

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики
Кафедра автоматизації енергосистем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

_____ Анатолій Марченко

«10» червня 2025 р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Управління, захист та
автоматизація енергосистем»**

**спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

на тему: «Розрахункова модель підстанції 110/35/10 кВ»

Виконав:

студент IV курсу, групи ЕК-311

Новик Валентина Олександрівна

Керівник:

Доцент, кандидат тех. наук

Хоменко Олег Володимирович

Рецензент:

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

Студент _____

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації енергосистем

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Управління, захист та автоматизація енергосистем»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Анатолій Марченко

«10» червня 2025 р

ЗАВДАННЯ

на дипломний проект студенту

Новик Валентині Олександрівні

1. Тема проекту «Розрахункова модель підстанції 110/35/10 кВ», керівник проекту доцент, канд. тех. наук. Хоменко Олег Володимирович, затверджені наказом по університету від «26» травня 2025 р. № 1751-с.
2. Термін подання студентом проекту «10» червня 2025 р.
3. Вихідні дані до проекту: підстанція 110/35/10 кВ
4. Зміст пояснювальної записки
 1. Характеристика об'єкту – підстанція 110/35/10 кВ
 2. Розробка моделі підстанції
 3. Моделювання роботи підстанції в нормальних і аварійних режимах
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо)
 1. Підстанція 110/35/10 кВ.
 2. Моделювання нормального режиму роботи підстанції 110/35/10 кВ
 3. Моделювання аварійних режимів роботи підстанції 110/35/10 кВ
6. Дата видачі завдання «26» травня 2025 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1.	Характеристика об'єкту – підстанція 110/35/10 кВ	27.05.25-28.05.25	
2.	Розробка моделі підстанції	29.05.25-31.05.25	
3.	Моделювання роботи підстанції в нормальних і аварійних режимах	01.06.25-03.06.25	
4.	Підготовка плакатів	04.06.25-09.06.25	

Студент

Валентина НОВИК

Керівник

Олег ХОМЕНКО

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЕКТУ

№ п/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проект	1	
2	A4	<i>141.EKз1105.005.ДБ</i>	Пояснювальна записка	89	
3	A1	<i>141.EKз1105.005.ТК1</i>	П/с 110/35/10 кВ	1	
4	A1	<i>141.EKз1105.005.ТК2</i>	Моделювання нормального режиму роботи підстанції 110/35/10 кВ	1	
5	A1	<i>141.EKз1105.005.ТК3</i>	Моделювання аварійних режимів роботи підстанції 110/35/10 кВ	1	

Пояснювальна записка
до дипломного проекту
на тему: «Розрахункова модель підстанції 110/35/10 кВ»

Київ -2025 року

РЕФЕРАТ

Дипломний проект «Розрахункова модель підстанції 110/35/10 кВ» виконаний на 89 аркушах та містить 37 рисунків, 18 таблиць, 3 листи графічної частини та 10 літературних посилань.

Об'єктом дослідження є підстанція 110/35/10 кВ.

Предметом дослідження є моделювання підстанції 110/35/10 кВ

Даний дипломний проект спрямований на дослідження процесу моделювання підстанції 110/35/10 кВ.

Згідно з отриманими результатами, було виконано комплексне моделювання електричної підстанції, що включало розрахунки параметрів для різних експлуатаційних режимів, зокрема нормального, аварійного та післяаварійного станів.

Ключові слова: ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ, ІНТЕРФЕЙС АРМ ІНЖЕНЕРА-РЕЛЕЙЩИКА, АВТОМАТИЗОВАНЕ РОБОЧЕ МІСЦЕ ІНЖЕНЕРА-РЕЛЕЙЩИКА, АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ.

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ABSTARCT

The diploma project "Calculated model of a 110/35/10 kV substation" is made on 89 sheets and contains 37 figures, 18 tables, 3 sheets of graphic part and 10 literary references.

The object of the study is a 110/35/10 kV substation.

The subject of the study is modeling a 110/35/10 kV substation

This diploma project is aimed at studying the process of modeling a 110/35/10 kV substation.

According to the results obtained, a comprehensive modeling of an electrical substation was performed, which included calculations of parameters for various operating modes, in particular normal, emergency and post-accident states.

Keywords: TECHNOLOGICAL PROCESSES, INTERFACE OF THE WORKSTATION OF A RELAY ENGINEER, AUTOMATED WORKSTATION OF A RELAY ENGINEER, AUTOMATED CONTROL SYSTEM.

					<i>141.EK31105.005.ДБ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	11
1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ’ЄКТУ – ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ	13
1.1 Схема електричних з’єднань підстанції.....	13
1.2 Силові трансформатори підстанції.....	15
1.3 Збірні шини підстанції.....	16
1.4 Комутаційне обладнання підстанції.....	18
1.5 Захисне обладнання.....	21
1.6 Вимірювальні трансформатори напруги і струму підстанції	24
1.7 Вимірювальні прилади.....	26
1.8 Власні потреби станції.....	34
1.9 Засоби релейного захисту і автоматики станції.....	36
1.10 Розрахунок струмів короткого замикання на шинах підстанції.....	37
1.11 Перевірочний вибір обладнання підстанції.....	48
Висновки по розділу	49
2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПІДСТАНЦІЇ.....	51
2.1 Засоби розробки моделі - програмний комплекс MATLAB.....	51
2.2 Моделі основних елементів підстанції в середовищі MATLAB.....	52
2.3 Модель підстанції в середовищі MATLAB.....	62
Висновки по розділу	64
3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПІДСТАНЦІЇ В НОРМАЛЬНИХ І АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ	66
3.1 Моделювання нормального режиму роботи ПС (схема, навантаження)	66
3.2 Моделювання режимів при змінах навантаження у вузлах.....	69
3.3 Моделювання режимів при КЗ в елементах ПС.....	72
3.4 Моделювання післяаварійного режиму після відключення трансформатора.....	76
Висновки по розділу	84

ВИСНОВКИ 86

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ 88

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

АВР – автоматичне включення резерву

АПВ – автоматичне повторне ввімкнення

АРВ – автоматичний регулятор впливу

АЧР – автоматичне частотне розвантаження

КЗ – коротке замикання

ЗШ – збірні шини

ЛЕП – лінія електропередачі

ОПН – обмежувач перенапруги

ПБЗ – переключення без збудження

ПС – підстанція

РЗА – релейний захист та автоматика

СВ – секційний вимикач

СЗ – схема заміщення

ТВП – трансформатор власних потреб

ТН – трансформатор напруги

ТС – трансформатор струму

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

У сучасних умовах електроенергетика визначається як одна з ключових галузей економіки, оскільки саме вона забезпечує стабільне функціонування промисловості, транспорту, зв'язку та побутового сектору. Важливим аспектом є те, що ефективність і надійність енергетичних систем значною мірою залежать від якості проектування, експлуатації та управління електричними підстанціями, які виконують роль ключових вузлів у системі передачі та розподілу електроенергії. Особливе значення мають підстанції високої напруги, зокрема 110/35/10 кВ, оскільки вони забезпечують електропостачання великих промислових споживачів та розподільчих мереж.

З точки зору науково-технічного прогресу, актуальність даного дослідження обумовлена необхідністю розробки сучасних методів аналізу та моделювання роботи підстанцій з метою підвищення їх надійності, ефективності та безпеки. Слід зазначити, що використання програмного забезпечення, такого як MATLAB, дозволяє з високою точністю відтворити роботу підстанції в різних режимах, зокрема нормальних, аварійних та післяаварійних, що є критично важливим етапом у проектуванні та оптимізації енергетичних систем.

Метою дипломного проекту є створення розрахункової моделі підстанції 110/35/10 кВ та проведення комплексного аналізу її роботи в різних режимах за допомогою програмного комплексу MATLAB. Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі завдання:

1. Провести детальний аналіз характеристик підстанції, включаючи опис обладнання, параметри силових трансформаторів, комутаційних пристроїв, систем захисту та автоматики.
2. Розробити математичну модель підстанції в середовищі MATLAB з використанням бібліотеки Simulink.

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Виконати моделювання роботи підстанції в нормальному режимі, режимі короткого замикання та післяаварійному режимі з подальшим аналізом отриманих результатів.

4. Оцінити ефективність обраного обладнання та запропонованих рішень на основі результатів моделювання.

Об'єктом дослідження виступає підстанція 110/35/10 кВ, яка є складовою частиною електроенергетичної системи та забезпечує передачу та розподіл електроенергії.

Предметом дослідження є процеси, що відбуваються в електричній системі підстанції під час її функціонування в різних режимах.

У рамках дослідження були застосовані такі методи:

- Аналітичні розрахунки параметрів підстанції, зокрема струмів короткого замикання.

- Комп'ютерне моделювання за допомогою програмного комплексу MATLAB/Simulink.

- Візуалізація та аналіз отриманих результатів для оцінки стабільності та надійності системи.

Структура дипломного проекту включає вступ, три розділи, висновки та перелік джерел інформації. У першому розділі наведено характеристику підстанції та її обладнання. Другий розділ присвячений розробці моделі підстанції в MATLAB. У третьому розділі проведено моделювання роботи підстанції в різних режимах. У висновках підсумовано результати дослідження.

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ – ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ

1.1 Схема електричних з'єднань підстанції

З огляду на сучасні вимоги до проектування енергетичних об'єктів, слід зазначити, що при розробці електричної частини електростанції чи підстанції принципово важливим етапом є обґрунтований вибір основної схеми. Варто підкреслити, що даний вибір має вирішальний вплив на подальшу експлуатацію об'єкта, оскільки саме він визначає не лише повний перелік необхідного обладнання, а й усі ключові взаємозв'язки між його компонентами.

З інженерної точки зору, правильно обрана основна схема слугує фундаментом для розробки цілого комплексу технічної документації, включаючи принципові схеми електричних з'єднань, схеми внутрішньої компоновки, схеми вторинних кіл, монтажні схеми, інші проектно-технічні рішення;

На рис. 1.1 наведено головну схему, яка відображає стан усіх елементів установки при їх вимкненому положенні. Це дозволить провести комплексну оцінку запропонованого технічного рішення.

					141.ЕКз1105.005.ДБ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТУ – ПІДСТАНЦІЯ 110/35/10 КВ	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Новик В.О.					13	17
Перевірів		Хоменко О.В.						
Н.контроль		Шполянський О.Г.				НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» ФЕА, гр. ЕК-311		
Затвердив		Марченко А.А.						

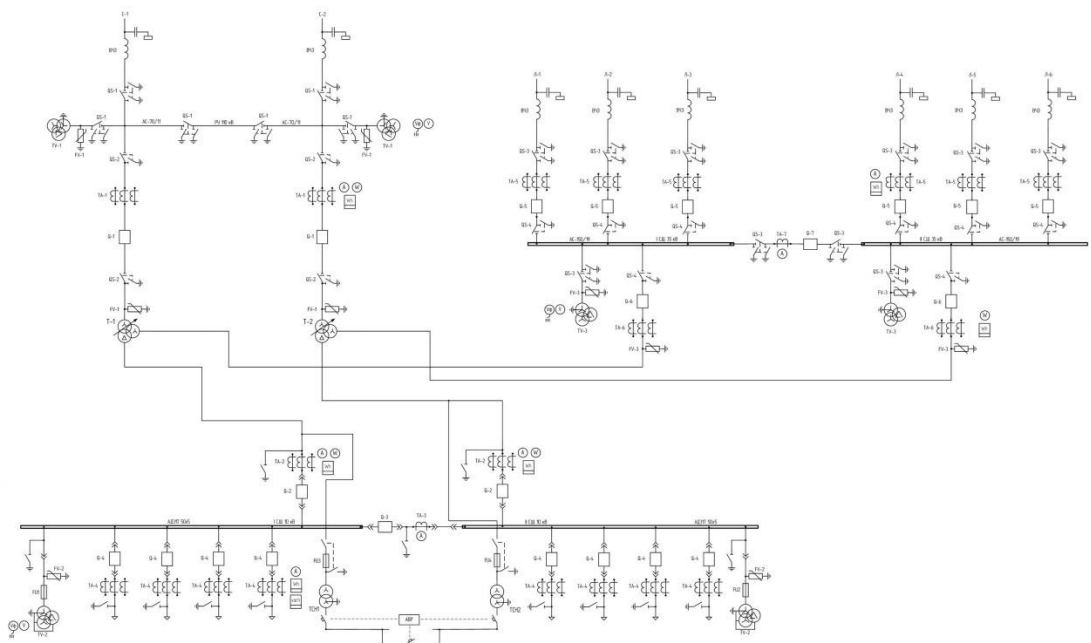


Рисунок 1.1 – Головна схема електричної підстанції

Підстанція, яку ми досліджуємо в рамках даного дипломного проєкту, характеризується трирівневою структурою напруг - 110 кВ, 35 кВ та 10 кВ, що технологічно обумовлює можливість підключення різноманітних ліній електропередачі з різними параметрами.

Конструктивно підстанція включає:

1. Трансформаторні блоки, основним призначенням яких є перетворення високої напруги на нижчу;
2. Розподільчі пристрої, що функціонально забезпечують регулювання потоку електроенергії на окремі лінії передачі;

Важливо відзначити, що підстанція проєктувалася з урахуванням підвищених вимог до надійності роботи, стійкості до перебоїв та безпеки електропостачання.

В наступних розділах буде наведено склад основного обладнання підстанції.

1.2 Силові трансформатори підстанції

З точки зору електроенергетики, основним призначенням силових трансформаторів на підстанціях є перетворення рівнів напруги. Цей процес реалізується шляхом подачі високої напруги на входні обмотки трансформатора з подальшим її зниженням до необхідних значень. [1]

Слід зазначити, що принцип роботи таких трансформаторів базується на:

1. Прийомі високої напруги від магістральних ліній;
2. Її трансформації до оптимальних рівнів;
3. Подальшому розподілі зниженої напруги споживачам;

Даний процес трансформації дозволяє мінімізувати втрати при передачі електроенергії, забезпечити безпечні параметри для кінцевих споживачів та оптимізувати роботу розподільчих мереж.

Таким чином, силові трансформатори виконують ключову роль у підтримці стабільної роботи всієї енергосистеми, забезпечуючи ефективне перетворення та розподіл електроенергії. [1]

На досліджуваній підстанції встановлено 2 трансформатори типу ТДН-40000/110-70. На рис. 1.2 зображено фото трансформатора, у табл. 1.1 наведені його паспортні дані.



Рисунок 1.2 – Трансформатор ТДН-400000/110-70

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.1 – Паспортні дані трансформатора ТДН-40000/110-70

Тип	S _{ном} , МВА	Напруга обмотки, кВ			Втрати, кВт		U _к , %			I _х , %
		ВН	СН	НН	P _х	P _к	ВН- СН	ВН- НН	СН- НН	
ТДН- 40000/110- 70	40	115	-	38,5	34	170	-	10,5	-	0,55

Згідно з технічною документацією, основне завдання трансформатора ТДН-40000/110-70 полягає в перетворенні високої напруги з рівня 110 кВ на нижчу напругу рівня 35 кВ. Потужність даного трансформатора дорівнює 40000 кВА. [1]

1.3 Збірні шини підстанції

Збірні шини підстанції виконують ряд ключових функцій, серед яких:

1. Інтеграційна функція:

- Об'єднання різних рівнів напруги;
- З'єднання окремих ланок енергосистеми;

2. Розподільча функція:

- Оптимальний розподіл електроенергії;
- Забезпечення гнучкості енергопостачання;

Технічно, дане рішення дозволяє інтегрувати кілька ліній живлення, об'єднувати трансформатори з різними параметрами та створювати єдину керовану систему.[2]

Як зазначено в джерелі [2], використання збірних шин суттєво підвищує:

- Ефективність енергорозподілу;
- Надійність електропостачання;
- Гнучкість управління потоками енергії;

Важливо відзначити, що сучасні збірні шини виготовляються з високоякісних матеріалів, забезпечують мінімальні втрати енергії та дозволяють швидко переналаштовувати схеми живлення.

На підстанції, яку ми досліджуємо в рамках даного дипломного проєкту, встановлено такі секції збірних шин:

- Дві секції на 35 кВ (АС-185);
- Дві секції на 10 кВ (2А 100х10);

На рис. 1.3 наведене фото збірних шин підстанції.



Рисунок 1.3 – Збірні шини підстанції

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

141.EK31105.005.ДБ

Арк.

17

1.4 Комутаційне обладнання підстанції

Комутаційне обладнання підстанції виконує ряд критично важливих функцій:

1. Основні функціональні завдання: [3]
 - Забезпечення безперебійного розподілу електроенергії;
 - Захист системи від перевантажень та аварійних режимів;
 - Контроль та управління робочими параметрами;
2. Оперативні можливості: [3]
 - Виконання комутаційних операцій (вмикання/вимикання);
 - Переключення електричних кіл;
 - Локалізація аварійних ділянок;

Технічно, дане обладнання дозволяє оперувати різними режимами роботи, швидко реагувати на аварійні ситуації та забезпечити безпеку персоналу.

Сучасне комутаційне обладнання відповідає вимогам надійності, забезпечує оперативне управління та мінімізує час аварійного відключення.

