описаних в п. 4.2 та п. 5.2 відповідно.

					БР 3.6.141.313 ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		72

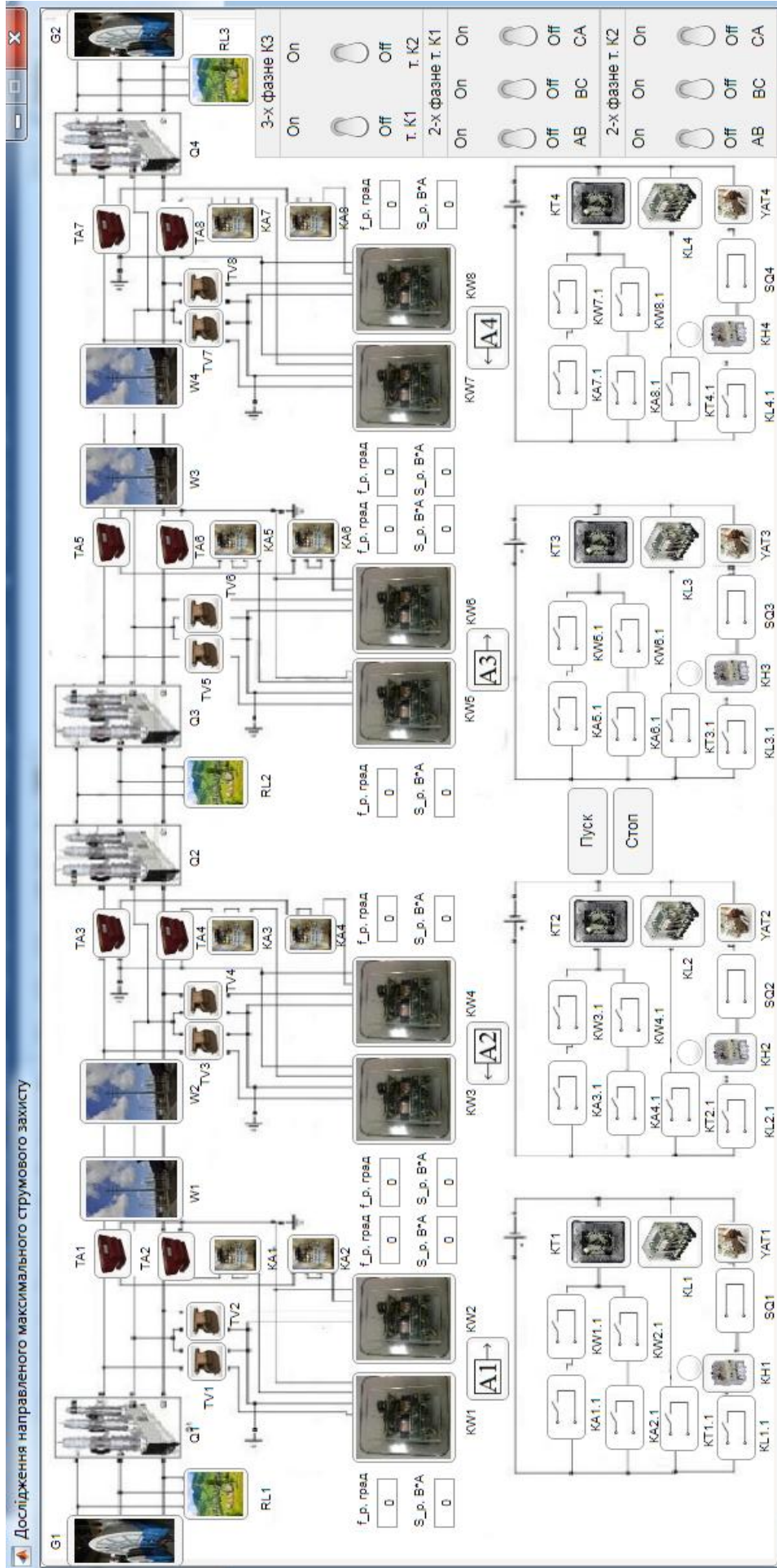


Рисунок 5.6 – Віртуальний стенд «Дослідження направлено максимального струмового захисту»

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

БР 3.6.141.313ПЗ

арк.

73

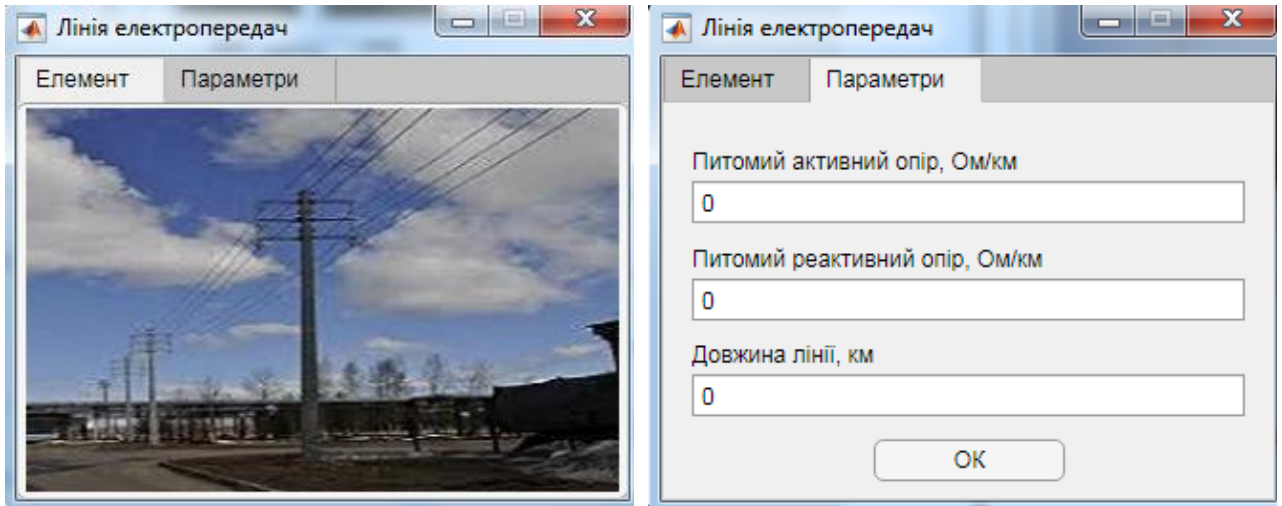


Рисунок 5.7 – Вікно для вводу параметрів ЛЕП

5.3.2 Виконання дослідів

1. Введемо вхідні параметри. Навантаження RL1: $P_{н1} = 820 \text{ кВт}$, $\cos \varphi = 0,86$, навантаження RL2: $P_{н2} = 530 \text{ кВт}$, $\cos \varphi = 0,83$, навантаження RL3: $P_{н3} = 738 \text{ кВт}$, $\cos \varphi = 0,89$.

2. Для віртуального стенда (рис. 5.6) складемо розрахункову схему рис. 5.8 та оберемо провід [6].

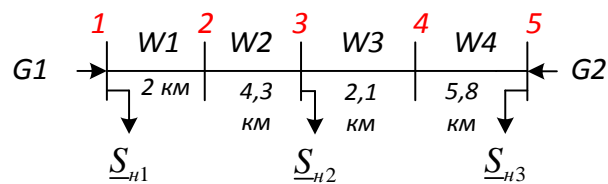


Рисунок 5.8 – Розрахункова схема

Визначаємо потужності на лініях замкнутої мережі. Вважаємо, що лінія однорідна.

$$\underline{S}_{12} = \frac{\underline{S}_{н1}l_{15} + \underline{S}_{н2}l_{35}}{l}$$

$$l_{15} = l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{45} = 2 + 4,3 + 2,1 + 5,8 = 14,2 \text{ км}$$

$$l_{35} = l_{34} + l_{45} = 7,9 \text{ км}$$

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		74

$$l = l_{12} + l_{23} + l_{34} + l_{45} = 14,2 \text{ км}$$

$$\underline{S}_{H1} = P_{H1} + \frac{P_{H1} \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} = 820 + j486,6 \text{ кВА}$$

$$\underline{S}_{H2} = 530 + j356,2 \text{ кВА}$$

$$\underline{S}_{H3} = 738 + j378,1 \text{ кВА}$$

$$\underline{S}_1 = \frac{\underline{S}_{H1} l_{15} + \underline{S}_{H2} l_{35}}{l} = 1115 + j684,7 \text{ кВА}$$

$$l_{51} = l_{54} + l_{43} + l_{32} + l_{21} = 14,2 \text{ км}$$

$$l_{31} = l_{43} + l_{32} + l_{21} = 6,3 \text{ км}$$

$$\underline{S}_2 = \frac{\underline{S}_{H3} l_{51} + \underline{S}_{H2} l_{31}}{l} = 973,1 + j536,1 \text{ кВА}$$

$$\underline{S}_{13} = \underline{S}_1 - \underline{S}_{H1} = 294,9 + j198,1 \text{ кВА}$$

$$\underline{S}_{53} = \underline{S}_2 - \underline{S}_{H3} = 235,1 + j158,0 \text{ кВА}$$

Нормальный режим:

$$I_{13} = \frac{S_{13}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 20,5 \text{ А}$$

$$I_{53} = \frac{S_{53}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 16,4 \text{ А},$$

де $U_H = 10 \text{ кВ}$

Післяаварійний режим:

$$I_{13}^a = \frac{S_{H3}}{\sqrt{3} \cdot U_H} = 47,87 \text{ А}$$

Обираємо провід АС – 35/6,2, у якого $r_0 = 0,79 \text{ Ом/км}$, $x_0 = 0,354 \text{ Ом/км}$

3. Виберемо трансформатор струму, уставку реле згідно п. 4.1.3 та трансформатор напруги. Сумарний максимальний струм матиме значення 67 А.

