

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Управління енергетичними процесами

Інтелектуальні системи енергопостачання

Пояснювальна записка  
до кваліфікаційної роботи  
магістра

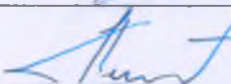
на тему: Удосконалення алгоритму роботи мікропроцесорного захисту тягової мережі постійного струму  
за освітньою програмою Електротехнічні системи електроспоживання  
зі спеціальності: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Виконав: студент групи ЕС2121:



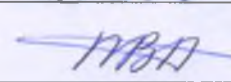
/ Віталій МОДЛІЦЬКИЙ /

Керівник:



/ доцент Віталій ЛЯШУК /

Нормоконтролер:



/ доцент Віталій ПЕРЦЕВИЙ /

Засвідчую, що у цій роботі немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент

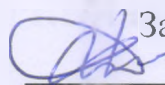


Дніпро – 2022 рік

Міністерство освіти і науки України  
Український державний університет науки і технологій

Факультет: Управління енергетичними процесами  
Кафедра: Інтелектуальні системи енергопостачання  
Рівень вищої освіти: Другий (магістерський)  
Освітня програма: Електротехнічні системи електроспоживання  
Спеціальність: 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

 Завідувач кафедри ІСЕ  
Дмитро БОСІЙ

Дата 05.09.22

**ЗАВДАННЯ**

на кваліфікаційну роботу магістр з електротехнічних систем  
електроспоживання

студенту МОДЛІЦЬКОМУ Віталію Олеговичу

1. Тема роботи: “Удосконалення алгоритму роботи мікропроцесорного захисту тягової мережі постійного струму”.

Керівник роботи: Ляшук Віталій Михайлович, к.т.н., доцент

затвержені наказом від

" 14 " 04 2022 р. № 318ст

2. Строк подання студентом роботи: 12.12.2022 р.

3. Вихідні дані до роботи:

Схема типових підстанцій.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно опрацювати):

4.1 Аналіз мікропроцесорних пристроїв захисту.

4.2 Аналіз сучасного обладнання мікропроцесорного захисту.

4.3. Удосконалення алгоритму роботи мікропроцесорного захисту

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 1. Схеми мікропроцесорних захистів. 2. Схеми тягових підстанцій.

3. Моделі різних схем живлення фідерної зони. Дослідження поведінки сталої часу. 3. Модель типової тягової підстанції. Результати дослідження поведінки сталої часу з впливом фільтр-пристроїв. Аналіз алгоритму покращення мікропроцесорного захисту.

6. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Завдання видав: (підпис консультанта, дата)	Завдання прийняв: (підпис студента, дата)
1			
2			

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

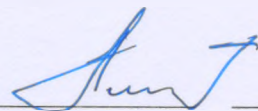
№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	ВСТУП	10.12.22	
2	1 АНАЛІЗ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	01.09.22	
3	АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	01.11.22	
4	ПОКРАЩЕННЯ АЛГОРИТМУ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ	01.12.22	
5	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	10.12.22	
6	Подання кваліфікаційної роботи до кафедри	14.12.22	
7	Захист кваліфікаційної роботи на засіданні Екзаменаційної комісії	20.12.22	

Студент



Віталій МОДЛІЦЬКИЙ





Керівник роботи



Віталій ЛЯШУК

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1. АНАЛІЗ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ .....	10
1.1 Основні вимоги до захисту тягової мережі .....	10
1.2 Аналіз основних характеристик мікропроцесорних (цифрових) захистів....	11
1.3 Опис мікропроцесорного релейного захисту .....	13
1.3.1 Структурна схема мікропроцесорного пристрою та мікропроцесору.....	13
1.3.2 Перетворення аналогових сигналів .....	15
1.3.3 Вхідні бінарні сигнали .....	16
1.3.4 Перетворення та зберігання інформації МРЗ.....	17
1.3.5 Блок живлення та блок індикації МРЗ .....	18
2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ .....	19
3 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ.....	28
3.1.1 Simulink MatLab.....	28
3.2 Математичне описання блоку розрахунку сталої часу .....	33
3.3 Розрахунок сталої часу при різних схемах живлення .....	37
3.3.1 Схема одностороннього живлення .....	37
3.3.2 Схема двостороннього живлення з одноколійною ділянкою .....	39
3.3.3 Схема двостороннього живлення з двоколійною ділянкою .....	41
3.3.4 Схема двостороннього живлення з КЗ на ТП-2 .....	46
3.3.5 Схема перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму .....	49
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ .....	55
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ .....	56

					02.15.ЕС2121.КРМ.2022 - ПЗ				
Зм.	Арк	№ документа	Підпис	Дата					
Розробник		Модліцький		19.12.22	Удосконалення алгоритму роботи мікропроцесорного захисту тягової мережі постійного струму	Літера	Аркуш	Аркушів	
Консульт.						М	Д	6	57
Керівник		Ляшук		19.12.22		<b>МОНУ, УДУНТ, ІСБ, гр. ЕС2121</b>			
Н. контр.		Перцевий							
Зав. каф.		Босий		19.12.22					

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 57 сторінок, складається з трьох розділів та містить 43 ілюстрації, 20 таблиць, 12 використаних джерел.

Метою роботи є дослідження зміни сталої часу в різній геометрії контактної мережі та різних схемах живлення при аварійних режимах. Розглянуто питання швидкості змінення сталої часу, характер її поведінки в системах з різними параметрами, розглянута можливість використання даного параметру для виконання функції телеблокування. Для цього створені імітаційні моделі постійного струму з різними схемами живлення та формою контактної мережі. Проведено розрахунки сталої часу для різних схем живлення, досліджено вплив струму ділянки та відстані до місця короткого замикання на сталу часу.

Ключові слова: ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, СТАЛА ЧАСУ, ТЕЛЕБЛОКУВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, МІКРОПРОЦЕСОРНИЙ ЗАХИСТ, РЕЛЕЙНИЙ ЗАХИСТ, ФІЛЬТР-ПРИСТРІЙ

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Електрифіковані залізниці є важливим транспортним сполученням. Тому вони мають задовольняти двом основним критеріям: безперебійності та надійності роботи. При експлуатації змінюються умови роботи тягової мережі через особливості передачі електроенергії електрорухомому складу, який постійно змінює своє положення. Тому під час експлуатації тягової мережі цілком імовірні випадки порушення нормального режиму роботи. Самим розповсюдженим випадком виникнення аварійного режиму роботи тягової мережі є виникнення короткого замикання.