Таким чином, комутаційне обладнання є ключовим елементом, що забезпечує стабільну та безпечну роботу підстанції в різних режимах експлуатації. [3]

На нашій підстанції встановлено:

- Роз'єднувачі: РЛНД – 110/600, РНД – 110/600;
- Короткозамикачі: КЗ-110;
- Від'єднувачі: ОД-110/600;
- Вимикачі: ВМП-10/3000, ВМП-10/600, ВМП-10/1500;

Паспортні дані цих комутаційних пристроїв наведені в табл. 1.2 – 1.5

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 1.2 – Паспортні дані роз'єднувачів

Тип	Номинальна напруга, В	Номинальний струм, А	Довжина, мм	Ширина, мм	Висота, мм	Маса провідника, кг	Тип дроту
РЛНД-110	110	1000 2000	1500	500	1500	165	ПРН-110М
РНД-110У	110	1000 2000	1644	650	2080	394	ПРН-220М

Таблиця 1.3 – Паспортні дані короткозамикачів

Тип	Номинальна напруга, кВ	Амплітуда граничного наскрізного струму, кВ	Початкове значення періодичної складової струму, кА	Граничний струм термічної стійкості, кА	Час протікання граничного струму термічної стійкості, с	Число включень на струм ІЗ без зміни контактів
КЗ-110	110	51	20	20	3	5

Таблиця 1.4 – Паспортні дані від'єднувачів

Тип		ОД-110/600
Номинальна напруга, кВ		110
Найбільша напруга, кВ		126
Номинальний струм, А		600; 1000
Амплітуда граничного струму	Голов-них ножів	80
	Зазем-люючих ножів	50
Термічна стійкість струму за 10 с.	Голов-них ножів	12
	Зазем-люючих ножів	7
Повний час відключення, с		0,7 – 0,9
Тип дроту для	Голов-них ножів	ШПО
	Зазем-люючих ножів	ПРН-110
Вага, кг	Одного полюса відокремлювача	71
	Приводу ШПО	100
	Приводу ПРН-110	11

Таблиця 1.5 – Паспортні дані вимикачів

Тип	Номинальна напруга, кВ	Найбільша робоча напруга, кВ	Номинальний струм, А	Номинальний струм відключення, кА	Власний час відключення з приводом	Мінімальна безструмова пауза при АПВ, сек	Електричний опір струмопроводу полюса мкОм	Вага оливи, кг
ВМП-10/600	10	11,5	600	20	0,1	0,5	50/630 А	5,5
ВМП-10/1500	10	11,5	1500	20	0,1	0,5	30/1500 А	5,5
ВМП-10/3000	10	11,5	3000	20	0,1	0,5	30/3000 А	5,5

1.5 Захисне обладнання

Відповідно до актуальних вимог електробезпеки, сучасне захисне обладнання підстанцій виконує ряд критично важливих функцій: [4]

1. Основні завдання:

- Попередження аварійних ситуацій;
- Захист від перенапруги;
- Збереження електротехнічного обладнання;

2. Основні типи захисних пристроїв:

а) Обмежувачі перенапруги (ОПН): [4]

- Ефективно захищають від високовольтних імпульсів;
- Нейтралізують наслідки грозових розрядів;
- Мінімізують вплив комутаційних процесів;

Принцип дії ґрунтується на миттєвому відведенні надлишкового струму до заземлювального контуру.

б) Розрядники: [4]

- Виконують функцію додаткового захисту;
- Забезпечують остаточне відведення струмів;
- Сприяють стабілізації рівня напруги;
- Знижують ймовірність пошкодження обладнання;

Таким чином, правильний підбір і експлуатація захисного обладнання є вирішальним фактором безпечної та стабільної роботи підстанцій. [4]

На підстанції, яку ми досліджуємо в рамках даного дипломного проєкту, встановлено обмежувачі перенапруги ОПНп-110/73/10/550 та ОПНп-10/12/10/УХЛ1, а також розрядники:

- на стороні 110 кВ – РВС 110-М;
- на стороні 35 кВ – розрядники РВС-35;
- на стороні 10 кВ – розрядники РВП-10;

У табл. 1.6 та 1.7 наведені технічні характеристики даних пристроїв.

Таблиця 1.6 – Паспортні дані розрядників

Тип	Одиниця виміру	РВС-110М	РВП-35	РВС-10
Клас напруги мережі	кВ	110	35	10
Номінальна напруга	кВ	102	30	10,8
Пробивна напруга при частоті 50 Гц в сухому стані і під дощем				

Продовження Таблиці 1.6

Не менше	кВ	200	36	25
Не більше		200	46	28
Імпульсна пробивна напруга при передрозрядному часі від 2 до 20 мкс при повному імпульсі 1,2/50 мкс, не більше	кВ	285	67	50
Залишкова напруга при імпульсному струмі з довжиною фронту хвилі 8 мкс				
З амплітудою струму 3000 А	кВ	315	57	47
З амплітудою струму 5000 А		335	61	50
З амплітудою струму 10000 А		367	67	-
Струмова пропускна здатність				
20 імпульсів струму хвилею 16/40 мкс	кА	10,0	10,0	-
20 імпульсів струму прямокутною хвилею тривалістю 2000 мкс	А	150	150	-
Довжина шляху витoku зовнішньої ізоляції, не менше	см	345	54	-
Допустимий натяг проводів, не менше	Н	500	300	-
Висота, не більше	мм	3100	800	-
Маса, не більше	кг	175	49	-

Таблиця 1.7 – Паспортні дані обмежувачів перенапруги

Тип	Клас напруги, кВ	Довгодопустима робоча напруга, кВ	Ном. розрядний струм, кА	U _{ном.} ОПН, кВ	Пропускна здатність, А	Напруга, що відстає		
						При гроз. імпульс. 10 кА	При гроз. імпульс. 1000 А	При гроз. імпульс. 500 кА
ОПНп- 110/73/10/550	110	73	10	92	550	234	185	179
ОПНп- 10/12/10/УХЛІ	10	12	10	9	450	26	38	38

1.6 Вимірювальні трансформатори напруги і струму підстанції

Трансформатори напруги та струму виконують ряд критично важливих функцій: [5]

1. Основні технічні характеристики:

- Перетворення високих рівнів напруги до безпечних значень;
- Трансформація великих струмів до величин, придатних для вимірювання;
- Забезпечення високої точності вимірювань;

2. Функціональні можливості:

- Моніторинг основних параметрів енергосистеми;
- Захист обслуговчого персоналу від небезпечної напруги;
- Інтеграція з автоматизованими системами контролю;

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

Як зазначено у джерелі [5], вимірювальні трансформатори є обов'язковим елементом будь-якої підстанції, забезпечують безпеку експлуатації та дозволяють реалізувати складні системи захисту.

На заданій підстанції встановлено:

- Трансформатори напруги – НТМИ-10;
- Трансформатори струму – ТВТ-110/220-600, ТВТ-35М-200-600, ТПЛ-10, ТПЛ-10/300;

В табл. 1.8,1.9 наведені паспортні дані трансформаторів напруги та струму.

Таблиця 1.8 – Паспортні дані трансформаторів напруги

Назва параметру	Одиниця виміру	НТМИ-10
Номінальна напруга первинної обмотки	кВ	10
Номінальна напруга вторинної обмотки	В	100
Номінальна потужність трансформатора	ВА	200
Максимальна потужність	ВА	960
Похибки по напрузі	%	±0,5
Схема і група з'єднань обмоток	-	Y/Yn-0
Маса	кг	85

Таблиця 1.9 – Паспортні дані трансформаторів струму

Тип	ТВТ- 110М/220- 600	ТВТ- 35М/200- 600	ТПЛ- 10	ТПЛ- 10/300
Номинальна напруга, кВ	110	35	10	10
Найбільша робоча напруга, кВ	126	40,5	12	12
Номинальний первинний струм, А	600	600	600	300
Номинальний вторинний струм, А	5	5	5	5
Струм термічної стійкості 1с, кА	31,5	7-37	31,5	31,5
Струм електродинамічної стійкості, кА	80	80	80	100
Клас точності для захисту	10Р	10Р	10Р	10Р

1.7 Вимірювальні прилади

Вимірювальні прилади виконують ряд ключових функцій:

1. Основні завдання:

- Точний моніторинг параметрів електромережі (струм, напруга, потужність);
- Збір та аналіз експлуатаційних даних;
- Візуалізація технологічних параметрів;

2. Технологічні особливості:

- Забезпечення оперативного контролю стану мережі;
- Формування інформаційної бази для прийняття управлінських рішень;

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Інтеграція з системами диспетчеризації;

Як зазначено у джерелі [6], сучасні вимірювальні системи включають:

- Вольтметри - для вимірювання рівнів напруги;
- Амперметри - для контролю величин струму;
- Варметри - для аналізу реактивної потужності;
- Осцилографи - для реєстрації динамічних процесів;
- Лічильники - для обліку спожитої енергії;
- Ватметри - для вимірювання активної потужності;

Прилади, що встановлені на досліджуваній підстанції, розглянуті нижче:

- Вольтметр DMK:

У табл. 1.10 наведені паспортні дані вольтметра DMK.

Таблиця 1.10 – Паспортні дані вольтметра DMK

Тип	DMK
Напруга дод. живлення	220 – 240 В
Робоча частота	45 – 65 Гц
Вимірювання	Реальних значень
Релейний вихід	1
Діапазон вимірювання	15-660 В
Похибка	$\pm 0,25 \%$
Програмне співвідношення ТН	1 – 500
Номинальна напруга	600 В

Вольтметр виконує ряд критично важливих функцій:

1. Основні технічні характеристики:

- Точне вимірювання величини напруги;
- Неперервний контроль параметрів мережі;
- Виявлення аномалій електропостачання;

2. Експлуатаційні переваги:

- Забезпечення безпеки персоналу;
- Підвищення енергоефективності систем;
- Попередження аварійних ситуацій;

Технологічно даний прилад дозволяє:

- Фіксувати коливання напруги;
- Виявляти провали напруги;
- Контролювати рівень перевантажень;

Як свідчить практика експлуатації, вольтметр встановлюється на ключових вузлах (силові трансформатори, збірні шини), забезпечує оперативний контроль та дозволяє вживати профілактичних заходів.

- Амперметр ІЦК120:

У табл. 1.11 наведені паспортні дані амперметра ІЦК120.

Таблиця 1.11 – Паспортні дані амперметра ІЦК120

Тип	ІЦК 120
Клас точності	0,5 або 1,0
Висота знака, мм	20
Робочий діапазон температур	Від – 40 °С до + 55 °С
Максимальний діапазон показань	9999
Нормальна область частот вимірювальних сигналів	Від 45 Гц до 65 Гц

Амперметр виконує низку ключових завдань:

1. Основні технічні функції:

- Точне вимірювання величини струму;
- Контроль параметрів на різних ділянках мережі;
- Діагностика стану електрообладнання;

2. Експлуатаційні переваги пристрою:

- Забезпечення безпеки енергосистеми;
- Оптимізація енергоспоживання;
- Попередження аварійних ситуацій;

Технологічно амперметр дозволяє виявляти перевантаження в мережі, фіксувати короткі замикання та контролювати робочі параметри струму.

Як показують практичні дослідження, даний прилад:

- Встановлюється на критичних вузлах (силові трансформатори, лінії електропередач);
- Монтується на секційних вимикачах та трансформаторах власних потреб;
- Забезпечує оперативний аналіз стану мережі;

- Варметр СР3020:

У табл. 1.12 наведені паспортні дані варметра СР3020.

Таблиця 1.12 – Паспортні дані ватметра СР3020

Тип	СР3020
Тип виміру	Вимірювання варильного струму
Діапазон виміру	Від 0 до 1000 МВар
Точність вимірювання	$\pm 0,5 \%$
Частотний діапазон	45-65 Гц

Варметр виконує ряд важливих завдань:

1. Основні вимірювальні функції:

- Визначення величини реактивного струму;
- Оцінка якості електроенергії;
- Контроль балансу активної та реактивної потужності;

2. Оперативні можливості:

- Управління навантаженням у реальному часі;
- Підтримання стабільності енергосистеми;
- Діагностика стану обладнання;

Технологічно варметр дозволяє виявляти перевантаження в мережі, фіксувати збої в роботі устаткування та контролювати параметри реактивної потужності.

Як свідчить практика експлуатації, варметр:

- Встановлюється на критичних вузлах (силові трансформатори, лінії електропередач);
- Забезпечує оперативний моніторинг;
- Дозволяє запобігати аварійним ситуаціям;

- Осцилограф Н11:

У табл. 1.13 наведено паспортні дані осцилографа Н11.

Таблиця 1.13 – Паспортні дані осцилографа Н11

Тип	Н11
Кількість каналів	2
Частота дискретизації	100 МГц – 1 ГГц
Глибина пам'яті	1 Мб – 4 Гб
Роздільна здатність	Залежить від шкал і налаштувань
Вимірювання напруги	1 мВ – кілька кіловольт

Продовження Таблиці 1.13

Вимірювання часу	1 нс – кілька секунд
Запис тривалості	Мікросекунди – години
Збереження даних	USB, LAN, GPIB
Дисплей	Кольоровий LCD

Осцилограф виконує ряд ключових завдань:

1. Основні аналітичні функції:

- Дослідження часових характеристик електричних сигналів;
- Високоточний аналіз форми хвиль (напруга, струм);
- Візуалізація динамічних процесів;

2. Експлуатаційні переваги:

- Забезпечення детального аналізу параметрів мережі;
- Виявлення складних аномалій;
- Підтримка прийняття оперативних рішень;

Технологічно осцилограф дозволяє фіксувати перешкоди та спотворення сигналів, діагностувати періодичні збої та ідентифікувати приховані несправності.

Встановлюється на щитах обліку електроенергії (ЩУ), забезпечує високий рівень діагностики та дозволяє запобігати критичним ситуаціям.

- Лічильники ARIS EM:

У табл. 1.14 наведені паспортні дані лічильника ARIS EM.

Таблиця 1.14 – Паспортні дані лічильника ARIS EM

Тип	ARIS EM
Тип лічильника	Електролічильник
Діапазон вимірювання активної енергії	Від 0 до 50 000 кВт·год
Діапазон вимірювання реактивної енергії	Від 0 до 50 000 кВт·год
Діапазон вимірювання напруги	Від 0 до 1000 В
Діапазон вимірювання струму	Від 0 до 500 А
Точність вимірювання	$\pm 0,5 \%$
Частота живильної мережі	50 Гц
Робоча температура	Від -10°C до $+50^{\circ}\text{C}$

Лічильники виконують ряд критично важливих функцій:

1. Основні технічні характеристики:

- Високоточне вимірювання спожитої електроенергії;
- Облік енергоспоживання підключених об'єктів;
- Фіксація параметрів енергопостачання;

2. Експлуатаційні переваги:

- Забезпечення прозорості комерційних розрахунків;
- Контроль рівня енергоспоживання;
- Підтримка процесів тарифікації;

Технологічно сучасні лічильники дозволяють вести багатотарифний облік, фіксувати показники у цифровому форматі та передавати дані дистанційно.

Як свідчить практика експлуатації:

- Встановлюються на ключових вузлах (силові трансформатори, лінії електропередач);
 - Монтуються на трансформаторах власних потреб;
 - Інтегруються з системами АСКОЕ;
- Ватметри СР3020:

У табл. 1.15 наведені паспортні дані ватметра, який встановлений на досліджуваній підстанції.

Таблиця 1.15 – Паспортні дані ватметра СР3020

Тип	СР3020
Діапазон вимір активної потужності	0 – 1000 кВт
Точність вимірювання	$\pm 0,5 \%$
Вид виміру	Потужність (Ватт)

Ватметри виконують ряд ключових функцій:

1. Основні вимірювальні функції:

- Високоточне визначення активної потужності;
- Моніторинг споживання електроенергії;
- Аналіз рівня навантаження системи;

2. Оперативні можливості:

- Забезпечення ефективного управління мережею;
- Точний розрахунок енергоспоживання;
- Оптимізація розподілу потужностей;

Технологічно ватметри дозволяють виявляти енергетичні втрати, діагностувати несправності системи та контролювати ефективність роботи обладнання.

Як демонструє практика експлуатації:

- Встановлюються на силових трансформаторах;
- Монтуються на лініях електропередач;
- Інтегруються з системами моніторингу;

1.8 Власні потреби станції

З точки зору експлуатаційних вимог, сучасні підстанції мають комплекс основних потреб:

1. Енергетичне забезпечення:

- Живлення всього технологічного обладнання;
- Забезпечення роботи систем контролю та автоматизації;

2. Комунікаційна інфраструктура:

- Організація надійного зв'язку між компонентами підстанції;
- Інтеграція з зовнішніми диспетчерськими центрами;

3. Системи автоматизації:

- Впровадження сучасних засобів автоматичного управління;
- Реалізація функцій моніторингу та захисту;

4. Заходи безпеки:

- Захист від аварійних ситуацій;
- Контроль параметрів мережі;
- Пожежна безпека;

5. Технічне обслуговування:

- Регулярні перевірки обладнання;
- Діагностика технічного стану;
- Своєчасний ремонт;

6. Системи моніторингу:

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Постійний контроль основних параметрів;
- Аналіз напруги, струму та потужності;
- Оптимізація робочих режимів;

На підстанції, яку ми досліджуємо експлуатуються трансформатори типу ТМ-63/10, основні параметри яких представлені в таблиці 1.16. Дане обладнання забезпечує перетворення напруги рівня 10 кВ, номінальну потужність 63 кВА та надійне електропостачання споживачів.

Слід також зазначити, що вказані трансформатори відповідають сучасним вимогам до енергоефективності та надійності роботи.

Таблиця 1.16 – Паспортні дані трансформатора ТМ-63/10

Номінальна потужність, кВА	63
Трансформатор	ТМ
Напруга, кВ	6; 10/0,4
Потужність холостого ходу, Вт	340
Потужність короткого замикання, Вт	1480
Напруга короткого замикання, %	4,5
Струм холостого ходу, %	4
Схема та група з'єднань обмоток	Y/YH-O , Д/YH-0

1.9 Засоби релейного захисту і автоматики станції

З точки зору сучасних вимог до енергобезпеки, системи релейного захисту та автоматики виконують ряд критично важливих функцій: [7]

1. Автоматичне повторне вмикання (АПВ):

- Реалізує циклічне включення/виключення обладнання;
- Підтримує стабільність роботи підстанції;
- Зменшує ймовірність тривалих простоїв;
- Запобігає каскадним аваріям;

2. Автоматичне частотне розвантаження (АЧР) [7]:

- Підтримує частоту в мережі;
- Регулює навантаження в динамічному режимі;
- Забезпечує баланс між генерацією та споживанням;
- Активізує резервні джерела живлення;

3. Автоматичне вмикання резерву (АВР):

- Виконує автоматичне перемикання джерел;
- Забезпечує безперебійне електропостачання;
- Мінімізує час перехідних процесів;

4. Максимальний струмовий захист (МСЗ):

- Реагує на короткі замикання;
- Захищає обладнання від пошкоджень;
- Є найпоширенішим типом захисту; [7]

Дані системи є невід'ємною частиною сучасної підстанції, оскільки вони забезпечують своєчасне виявлення аварій, захищають дороге обладнання, підтримують безперебійне живлення споживачів та оптимізують роботу енергосистеми. [7]

Таким чином, комплекс релейного захисту та автоматики є ключовим елементом для забезпечення надійної та ефективної роботи сучасних підстанцій. [7]

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

1.10 Розрахунок струмів короткого замикання на шинах підстанції

Для оцінки сумісності обраного обладнання з даною підстанцією необхідно провести розрахунок короткого замикання.