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
						75
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		

Найбільшим ближчим значення із стандартного ряду 75 А. Струм спрацювання максимального струмового захисту 159,8 А, струм спрацювання реле 10,7 А. Обираємо реле РТ–40/20, паралельне з'єднання котушок.

4. Параметри необхідні для роботи стенда вводимо для кожного елемента (рис. 5.9).

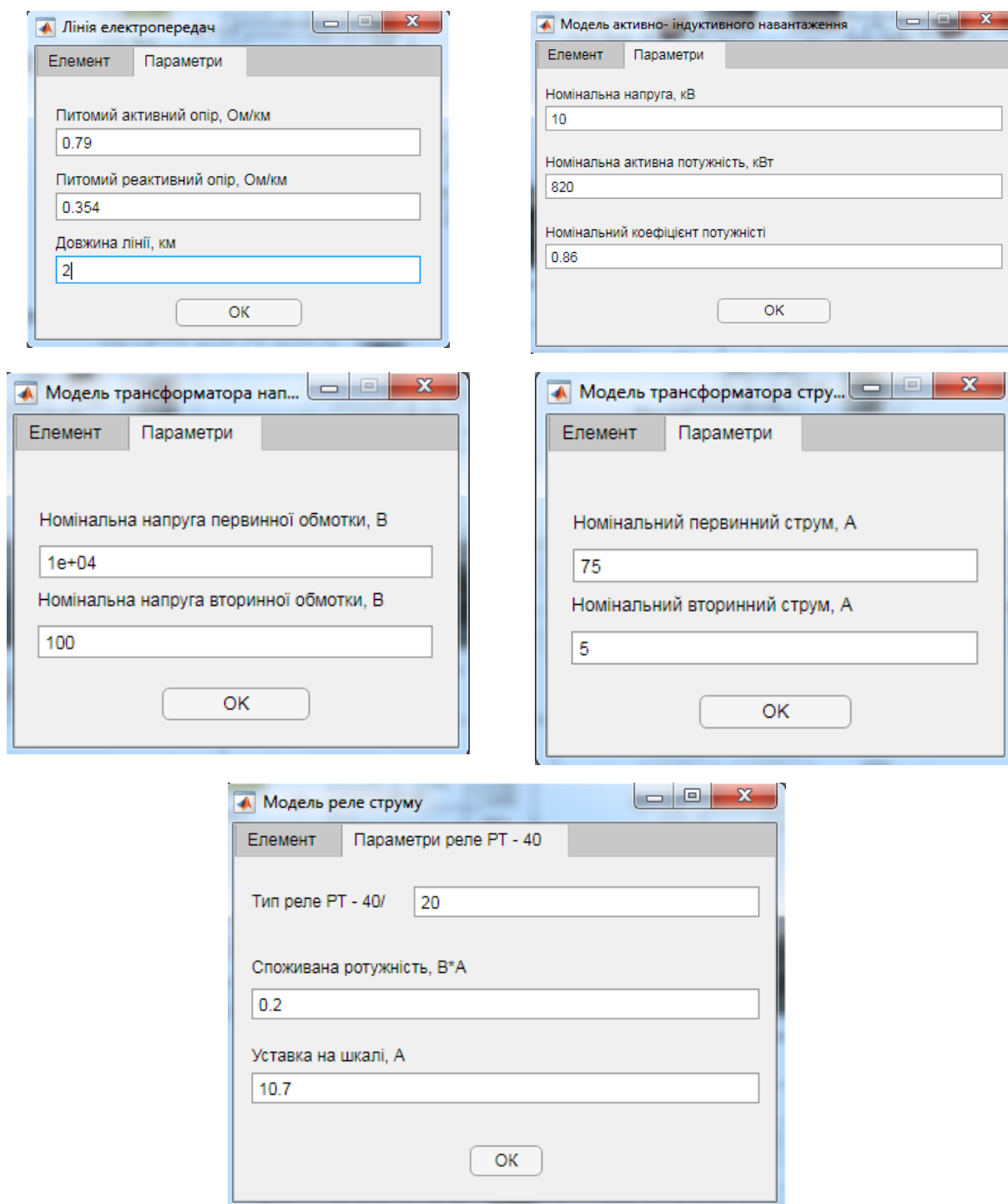


Рисунок 5.9 – Параметри окремих елементів

5. Натискаємо кнопку «Пуск». Спочатку схема знаходиться в нормальному режимі (рис. 5.10). На панелі «3-х фазне КЗ», вимикач «т. К1» перевести в положення «On» (рис. 5.11). Направлений МСЗ спрацювує вимикачі вимикають пошкоджену лінію. Індикатор-лампа червоного кольору свідчить про спрацювання направлено МСЗ (рис. 5.12). Після останнього режиму з'являється вікно, у якому можна дослідити графіки струмів (рис. 5.15) та стану елементів (рис. 5.13, 5.14).

6. Аналогічно до попереднього пункта проводимо дослід двофазного КЗ фаз С та А в т. К2 (рис. 5.16-5.20).

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		77

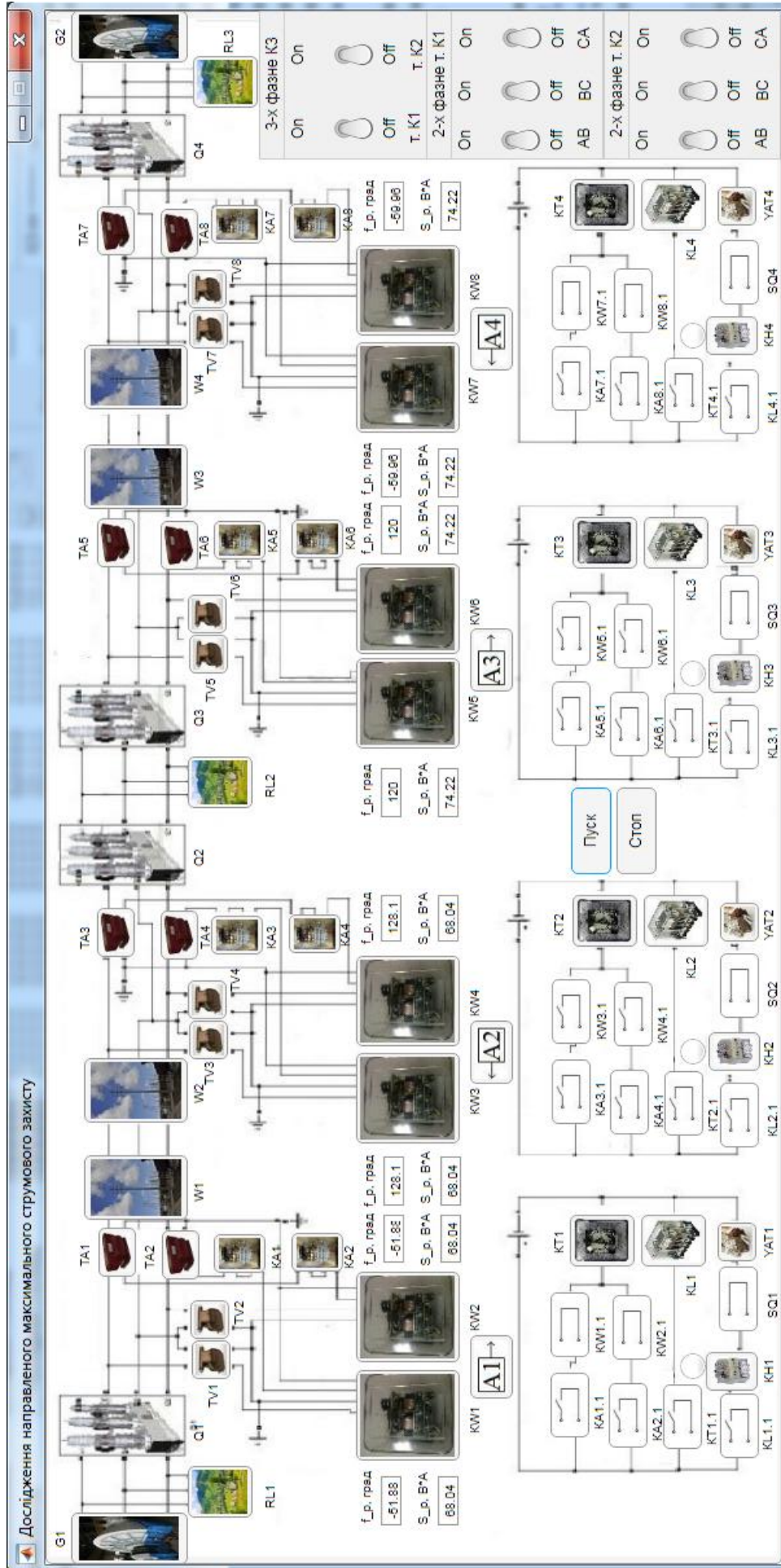


Рисунок 5.10 – Стан станда в нормальному режимі

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

БР 3.6.141.313ПЗ

арк.