Ступінь пошкодження елементів тягової мережі залежить від швидкості відключення короткого замикання. Швидкість відключення теж залежить від багатьох параметрів, як відстань до місця короткого замикання, геометрії контактної мережі, та внутрішніх параметрів тягової мережі. Поява мікропроцесорного захисту внесла важливий вклад в ідентифікацію короткого замикання в перші мілісекунди після його виникнення. Основним і самим дієвим способом відключення до сьогодні являється максимальний струмовий захист. Складність його експлуатації полягає у низькій швидкодії, що шкодить контактній мережі.

Саме тому постає питання вдосконалення даного виду захисту. Для цього вводиться новий параметр для слідкування МРЗ, тобто стала часу, яка змінюється швидше, ніж струм в тяговій мережі і дає можливість визначення приблизного місця до короткого замикання та виконання функції телеблокування (щось на кшталт дистанційного захисту в мережах змінного струму).

Однак постає питання впливу на даний параметр елементів підстанцій, таких як фільтр-пристрої, що містять в собі індуктивний та ємнісний вплив та самого короткого замикання, що носить індуктивний вплив на ділянку. Для розрахунку даних впливів на сталу часу було створено імітаційні моделі в спрощеному та ускладненому варіантах в середовищі MatLab. Це дозволило

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оперативно отримати необхідні дані для дослідження при різних схемах живлення тягової мережі.

**Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри.** Обране дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням науково-дослідних робіт в Українському державному університеті науки і технологій.

**Мета і завдання роботи.** Провести аналіз зміни сталої часу при різній геометрії контактної мережі та різних схемах живлення, яка виникає під час перехідних процесів.

**Об'єкт дослідження** – тягова мережа постійного струму.

**Предмет дослідження** – перехідні процеси та стала часу при різних схемах живлення.

**Методи дослідження** – моделювання коротких замикань та математичне дослідження сталої часу в тяговій мережі постійного струму.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Для дослідження перехідних процесів та сталої часу були створені імітаційні моделі в середовищі MatLab. Використовуючи моделі були проаналізовані зміни сталої часу при різних схемах живлення.

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі отриманих даних можна розглянути зміну сталої часу при різних умовах. Даний аналіз наочно показує, що введення до діагностики мікропроцесорним захистом даного параметру пришвидшує його швидкодію та селективність.

**Особистий внесок здобувача.** Постановка мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Здобувачем самостійно створені моделі перехідних процесів при різних схемах живлення, створена математична модель визначення сталої часу, проведені розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих даних під час моделювання.

#### **Публікації.**

V. Modlitskiy., Improvement of the microprocessor protection algorithm of the DC traction network /Транспортна інженерія [електронний ресурс]: збірник тез

									02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
										8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

доповідей секції 14 міжнародна науково-практична конференція студентів і молодих вчених імені Георгія Кірпи «Сучасні транспортні технології», яка проводилась Львівським інститутом Українського державного університету науки і технологій 08 грудня 2022 р. – Львів , 2022. – 139-140 с.

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. АНАЛІЗ МІКРОПРОЦЕСОРНИХ ПРИСТРОЇВ ЗАХИСТУ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Релейний захист [1] виконує важливі функції по запобіганню чи зменшенню шкоди, яка може виникнути в системах електропостачання через короткі замикання, та при ненормальних режимах роботи. Саме тому він має суттєвий вплив на довговічність системи електропостачання та стійкість електроживлення приймачів.

## 1.1 Основні вимоги до захисту тягової мережі

Захист повинен відповідати таким основним вимогам, як селективність, швидкодія, чутливість, надійність, простота і економічність [2].

Під терміном **селективність** розуміється здатність пристрою релейного захисту реагувати на пошкодження в межах того об'єкта електроенергетичної системи, для захисту якого він призначений. В свою чергу, селективність поділяється на замикання в межах захисної зони – внутрішнє (захист повинен відключати тільки ушкоджену ділянку мережі), та за межами цієї зони – зовнішнє (захист повинен вимикати тільки аварійні режими, не спрацьовуючи від навантажень).

Під терміном **швидкодія** розуміється властивість релейного захисту, яка полягає у відключенні пошкоджених ділянок з мінімально можливою витримкою часу, так як швидке відключення пошкодженого обладнання чи ділянки електричної установки запобігає або зменшує розміри пошкоджень.

Під терміном **чутливість** розуміється властивість захисту надійно спрацьовувати при коротких замиканнях в кінці ділянки, що захищається, при мінімальному режимі роботи системи.

Під терміном **надійність** розуміється постійна готовність захисту до роботи та безвідмовність усіх елементів системи. Оцінюється вона часом наробітку на відмову. Для підвищення надійності заздалегідь встановлюють резервний захист, що спрацьовує у випадках відмовлення основної системи.

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 1.2 Аналіз основних характеристик мікропроцесорних (цифрових) захистів

Сучасні фірми виробники релейного захисту закінчують випуск електромеханічних та електронних реле і пристроїв, переходячи на мікропроцесорну базу. Даний перехід не призводить про зміни принципів РЗ, а лише розширює її функціональні можливості, спрощуючи її експлуатацію та вартість. Через це мікропроцесорні пристрої швидко займають місце застарілих електромеханічних та електронних реле.

Лідерами виробниками в сфері мікропроцесорних пристроїв РЗА [4] є SIEMENS, ПЛУТОН, РЕЛСіС «КИЇВПРИЛАД», НІЕФА-ЕНЕРГО, ALSTOM, GENERAL ELECTRIC, ABB (більше використовується в нетяговій енергетиці). Дані компанії виготовляють цифровий захист високої вартості, проте їх рентабельність обумовлена високими технічними характеристиками та багатофункціональністю. Основні характеристики мікропроцесорного захисту значно вищі, ніж електромеханічних чи електронних. Так, коефіцієнт повернення вимірювальних органів складає 0,95–0,96, апаратна похибка – не більше 2–5 %, потужність, споживана від вимірювальних ТТ і ТН, становить 0,1–0,5 В·А.

Сучасні МРЗ поєднують в собі функції релейного захисту, вимірювання, регулювання та управління електроустановкою. В цифрових РЗА з'являється можливість переходу до нових вимірювальних перетворювачів струму і напруги на основі використання оптоелектронних датчиків, трансформаторів без феромагнітних сердечників, тощо. Такі перетворювачі більш технологічні у виробництві, мають високі метрологічні характеристики, проте мають малу вихідну потужність.