Відповідно до сучасних методик аналізу, такий розрахунок дозволить визначити відповідність параметрів обладнання умовам експлуатації.

З огляду на нормативні вимоги, розрахунки струмів короткого замикання є обов'язковим етапом проектування.

Розрахунок струмів короткого замикання на шинах 110кВ:

Для виконання розрахунків струм КЗ були прийняті такі базисні параметри:

- $U_6 = 115 \text{ кВ}$;
- $S_6 = 1000 \text{ МВА}$;
- $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 115} = 5,02 \text{ кА}$;

На рис. 1.4 зображено структурну схему підстанції.

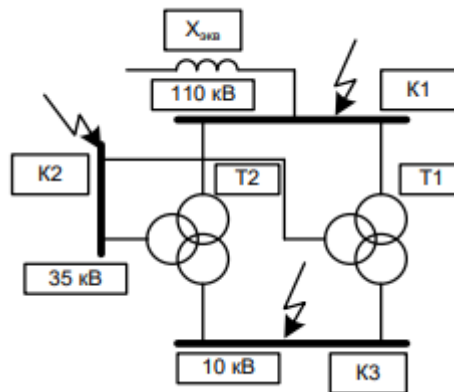


Рисунок 1.4 – Структурна схема підстанції

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці К1:

$$I_{n_{0_{110}}} = \frac{I_6}{x_{\text{екв}_1}} = \frac{5,02}{0,476} = 10,546 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці К1:

$$I_{y110} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n_{0_{110}}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 10,546 = 24,01 \text{ кА},$$

Де:

$k_y = 1,61$ – ударний коефіцієнт.

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n110} = I_{n_{0_{110}}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 10,546 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n110} = 13,928 \text{ кА};$$

Розрахунок струмів короткого замикання на шинах 35 кВ:

На рис. 1.5 зображено розрахунок струмів короткого замикання на шинах 35 кВ.

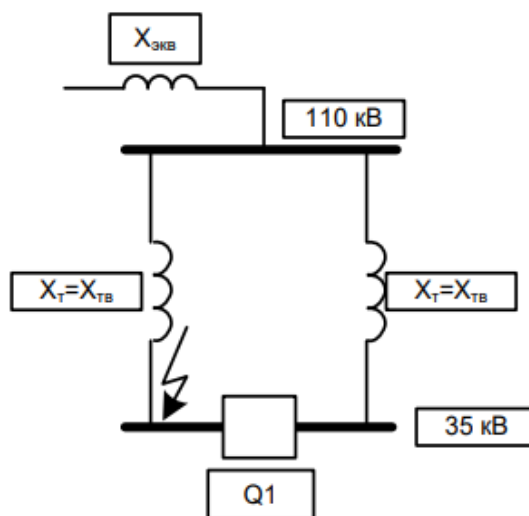


Рисунок 1.5 – КЗ на шинах 35 кВ

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Проведемо розрахунок для відключеного секційного вимикача.

Для виконання розрахунків струм КЗ були прийняті такі базисні параметри:

- $U_6 = 35,5 \text{ кВ} ;$
- $S_6 = 1000 \text{ МВА} ;$
- $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 35,5} = 16,263 \text{ кА} ;$
- $x_{e_{1\text{роз}}} = x_{e_{\text{КВ}_1}} \cdot \left(\frac{35,5}{115}\right)^2 = 0,476 \cdot \left(\frac{35,5}{115}\right)^2 = 0,045 \text{ в. о.} ;$

Пряма послідовність:

$$x_{m_{\text{ВС1}}} = \frac{U_{k-\text{ВС1}} \cdot S_6}{100 \cdot S_{\text{Н1}}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 2,625 \text{ в. о.} ;$$

$$x_{e_{35-1}} = x_{e_{1\text{роз}}} + x_{m_{\text{ВС1}}} = 0,045 + 2,625 = 2,67 \text{ в. о.} ;$$

Зворотна послідовність:

$$x_{e_{35-2}} = x_{e_{35-1}} = 2,67 \text{ в. о.} ;$$

Нульова послідовність:

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці К2:

$$I_{n_{0_{35}}} = \frac{I_6}{x_{e_{35-1}}} = \frac{16,623}{2,67} = 6,09 \text{ кА} ;$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці К2:

$$I_{y_{35}} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n_{0_{35}}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 6,09 = 13,886 \text{ кА} ;$$

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n35} = I_{n_{0,35}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 6,09 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n35} = 8,04 \text{ кА};$$

Проведемо розрахунок для включеного секційного вимикача:

Пряма послідовність:

$$x_{m_BC1} = \frac{U_{k-BC1} \cdot S_6}{100 \cdot S_{H1}} = \frac{10,5 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 2,625 \text{ в. о.};$$

$$x_{e35-1} = x_{e_{1\text{роз}}} + \frac{x_{m_BC1}}{2} = 0,045 + \frac{2,625}{2} = 1,358 \text{ в. о.};$$

Зворотна послідовність:

$$x_{e35-2} = x_{e35-1} = 1,358 \text{ в. о.};$$

Нульова послідовність:

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці К2:

$$I_{n_{0,35}} = \frac{I_6}{x_{e35-1}} = \frac{16,623}{1,358} = 11,976 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці К2:

$$I_{y35} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n_{0,35}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 11,976 = 27,247 \text{ кА};$$

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n35} = I_{n_{0,35}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 11,976 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n35} = 15,816 \text{ кА};$$

Розрахунок струмів короткого замикання на шинах 10 кВ:

На рис. 1.6 зображено розрахунок струмів короткого замикання на шинах 10 кВ.

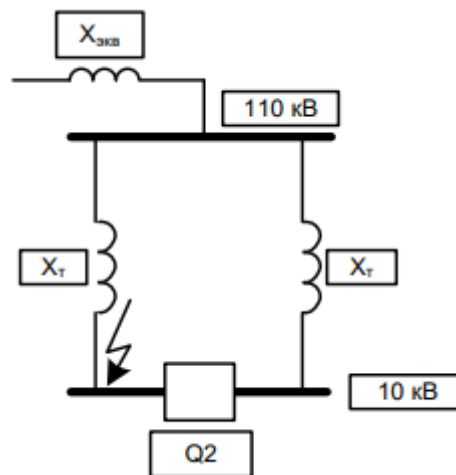


Рисунок 1.6 – КЗ на шинах 10 кВ

Проведемо розрахунок для відключеного секційного вимикача.

Для виконання розрахунків струм КЗ були прийняті такі базисні параметри:

- $U_6 = 10,5 \text{ кВ};$
- $S_6 = 1000 \text{ МВА};$
- $I_6 = \frac{S_6}{\sqrt{3} \cdot U_6} = \frac{1000}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 54,99 \text{ кА};$
- $x_{e_{1\text{роз}}} = x_{e_{кв_1}} \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,476 \cdot \left(\frac{10,5}{115}\right)^2 = 0,004 \text{ в. о.};$

Пряма послідовність:

$$x_{m_BH1} = \frac{U_{k-BH1} \cdot S_6}{100 \cdot S_{H2}} = \frac{17 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 4,25 \text{ в. о.};$$

$$x_{e10-1} = x_{e1poz} + x_{m_BH1} = 0,004 + 4,25 = 4,254 \text{ в. о.};$$

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці КЗ:

$$I_{n_{0_10}} = \frac{I_6}{x_{e10-1}} = \frac{54,99}{4,254} = 12,927 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці КЗ :

$$I_{y10} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n_{0_35}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 12,927 = 29,433 \text{ кА};$$

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n10} = I_{n_{0_10}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 12,927 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$
$$I_{n10} = 32,258 \text{ кА};$$

Проведемо розрахунок для включеного секційного вимикача:

Пряма послідовність:

$$x_{m_BH1} = \frac{U_{k-BH1} \cdot S_6}{100 \cdot S_{H2}} = \frac{17 \cdot 1000}{100 \cdot 40} = 4,25 \text{ в. о.};$$

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$x_{e10-1} = x_{e_{1\text{роз}}} + \frac{x_{m_BH1}}{2} = 0,045 + \frac{4,25}{2} = 2,129 \text{ в. о.};$$

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці КЗ:

$$I_{n0_{10}} = \frac{I_6}{x_{e10-1}} = \frac{54,99}{2,129} = 25,829 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці КЗ:

$$I_{y10} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n10} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 25,829 = 58,81 \text{ кА};$$

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n10} = I_{n0_{10}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 25,829 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n110} = 34,112 \text{ кА};$$

Проведемо розрахунок 1-фазного короткого замикання.

Однофазне коротке замикання на шинах напругою 110 кВ:

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці К1:

$$I_{n0_{110}} = \frac{I_6 \cdot 3}{x_{e1} + x_{e2} + x_{e0}} = \frac{5,02 \cdot 3}{0,476 + 0,476 + 1,044} = 7,545 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці К1:

$$I_{y110} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0_{110}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 7,545 = 17,179 \text{ кА};$$

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n110} = I_{n0_110} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 7,545 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n110} = 9,965 \text{ кА};$$

Проведемо розрахунок струмів 2-фазного КЗ на шинях 110кВ:

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці К1:

$$I_{n0_110} = \frac{I_\phi \cdot \sqrt{3}}{x_{e1} + x_{e2}} = \frac{5,02 \cdot \sqrt{3}}{0,476 + 0,476} = 9,133 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці К1:

$$I_{y110} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0_110} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 9,133 = 20,795 \text{ кА};$$

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n110} = I_{n0_110} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 9,133 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n110} = 12,054 \text{ кА};$$

Двофазне коротке замикання на шинях 35 кВ:

Проведемо розрахунок для відключеного секційного вимикача.

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці К2:

$$I_{n0_35} = \frac{I_\phi \cdot \sqrt{3}}{x_{e1} + x_{e2}} = \frac{16,623 \cdot \sqrt{3}}{2,67 + 2,67} = 5,275 \text{ кА};$$

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці К2:

$$I_{y35} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0_{35}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 5,275 = 12,01 \text{ кА};$$

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n35} = I_{n0_{35}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 5,275 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$
$$I_{n35} = 6,967 \text{ кА};$$

Проведемо розрахунок для включеного секційного вимикача:

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці К2:

$$I_{n0_{35}} = \frac{I_6 \cdot \sqrt{3}}{x_{e1} + x_{e2}} = \frac{16,623 \cdot \sqrt{3}}{1,358 + 1,358} = 10,371 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці К2:

$$I_{y35} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n0_{35}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 10,371 = 23,614 \text{ кА};$$

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n35} = I_{n0_{35}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 10,371 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$
$$I_{n35} = 13,697 \text{ кА};$$

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Двофазне коротке замикання на шинах 10 кВ:

Проведемо розрахунок для відключеного секційного вимикача.

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці КЗ:

$$I_{n_{0,10}} = \frac{I_{\phi} \cdot \sqrt{3}}{x_{e1} + x_{e2}} = \frac{54,99 \cdot \sqrt{3}}{4,254 + 4,254} = 11,195 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці КЗ:

$$I_{y10} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n_{0,10}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 11,195 = 25,49 \text{ кА};$$

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n10} = I_{n_{0,10}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 11,195 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n35} = 14,785 \text{ кА};$$

Проведемо розрахунок для включеного секційного вимикача:

Розрахуємо періодичну складову струму КЗ в точці КЗ:

$$I_{n_{0,35}} = \frac{I_{\phi} \cdot \sqrt{3}}{x_{e1} + x_{e2}} = \frac{54,99 \cdot \sqrt{3}}{2,129 + 2,129} = 22,369 \text{ кА};$$

Розрахуємо ударний струм КЗ в точці КЗ:

$$I_{y35} = k_y \cdot \sqrt{2} \cdot I_{n_{0,10}} = 1,61 \cdot \sqrt{2} \cdot 22,369 = 50,932 \text{ кА};$$

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Розрахуємо найбільше значення повного струму КЗ, що діє:

$$I_{n10} = I_{n0_{10}} \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (k_y - 1)^2} = 22,369 \cdot \sqrt{1 + 2 \cdot (1,61 - 1)^2};$$

$$I_{n35} = 29,542 \text{ кА};$$

Розрахункові значення струмів КЗ наведені в табл. 1.17.

Таблиця 1.17 – Розрахункові значення струмів КЗ

Місцеві умови КЗ		Вид КЗ	I_{n0} , кА	$I_{уд}$, кА	I_n , кА
Шини 110 кВ		3-фазне	10,546	24,01	13,928
		2-фазне	9,133	12,054	27,464
		1-фазне	7,545	17,179	9,965
Шини 35 кВ	Секц. вимикач вкл.	3-фазне	11,976	27,247	15,816
		2-фазне	5,275	12,01	6,967
	Секц. вимикач викл.	3-фазне	11,976	27,247	15,816
		2-фазне	10,371	23,614	13,697
Шини 10 кВ	Секц. вимикач вкл.	3-фазне	12,972	29,432	17,131
		2-фазне	25,829	58,81	34,112
	Секц. вимикач викл.	3-фазне	11,195	25,49	14,785
		2-фазне	22,369	50,932	29,542

1.11 Перевірочний вибір обладнання підстанції

Згідно з проведеними розрахунками струмів короткого замикання на підстанції 110/35/10 кВ, були отримані наступні ключові параметри:

1. Характеристики струмів КЗ:

- Максимальне значення періодичної складової струму на шинах 110 кВ: 10,546 кА (3-фазне КЗ);
- Пікове значення ударного струму на шинах 110 кВ: 24,01 кА (3-фазне КЗ);
- На шинах 35 кВ та 10 кВ значення струмів КЗ зростають при включеному секційному вимикачі, досягаючи 11,976 кА (35 кВ) та 25,829 кА (10 кВ) для періодичної складової;

2. Аналіз відповідності комутаційної апаратури:

- Номінальний струм вимикання вимикачів повинен перевищувати максимальні розрахункові значення (наприклад, 31,5 кА для шин 110 кВ);
- Максимальний наскрізний струм (80 кА) забезпечує запас міцності для всіх режимів роботи;

Отримані результати свідчать про достатній запас міцності обраного обладнання (трансформатори ТДТН-40000/110, вимикачі тощо), відповідність параметрів комутаційної апаратури розрахунковим значенням струмів КЗ та надійний захист системи при аварійних режимах, зокрема при різних видах коротких замикань (3-фазних, 2-фазних, 1-фазних).

Результати розрахунків підтверджують правильність вибору обладнання та його відповідність умовам експлуатації на підстанції. Запропоновані рішення забезпечують стійкість і безпеку роботи електричної мережі.

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						48
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки по розділу

У першому розділі дипломного проєкту здійснено всебічний аналіз технічних характеристик підстанції 110/35/10 кВ, яка є центральним об'єктом дослідження. Зокрема, особливу увагу приділено структурі, складовим елементам та експлуатаційним параметрам, що дало змогу сформулювати цілісне уявлення про функціонування об'єкта.

Основні результати розділу:

1. Схема та обладнання підстанції:

Як свідчить аналіз, підстанція має трирівневу структуру напруг (110 кВ, 35 кВ, 10 кВ), що забезпечує ефективне приєднання різнотипних ліній електропередач і споживачів.

До складу електротехнічного обладнання входять два трансформатори типу ТДТН-40000/110, основним призначенням яких є пониження напруги та розподіл потужності. Їх номінальна потужність становить 40 МВА, що узгоджується з розрахунковими навантаженнями на рівнях 35 кВ (17 МВА) та 10 кВ (11 МВА).

Крім того, комутаційне обладнання (вимикачі, роз'єднувачі, короткозамикачі) підібрано з урахуванням відповідності номінальним параметрам, що гарантує надійність і безпечність роботи підстанції.

2. Захисні та вимірювальні системи:

З метою забезпечення захисту обладнання від перенапруг використовуються обмежувачі перенапруг (ОПН) і розрядники (РВС, РВП), ефективність яких підтверджується при дії як грозових імпульсів, так і комутаційних перенапруг.

Як показують технічні характеристики, трансформатори напруги і струму, а також вимірювальні прилади (вольтметри, амперметри, ватметри) дозволяють здійснювати високоточний моніторинг параметрів, що є критично важливим для стабільної роботи електроенергетичної системи.

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. Розрахунки струмів короткого замикання:

В результаті інженерних розрахунків визначено струми короткого замикання (КЗ) для основних типів аварійних режимів — трифазних, двофазних та однофазних замикань на шинах усіх рівнів напруги.

Так, максимальні значення періодичної складової КЗ становлять:

- 10,546 кА для 110 кВ;
- 11,976 кА для 35 кВ;
- 25,829 кА для 10 кВ;

При цьому, зафіксовані пікові значення ударних струмів — 24,01 кА (110 кВ), 27,247 кА (35 кВ) та 58,81 кА (10 кВ) — вказують на необхідність ретельного вибору обладнання, здатного витримувати навантаження зазначеного рівня.

Отримані результати свідчать, що обране електрообладнання (трансформатори, комутаційні та захисні пристрої) має достатній конструктивний запас для безпечної експлуатації навіть у надзвичайних режимах.

На підставі проведеного аналізу можна зробити висновок, що підстанція 110/35/10 кВ задовольняє сучасні технічні вимоги до надійності, безпеки та енергоефективності. Результати моделювання аварійних режимів та відповідність обладнання вказують на його придатність до тривалої та стабільної експлуатації.

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПІДСТАНЦІЇ

2.1 Засоби розробки моделі - програмний комплекс MATLAB

Варто зазначити, що MATLAB – це високорівневе програмне середовище та мова програмування, розроблені компанією MathWorks. Згідно з сучасними дослідженнями, воно широко використовується для чисельних обчислень, візуалізації даних, моделювання та аналізу різноманітних наукових та інженерних задач. [8]

MATLAB надає широкий набір функцій та інструментів, які дозволяють виконувати такі завдання, як обробка сигналів, аналіз даних, статистика, оптимізація, симуляція систем, розв'язання диференціальних рівнянь та багато іншого. З огляду на сучасні тенденції, MATLAB має зручний інтерфейс, що сприяє ефективній роботі з числовими даними, візуалізації результатів та розробці алгоритмів.