78

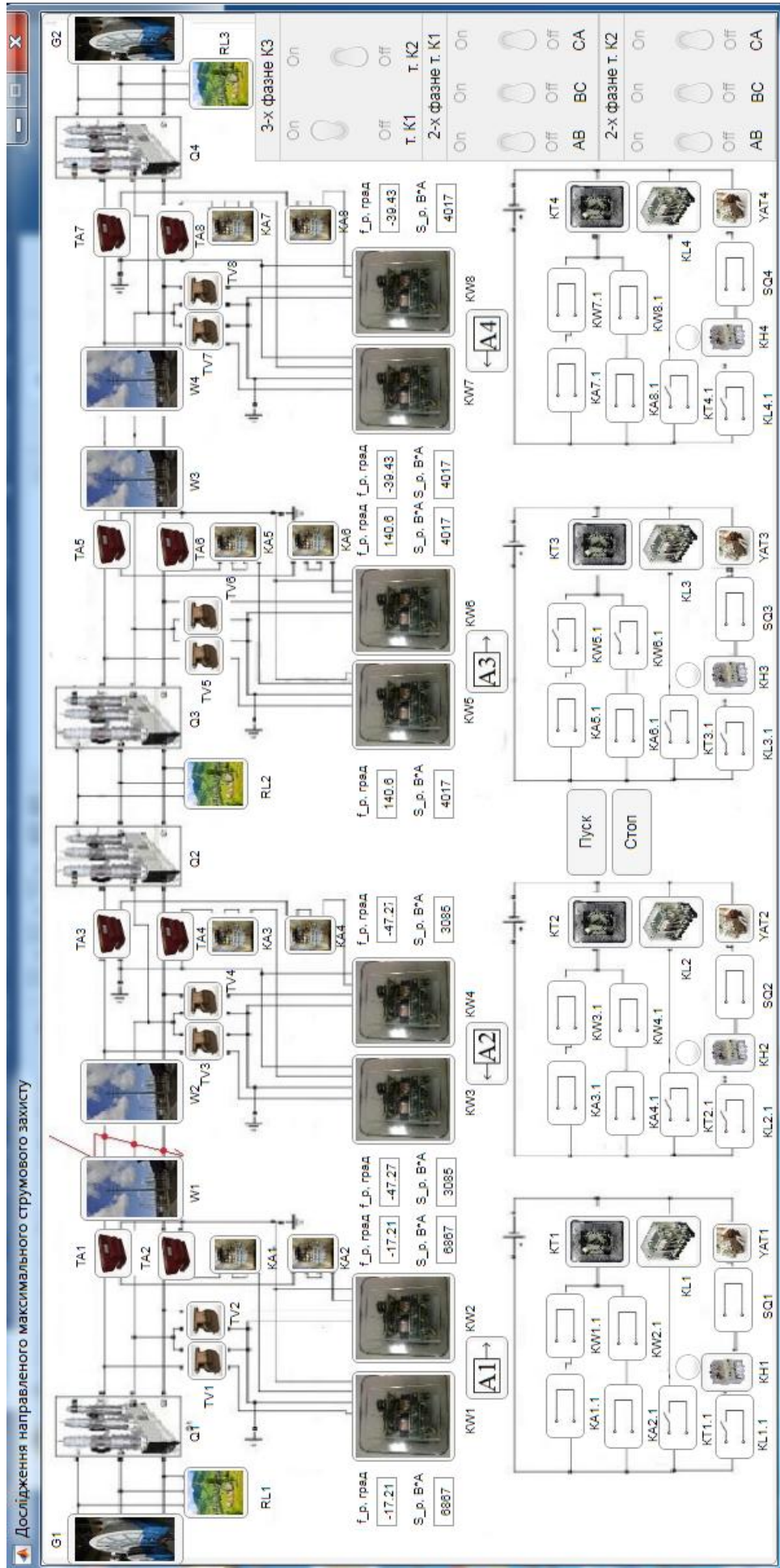


Рисунок 5.11 – Стан станда при трифазному К3 в т. К1

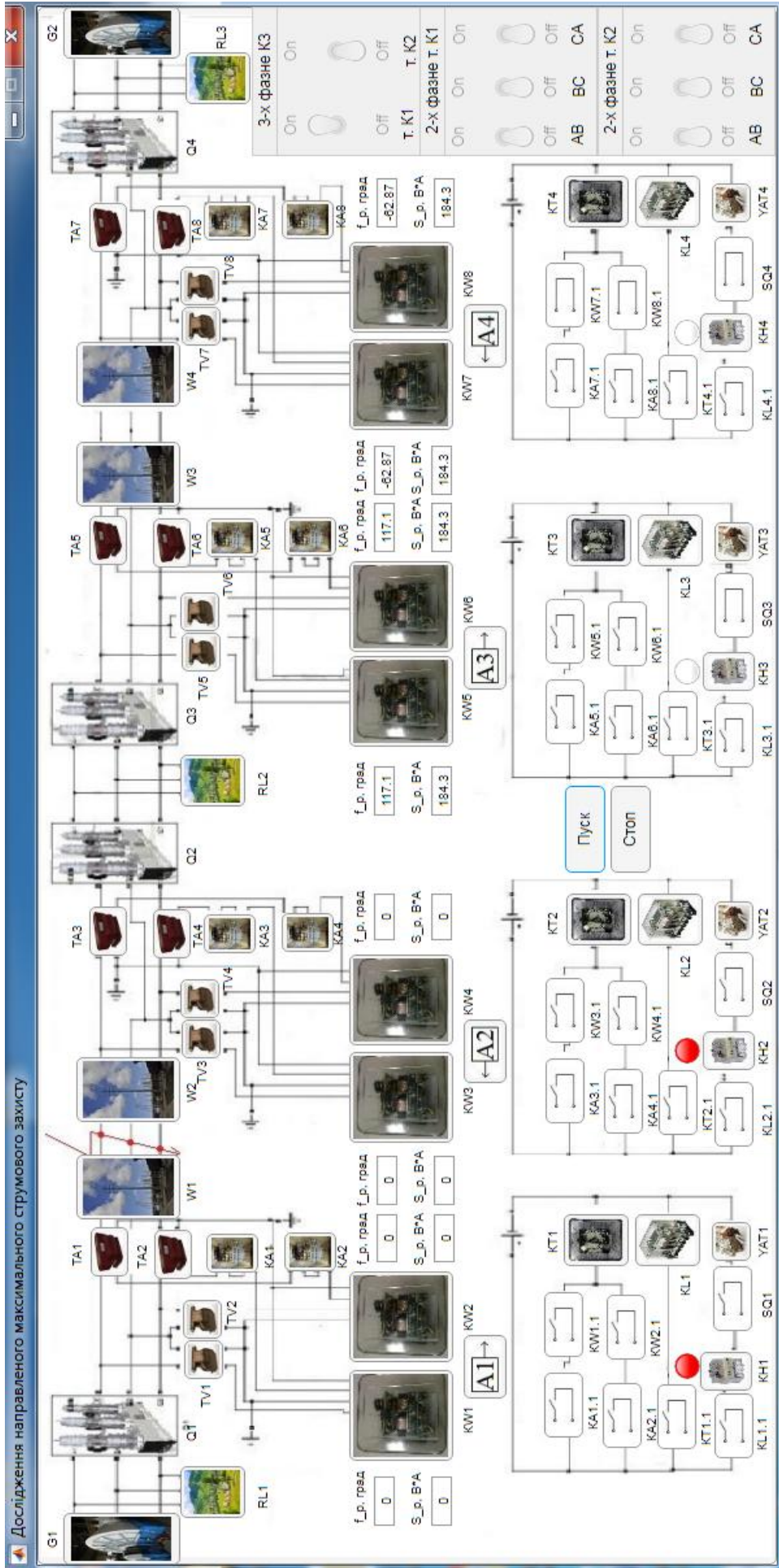


Рисунок 5.12 – Стан стенда після трифазного КЗ в т. К1

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

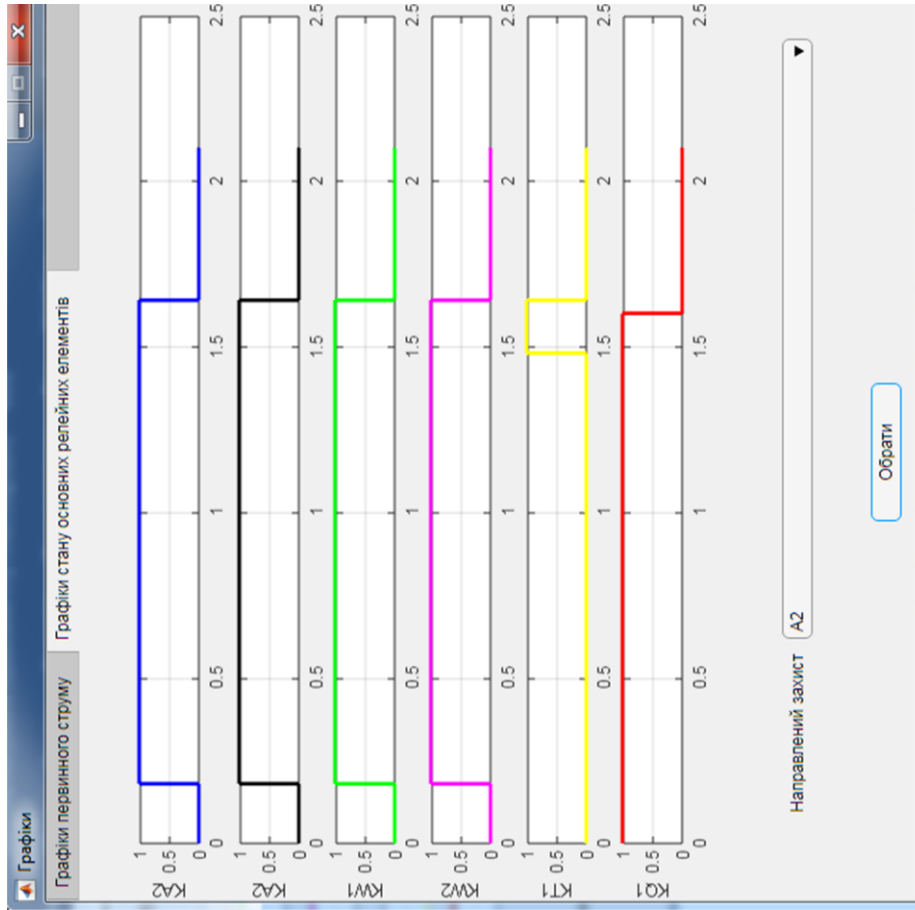
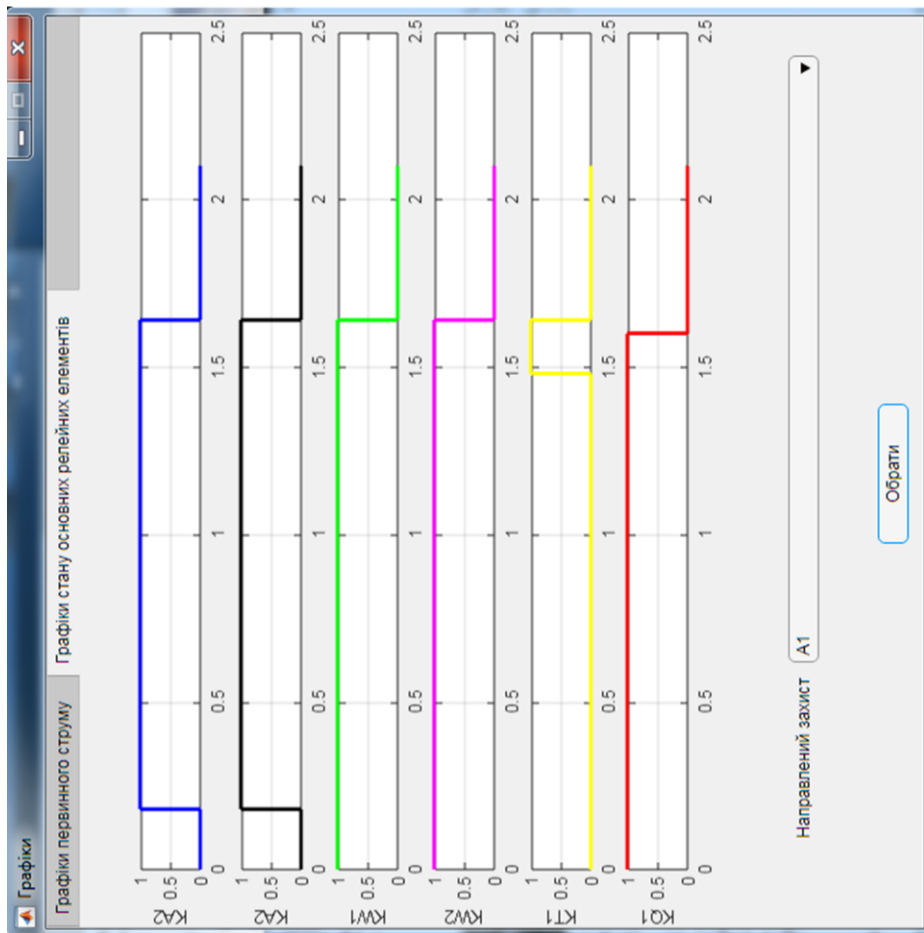