Основні **переваги** введених цифрових реле на електроенергетичних об'єктах [2], [3]:

а) Багатофункціональність МРЗ. Завдяки своїм малим розмірам мікропроцесорний захист заміняє до 20 аналогових реле, а також декілька вимірювальних приладів;

									Арк.
									11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.265М.РД.2022-ПЗ				

б) Безперервна самодіагностика та висока апаратна надійність, яка мінімізує можливість відмови захисту при короткому замиканні, яка в свою чергу запобігає шкоді від перегріву електропостачання споживачів;

в) Прискорене відключення КЗ, завдяки значному зменшенню ступені селективності по часу і точності роботи цифрових реле;

г) Удосконалюються способи забезпечення селективності та резервування відказу вимикачів;

г) Цифрові реле дозволяють записувати і потім відтворювати для аналізу аварійної ситуації режими, які були до аварії та під час її дії;

д) Дозволяють за допомогою підключеного комп'ютера вимірювати установки спрацювання і переходити з однієї характеристики на іншу завдяки програмним середовищам;

е) Дозволяють передавати всю інформацію про їх стан на віддалені диспетчерські пункти через спеціальні канали зв'язку;

є) Дозволяють змінювати конфігурацію комплекту релейного захисту: включати та виключати окремі функції чисто програмними середовищами за допомогою зовнішнього комп'ютера;

ж) Дозволяють реалізовувати більш високу чутливість до аварійних режимів, на відміну від електромагнітних реле;

з) Статичні цифрові реле володіють більш високою надійністю, на відміну від електромагнітних реле, які мають механічно-подвижні елементи.

Серед основних **недоліків** мікропроцесорних реле можна віднести[2], [3]:

а) Вплив на роботу реле зовнішніми електромагнітними впливами від живлячої мережі;

б) Раптова втрата оперативного живлення під час роботи реле може призвести до переривання поточної роботи оперативної пам'яті та зависанню процесору;

в) Несиметричні режими в мережі і режими, що зв'язані з провалами напруги і довгим пониженням рівня напруги;

										Арк.
										12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.265М.РД.2022-ПЗ					

г) Перенапруга в мережі, викликана скиданням навантаження, яка може проникнути в реле через живлячу мережу і привести до ушкодження внутрішніх елементів реле і його повної відмови;

г) Інформаційна надмірність, що ускладнює і без того складну настройку захисту;

д) Можливість дистанційних впливів на мікропроцесорний захист з ціллю порушення її нормальної роботи (кібератака).

### **1.3 Опис мікропроцесорного релейного захисту**

#### **1.3.1 Структурна схема мікропроцесорного пристрою та мікропроцесору**

Основним елементом цифрового захисту є процесор, на якому реалізований алгоритм роботи конкретного захисту. В залежності від фірми виробника в захисті може бути як один (більшість компаній виробників), так і декілька процесорів (компанія АВВ), завдяки їх паралельній роботі забезпечується швидкодія та точність. За допомогою цих додаткових вузлів здійснюється поєднання мікропроцесора із зовнішніми датчиками вихідної інформації, об'єктом управління, оператором, диспетчером тощо.

Процесор має зв'язок з об'єктом захисту, через кола введення – виведення. Вхідною інформацією є, як правило, аналогові сигнали – струми, напруги, температура та бінарні – положення комутаційних апаратів, стан вихідних реле інших пристроїв релейного захисту та автоматики тощо. Вихідними сигналами цифрових захистів, є бінарні сигнали. Ці сигнали поступають після спрацювання цифрового захисту в кола управління та в кола сигналізації. [5-6]

Структурна схема мікропроцесорного пристрою показана на рисунку 1.1.

									Арк.
									13
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.265М.РД.2022-ПЗ				



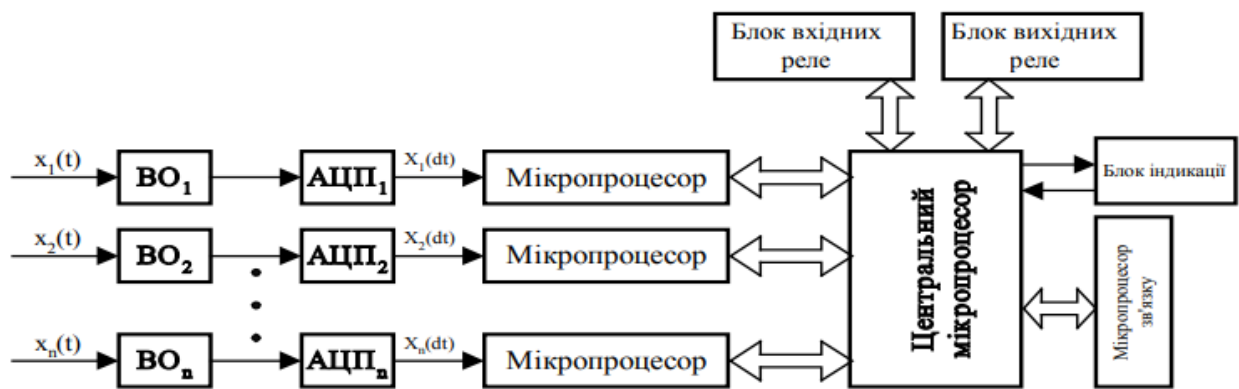


Рисунок 1.3 – Приклад структури багатопроцесорного МРЗ

### 1.3.2 Перетворення аналогових сигналів

Контрольовані напруги та струми є неперервними в часі аналоговими сигналами і можуть приймати на фіксованому відрізку часу будь-які значення в межах, обумовленими режимом роботи електричної мережі. Цифрові пристрої захисту працюють не з аналоговими, а з дискретними (цифровими) сигналами, котрі можуть приймати лише кінцеву множину значень для конкретних моментів часу. Пристрій, що здійснює перетворення називається аналогово-цифровим перетворювачем (АЦП).