Крім того, MATLAB включає багато розширень та спеціалізованих інструментів, таких як Simulink для моделювання систем, Image Processing Toolbox для обробки зображень, Neural Network Toolbox для роботи з нейронними мережами та інші. Для нашого дослідження побудову моделі підстанції буде здійснено за допомогою Simulink. [8]

Simulink є графічним середовищем моделювання та симуляції, яке входить до складу MATLAB. Згідно з практичним застосуванням, воно використовується для побудови блок-схем моделей систем, що складаються з різних взаємопов'язаних компонентів.

Важливою особливістю Simulink є те, що моделі створюються шляхом візуального з'єднання блоків, які відображають різні елементи системи, такі як сигнали, функції, математичні операції, логічні оператори та регулятори. [8]

					141.EK31105.005.ДБ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	РОЗРОБКА МОДЕЛІ ПІДСТАНЦІЇ	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Новик В.О.						
Перевірів		Хоменко О.В.					51	21
Н.контроль		Шполянський О.Г.				НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» ФЕА, гр. ЕК-311		
Затвердив		Марченко А.А.						

Враховуючи гнучкість платформи, блоки можуть бути налаштовані відповідно до специфічних вимог моделі.

Згідно з сучасними підходами до моделювання, Simulink надає можливість симулювати роботу системи та аналізувати її поведінку в різних умовах. Важливо відзначити, що він дозволяє проводити часові, частотні та інші види аналізу, включаючи визначення відповідей системи на різні вхідні сигнали. Крім того, за допомогою даного інструменту можна оцінювати стабільність системи, оптимізувати її параметри та вирішувати широке коло інших інженерних задач.

Таким чином, Simulink є потужним інструментом для дослідження динамічних систем, що робить його незамінним у наукових та прикладних розробках.

2.2 Моделі основних елементів підстанції в середовищі MATLAB

З огляду на принципи побудови моделей у Simulink, створення моделі здійснюється з блоків, доступних у бібліотеці середовища. Використовуючи шаблонні моделі для трифазних мереж, можна приступати до процесу моделювання.

На першому етапі необхідно обрати джерело напруги. У відповідному розділі бібліотеки знаходиться блок Three-Phase Source, який буде використано у моделі. Для коректного налаштування вказуємо номінальну напругу та обираємо схему з'єднання обмоток Yg. У рамках даної моделі передбачається використання двох ідентичних джерел. [9]

На рис. 2.1 та рис. 2.2 зображено модель трифазного джерела напруги і його налаштування.

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

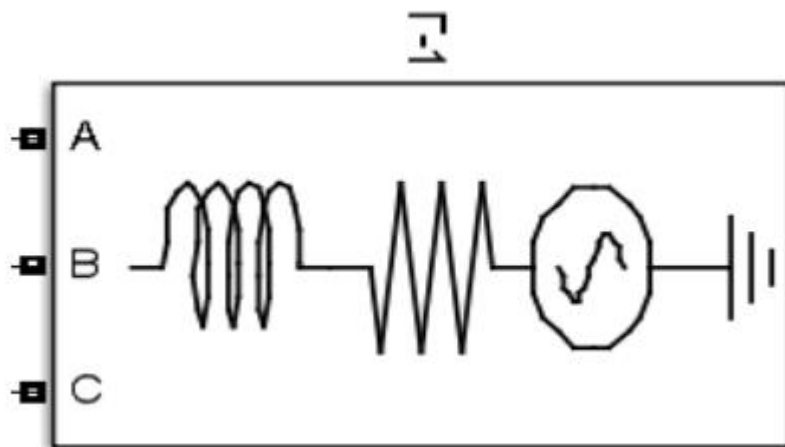


Рисунок 2.1 – Модель трифазного джерела напруги

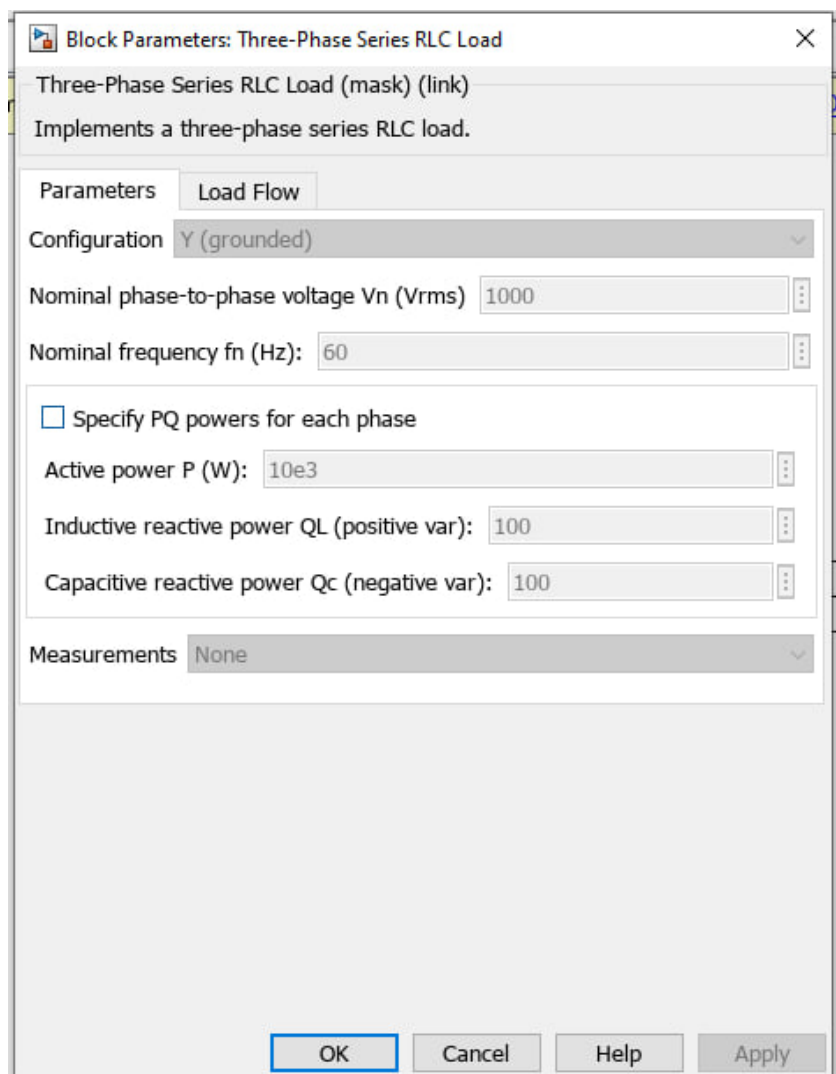


Рисунок 2.2 – Налаштування трифазного джерела напруги

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Продовжуючи побудову моделі, необхідно підібрати відповідний трансформатор. У бібліотеці Simulink обираємо трифазний триобмотковий трансформатор, який відповідає технічним вимогам системи. [9]

Для коректної роботи моделі в параметрах блоку задаємо номінальні напруги, схеми з'єднання обмоток (Y або Δ) та номінальну потужність пристрою. Враховуючи особливості схеми, встановлюємо два ідентичні силові трансформатори, для чого створюємо копію вже налаштованого блоку.

В результаті отримуємо частину моделі, що включає паралельно працюючі трансформатори з однаковими характеристиками, що забезпечує баланс у системі.

На рис. 2.3 та рис. 2.4 зображено модель трифазного триобмоткового трансформатора та його налаштування. [9]

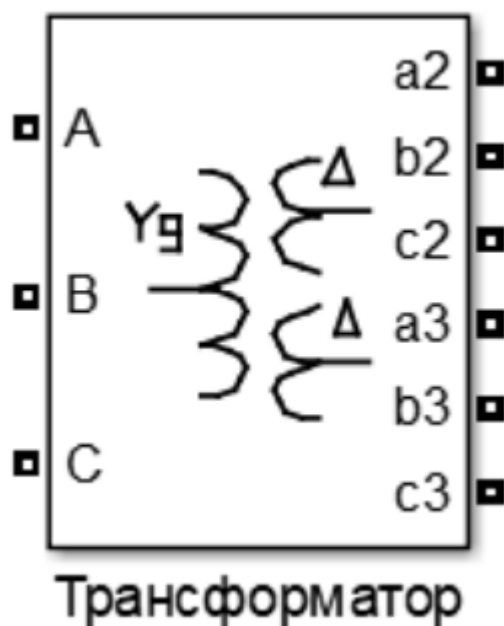


Рисунок 2.3 – Модель трифазного триобмоткового трансформатора

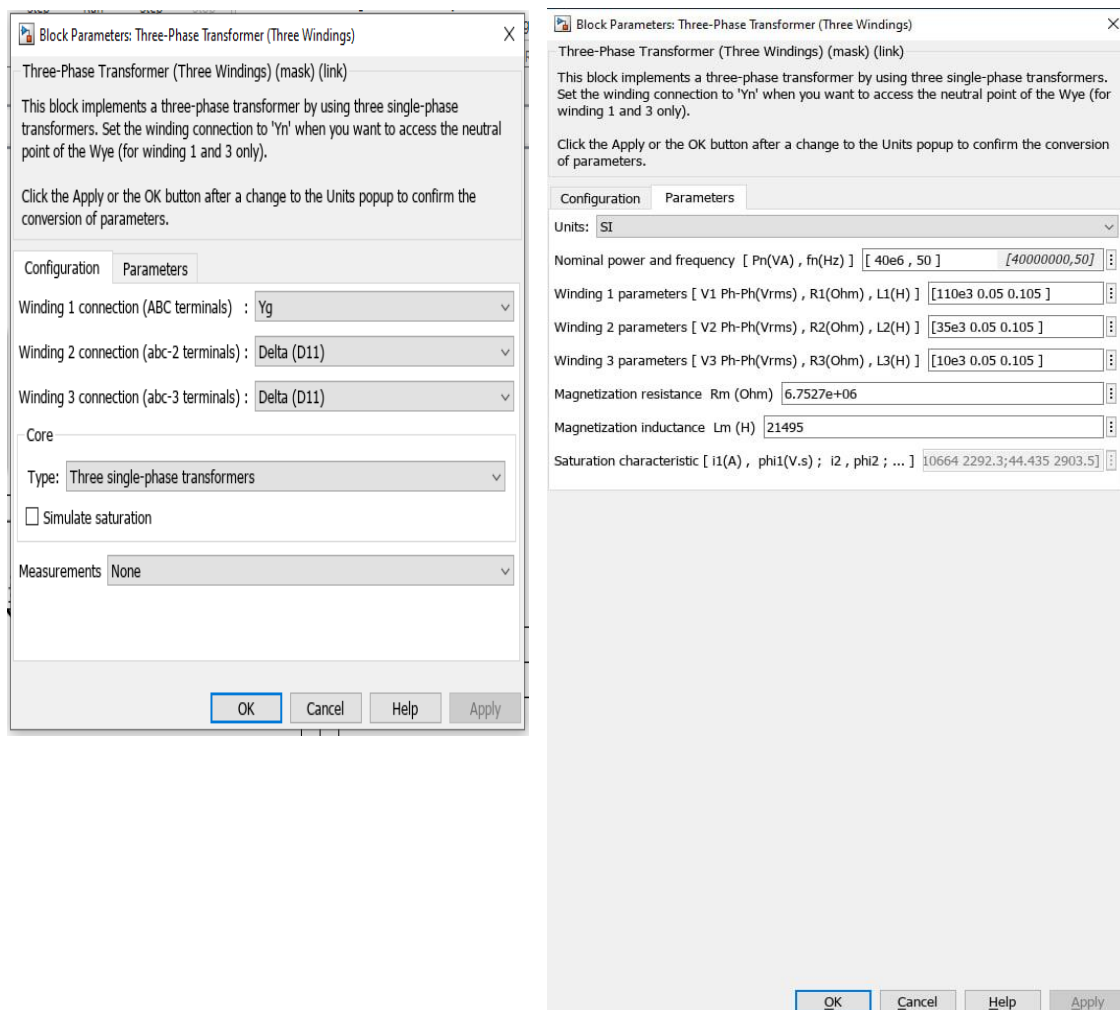


Рисунок 2.4 - Налаштування трифазного триобмоткового трансформатора

При моделюванні розподільчих мереж необхідно передбачити елементи для роз'єднання ділянок. Для цих цілей використовуємо спеціалізовані блоки вимикачів, зображені на рис. 2.5 у двох робочих положеннях. [9]

Важливою особливістю даного блоку є його універсальність – він ефективно виконує функції як вимикача, так і роз'єднувача та відокремлювача. Це дозволяє спростити структуру моделі, використовуючи один тип блоку для вирішення різних технічних завдань.

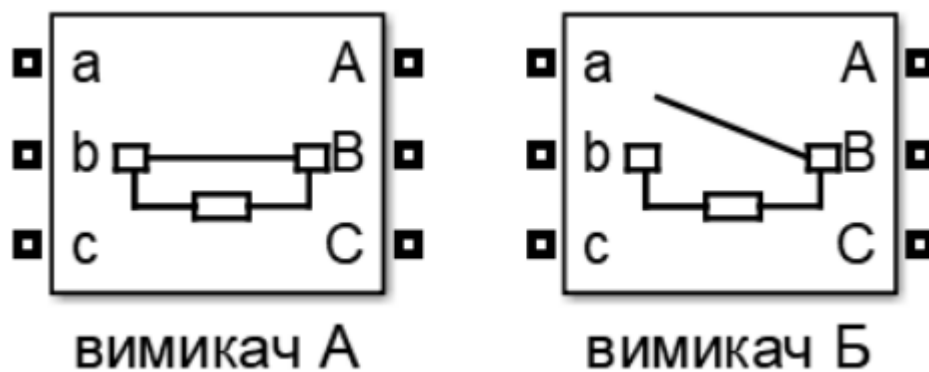


Рисунок 2.5 – Вимикач: а) замкнений; б) розімкнений

Для завершення моделювання енергосистеми необхідно додати блок навантаження, який показано на рис. 2.6. При налаштуванні параметрів встановлюємо номінальну напругу 10.5 кВ та активну потужність 3.1 МВт, що відображено на рис. 2.7. [10]

Навантаження

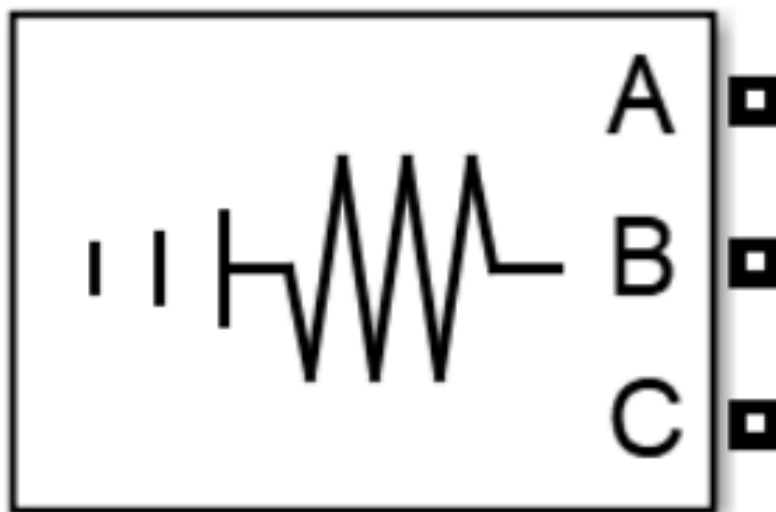


Рисунок 2.6 – Модель навантаження

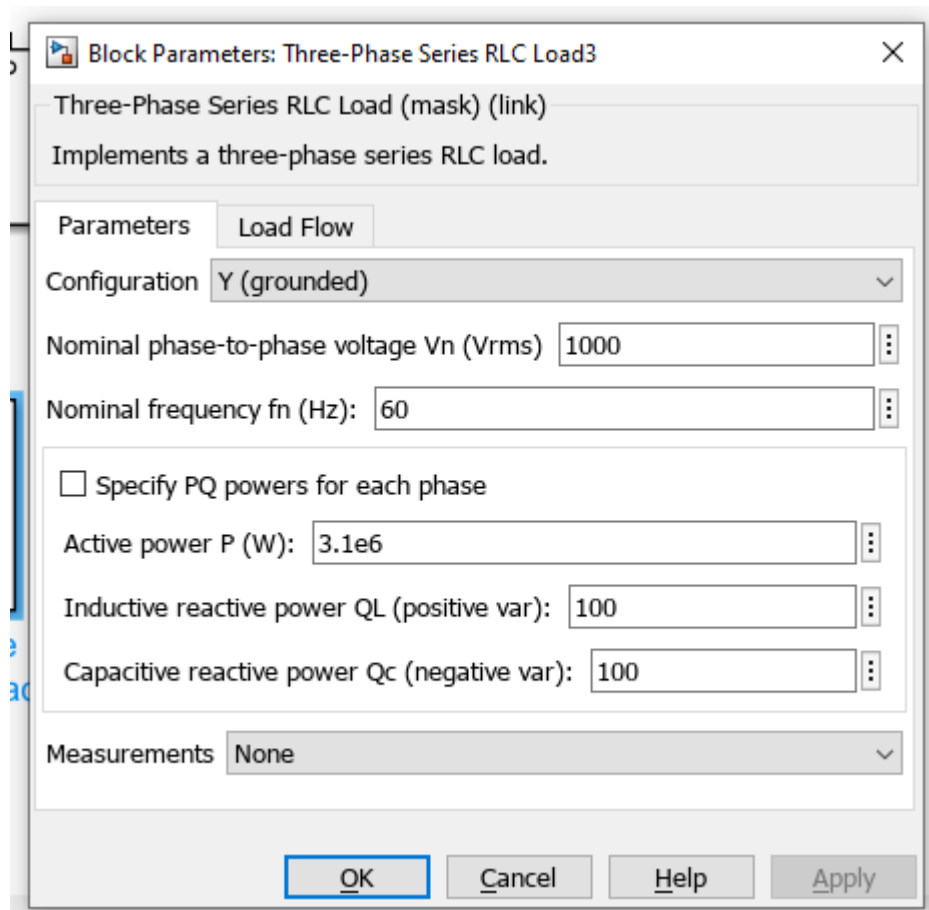


Рисунок 2.7 – Налаштування моделі навантаження

Для моніторингу роботи системи необхідно додати відповідні вимірювальні пристрої. У середовищі Simulink для цієї мети використовується блок вимірювача параметрів, який дозволяє фіксувати ключові характеристики системи. [10]

Візуалізація результатів здійснюється за допомогою блоку Scope (рис. 2.8), де у реальному часі відображаються графіки основних електричних параметрів. Цей підхід дає можливість аналізувати динаміку процесів та оцінювати стабільність роботи системи.