Рисунок 5.13 – Стан контактів релейних елементів при трифазному КЗ в т. К1

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

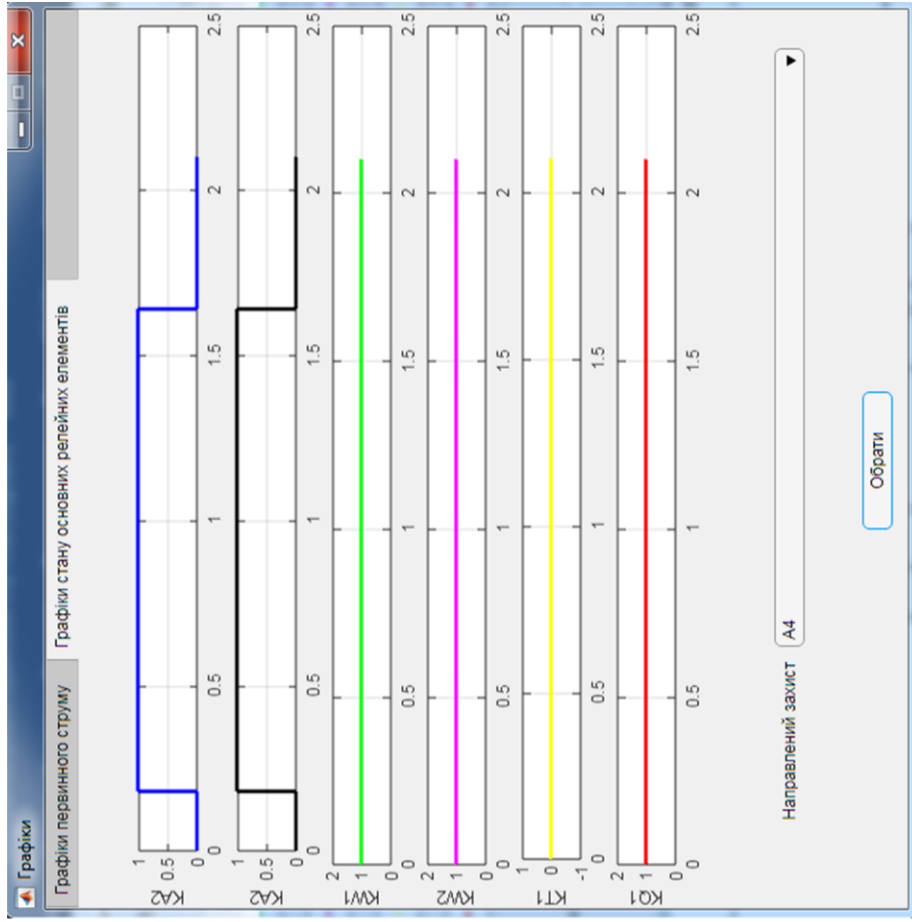
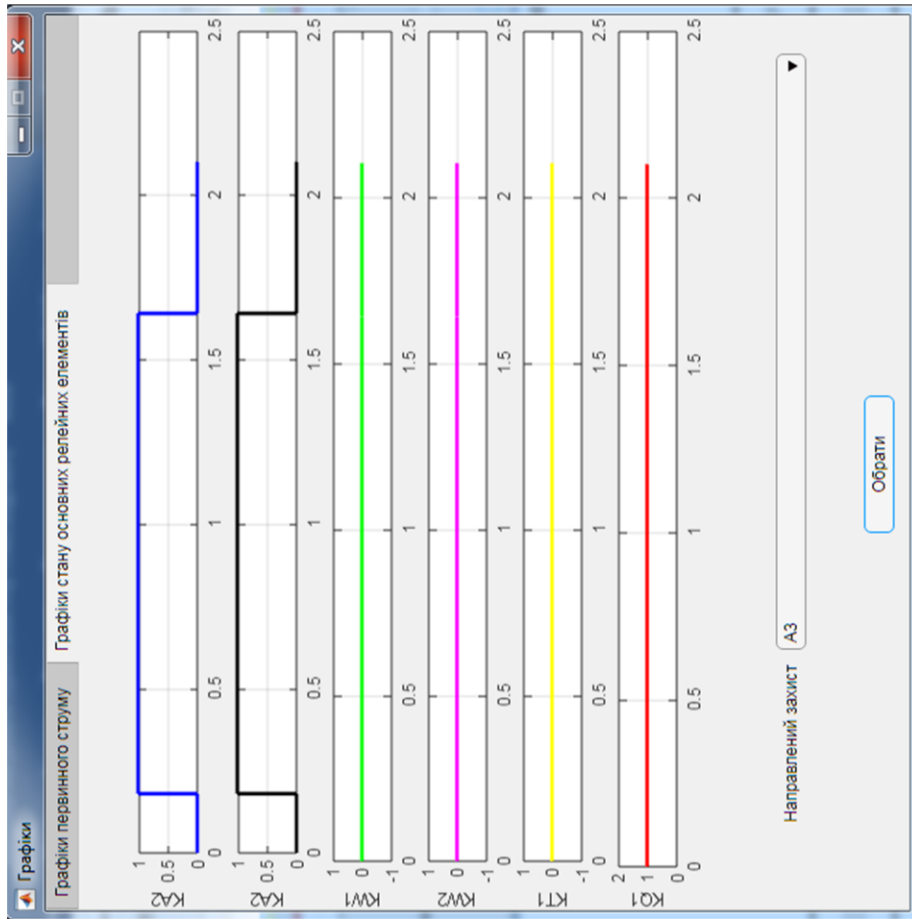