Попередньо аналогові сигнали, які контролюються пристроями захисту, – це струм від трансформатора струму ТА та трансформатора напруги TV – підводяться до спеціальних вхідних перетворювачів ТАЛ та TVL. Для захисту пристрою від імпульсних перешкод, між первинною та вторинною обмотками ставиться заземлений електростатичний екран. Для захисту електронних вузлів від можливих перенапруг широко використовують варистори RV (або стабілітрони) та фільтри нижніх частот, наприклад, на основі R-C ланцюгів. Для узгодження вторинної напруги на виході проміжних трансформаторів з вхідними сигналами пристрою АЦП слугують змінні опори R. Для правильної роботи АЦП необхідно унеможливити попадання на нього високочастотного спектра сигналу. Тому застосовують високочастотний фільтр, який виконаний на основі опору  $R_{\phi}$  та ємності  $C_{\phi}$ .

Перехід від аналогового неперервного сигналу до дискретного супроводжується деякою втратою інформації. Це пояснюється тим, що АЦП здійснює перетворення вхідного аналогового сигналу в дискретний через деякі часові проміжки  $\Delta t$ , а між ними значення вхідного сигналу не контролюється. Чим менший цей часовий проміжок, тим точніше відтворюється аналоговий сигнал у цифровій формі. Основними характеристиками АЦП є його розрядність та інтервал дискретизації сигналу за часом.

Формула розрядності та дискретизації сигналу за частотою вибірки 1.1:

$$f = \frac{1}{\Delta t}, \quad (1.1)$$

де  $\Delta t$  – проміжки часу

Принципові схеми бінарних перетворювачів струму та напруги показані на рисунку 1.4.

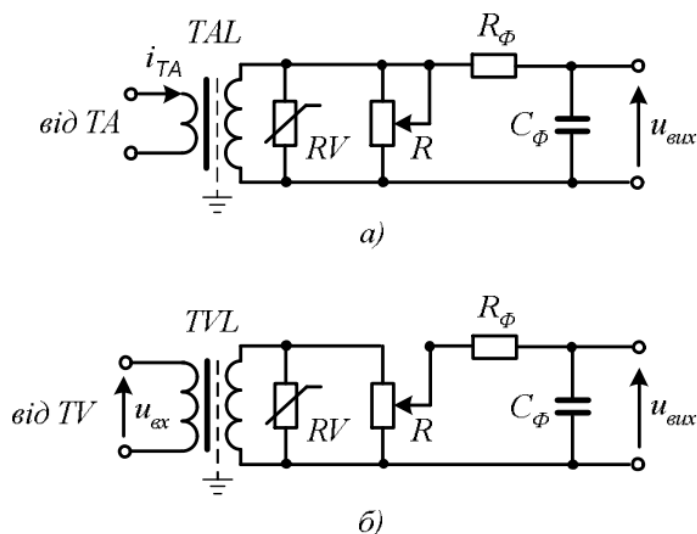


Рисунок 1.4 – Принципові схеми вхідних перетворювачів а) струму; б) напруги

### 1.3.3 Вхідні бінарні сигнали

Для роботи захисту, крім аналогових сигналів, необхідно мати також інформацію про бінарні сигнали від інших пристроїв релейного захисту та автоматики, положення комутаційних апаратів, тощо. Бінарні сигнали передають дані про стан апаратури до мікропроцесорного захисту. Майже на всіх сучасних МРЗ ввід бінарних (дискретних) сигналів здійснюється завдяки

						02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			16

перетворювачам на основі оптрона. Час переключення у оптрона займає доли мікросекунди. Для оптопари характерна мала прохідна ємність, що зменшує проходження перешкод по даному шляху. Допустима напруга між ланцюгом управління та елементами керованого ланцюга досягає декількох кіловольт, а робочий струм світлодіода складає 2-12 мА.

Схема введення дискретного сигналу показана на рисунку 1.5. Вихідні реле KL1, KL2 призначені для видачі мікропроцесору логічного сигналу в ланцюги управління комутаційним устаткуванням, в ланцюги управління попереджувальної сигналізації, або на зовнішні пристрої РЗА, при чому має забезпечуватися гальванічна розв'язка комутованих ланцюгів. Вихідні перетворювачі повинні мати відповідну комутаційну спроможність і, в загальному випадку, забезпечувати видиме розривання комутованого ланцюга, зазвичай для цього використовуються малогабаритні проміжні електромагнітні реле.

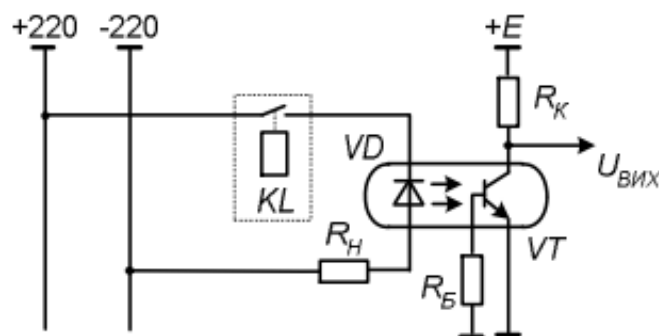


Рисунок 1.5 – Схема введення дискретного сигналу

### 1.3.4 Перетворення та зберігання інформації МРЗ

Цифрові сигнали від АЦП потрапляють до процесору, де оброблюються за певним алгоритмом, який реалізований у вигляді програми. Сама програма зберігається в ПЗП, що являє собою програмований постійний запам'ятовуючий пристрій з енергонезалежною пам'яттю.

Для зберігання проміжних результатів обчислень використовується ОЗП (оперативний запам'ятовуючий пристрій), вона має високу швидкодію, проте не зберігає інформацію у випадку вимикання зовнішнього живлення.

									Арк.
									17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.265М.РД.2022-ПЗ				

Уставки спрацювання захистів, які потрібно змінювати в процесі експлуатації, зберігаються в ППЗП (постійному програмованому запам'ятовуючому пристрої), який допускає багатократну зміну уставок. ППЗП також незалежний від зовнішнього живлення.

На передній панелі пристрою розміщений пульт управління, за допомогою якого можна задавати необхідний режим пристрою та змінювати уставки спрацювання.

### **1.3.5 Блок живлення та блок індикації МРЗ**

Задачею блока **живлення** є забезпечення стабілізованою напругою усіх вузлів мікропроцесорного захисту, незалежно від можливих змін напруги в мережі живлення. Звичайно використовується імпульсний БЖ від мережі постійного струму.

Блок **індикації** призначений для відображення на індикаторі МП пристрою РЗА різноманітної збереженої, вимірної і обчислюваної у цифровому реле інформації.