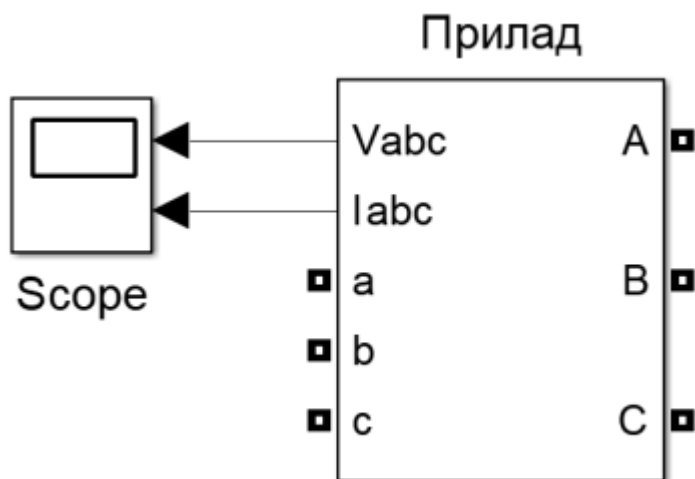


Рисунок 2.8 – Модель вимірювача та блоку Scope

При дослідженні аварійних режимів необхідно використовувати спеціалізовані інструменти моделювання. У даному випадку застосовується модуль Fault (рис. 2.9), який у поєднанні з вимикачем імітує коротке замикання у заданий момент часу. [10]

Важливою перевагою такого підходу є можливість точно контролювати параметри аварійного режиму. Зокрема, користувач може задавати тривалість короткого замикання (рис. 2.10), що дозволяє детально вивчати перехідні процеси в системі.

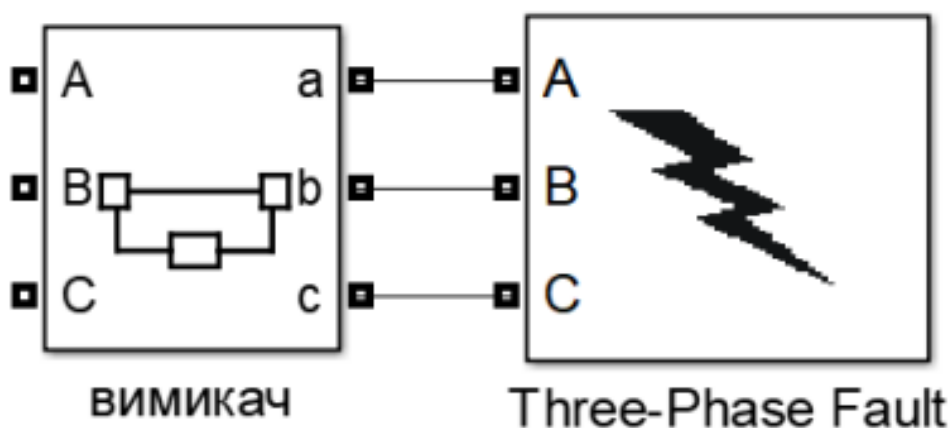


Рисунок 2.9 – Модель для створення штучного КЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

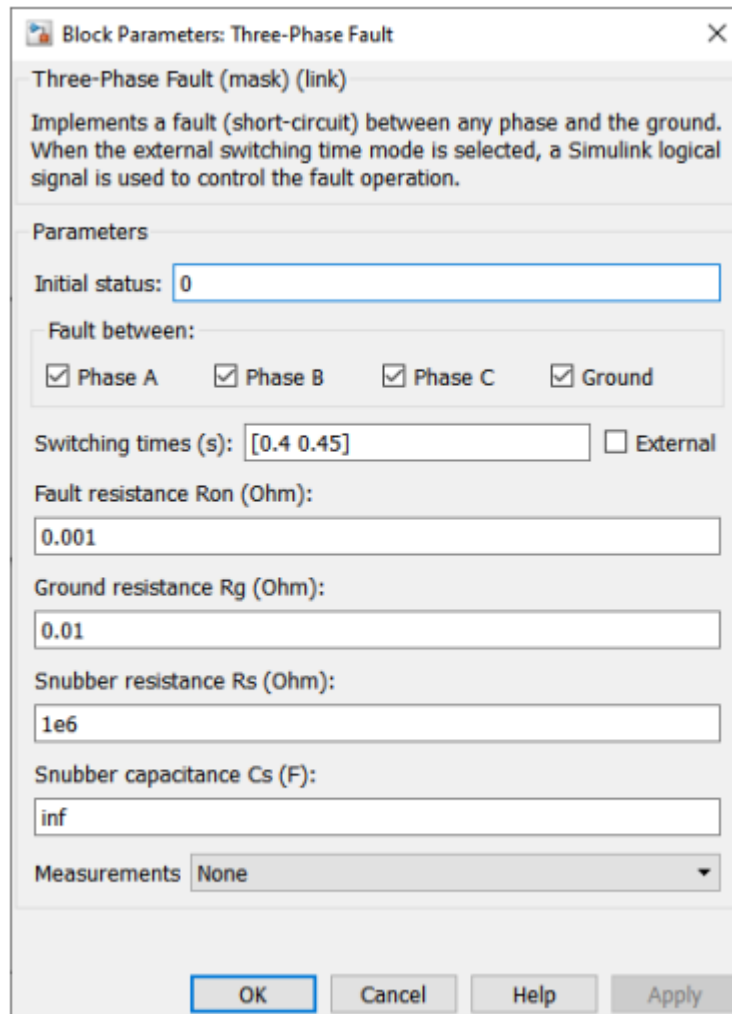


Рисунок 2.10 – Налаштування блоку Fault

При проектуванні розподільної системи ключовим етапом є створення моделі шини. Для цього необхідно інтегрувати всі основні компоненти: навантаження, комутаційні апарати та вимірювальні прилади.

Згідно з принципами моделювання, окремі моделі навантажень з'єднуються паралельно (рис. 2.11, рис.2.12), що дозволяє відтворити реальну конфігурацію розподільчої мережі. Така структура дає можливість аналізувати роботу системи при різних режимах експлуатації. [10]

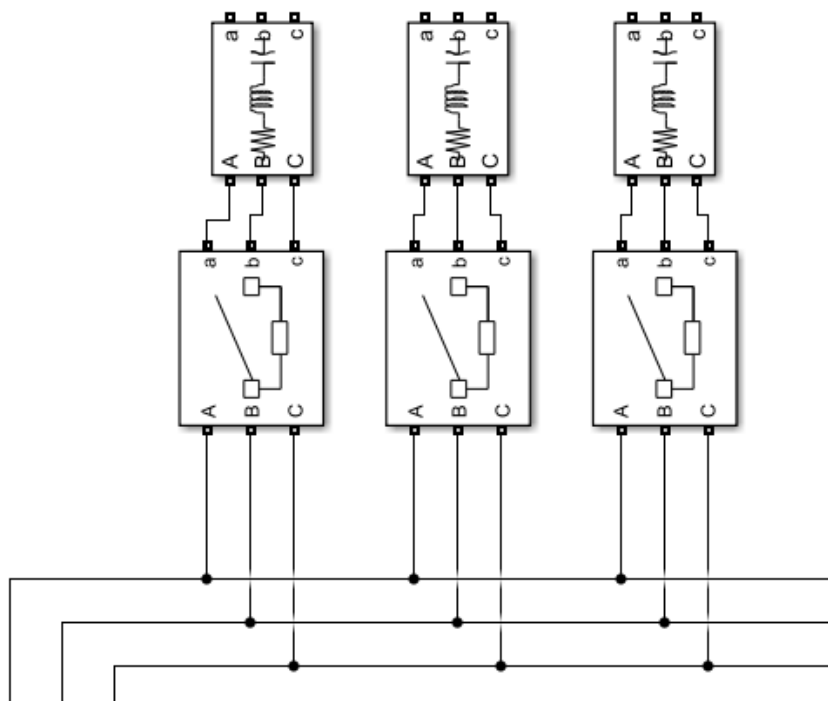


Рисунок 2.11 – Модель шини 35 кВ

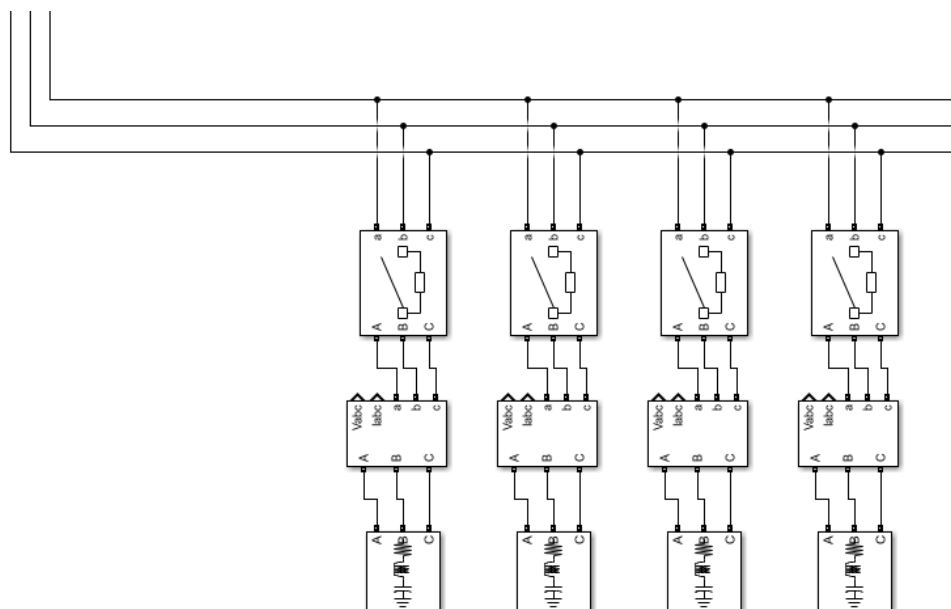


Рисунок 2.12 – Модель шини 10 кВ

Відповідно до принципів проектування підстанцій, шини 35 кВ підключаються до обмоток середньої напруги силових трансформаторів, а шини 10 кВ підключаються до обмоток низької напруги силових трансформаторів. Така конфігурація забезпечує оптимальний розподіл електроенергії між споживачами. [10]

Для підвищення надійності системи, окремі шинні секції роз'єднуються спеціальним секційним вимикачем, як показано на рис. 2.13 та рис. 2.14.

Це технічне рішення дозволяє:

- ізолювати пошкоджені ділянки мережі
- підтримувати живлення при аваріях
- здійснювати планове обслуговування без повного відключення

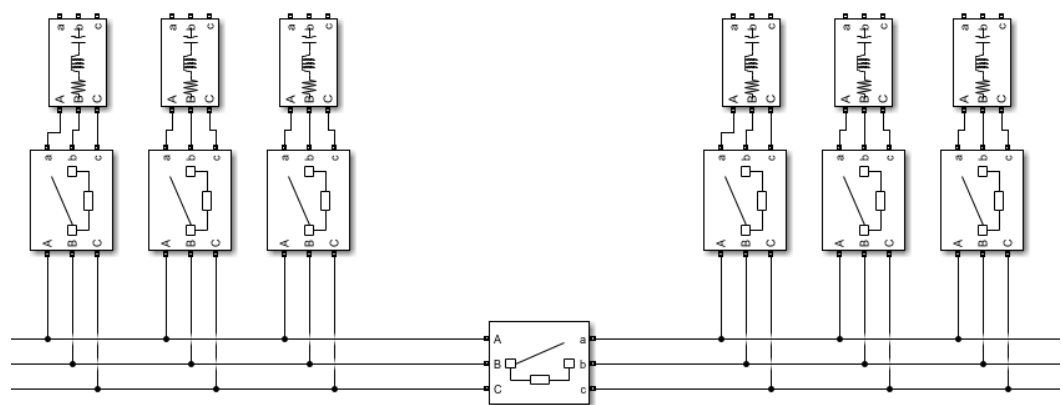


Рисунок 2.13 - Секційний вимикач між 1 з.ш. та 2 з.ш. 35 кВ

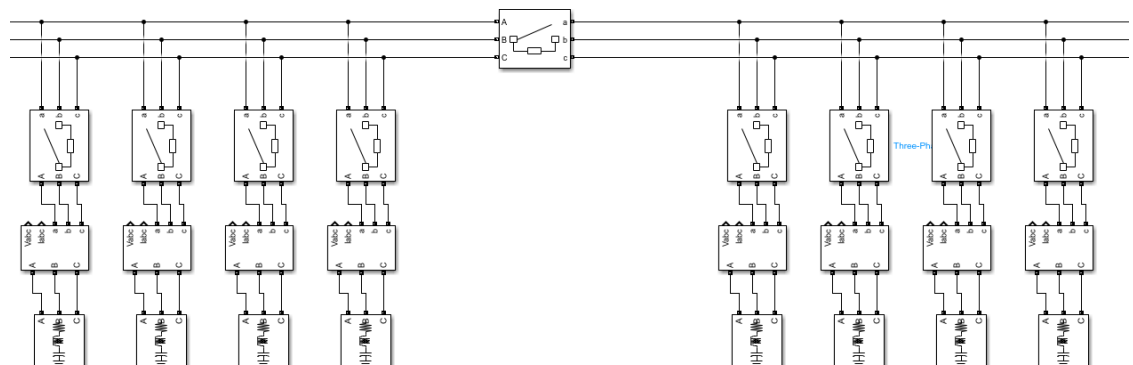


Рисунок 2.14 - Секційний вимикач між 1 з.ш. та 2 з.ш. 10 кВ

2.3 Модель підстанції в середовищі MATLAB

Використовуючи потужний інструментарій MATLAB, було розроблено комплексну модель підстанції шляхом інтеграції всіх структурних компонентів, описаних у розділі 2.2. Отримана модель, представлена на рисунку 2.15, включає:

- основні силові елементи;
- комутаційні апарати;
- контрольно-вимірювальні прилади;

Реалізована модель дозволяє проводити комплексне дослідження роботи підстанції в різних режимах експлуатації. Застосування середовища Simulink дає можливість візуалізувати всі технологічні процеси та взаємодії між окремими елементами системи.

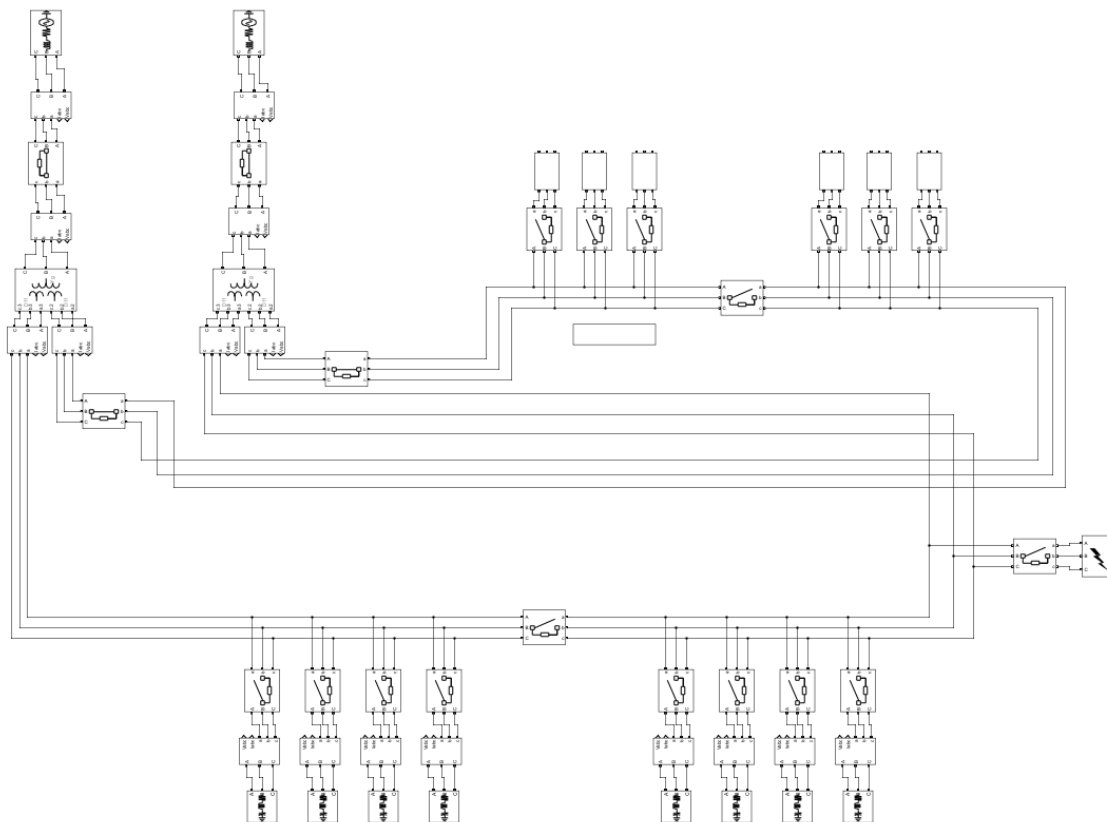


Рисунок 2.15 – Розрахункова модель підстанції 110/35/10 кВ

Для моніторингу основних електротехнічних параметрів використовується спеціалізований блок Powergui. Даний інструмент акумулює дані з усіх вимірювальних блоків MEASUREMENTS, забезпечуючи комплексний аналіз роботи системи.

Як видно з рисунка 2.16, Powergui надає змогу візуалізувати динаміку змін напруги та струму в системі. Це дозволяє оперативно оцінювати стан електрообладнання та виявляти аномалії в роботі мережі.

Функціональні можливості Powergui включають:

- автоматизований збір вимірювальних даних;
- комплексну обробку сигналів;
- наочне представлення результатів;

Отримані результати є важливими для подальшого аналізу ефективності роботи моделі підстанції.