Рисунок 5.14 – Стан контактів релейних елементів при трифазному КЗ в т. К1

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

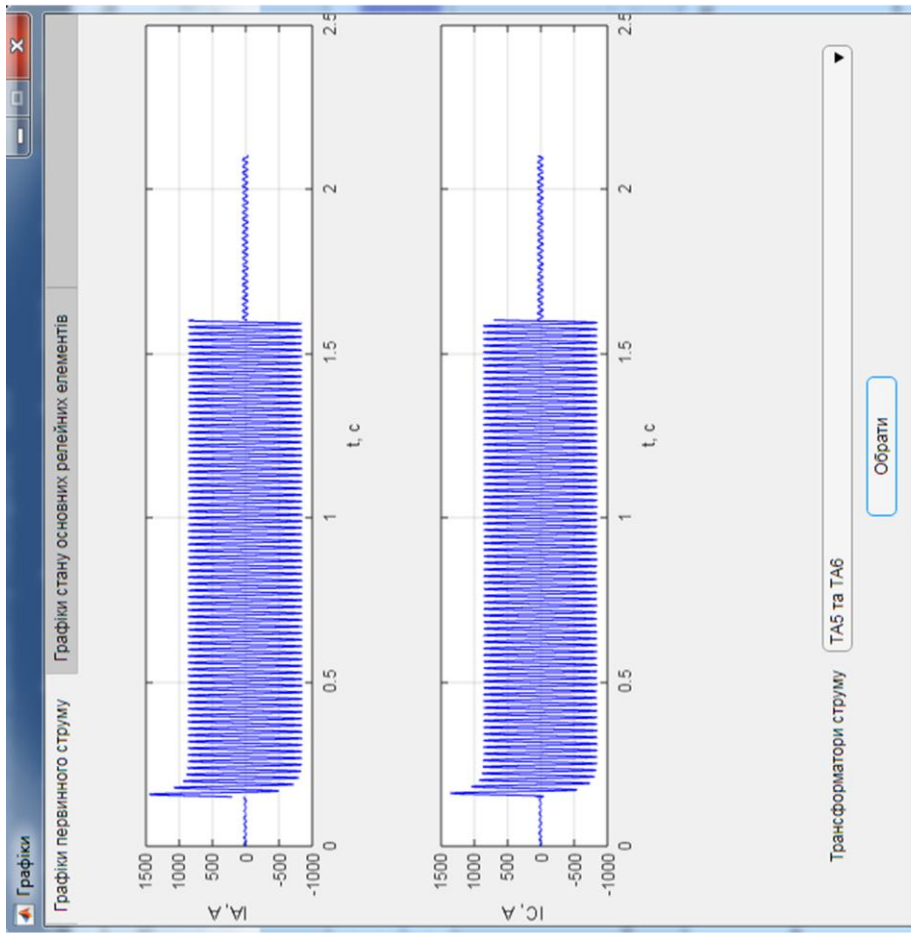
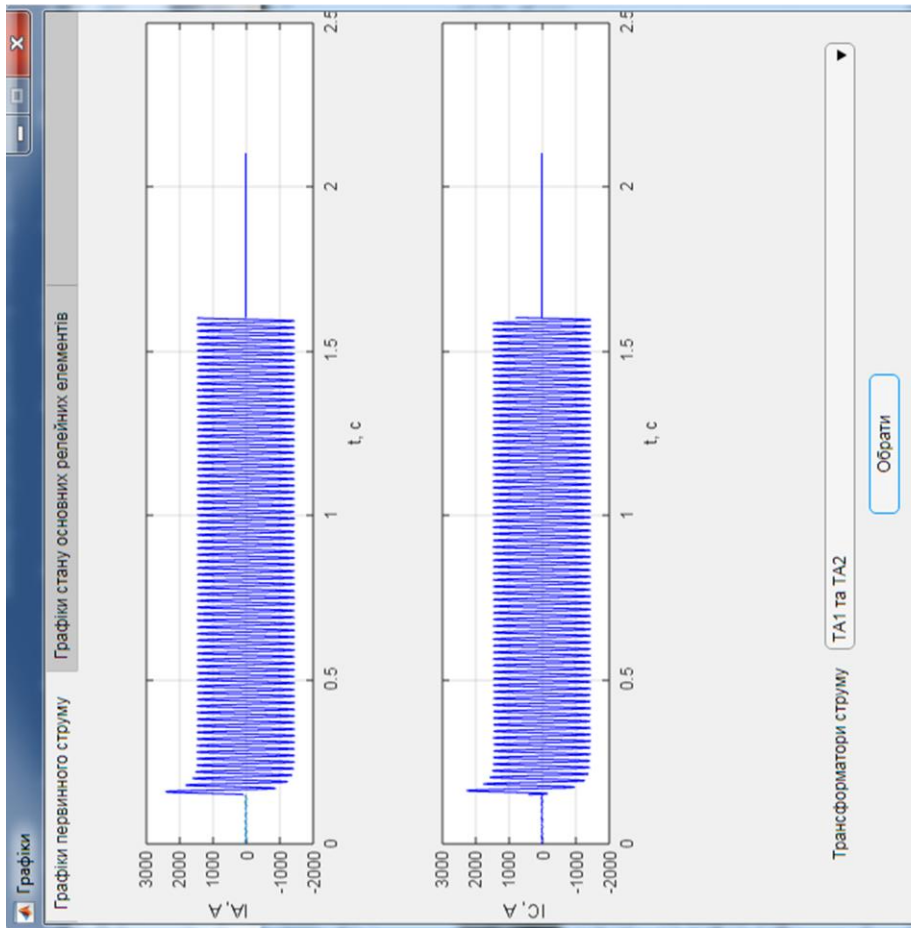