Результати роботи пристрою та уставки відображаються на рідиннокристалічному індикаторі, світлодіодному індикаторі, або дисплеї, що знаходиться на передній панелі пристрою.

Крім того, невід'ємним елементом зв'язку оператора з мікропроцесорним пристроєм є **клавіатура**. За її допомоги можна змінити режим роботи пристрою, викликати на дисплей необхідні параметри і величини, ввести нове значення вставки і тому подібне.

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО ОБЛАДНАННЯ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

На даному етапі в тягових мережах постійного струму лідерами продаж в сфері мікропроцесорного захисту являються фірми “PLUTON”, “Київприлад» та «НПЕФА ЕНЕРГО», що випускають модулі для фідерів контактної мережі залізничного транспорту.

Принцип роботи та технічні характеристики у даних захистів доволі схожі, різниця полягає, по більшій частині, у відображенні інформації, способу обробки сигналів та деяких внутрішніх параметрах.

Система моніторингу та захисту тягової мережі SMTN-3 від компанії PLUTON створена для тягових підстанцій, транспортних підприємств. Вона використовується в розподільчих пристроях (РУ) тягових підстанцій міського транспорту, метрополітену, електрифікованих ділянок залізниць.

Призначення SMTN-3:

- використання в якості пристрою захисту тягових мережі від струмів короткого замикання та неприпустимих перенавантажень;
- моніторинг параметрів тягової мережі;
- використання в якості пристрою накопичення даних для аналізу аварійних процесів.

Серед особливостей захисту даної компанії є наявність рідинно-кристалічного екрану, для відображення інформації та керування пристроєм, відсутність функції АКВ.

Пристрій ЦЗАФ-3,3 призначений для виконання функцій релейного захисту фідерів контактної мережі (ФКС) постійного струму напругою 3,3 кВ, а також функцій протиаварійної автоматики, вимірювання, контролю та сигналізації, місцевого та дистанційного керування комутаційними апаратами.

Порівняємо їх основні параметри [6].

Експлуатаційні характеристики цифрових захистів показані в таблиці 2.1.

									Арк.
									19
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.265М.РД.2022-ПЗ				



Продовження таблиці 2.2

Основна приведена погрішність виміру напруги, %	+1	+0,5	+0,5
Здатність реєстратора по аналоговим сигналам, мкс	125	5	50

\* формула визначення діапазону робочих вимірювальних струмів

$$I_{max} = \frac{0.4 \cdot I_{sh}}{U_{sh}} \quad (2.1)$$

де  $I_{sh}$  – номінальний струм шунта, А

$U_{sh}$  – падіння напруги на шунті при номінальному струмі, В

Входи та виходи дискретних сигналів та загальні технічні характеристики порівнюються у таблицях 2.3 та 2.4.

Таблиця 2.3 – Входи та виходи дискретних сигналів

Найменування характеристики	ЦЗАФ 3,3	SMTN-3-ММ-32Х (К39)	SMTN-3-ММ-21Х (К02)
Число входів	≤4	≤5	≤5
Вхідний струм, мА	≤4	≤10	≤10
Логічний «0», при 220 В	<140	15	15
Логічна «1», при 220 В	>170	10	10
Логічний «0», при 110 В	<70	15	15
Логічна «1», при 110 В	>80	10	10
Захист від перенапруг	ні	так	так
Число виходів	Релейних -14 Електронних ключів -2	≤5	≤5
Діапазон напруг, що комутуються, В	24-264	<30	<30



Продовження таблиці 2.5

Кількість аварійних записів	23	200
Самодіагностика		
Наявність сторожового таймера	є	є
Контроль цілісності пам'яті уставок	є	є
Контроль цілісності пам'яті виконання команд	є	є
Контроль зв'язку з вимірювальним блоком	Кожні 2 с	Кожні 0,5 с

Мікропроцесорні пристрої захисту фідерів КМ постійного струму мають наступні види автономних захистів, призначених для реагування на зміну струму, напруги, опору.

Основні види захистів в SMTN-3 однакові на всіх моделях, тому далі в порівнянні присутні лише дві моделі МРЗ.

Основні види захистів SMTN-3 та ЦЗАФ 3,3 показані в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Види захистів в даних МРЗ

ЦЗАФ 3,3	SMTN-3
двонаправлена МТЗ	двонаправлена МТЗ
спрямована ЗПТ	спрямована ЗПТ
спрямована ЗСНТ	Спрямована ЗСНТ
спрямована ДЗ	Спрямована ДЗ
ЗМН	ЗМН
ЗПН	ЗПН
КВТЗ	
Зовнішні захисти	
АПВ	

Продовження таблиці 2.6

УРОВ	УРОВ
	АС

– МТЗ – двоступінчастий двонаправлений максимальний струмовий захист. Перша ступінь ТО – струмове відсічення (прямий напрямок струму). Друга ступінь – МТЗ із витримкою часу (зворотний напрямок струму);

– ЗПТ – спрямований максимальний струмовий захист по збільшенню струму, що перевищує граничне значення, за встановлений інтервал часу (прямий напрямок струму);

– ЗСНТ – захист по швидкості наростання – 2 ступені, спрямовані (прямий і зворотній напрямок струму);

– ДЗ – захист по опорі (дистанційний) – 2 ступені, спрямовані (прямий напрямок струму);

– ЗМН – захист мінімальної напруги;

– ЗПН – захист максимальної напруги;

– ЗДВ - формування команд керування від земляного, теплового і зовнішнього захистів;

– АПВ - автоматичне повторне включення;

– УРОВ - пристрій резервування при відмовленні вимикача;

– АС – ампер-секундний захист.

Параметри всіх видів захисту показані в таблицях 2.7-2.11.

Таблиця 2.7 – Характеристики МТЗ

Уставки, витримки і керування	ЦЗАФ-3,3	SMTN-3
Діапазон регулювання уставки по струму, А:		
- для прямого струму	500...8000	0...20000
- для зворотнього струму	500...8000	0...20000



Продовження таблиці 2.9

Крок часу дельти, мс	10	10
Витримка часу, мс	0...32000	0...1000
Крок витримки спрацьовування, мс	5	5

Таблиця 2.10 **Характеристики ЗМН та ЗПН**

Уставки, витримки і керування	ЦЗАФ-3,3	SMTN-3
ЗМН		
Діапазон регулювання уставки по напрузі, В	500...3000	0...5000
Витримка часу, мс	0...500	0...1000
ЗПН		
Діапазон регулювання уставки по напрузі, В	3000...6000	0...5000
Витримка часу, мс	0...500	0...1000

Таблиця 2.11 **Характеристика УРОВ**

Уставки, витримки і керування	ЦЗАФ-3,3	SMTN-3
Діапазон регулювання контрольного часу, мс	100...1000	0...5000
Крок регулювання, мс	100	10

Обрані до розгляду мікропроцесорні комплекти мають приблизно схожі параметри, включають дистанційне та місцеве керування. Всі дані роботи пристрою можуть бути отримані на зовнішній носій інформації, або відправлені до диспетчерського пункту.