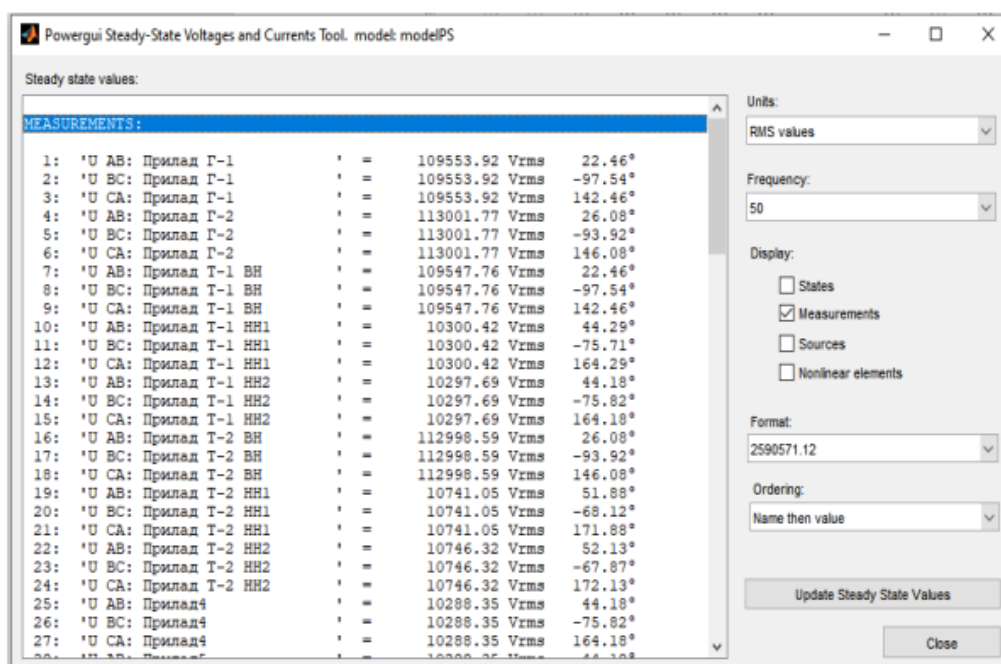


Рисунок 2.16 – Приклад зображення даних у інтерфейсі блоку Powergui

З метою оптимізації обчислювальних процесів при моделюванні підстанції було прийнято рішення про спрощення схеми. Відповідно до цього підходу, у моделі свідомо не враховано фізичні провідники як на шинах високої напруги (110 кВ), так і на розподільчих шинах середньої і низької напруги (35, 10 кВ).

Таке технічне рішення дозволило значно скоротити час розрахунків різних режимів роботи підстанції. Проте важливо зазначити, що це не впливає на точність аналізу основних параметрів системи, оскільки:

- опір ліній не є визначальним фактором для даного дослідження;
- основна увага приділяється роботі ключових елементів системи;
- зберігається можливість аналізу струмів короткого замикання;

Застосоване спрощення є типовим прийомом при моделюванні складних енергетичних систем, коли необхідно збалансувати точність і швидкість обчислень.

Висновки по розділу

У другому розділі дипломного проекту здійснено побудову розрахункової моделі підстанції 110/35/10 кВ із використанням програмного середовища MATLAB/Simulink. Особлива увага приділялася створенню структурованої та функціонально повноцінної моделі, що дає змогу досліджувати роботу підстанції в різноманітних експлуатаційних режимах.

Ключові досягнення розділу:

1. Використання сучасних інструментів моделювання:

Вибір середовища Simulink обґрунтовано його високим рівнем інтеграції засобів моделювання динамічних систем. Завдяки використанню відповідної бібліотеки вдалося реалізувати модель, яка охоплює основні компоненти підстанції: джерела живлення, трансформатори, комутаційні пристрої, навантаження та вимірювальну апаратуру;

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

2. **Моделювання ключових компонентів:**

На основі інженерного підходу були сформовані окремі блоки для:

- Трифазних джерел напруги з можливістю налаштування параметрів;
- Трифазних трансформаторів з опціями зміни схеми обмоток;
- Комутаційної апаратури (вимикачів, роз'єднувачів) для моделювання операцій в мережі;
- Регульованих навантажень, що дозволяють змінювати активну та реактивну складові;
- Вимірювальних засобів, які забезпечують моніторинг основних електричних величин;

3. **Оптимізація структури моделі:**

З огляду на ефективність обчислень, модель було спрощено шляхом виключення фізичних провідників на шинах високої та середньої напруги. Такий підхід сприяв зниженню тривалості симуляції без суттєвої втрати точності аналізу.

4. **Застосування засобів візуалізації:**

За допомогою інструмента Powergui було реалізовано збір та графічне представлення результатів. Це стало підґрунтям для оперативного аналізу динаміки електротехнічних процесів та оцінки стабільності функціонування системи.

5. **Моделювання аварійних режимів:**

Завдяки інтеграції модуля Fault було змодельовано різні сценарії коротких замикань з можливістю варіювання параметрів та тривалості. Це дозволило глибше вивчити реакцію системи в нештатних ситуаціях.

Змодельована система є дієвим інструментом для аналізу функціонування підстанції як у штатних, так і в аварійних режимах.

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПІДСТАНЦІЇ В НОРМАЛЬНИХ І АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ

3.1 Моделювання нормального режиму роботи ПС (схема, навантаження)

Згідно з визначенням нормального режиму роботи електроенергетичних об'єктів, підстанція функціонує у стані, коли всі її компоненти та обладнання працюють у межах встановлених технічних параметрів. У такому випадку електричні системи демонструють стабільну роботу без відхилень від проектної документації.

З технічної точки зору, нормальний режим характеризується:

- напругами та струмами, що знаходяться у межах номінальних значень;
- відсутністю аварійних ситуацій чи технологічних відхилень;
- стабільним електропостачанням споживачів;

Важливим аспектом нормальної експлуатації є дотримання обмежень навантаження – воно не повинно перевищувати 70% від номінальної потужності трансформаторів. У нашому випадку ≤ 90 МВА.

Це забезпечує:

- оптимальний тепловий режим обладнання;
- резерв потужності для покриття пікових навантажень;
- зниження ймовірності перегріву та передчасного зносу;

Проводимо моделювання нормального режиму роботи підстанції при навантаженнях, які не перевищують 70% номінальної потужності трансформаторів.

					141.EK31105.005.ДБ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПІДСТАНЦІЇ В НОРМАЛЬНИХ І АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ	Літ.	Арк.	Акрушів
Розробив		Новик В.О.						
Перевірів		Хоменко О.В.					66	21
Н.контроль		Шполянський О.Г.				НТТУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» ФЕА, гр. ЕК-311		
Затвердив		Марченко А.А.						

Зокрема:

- Навантаження на шинах 110 кВ – близько 80 МВА (з урахуванням 2-ох трансформаторів по 40 МВА);
- Навантаження на шинах 35 кВ – 17 МВА;
- Навантаження на шинах 10 кВ – 11 МВА;

Результати моделювання нормального режиму роботи підстанції представлені на рис. 3.1 та 3.2 та систематизовані у таблиці 3.1. Отримані дані підтверджують стабільність системи та відповідність її роботи проектним характеристикам.

MEASUREMENTS:				
1:	'U AB: Прилад Г-2	' =	113001.72 Vrms	26.08°
2:	'U AB: Прилад4	' =	10495.16 Vrms	47.68°
3:	'U BC: Прилад4	' =	10495.16 Vrms	-72.32°
4:	'U CA: Прилад4	' =	10495.16 Vrms	167.68°
5:	'U AB: Прилад5	' =	10495.16 Vrms	47.68°
6:	'U BC: Прилад5	' =	10495.16 Vrms	-72.32°
7:	'U CA: Прилад5	' =	10495.16 Vrms	167.68°
8:	'U BC: Прилад Г-2	' =	113001.72 Vrms	-93.92°
9:	'U AB: Прилад Г-1	' =	111011.34 Vrms	23.81°
10:	'U CA: Прилад Г-2	' =	113001.72 Vrms	146.08°
11:	'U AB: Прилад Т-1 NH	' =	111006.29 Vrms	23.81°
12:	'U AB: Прилад Т-1 NH1	' =	10474.89 Vrms	46.70°
13:	'U AB: Прилад Т-1 NH2	' =	10498.11 Vrms	47.68°
14:	'U AB: Прилад Т-2 NH	' =	112998.54 Vrms	26.08°
15:	'U AB: Прилад Т-2 NH1	' =	10741.05 Vrms	51.88°
16:	'U AB: Прилад Т-2 NH2	' =	10746.31 Vrms	52.13°
17:	'U AB: Прилад1	' =	10495.16 Vrms	47.68°
18:	'U AB: Прилад10	' =	10738.03 Vrms	51.88°
19:	'U AB: Прилад11	' =	10738.03 Vrms	51.88°
20:	'U AB: Прилад12	' =	10738.03 Vrms	51.88°
21:	'U AB: Прилад13	' =	10738.03 Vrms	51.88°
22:	'U AB: Прилад14	' =	10471.94 Vrms	46.70°
23:	'U AB: Прилад15	' =	10471.94 Vrms	46.70°
24:	'U AB: Прилад16	' =	10471.94 Vrms	46.70°
25:	'U AB: Прилад17	' =	10471.94 Vrms	46.70°
26:	'U AB: Прилад18	' =	10471.94 Vrms	46.70°
27:	'U AB: Прилад19	' =	10471.94 Vrms	46.70°
28:	'U AB: Прилад2	' =	10495.16 Vrms	47.68°
29:	'U AB: Прилад20	' =	10471.94 Vrms	46.70°
30:	'U AB: Прилад21	' =	10471.94 Vrms	46.70°

Рисунок 3.1 – Результати роботи у нормальному режимі

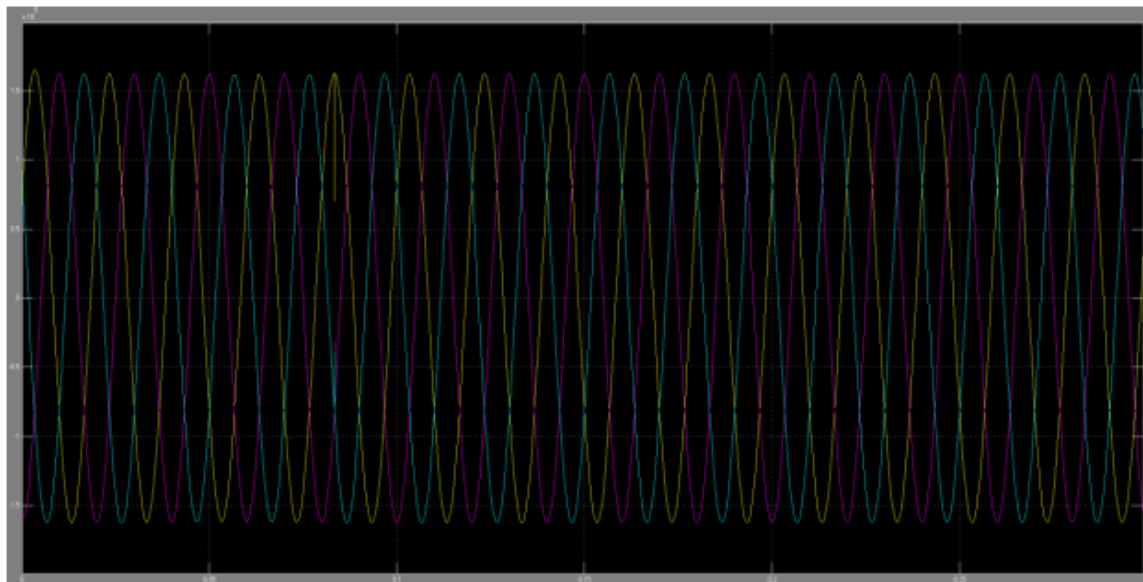


Рисунок 3.2 – Графік напруг при нормальному режимі

Рис. 3.2 відображає графік напруг у нормальному режимі роботи підстанції, на графіку відображено фазні напруги (U_a, U_b, U_c) на шинах 10 кВ, стабільність напруги в межах 10,4-10,5 кВ, симетричність трифазної системи (кути зсуву 120° між фазами) та відсутність спотворень форми хвилі.

Таблиця 3.1 – Результати вимірювання напруги у нормальному режимі

Прилади	Напруга, кВ
Прилад Г-1	111,011
Прилад Г-2	113,001
Прилад Т-1 ВН	111,006
Прилад Т-1 НН1	10,474
Прилад Т-1 НН2	10,498
Прилад Т-2	112,998
Прилад Т-2 НН1	10,741
Прилад Т-2 НН2	10,746
Прилад 1	10,495
Прилад 2	10,495

Продовження Таблиці 3.1

Прилад 3	10,495
Прилад 4	10,495
Прилад 5	10,471
Прилад 6	10,471
Прилад 7	10,471
Прилад 8	10,471

Оскільки навантаження на шинах було зазначене однаковим для спрощення розрахунків, прилади з однієї шини вказують однакове навантаження.

Згідно з технічними вимогами до нормального режиму експлуатації, рівень навантаження підстанції становить 70% від номінальної потужності. Важливо підкреслити, що в таких умовах значення напруги у всіх вузлах споживання залишаються в межах встановлених нормативних меж.

3.2 Моделювання режимів при змінах навантаження у вузлах

Відповідно до принципів адаптивного управління енергосистемами, у даному режимі система автоматично коригує свої параметри для задоволення змінних потреб у електроенергії. Зокрема, регулювання потужності генерації та рівнів напруги дозволяє підтримувати стабільність системи при коливаннях навантаження.

Для дослідження даного режиму було обрано вузли 4 та 5 (Рис. 3.3), де стандартне навантаження по 3.1 МВт було змінено на нерівномірне:

- вузол 4 - 10 МВт;
- вузол 5 - 7 МВт;

Таке рішення прийнято з метою:

1. Моделювання реальних умов експлуатації, де навантаження між вузлами розподілене нерівномірно;
2. Дослідження адаптаційних можливостей системи;
3. Оцінки впливу асиметрії навантаження на параметри мережі;

Важливо зауважити, що попереднє припущення про однакове навантаження у всіх вузлах було зроблено виключно для спрощення попередніх розрахунків. У реальних умовах таке співпадіння є малоймовірним.

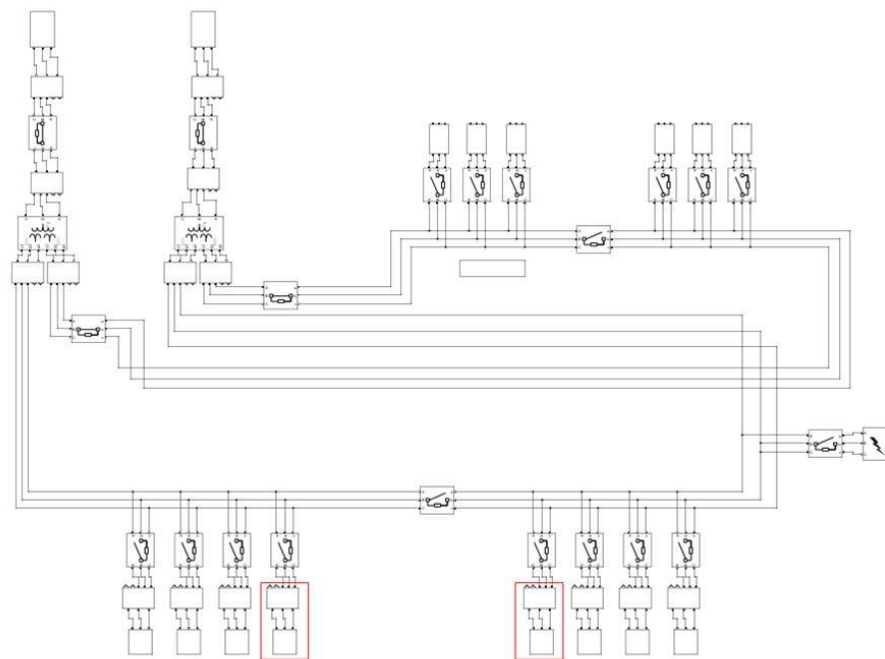


Рисунок 3.3 – Модель з обраними вузлами для зміни навантаження

Аналіз результатів моделювання показав, що зміна навантаження призвела до суттєвих коливань напруги в системі. Зокрема, у вузлах 4 та 5 спостерігалось зниження напруги з 10.495 кВ до 10.334 кВ та 10.337 кВ відповідно.

Слід зазначити, що даний вплив поширився й на суміжні вузли, а також вузли інших шин, демонструючи взаємозалежність параметрів у енергосистемі. Для візуалізації цих змін результати вимірювань представлені

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		70

на Рис. 3.4, а також систематизовані в Табл. 3.2, де вузли зі зміненими параметрами позначені зеленим кольором.

Таким чином, отримані дані підтверджують чутливість системи до змін навантаження та необхідність ретельного моніторингу для підтримки стабільності.

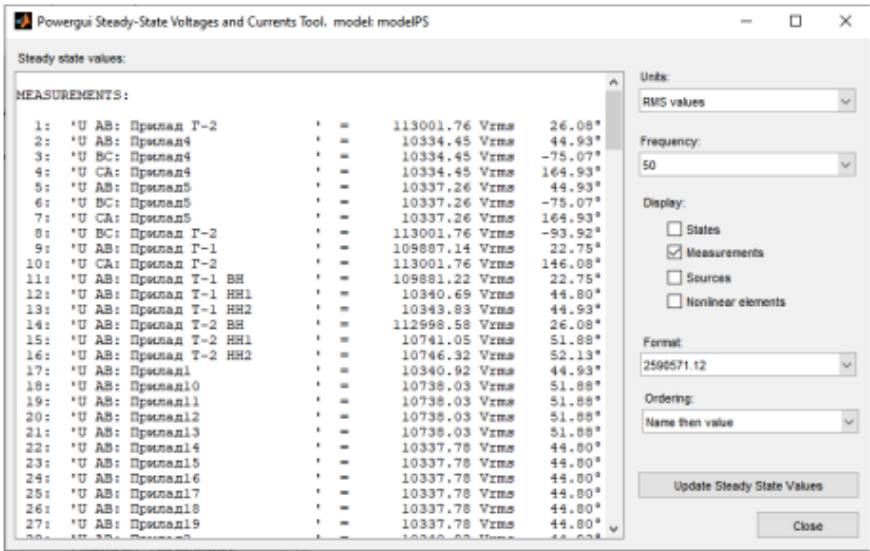


Рисунок 3.4 – Покази приладів при режимі зміни навантаження

Таблиця 3.2 – Покази приладів при режимі зміни навантаження

Прилади	Напруга, кВ
Прилад Г-1	109,887
Прилад Г-2	109,881
Прилад Т-1 ВН	10,340
Прилад Т-1 НН1	10,343
Прилад Т-1 НН2	10,498
Прилад Т-2	112,998
Прилад Т-2 НН1	10,741
Прилад Т-2 НН2	10,746
Прилад 1	10,340

Продовження Таблиці 3.2

Прилад 2	10,340
Прилад 3	10,340
Прилад 4	10,334
Прилад 5	10,337
Прилад 6	10,337
Прилад 7	10,337
Прилад 8	10,337

3.3 Моделювання режимів при КЗ в елементах ПС

З точки зору енергетичної безпеки, режим короткого замикання (КЗ) представляє найбільш критичний сценарій роботи підстанції. Фізична суть явища полягає в утворенні шляху з низьким опором для електричного струму, що провокує різке зростання струмових навантажень із супутнім виділенням великої кількості енергії.