Рисунок 5.15 – Графіки струмів при трифазному КЗ в т. К1

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

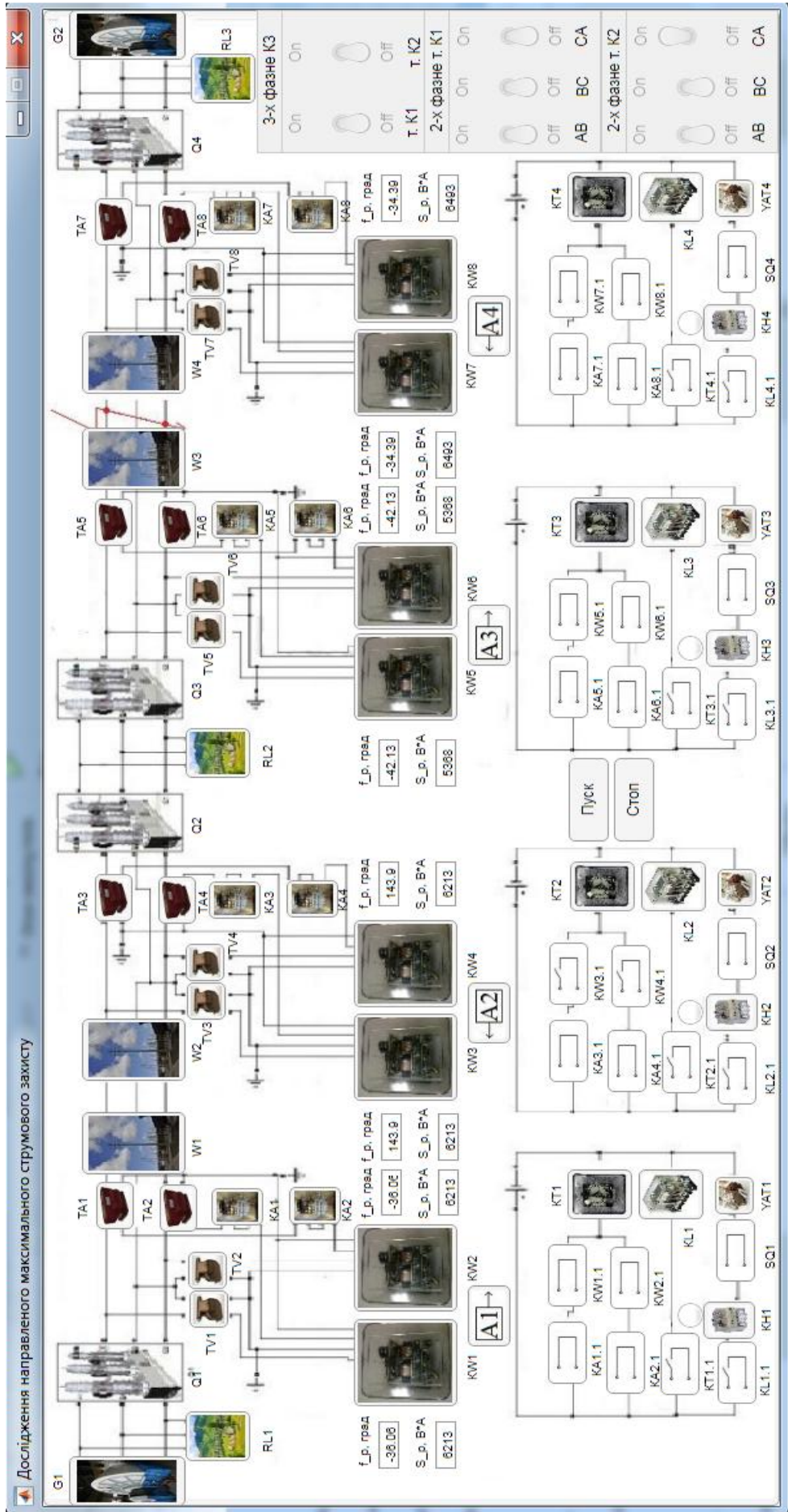


Рисунок 5.16 – Стенд при двофазном К3 фаз С та А в т. К2

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

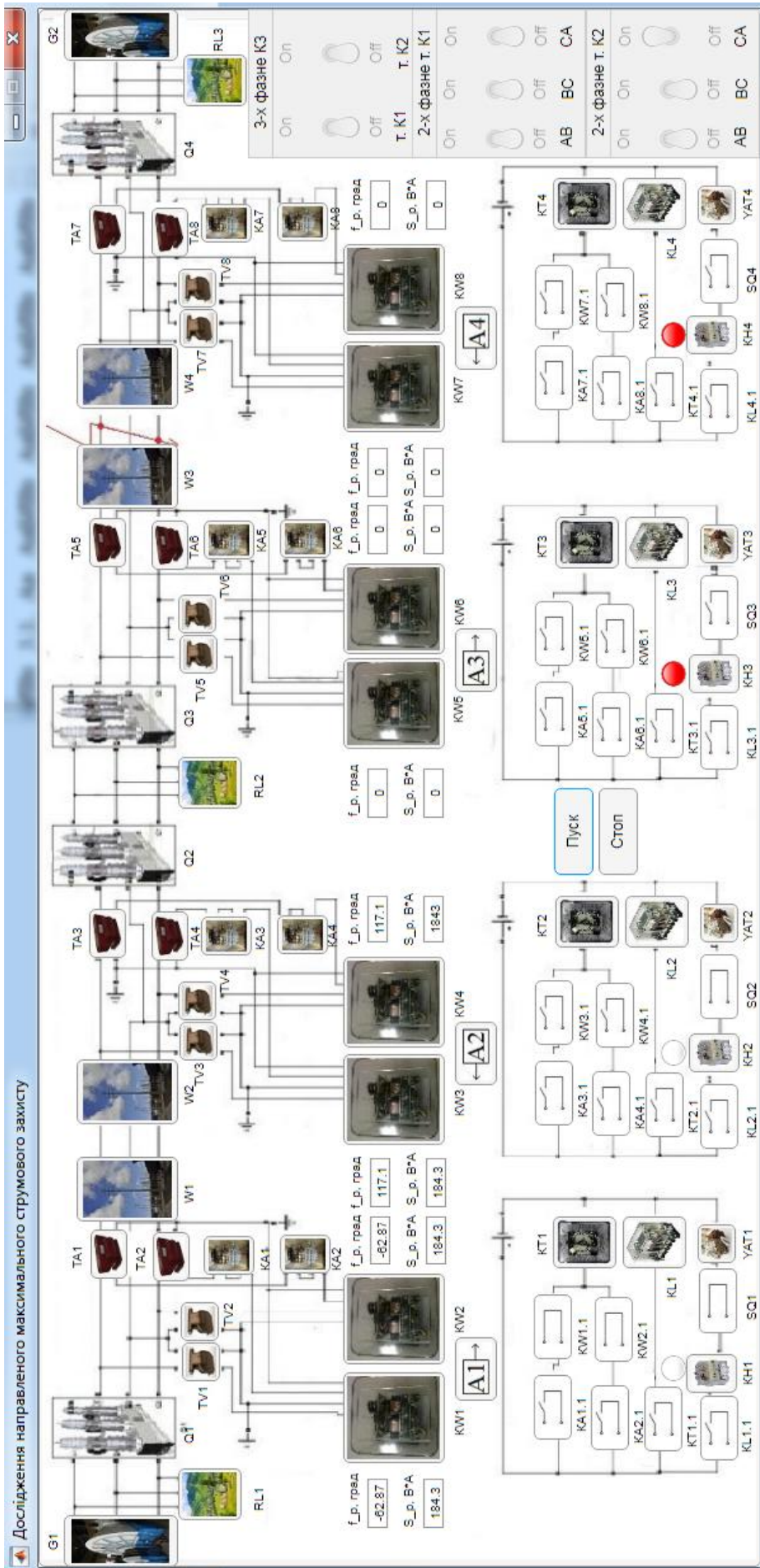


Рисунок 5.17 – Стенд після двофазного КЗ фаз С та А в т. К2

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

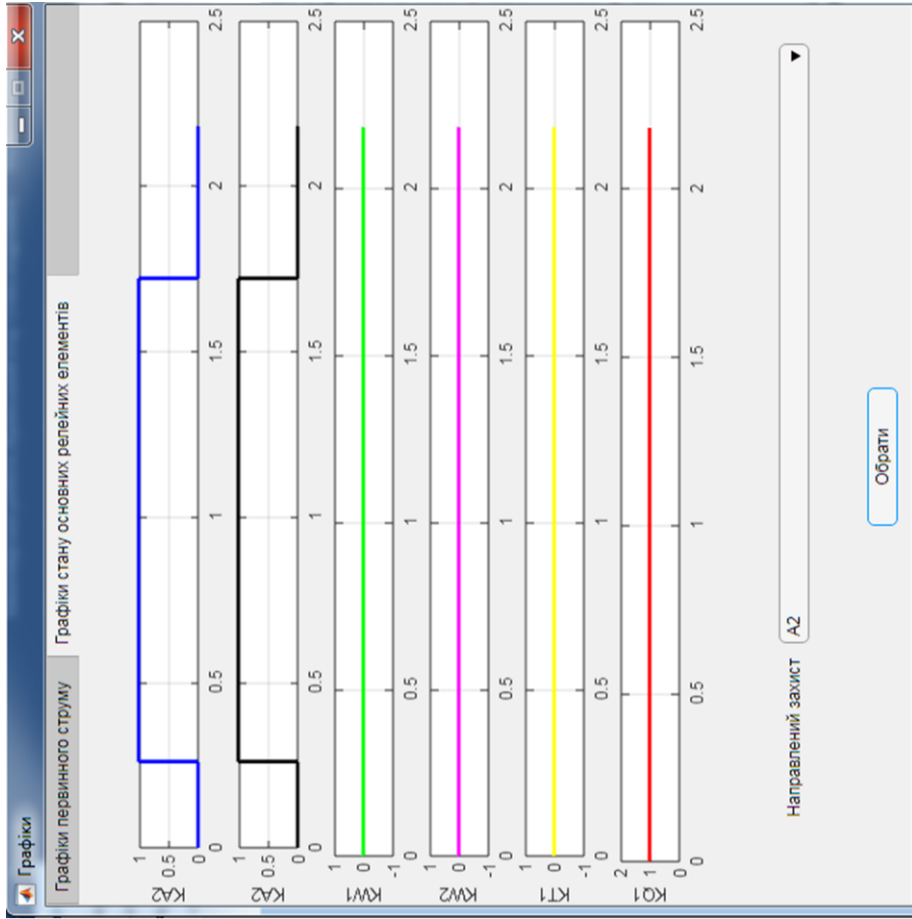
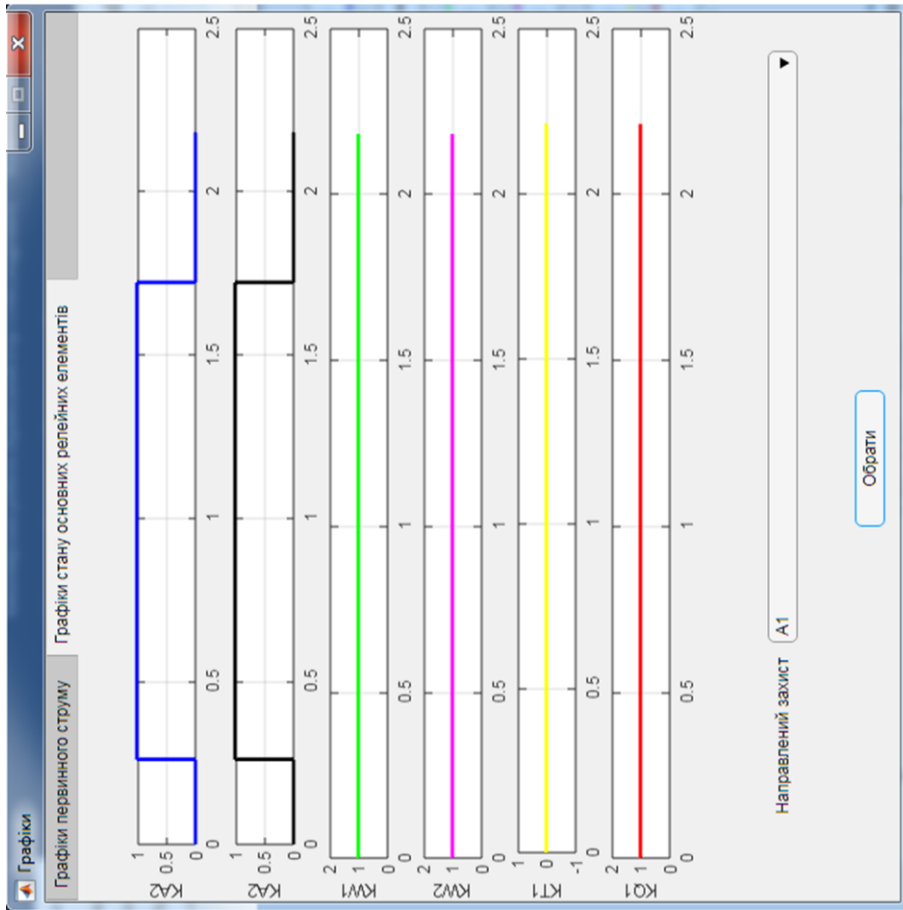


Рисунок 5.18 – Стан контактів релейних елементів при двофазном КЗ фаз С та А в т. К2