Є відмінності в видах захисту. Система мікропроцесорного захисту SMTN-3 від компанії «PLUTON» на відміну від ЦЗАФ-3,3 від «Київприлад» має гнучку настройку, що має виконуватись кваліфікованим співробітником компанії. Обидва пристрої є сучасними приладами релейного захисту і використовуються у проектах модернізації старих підстанцій, пунктів секціонування, та побудові нових.

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 3 УДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ РОБОТИ МІКРОПРОЦЕСОРНОГО ЗАХИСТУ

### 3.1.1 Simulink MatLab

Пакет розширення Simulink у системі MatLab є ядром інтерактивного програмного комплексу, призначеного для математичного моделювання лінійних та нелінійних динамічних систем та пристроїв, представлених своєю функціональною блок-схемою (S-моделлю), або просто моделлю. При вище зазначеному можливі різні варіанти моделювання: в часовій області, в частотній області, на основі спектральних перетворень Фур'є, з використанням методу Монте-Карло та ін.

Для побудови функціональних блок-схем модельованих пристроїв Simulink має велику бібліотеку блочних компонентів та зручних редактор блок-схем. Він заснований на графічному інтерфейсі користувача і являється типовим засобом візуально-орієнтовного програмування. Використання палітри компонентів, користувач за допомогою мишки може переносити потрібні блоки з палітри на робочий стіл пакету Simulink та з'єднуючи лініями зв'язку входи та виходи блоків. Таким чином створюється блок-схема системи пристрою, тобто модель.

S-модель фактично є програмою, яку можна переглянути за допомогою тестового редактора або за допомогою редактора файлів системи MATLAB. Файли моделі мають розширення mdl. Однак такі файли мають досить великий розмір і для простих моделей, часто, вміщують в собі великий програмний код.

Simulink автоматизує наступний, найбільш трудомісткий етап моделювання: він складає та вирішує складні системи алгебраїчних та диференціальних рівнянь, що описують задану модель, забезпечуючи зручний та наочний візуальний контроль за поведінкою створеного користувачем віртуального пристрою. Досить лише уточнити вид аналізу та запустити Simulink у режимі симуляції створеної моделі системи чи пристрою.

Simulink практично миттєво змінює математичний опис моделі по мірі введення і неї нових блоків, навіть у тому випадку, коли цей процес

										Арк.
										28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

02.15.265М.РД.2022-ПЗ

супроводжується зміною порядку системи рівнянь, що веде до суттєвої якісної зміни поведінки системи.

Однією з цінностей даного пакету являється наявність великої та відкритої для вивчення і модифікації, бібліотеки компонентів. Вона містить в собі джерела впливів (сигналів) з майже любими часовими залежностями, масштабуючі, лінійні та нелінійні перетворювачі з різноманітними формами передатних характеристик, інтегруючі та диференційні блоки, тощо. Також перевагою Simulink є можливість задання в блоках довільних математичних виразів, що дозволяє вирішити типові задачі, або просто описати роботу модульованих користувачем систем і пристроїв.

Набула практичного значення можливість інтеграції Simulink не лише за системою MatLab, а й з рядом інших пакетів розширення, що забезпечує, практично, нескінчені можливості використання Simulink для рішення задач імітаційного та ситуаційного моделювання.

### **3.1.2. Бібліотека блоків SimPowerSystem**

SimPowerSystem являється однією з додаткових бібліотек Simulink, задача яких полягає у моделюванні енергетичних систем, пристроїв електротехніки та промислової електроніки. У своєму складі вона містить такі елементи, як: моделі пасивних та активних електротехнічних елементів, електродвигунів, джерел струму та напруги (як постійного, так і змінного струму), трансформаторів, ЛЕП, тощо. За допомогою комбінації двох бібліотек, можна не лише імітувати роботу пристроїв у часовій області, а й виконувати різні види аналізу таких пристроїв.

Основною перевагою даного пакету являється можливість моделювання, сполучаючи методи імітаційного та структурного моделювання. Така можливість дозволяє значно спростити модель, а як наслідок підвищити її стійкість і швидкість роботи. Окрім того, є можливість використання і сполучення інших бібліотек Simulink, і самого MatLab, що дає майже необмежені можливості для моделювання електротехнічних систем.

										02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
											29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Незважаючи на великий розмір блоків у бібліотеці, інколи виникає необхідність створення своїх власних блоків. Реалізовується це за допомогою вже наявних блоків, реалізуючи можливості Simulink по створенню підсистем, так і на основі основних блоків Simulink з керованими джерелами напруги та струму.

Як висновок, можна зазначити, що SimPowerSystems у складі Simulink на даний час можна вважати одним з найліпших пакетів для моделювання електротехнічних пристроїв та систем.

Побудова моделей тягових підстанцій, з пристроями ШВ, фільтр-пристроями, моментом КЗ та відстеженням постійної часу відбувається за допомогою даних функціональних блоків.

Three-Phase Source – модулює трифазне джерело напруги [8], [12] (рисунок 3.1.) Кожна фаза джерела має внутрішній активно-індуктивний опір. Внутрішній опір джерела може бути заданий за допомогою значень опору та індуктивності фази або опосередковано, за допомогою параметрів короткого замикання.

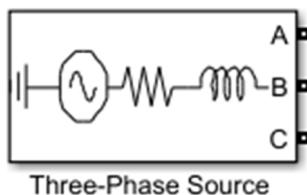


Рис. 3.1 – Трифазний генератор

Three-Phase Transformer (Three Windings) – модулює трифазний трансформатор (рисунок 3.2) з використанням трьох однофазних трансформаторів. Налаштовуються обмотки трансформатору, параметри витків, номінальна потужність та частота, магнітні взаємодії.