Технологічні аспекти КЗ включають:

- Фазні або фазно-земляні замикання;
- Потенційні причини: деградація ізоляції, механічні пошкодження, зовнішні впливи;
- Негативні наслідки: термічні перевантаження, ризик пожеж, вихід обладнання з ладу;

Згідно з сучасними стандартами, протиаварійний захист підстанцій передбачає:

1. Миттєве виявлення аномалій;
2. Точну локалізацію пошкодженої ділянки;
3. Селективне відключення аварійної зони;

Для дослідження КЗ в MatLab використовується спеціалізований блок (Рис. 3.5), який дозволяє імітувати аварійні умови на конкретній ділянці мережі. У рамках моделювання штучне КЗ було запроваджено на шинах 10 кВ (Рис. 3.6), що відповідає типовими сценаріями тестування захищених систем.

Практична значущість таких досліджень полягає у:

- Верифікації чутливості систем захисту;
- Оцінці динаміки перехідних процесів;
- Оптимізації параметрів апаратів комутації;

Важливо підкреслити, що комплексне моделювання КЗ є обов'язковим етапом проектування сучасних підстанцій, оскільки дозволяє запобігти критичним ситуаціям у реальній експлуатації.

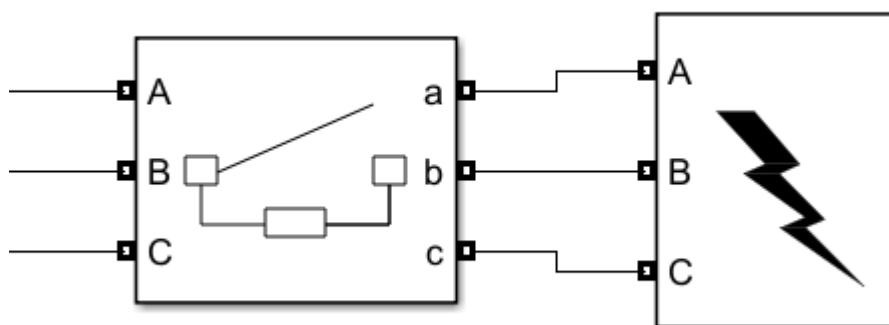


Рисунок 3.5 – Блок для створення режиму КЗ

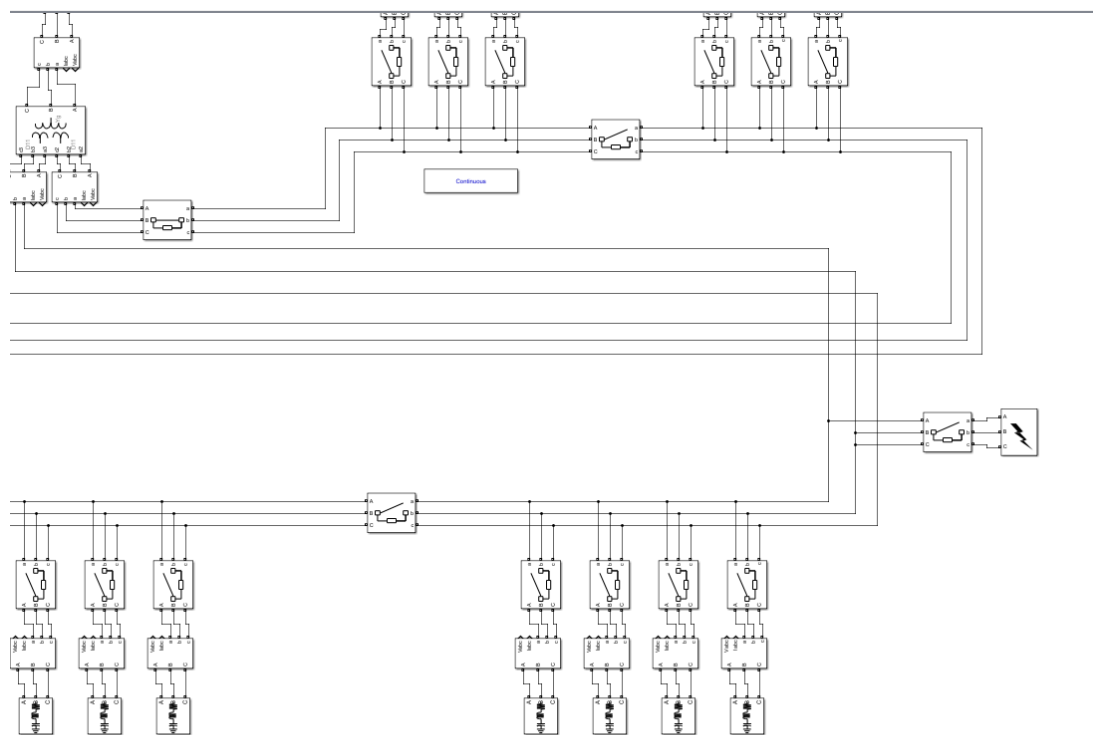


Рисунок 3.6 – Місце введення КЗ

Аналіз динаміки напруги демонструє характерні зміни під час аварійного режиму. У нормальних умовах експлуатації напруга на шині підтримувалася на рівні 10.743 кВ, що відповідає технічним вимогам.

При виникненні короткого замикання спостерігається:

- Різке зниження напруги практично до нульового значення;
- Швидка реакція системи захисту;
- Відновлення номінальних параметрів після ліквідації аварії;

Візуалізація перехідних процесів, яка зображена на рисунках 3.7 та 3.8, чітко фіксує:

1. Момент виникнення аварії;
2. Період дії короткого замикання;
3. Процес відновлення нормального режиму роботи;

Отримані результати підтверджують ефективність систем захисту та здатність підстанції до швидкого відновлення після аварійних ситуацій.

Steady state values:					Units:	
39:	'U	AB: Прилад3	' =	10340.91 Vrms	44.93°	RMS values
40:	'U	AB: Прилад6	' =	10340.91 Vrms	44.93°	
41:	'U	AB: Прилад7	' =	10340.91 Vrms	44.93°	
42:	'U	AB: Прилад8	' =	10855.67 Vrms	54.86°	
43:	'U	AB: Прилад9	' =	10855.67 Vrms	54.86°	
44:	'U	BC: Прилад1	' =	10340.91 Vrms	-75.07°	Frequency: 50
45:	'U	CA: Прилад1	' =	10340.91 Vrms	164.93°	
46:	'U	BC: Прилад2	' =	10340.91 Vrms	-75.07°	
47:	'U	CA: Прилад2	' =	10340.91 Vrms	164.93°	
48:	'U	BC: Прилад3	' =	10340.91 Vrms	-75.07°	
49:	'U	CA: Прилад3	' =	10340.91 Vrms	164.93°	
50:	'U	BC: Прилад6	' =	10340.91 Vrms	-75.07°	
51:	'U	CA: Прилад6	' =	10340.91 Vrms	164.93°	
52:	'U	BC: Прилад7	' =	10340.91 Vrms	-75.07°	
53:	'U	CA: Прилад7	' =	10340.91 Vrms	164.93°	
54:	'U	BC: Прилад8	' =	10855.67 Vrms	-65.14°	
55:	'U	BC: Прилад9	' =	10855.67 Vrms	-65.14°	
56:	'U	CA: Прилад8	' =	10855.67 Vrms	174.86°	
57:	'U	CA: Прилад9	' =	10855.67 Vrms	174.86°	
58:	'U	BC: Прилад10	' =	10855.67 Vrms	-65.14°	
59:	'U	BC: Прилад29	' =	0.39 Vrms	-63.66°	
60:	'U	BC: Прилад28	' =	0.39 Vrms	-63.66°	
61:	'U	BC: Прилад27	' =	0.39 Vrms	-63.66°	
62:	'U	BC: Прилад26	' =	0.39 Vrms	-63.66°	
63:	'U	BC: Прилад25	' =	0.39 Vrms	-63.66°	
64:	'U	BC: Прилад24	' =	10337.77 Vrms	-75.20°	
65:	'U	CA: Прилад10	' =	10855.67 Vrms	174.86°	
66:	'U	BC: Прилад23	' =	10337.77 Vrms	-75.20°	
67:	'U	BC: Прилад22	' =	10337.77 Vrms	-75.20°	
68:	'U	BC: Прилад21	' =	10337.77 Vrms	-75.20°	

Рисунок 3.7 – Результати розрахунку програми в режимі КЗ

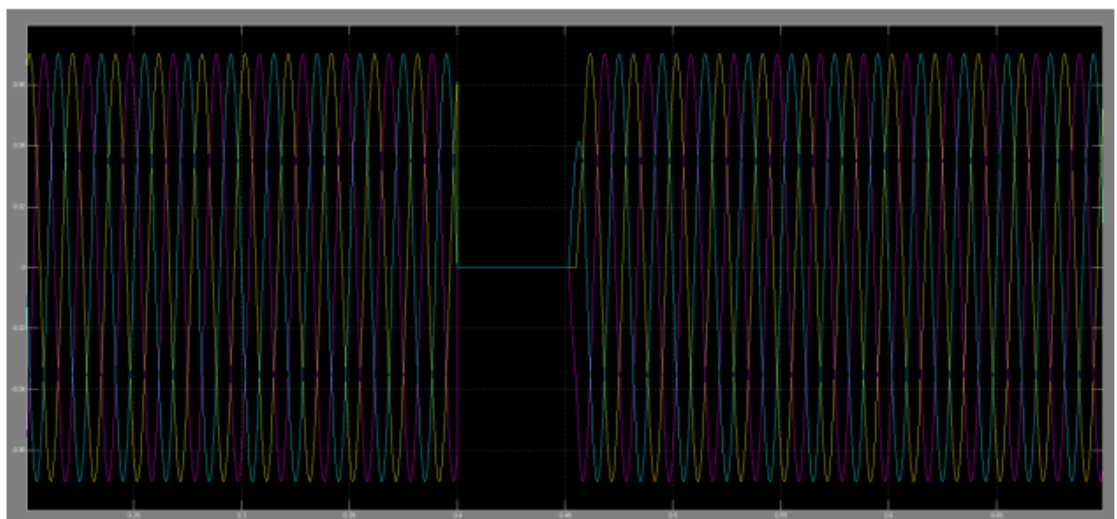


Рисунок 3.8 – Графік напруг при КЗ

На рис. 3.8 наведено графік напруги під час КЗ, виміри виконувались на шинах 10 кВ (вузол, де було імітовано КЗ). Виконавши виміри отримали:

- Різке падіння напруги до ~ 0 кВ у момент КЗ ($t=0,1$ сек.);
- Тривалість КЗ – 0,1 сек.;
- Відновлення напруги після ліквідації КЗ;
- Перехідні процеси під час відновлення нормальної роботи підстанції;

3.4 Моделювання післяаварійного режиму після відключення трансформатора

Згідно з експлуатаційними вимогами, відключення трансформатора може бути викликане різними факторами, включаючи:

- Планові ремонтні роботи;
- Аварійні ситуації;
- Технічне обслуговування;

При такому відключенні спостерігаються суттєві зміни параметрів системи, такі як коливання напруги, зміни струмових навантажень та варіації розподілу потужностей.

Для підтримки стабільності системи необхідно:

1. Відключити пошкоджений трансформатор;
2. Активувати секційні вимикачі;
3. Перерозподілити навантаження на робочий трансформатор;

У рамках моделювання було запроваджено штучне відключення трансформатора (Рис. 3.9) з чітко визначеною послідовністю дій:

1. Нормальний режим роботи;
2. Імітація аварійної ситуації;
3. Відключення трансформатора;
4. Включення відокремлювача та секційних вимикачів;
5. Перехід у післяаварійний режим;

Технічна реалізація передбачала точне налаштування часових параметрів для роз'єднувачів, відокремлювачів і секційних вимикачів.

Таке моделювання дозволяє оцінити:

- Час відновлення системи;
- Ефективність перерозподілу навантаження;
- Стабільність роботи в післяаварійному режимі;

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

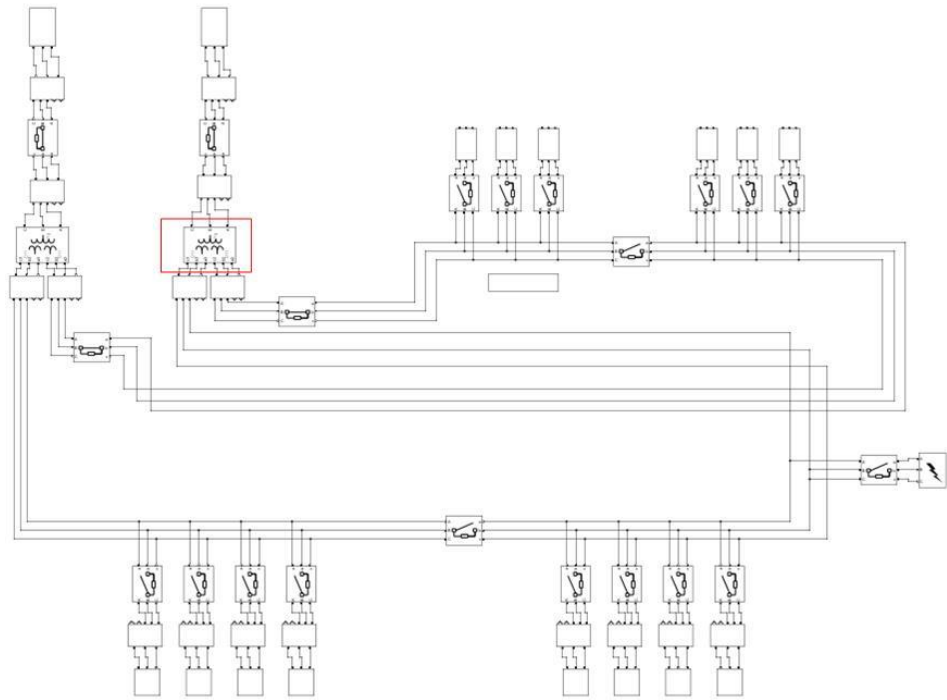


Рисунок 3.9 – Силовий трансформатор знаходиться в аварійному стані

Block Parameters: Three-Phase Breaker9

Three-Phase Breaker (mask) (link)

Implements a three-phase circuit breaker. When the external switching time mode is selected, a Simulink logical signal is used to control the breaker operation.

Parameters

Initial status: open

Switching of:

☒ Phase A ☒ Phase B ☒ Phase C

Switching times (s): [2.5 2.51 10] ☐ External

Breaker resistance Ron (Ohm): 0.01

Snubber resistance Rs (Ohm): 1e6

Snubber capacitance Cs (F): inf

Measurements None

OK Cancel Help Apply

Рисунок 3.10 – Налаштування секційного вимикача

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

Секційний вимикач на шині 10 кВ є критично важливим елементом підстанції. Його основне завдання полягає в оперативному управлінні електричними колами шляхом розділення або об'єднання різних ділянок мережі.

Конструктивні особливості даного пристрою включають:

- Герметичний корпус;
- Контактну систему (стаціонарні та рухомі контакти);
- Механізм приводу;
- Систему керування;

Технічний принцип роботи ґрунтується на забезпеченні надійного електричного контакту у замкнутому стані, швидкому розриві кола при вимкненні та ефективній ізоляції у відключеному положенні.

Функціональні можливості секційного вимикача:

- Оперативне перемикання між ділянками мережі;
- Локалізація аварійних зон;
- Забезпечення безпеки під час ремонтних робіт;
- Оптимізація розподілу навантаження;

У контексті захисту системи вимикач виконує ключову роль попередження поширення аварій, обмеження зони впливу коротких замикань та забезпечення селективності захисту.

Налаштування параметрів секційного вимикача, представлені на рисунку 3.10, включають:

- Час спрацьовування
- Струмові уставки
- Логіку взаємодії з іншими елементами захисту

Таким чином, секційний вимикач на шині 10 кВ є важливим компонентом, що забезпечує гнучкість управління, надійність електропостачання та безпеку експлуатації підстанції.

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відокремлювач на стороні 110 кВ є ключовим елементом комутаційного комплексу підстанції. Його основне призначення полягає у фізичному відокремленні ділянок мережі для забезпечення безпеки під час технічного обслуговування та ремонтних робіт.

Конструктивні особливості даного пристрою включають:

- Систему контактів (рухомих і стаціонарних);
- Механізм комутації;
- Систему ізоляції;
- Пристрій керування;

Функціональне призначення відокремлювача охоплює:

- Безпечне відключення ділянок для обслуговування;
- Перерозподіл потоків потужності;
- Локалізацію аварійних ділянок;
- Забезпечення видимої межі робіт;

У практичній експлуатації відокремлювач дозволяє:

- Виконувати планові перемикання;
- Проводити ремонтні роботи без напруги;
- Забезпечувати безпеку персоналу;
- Підвищувати надійність електропостачання;

Налаштування робочих параметрів відокремлювача, представлені на рисунку 3.11, включають в себе час спрацьовування, послідовність операцій і логіку взаємодії з іншим обладнанням.