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

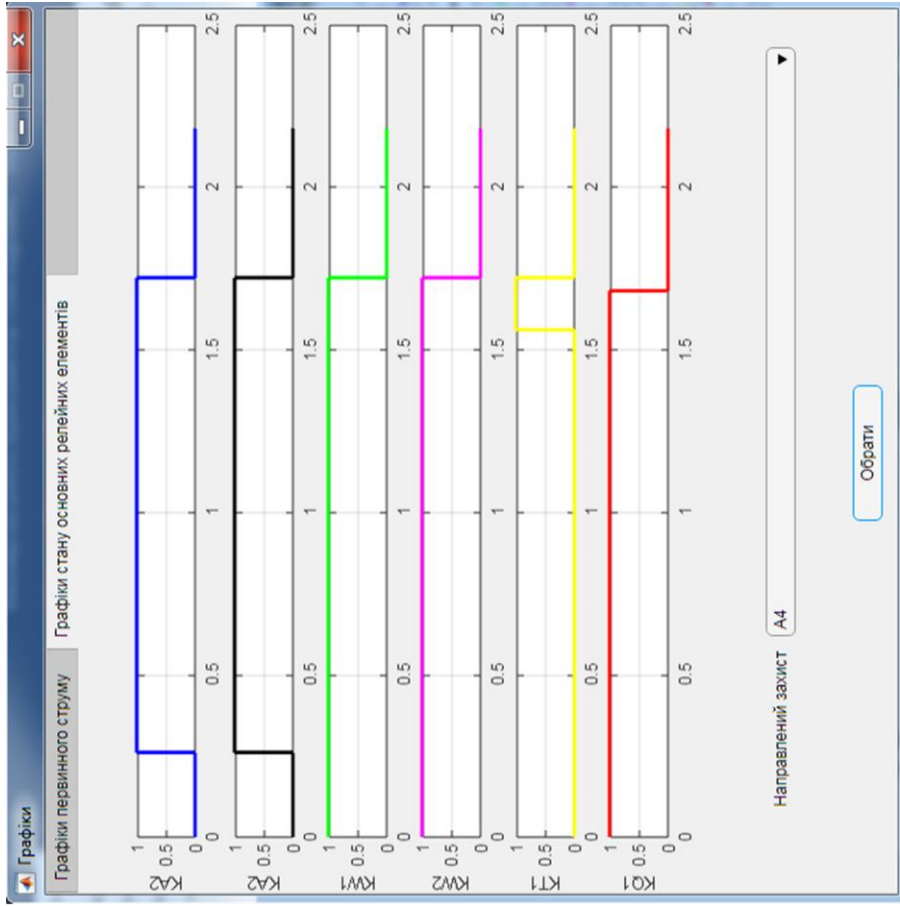
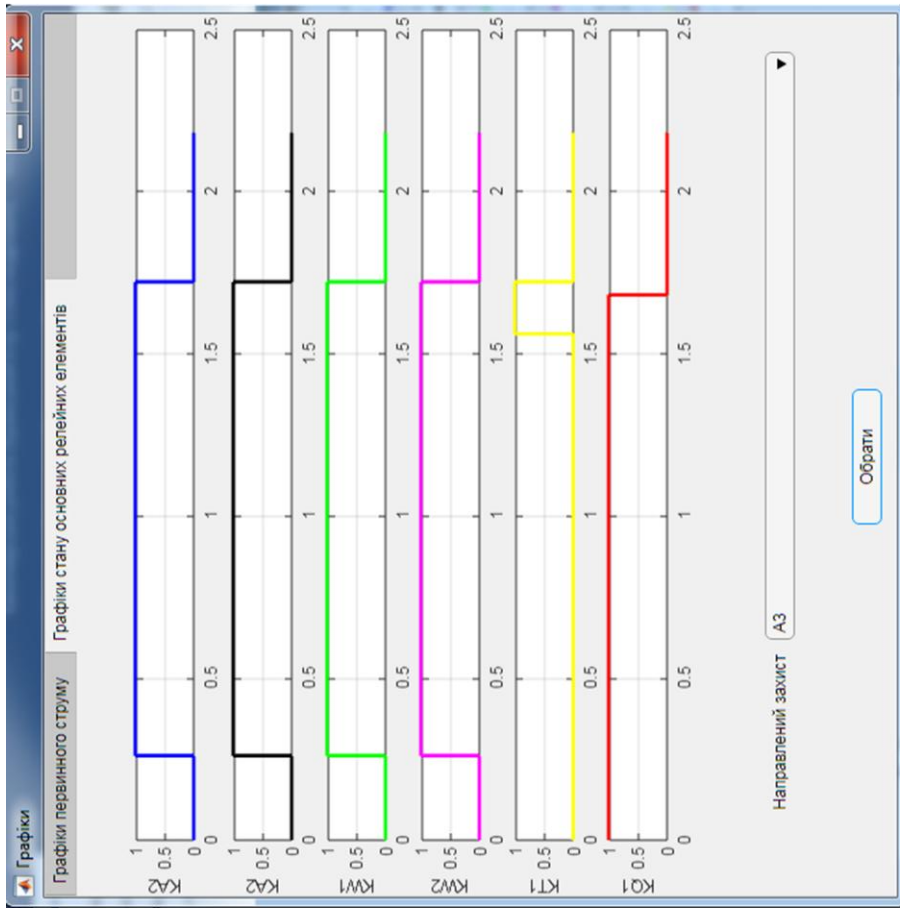


Рисунок 5.19 – Стан контактів релейних елементів при двофазном КЗ фаз С та А в т. К2

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата
-----	------	--------	--------	------

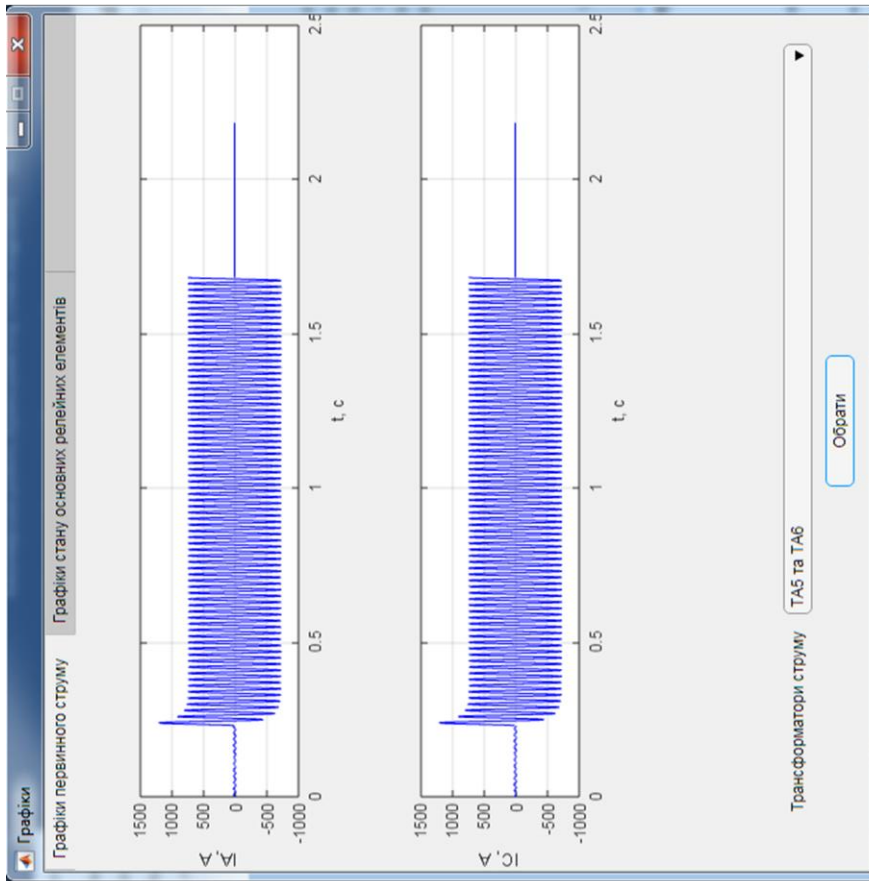
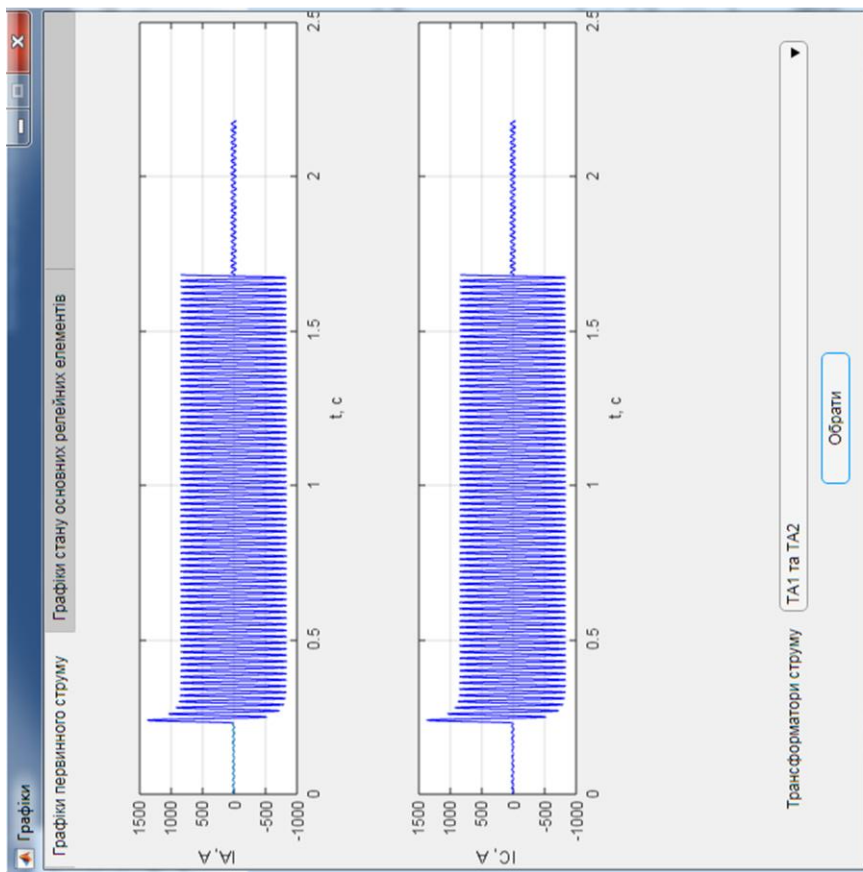


Рисунок 5.20 – Графіки струмів при двофазном КЗ фаз С та А в т. К2

Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата

6. ОХОРОНА ПРАЦІ. ЗАХИСТ ПОВІТРЯНИХ ТА КАБЕЛЬНИХ ЛІНІЙ У МЕРЕЖАХ НАПРУГОЮ 3-10 КВ З ІЗОЛЬОВАНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

Для ліній у мережах 3 – 10 кВ з ізолюованою нейтраллю (у тому числі й з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор) треба передбачати пристрої РЗА від багатофазних і однофазних замикань на землю [11].

Захист від багатофазних замикань треба передбачати в двофазному виконанні і вмикати в одні й ті самі фази по всій мережі даної напруги для забезпечення вимкнення в більшості випадків подвійних замикань на землю лише одного місця пошкодження.

Захист має бути виконано дво- або трирелейним залежно від вимог чутливості та надійності.

На одиночних лініях з одностороннім живленням від багатофазних замикань потрібно встановлювати, як правило, двоступінчастий струмовий захист, перший ступінь якого виконано у вигляді струмової відсічки, а другий – у вигляді максимального струмового захисту з незалежною або залежною характеристикою витримки часу.