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

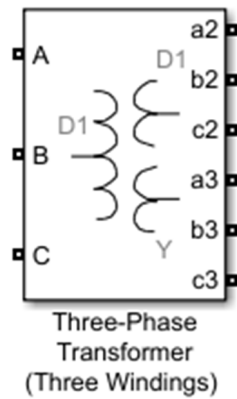


Рис. 3.2 – Трифазний трансформатор

Universal Bridge – модулює універсальний трифазний силовий перетворювач (рисунок 3.3), який складається з шести силових ключів, з'єднаних в конфігурації мосту. Обирається тип живлення та конфігурація перетворювача, задаються параметри внутрішнього опору та ємності.

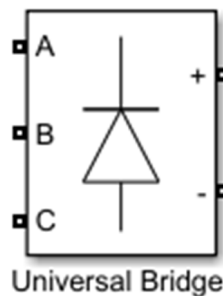


Рис. 3.3 – Універсальний трифазний силовий перетворювач

Series RLC Branch – послідовна RLC - ділянка. Моделює послідовне включення опору, індуктивності та ємності (рисунок 3.4). Отримання окремих елементів даного блоку налаштовується у вікні команд.



Рис. 3.4 – Послідовна RLC ділянка

Current Measurement – вимірювач струму (рисунок 3.5). Виконує функцію вимірювання миттєвого значення струму, що протікає через з'єднувальну лінію. Вихідним сигналом блоку є звичайний сигнал Simulink, який можна використовувати любим Simulink блоком.

						02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			31

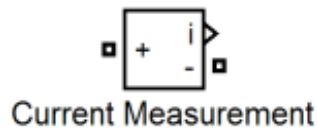


Рис 3.5 – Вимірювач струму

Voltage Measurement – вимірювач напруги (рисунок 3.6). Виконує вимірювання миттєвого значення напруги між двома вузлами схеми. Вихідним сигналом блока є звичайний сигнал Simulink, який може використовуватись любым Simulink блоком.

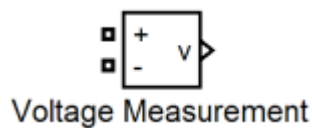


Рис. 3.6 – Вимірювач напруги

Scope – осцилограф (рисунок 3.7). Дозволяє відобразити результати моделювання у формі сучасного високоточного осцилографа з оцифрованою масштабною сіткою та променями різного кольору. За необхідності змінюється кількість вхідних каналів оброблюваних сигналів.



Рис. 3.7 – Осцилограф

Step – джерело одиночного перепаду (рисунок 3.8). Перепад може бути як додатнім, так і від’ємним, що задається відповідними початковими значеннями. Задає момент часу для подачі ввімкнення чи вимкнення функціонального блоку.

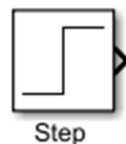


Рис. 3.8 – Джерело одиночного перепаду

Breaker – вимикач струму (рисунок 3.9). Моделює пристрій включення та відключення струму. Може керуватись зовнішнім вхідним сигналом або від вбудованого таймеру. Включення пристрою виконується одиночним керуючим

										Арк.
										32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата						

сигналом. Команда на відключення подається у вигляді нульового рівня сигналу, при цьому, відключення відбувається при зменшенні струму до нуля. Пристрій має вбудовану іскрогасильну RC – ділянку, ввімкнену паралельно контактам вимикача.

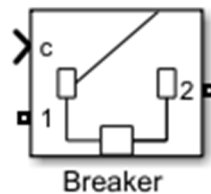


Рис. 3.9 – Вимикач струму

Ideal Switch – ідеальний ключ (Рисунок 3.10). Моделює ідеальний ключ. Модель ключа складається з послідовно з'єднаних резистора і ключа. Прилад вмикається при подачі на керуючий вхід одиничного позитивного сигналу, відключення – при зменшенні керуючого сигналу до нуля.

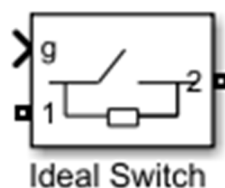


Рис. 3.10 – Ідеальний ключ

### 3.2 Математичне описання блоку розрахунку сталої часу

Як відомо, струм під час короткого замикання в тяговій мережі постійного струму змінюється по експоненціальному закону.

Визначити струм в момент часу  $t$  можна за формулою 3.1

$$i(t) = I_{кз}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (3.1)$$

де  $I_{кз}$  – усталений струм короткого замикання, А;

$\tau$  – стала часу, що визначається відношенням  $L_{кз}/R_{кз}$ , с.

Питомий опір та індуктивність визначаються за формулами 3.2 та 3.3 відповідно.

									Арк.
									33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.265М.РД.2022-ПЗ				

$$L_{кз} = l_0 \cdot S \quad (3.2)$$

де  $l_0$  – питома індуктивність контактної мережі;

$S$  – відстань до місця короткого замикання.

$$R_{кз} = r_0 \cdot S \quad (3.3)$$

де  $r_0$  – питомий опір контактної мережі.

Формула визначення сталої часу в будь-який момент часу 3.4:

$$\tau = \frac{\Delta t}{\ln\left(\frac{di_2}{dt} / \frac{di_1}{dt}\right)} \quad (3.4)$$

де  $\Delta t$  - це період за яким працює АЦП (в імітаційних моделях  $\Delta t = 0.001$  с).

Індуктивність  $L$  залежить лише від конструкції контактної мережі, та конфігурації її елементів (кількість гілок системи, що включаються послідовно чи паралельно). Опір  $R$  залежить лише від температури (зміна навколишнього середовища від  $-20$  до  $+30^{\circ}\text{C}$ ), що викликає зміну значення опору приблизно на 20% (у моделях 5%) та відповідно змінюється усталений режим струму короткого замикання.