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						79
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

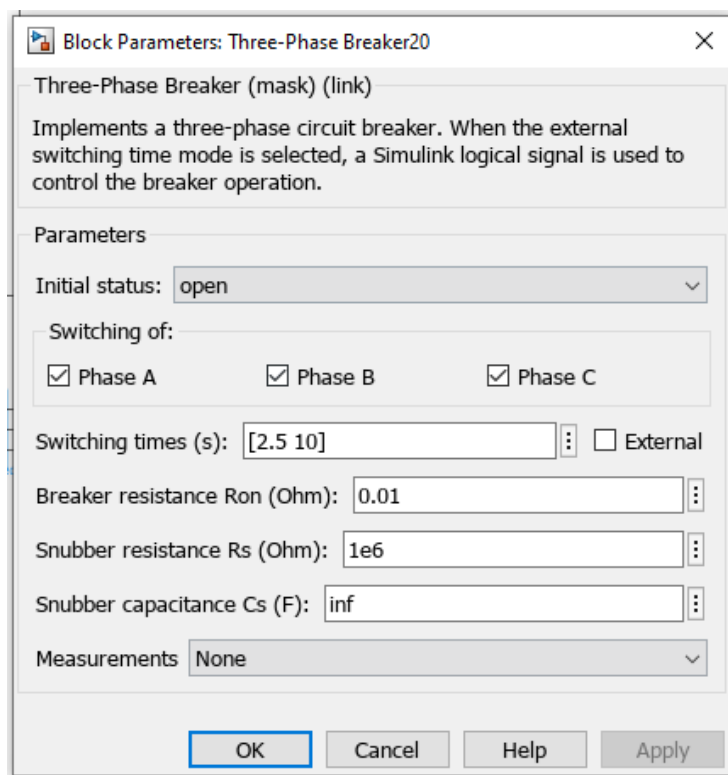


Рисунок 3.11 – Налаштування відокремлювача

Роз'єднувач, встановлений між джерелом напруги та силовим трансформатором, відіграє критичну роль у схемі підстанції. Його ключове призначення полягає у фізичному відокремленні трансформатора від мережі живлення шляхом створення видимого повітряного проміжку між контактами.

У нормальному режимі роботи роз'єднувач перебуває у замкнутому стані, забезпечуючи:

- Безперебійне електропостачання;
- Надійне з'єднання між джерелом та трансформатором;
- Стабільність роботи всієї системи;

При необхідності проведення технічних робіт роз'єднувач виконує такі функції:

1. Фізичне відключення трансформатора від мережі;
2. Створення видимого розриву для візуального контролю;
3. Забезпечення безпечного доступу до обладнання;

Технічні характеристики, представлені на рисунку 3.12, охоплюють:

- Номінальні параметри напруги та струму;
- Час перемикання;
- Кліматичну стійкість;

Результати моделювання, відображені на рисунках 3.13-3.15, демонструють:

- Процес перемикання роз'єднувача;
- Динаміку зміни параметрів системи;
- Ефективність ізоляції трансформатора;

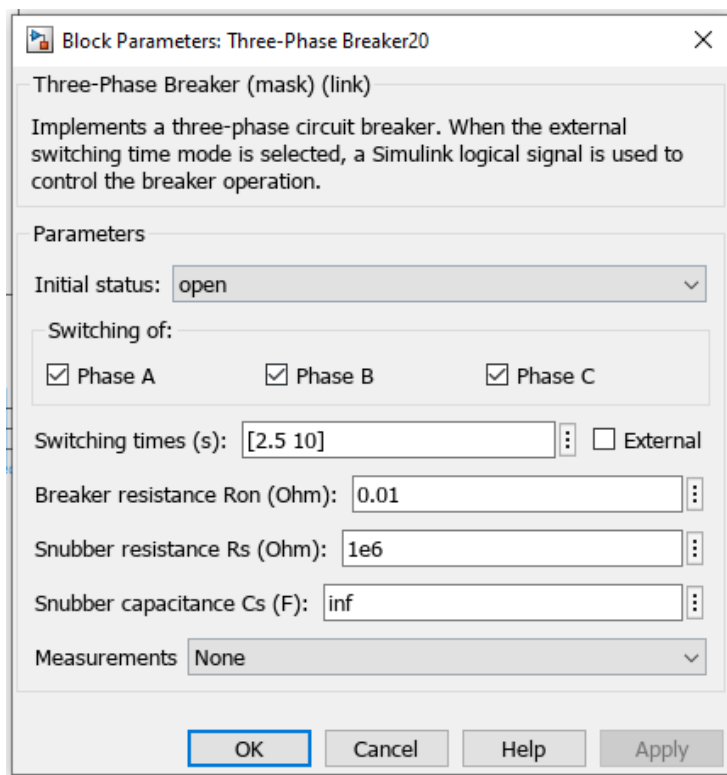


Рисунок 3.12 – Налаштування роз'єднувача

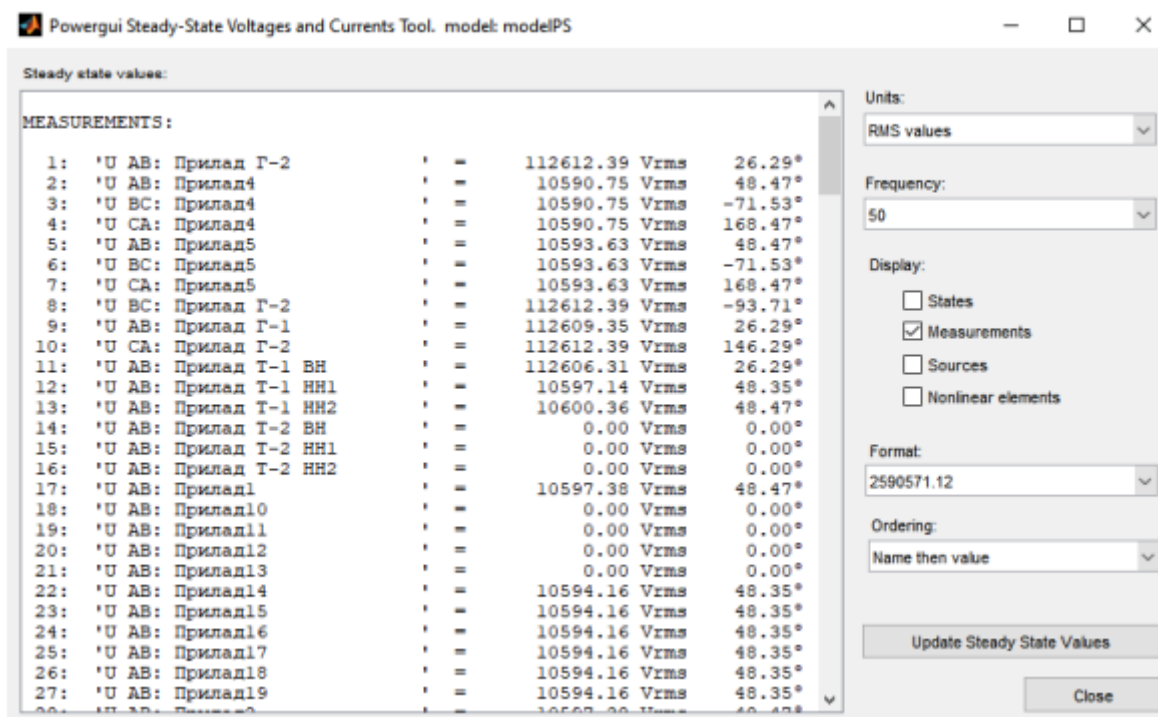


Рисунок 3.13 – Значення напруги в момент відключення від трансформатору

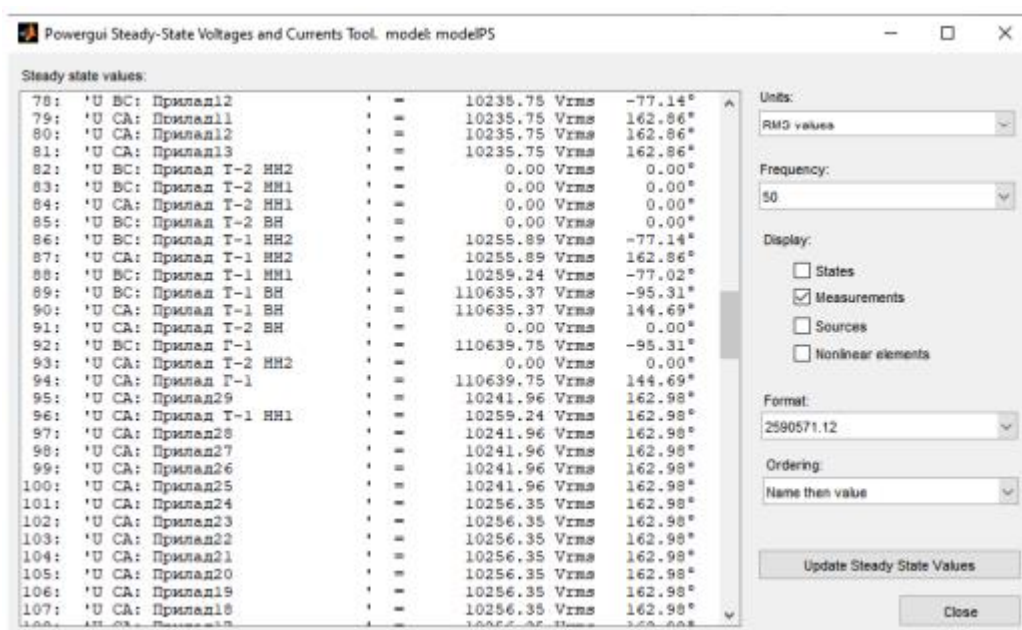


Рисунок 3.14 – Значення перенапруг після спрацювання секційних вимикачі та відокремлювачів



Рисунок 3.15 – Графік напруг в процесі відключення трансформатора

Рис. 3.15 ілюструє графік напруг під час відключення трансформатора. На даному графіку показано:

- початковий стан ($t < 2,5$ сек.) – нормальна робота, напруга ~ 112 кВ;
- момент відключення ($t = 2,5$ сек.) – різке падіння напруги;
- перехідний процес ($2,5 < t < 10$ сек.) – коливання напруги;
- новий усталений режим ($t > 10$ сек.) – напруга на ВН $\sim 110,6$ кВ, напруга на шинах 10 кВ $\sim 10,26$ кВ;

Аналіз перехідних процесів показує, що при відключенні трансформатора спостерігається тимчасове падіння напруги до нульових значень. Після спрацювання захистів система стабілізується, а напруги відновлюються до номінальних рівнів.

У результаті перерозподілу навантаження на робочий трансформатор зафіксовано такі зміни:

- Зниження напруги на обмотці ВН з 112.61 кВ до 110.64 кВ;
- Коливання напруги у вузлі 8 з 10.59 кВ до 10.26 кВ;

Важливо підкреслити, що всі зареєстровані значення залишаються в межах допустимих відхилень, що підтверджує правильність розрахунків

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
						83
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

системи, надійність вибраного обладнання та ефективність заходів з підтримки стабільності

Отримані результати свідчать про здатність системи до швидкого відновлення після аварійних ситуацій та підтверджують надійність запроєктованої схеми.

Висновки по розділу

У третьому розділі дипломного проекту було проведено моделювання роботи підстанції 110/35/10 кВ у різних режимах: нормальному, режимі зміни навантаження, аварійному та післяаварійному. Отримані результати дозволили оцінити стабільність системи, ефективність захисту та можливість швидкого відновлення після аварійних ситуацій.

Ключові результати дослідження:

1. Нормальний режим роботи:

Підстанція демонструвала стабільність при навантаженні, що не перевищувало 70% номінальної потужності трансформаторів. Напруга на всіх рівнях (110 кВ, 35 кВ, 10 кВ) залишалася в межах допустимих значень, що підтверджує відповідність обладнання проектним вимогам. Наприклад, напруга на шинах 10 кВ становила близько 10.5 кВ, що відповідає нормативним показникам.

2. Режим зміни навантаження:

Моделювання нерівномірного навантаження (10 МВт у вузлі 4 та 7 МВт у вузлі 5) виявило чутливість системи до змін. Напруга в цих вузлах знизилася до 10.33–10.34 кВ, що свідчить про вплив асиметрії навантаження на параметри мережі. Однак система продемонструвала здатність адаптуватися до таких умов без критичних відхилень.

3. Аварійний режим (коротке замикання):

Імітація КЗ на шинах 10 кВ призвела до різкого падіння напруги майже до нуля. Система захисту ефективно спрацювала, локалізавши аварію та

					141.ЕКЗ1105.005.ДБ	Арк.
						84
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запобігши поширенню пошкоджень. Після ліквідації КЗ напруга швидко відновилася до номінальних значень, що підтверджує надійність захистів.

4. Післяаварійний режим (відключення трансформатора):

Відключення одного з трансформаторів і перерозподіл навантаження на інший призвели до тимчасових коливань напруги (наприклад, зниження з 112.61 кВ до 110.64 кВ на обмотці ВН). Проте система продемонструвала здатність підтримувати стабільність у нових умовах, а всі параметри залишилися в межах допустимих відхилень.

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
						85
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У сучасних умовах розвитку електроенергетики особливе значення набувають дослідження, спрямовані на підвищення надійності та ефективності роботи електричних підстанцій. У даному дипломному проекті було розроблено розрахункову модель підстанції 110/35/10 кВ та проведено комплексний аналіз її роботи в різних режимах за допомогою програмного комплексу MATLAB/Simulink. Отримані результати дозволяють зробити низку важливих висновків щодо функціонування та оптимізації подібних об'єктів.

Насамперед, слід підкреслити, що основним об'єктом дослідження виступила підстанція 110/35/10 кВ, яка є ключовою ланкою у системі передачі та розподілу електроенергії. У ході роботи було детально проаналізовано її технічні характеристики, включаючи схему електричних з'єднань, параметри силових трансформаторів, комутаційного та захисного обладнання. Важливим етапом стало проведення розрахунків струмів короткого замикання, які підтвердили відповідність обраного обладнання експлуатаційним вимогам. Наприклад, максимальні значення періодичної складової струму КЗ на шинах 110 кВ склали 10,546 кА, що знаходиться в межах допустимих норм для встановленого обладнання.

Важливим аспектом роботи стало розроблення математичної моделі підстанції в середовищі MATLAB/Simulink. Завдяки використанню сучасних інструментів моделювання вдалося відтворити основні компоненти системи, включаючи джерела живлення, трансформатори, комутаційні пристрої та навантаження. Модель продемонструвала високу точність у відтворенні реальних процесів, що дозволило провести детальний аналіз роботи підстанції в різних режимах.

Особливу увагу приділено моделюванню аварійних режимів, зокрема коротких замикань та відключення трансформатора. Результати показали, що система ефективно реагує на аварійні ситуації: при КЗ на шинах 10 кВ напруга

					141.EKз1105.005.ДБ	Арк.
						86
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

швидко відновлюється після ліквідації аварії, а відключення трансформатора супроводжується стабілізацією параметрів за рахунок перерозподілу навантаження. Це свідчить про надійність запропонованих рішень та ефективність систем захисту.

Крім того, дослідження режимів зміни навантаження підтвердило чутливість системи до зовнішніх впливів. Наприклад, нерівномірний розподіл навантаження призвів до зниження напруги в окремих вузлах, проте система продемонструвала здатність адаптуватися до таких умов без критичних відхилень. Це підкреслює важливість постійного моніторингу та оптимізації параметрів мережі.

У цілому, проведене дослідження підтвердило доцільність використання програмного комплексу MATLAB/Simulink для моделювання та аналізу роботи підстанцій. Розроблена модель може бути використана для подальших досліджень, оптимізації режимів роботи та підвищення надійності енергетичних систем. Результати проекту мають практичну цінність для інженерів-енергетиків та можуть слугувати основою для вдосконалення існуючих підстанцій або проектування нових об'єктів.

Таким чином, дипломний проект досяг поставленої мети, продемонструвавши ефективність запропонованих рішень та можливість їх застосування у реальних умовах. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення моделі, зокрема через врахування додаткових факторів, таких як вплив кліматичних умов або інтеграція відновлюваних джерел енергії.

					141.EK31105.005.ДБ	Арк.
						87
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Технічні характеристики трансформатора ТДН-400000/110 [Електронний ресурс]
Режим доступу: <https://leg.co.ua/info/transformatory/spravochnye-dannye-po-transformatoram-s-vysshim-napryazheniem-110-kv.html>
(дата звернення: 27.05.2025).
2. Збірні і обхідні шини [Електронний ресурс]
Режим доступу: <https://makemone.ru/uk/instrumenty-i-materialy/sbornye-iobhodnye-shiny-sekciya-sistemy-sbornyh-shin.html> (дата звернення: 27.05.2025).
3. Комутаційне обладнання станції [Електронний ресурс]
Режим доступу: <https://rada.energy/product-category/komutaczijne-obladnannya/> (дата звернення: 28.05.2025).
4. Розрядники та обмежувачі перенапруги [Електронний ресурс]
Режим доступу: <https://elektrovoz.com.ua/ua/razryadniki-ops> (дата звернення: 28.05.2025).
5. Клименко Б. В. Електричні апарати. Електромеханічна апаратура комутації, керування та захисту. Загальний курс : навч. посібник / Б. В. Клименко. – Харків : Точка, 2012. – 340 с
6. Електровимірювальні прилади на електричних станціях, підстанціях та в електричних мережах. [Електронний ресурс]
Режим доступу:
https://bstudy.net/657301/tehnika/elektroizmeritelnye_pribory_elektricheskikh_s_tantsiyah_podstantsiyah_elektricheskikh_setyah (дата звернення: 28.05.2025).
7. Релейний захист і автоматика: Навч. посібник / С. В. Панченко, В. С. Блиндюк, В. М. Баженов та ін.; за ред. В. М. Баженова. – Харків: УкрДУЗТ, 2020. – Ч. 1. – 250 с.

					<i>141.EK31105.005.ДБ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		88

8. Пакет прикладних програм MATLAB [Електронний ресурс]
Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/MATLAB> (дата звернення: 29.05.2025).
9. М.Д. Гераїмчук, Ю.Ф. Лазарєв, Т.О. Толочко Моделювання систем у середовищі MATLAB-SIMULINK: Комп'ютерний практикум. – Київ, 2006. – 175с
- 10.Лозинський А., Мороз В., Паранчук Я. Розв'язування задач електромеханіки в середовищах пакетів MathCAD і MATLAB : Навчальний посібник. Львів: Видавництво Державного університету «Львівська політехніка», 2000. – 166 с

					141.ЕКз1105.005.ДБ	Арк.
						89
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		