На нереактованих кабельних лініях з одностороннім живленням, які відходять від шин електростанцій, струмові відсічки має бути виконано без витримки часу, а зону їх дії має бути визначено за умови вимкнення КЗ, які супроводжуються залишковою напругою на шинах зазначених електростанцій, нижчою ніж 0,5 – 0,6 від номінальної. Для виконання зазначеної умови допускається виконувати захист неселективним у поєднанні з пристроями АПВ або АВР, які повністю або частково виправляють неселективну дію захисту [11]. Відповідно до зазначених вимог відсічки рекомендовано встановлювати також на лініях, що відходять від шин підстанцій, які живлять синхронні електродвигуни значної потужності.

На одиночних лініях з двостороннім живленням за наявності або відсутності обхідних зв'язків, а також на лініях, які входять до кільцевої мережі з однією точкою живлення, рекомендовано застосовувати такі самі захисти, що й на

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		89

одиначних лініях з одностороннім живленням, виконуючи їх за необхідності на-
правленими.

З метою спрощення захистів і забезпечення їх селективної дії допускається
застосовувати автоматичний поділ мережі на радіальні ділянки в момент виник-
нення пошкодження з подальшим автоматичним її відновленням.

Якщо ненаправлений або направлений струмовий ступінчастий захист не
забезпечує необхідної швидкодії та селективності, допускається передбачати
такі захисти [11]:

- 1) дистанційний захист у найпростішому виконанні;
- 2) поперечний диференціальний струмовий захист (для здвоєних кабель-
них ліній);
- 3) поздовжній диференціальний струмовий захист для коротких ділянок лі-
ній (у разі необхідності прокладання спеціального кабелю лише для поздовж-
нього диференціального захисту, довжина якого має бути не більше ніж 3 км).

Для направлених і дистанційних захистів відповідно треба передбачати
функцію контролю несправності кіл напруги. Зазначена функція в захистах ліній
3 – 10 кВ має забезпечувати в необхідних випадках блокування відповідних сту-
пенів захисту або їх переведення в ненаправлені струмові захисти з окремими
установками. У разі блокування треба передбачати ступені резервних струмових
захистів, які продовжують працювати в разі блокування основних. Функцію ко-
нтролю несправності кіл напруги має бути реалізовано найпростішими засобами,
доступними за наявної схеми з'єднань кіл трансформаторів напруги.

Захист від однофазних замикань на землю треба виконувати у вигляді [11]:

- селективного захисту (що встановлює пошкоджений напрямок),
який діє на сигнал;
- селективного захисту (що встановлює пошкоджений напрямок),
який діє на вимкнення, коли це необхідно за вимогами безпеки (такий захист має
бути встановленим на живильних елементах у всій електрично зв'язаній мережі);

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		90

– селективного захисту з дією на вимкнення (не за вимогами безпеки) і можливістю відновлення нормального режиму за допомогою АПВ коли така дія є обґрунтованою;

– пристрою контролю ізоляції; при цьому відшукування пошкодженого елемента треба виконувати спеціальними пристроями; як виняток допускається відшукувати пошкоджений елемент почерговим вимкненням приєднань.

Захист від однофазних замикань на землю має бути виконаним, як правило, з використанням трансформаторів струму нульової послідовності. В разі відсутності трансформаторів струму нульової послідовності можливість використання фільтру струмів нульової послідовності іншого виду повинно бути підтверджено розрахунком рівня небалансу струмів для цього фільтру. Захист у першу чергу має реагувати на сталі замикання на землю; допускається також застосовувати пристрої, які реєструють короточасні замикання без забезпечення повторності дії.

Захист від однофазних замикань на землю, який діє на вимкнення без витримки часу за вимогами безпеки або діє на вимкнення в разі обґрунтування доцільності такої дії (див. 1.2.111 ПУЕ), має вимикати лише елемент, що живить пошкоджену ділянку. При цьому як резервний по відношенню до захисту, що діє на вимкнення за вимоги безпеки, має бути передбачено захист, який виконують у вигляді захисту нульової послідовності з витримкою часу близько 0,5 с, і який діє на вимкнення всієї електрично зв'язаної мережі – системи (секції) шин або живильного трансформатора. Селективний захист від однофазних замикань на землю без витримки часу, якщо його виконують без пуску по напрузі нульової послідовності, повинен бути відстроєним від кидка зарядного струму лінії в разі її включення [11].

Збільшення струму промислової частоти спеціально для забезпечення дії захисту в мережі з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор за допомогою розладу реактора, як правило, передбачати не допускається.

Для селективного захисту від однофазних замикань на землю в мережах з ізолюваною, заземленою через активний опір нейтраллю або в мережах з

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		91

комбінованим заземленням нейтралі (через дугогасний реактор і активний опір) переважно слід передбачати [11]:

– при співвідношенні струму замикання на землю і часткових емнісних струмів у непошкоджених приєднаннях більше двох-трьох – прості струмові захисти нульової послідовності, відстроєні від рівнів часткових струмів непошкоджених приєднань;

– в іншому випадку – направлений захист нульової послідовності.

Для селективного захисту від однофазних замикань на землю в мережах з нейтраллю, заземленою через дугогасний реактор, слід передбачати захист, що реагує на рівень вищих гармонійних складових струму нульової послідовності як такий, дія якого не залежить від зміни режиму компенсації.

У всіх видах захисту від однофазних замикань на землю для підвищення надійності визначення режиму замикання, коли це можливо, слід використовувати пуск по напрузі нульової послідовності незалежно від наявності інших пускових органів.

У всіх випадках, коли використовується заземлення нейтралі через активний опір, незалежно від дії при однофазних замиканнях на землю основних захистів приєднань на сигнал або відключення, заземлюючий опір має бути обладнано захистом, що діє на його відключення в разі однофазних замиканнях на землю з витримкою часу, відстроєною від максимальної витримки часу захистів приєднань. Термічну стійкість заземлюючого опору потрібно розраховувати на час дії його захисту [11].

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		92

ВИСНОВОК

Метою роботи було створити програми, які б моделювали роботу релейних пристроїв при різних режимах роботи електричної мережі. При дослідженні МСЗ та спрямованого МССЗ використовувались, двофазні та трифазні КЗ. Розрахунок перехідних режимів здійснювався за допомогою методу симетричних складових та шляхом еквівалентного перетворення схеми. Характеристики реле, що використовувались у віртуальних стендах є наближеними до реальних характеристик, що вказані в технічній документації цих приладів. У результаті проведеної роботи створено чотири комп'ютерних програми: «Дослідження електромагнітного реле струму РТ-40», «Дослідження характеристик реле напрямку потужності», «Дослідження максимального струмового захисту лінії електропередач», «Дослідження направлено максимального струмового захисту».

Перша модель розроблена для дослідження характеристик реле РТ-40. Результати тестування програми: (коефіцієнта повернення, часу спрацювання) показують, що характеристики реле РТ-40 відповідають зазначеним в технічній документації.

За допомогою другої моделі досліджено характеристики чутливості реле РБМ-171 та його куту характеристику. Порівнюючи отримані графіки з реальними графіками робимо висновок, що вони співпадають, а отже модель створена правильно та дає можливість застосовувати її в інших стендах.

Модель РТ-40 перевірена дослідом була застосована при створенні віртуального стенда з дослідження максимального струмового захисту (МСЗ). Створено математичні моделі, які б описувала роботу МСЗ та перехідні процеси при двофазному КЗ. Останні створено на основі методу симетричних складових. Як висновок, моделі створені, графіки струмів та графіки станів елементів отримані. Аналіз графіків струмів дозволяє досліджувати перехідні процеси, що виникають в мережі.

Стенд з дослідження спрямованого МСЗ розроблений для того, щоб дослідити роботу спрямованого максимального захисту. Складається із моделей

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		93

розроблених раніше, а також моделей трифазного короткого замикання та спрямованого МСЗ. Перехідні процеси було побудовано на основі методів симетричних складових та еквівалентних перетворень схеми. Дана модель дозволяє отримувати графіки струмів фаз А та С в точках, де встановлено трансформатори струму. Також наглядно виводяться графіки станів кожного реле, що входить до складу спрямованого МСЗ, для отримання інформації про стан елемента захисту у різні моменти часу.

					<i>БР 3.6.141.313ПЗ</i>	<i>арк.</i>
<i>Зм.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ док.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		94

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дьяконов В. П. MATLAB. Полный самоучитель. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
2. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Навчальний посібник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 500 с.
3. Костров М.Ф., Соловьев И.И., Федосеев А.М. Основы техники релейной защиты, Госэнергоиздат, 1944.
4. Перехідні процеси в системах електропостачання: підручник для ВНЗ / Г.Г. Півняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, Л.І. Несен, за ред. Г.Г. Півняка ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – 5-те вид., доопрац. та допов. – Дніпро: НГУ, 2016. – 600 с.
5. Соколов Б.В. Методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Релейная защита и автоматика СЭС» для студентов направления 551700 «Электроэнергетика».
6. Идельчик В. И. Электрические системы и сети. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
7. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з навчальної дисципліни «Основи релейного захисту та автоматизації електричних систем» для студентів за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форми навчання/Василець С. В, – Рівне: НУВГП, 2017. – 40с.
8. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем»/укладачі: М.В. Петровський, С.С. Жемаєв Суми: Сумський державний університет, 2019. – 71с.
9. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів спеціальності 141–Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/Освітня програма «Електротехнічні системи електроспоживання»/ укладачі: І.Л. Лебединський, І.І. Борзенков –Суми: СумДУ, 2019. – 40 с.

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		95

10. Методичні вказівки до оформлення дипломних робіт / Укладачі: М.А. Никифоров, І.Л. Лебединський. – Суми: Вид-во СумДУ, 2008. – 74 с.

11. Правила улаштування електроустановок. – Видання офіційне. Мінерговугілля України. – Х.: Видавництво «Форт», 2017. – 760 с.

					БР 3.6.141.313ПЗ	арк.
Зм.	Арк.	№ док.	Підпис	Дата		96