Тому, визначив за допомогою імітаційного моделювання КЗ в області якого знаходиться  $\tau$  при різних значеннях температури, та різних схемах живлення контактної мережі стане зрозуміла поведінка даного параметру та можливість його використання як додаткового параметру при визначенні КЗ максимальним струмовим захистом. Оскільки значення сталої часу визначається за 2 такти роботи АЦП, то можна прийти до висновку, що захист має стати більш швидкодіючим

									Арк.
									34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	02.15.265М.РД.2022-ПЗ				



Таблиця 3.1 – Параметри елементів контактної підвіски та рейок

Тип контактної підвіски	Питомий опір мережі та рейок Ом/км		
	Одноколійна ділянка	Двоколійна ділянка	
		Одна колія	Дві колії паралельно
M120+2МФ-100	0,07	0,067	0,034
M120+2МФ-100+A185			
M120+2МФ-100+2A185	0,044	0,04	0,021
M120+2МФ100+3A185	0,038	0,034	0,018
ПБСМ95+2МФ-100	0,094	0,089	0,049
Тип рейки			
P65	0,0254	0,0155	0,077

В якості досліджуваної ділянки були вибрані одно та двоколіїні ділянки з контактною підвіскою M120+2МФ-100+2A185 та рейкою P65 довжиною 10 км.

Питома індуктивність тягової мережі може змінюватись в межах 1,1-1,5мГн/км. В імітаційних моделях прийняте значення  $L=1.5\text{мГн/км}$ .

Параметри елементів використаної контактної підвіски з впливом температури показана в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Параметри елементів контактної підвіски з впливом температури

Тип контактної підвіски	Питомий опір мережі та рейок Ом/км		
	Одноколійна ділянка	Двоколійна ділянка	
		Одна колія	Дві колії паралельно
M120+2МФ-100+2A185	0,042108	0,03828	0,020097

### 3.3 Розрахунок сталої часу при різних схемах живлення

#### 3.3.1 Схема одностороннього живлення

Модель тягової ділянки постійного струму з однією живлячою підстанцією являється непоширеним рішенням в системі тягового електропостачання, проте може використовуватись в окремих випадках, за неможливості побудови другої ПС, або за економічною невідгідністю.

Дана імітаційна модель (рисунок 3.13) носить лише спрощений характер поведінки перехідних процесів в тяговій мережі, проте в змозі показати основний характер поведінки струму та сталої часу в момент короткого замикання.

Опір короткого замикання  $R_{кз}=0.001$  Ом. Дискретний метод, крок 0.001 с.

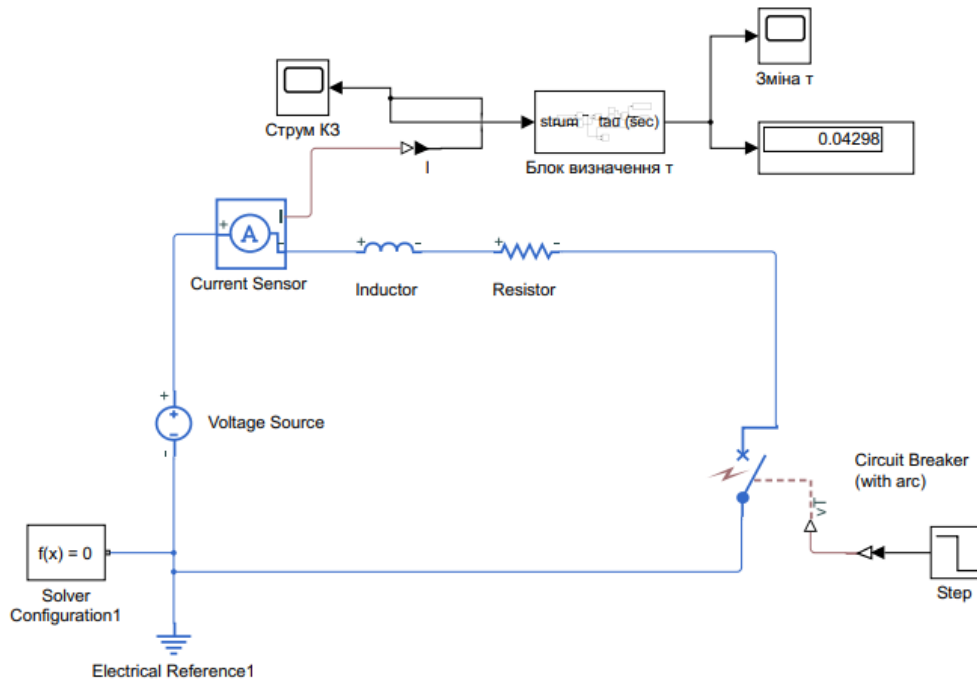


Рисунок 3.13 – Імітаційна модель одностороннього живлення

Отримані результати вимірювання  $\tau$  виводяться на дисплей в усталеному режимі і відображені у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Зміна сталої часу з однією ПС

l, км	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\tau$ , с	0,03814	0,03867	0,03883	0,03893	0,03898	0,03903	0,03905	0,03907	0,03908	0,0391

Подальші осцилограми зміни струму та сталої часу  $\tau$  (рисунок 3.14 та рисунок 3.15) визначені при короткому замиканні на 7 км контактної мережі.

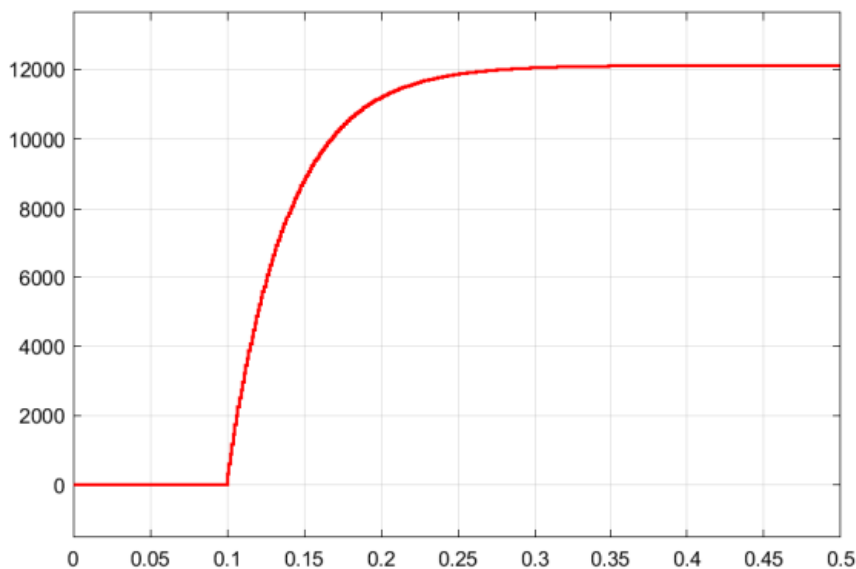


Рисунок 3.14 – Осцилограма зміни струму в момент короткого замикання

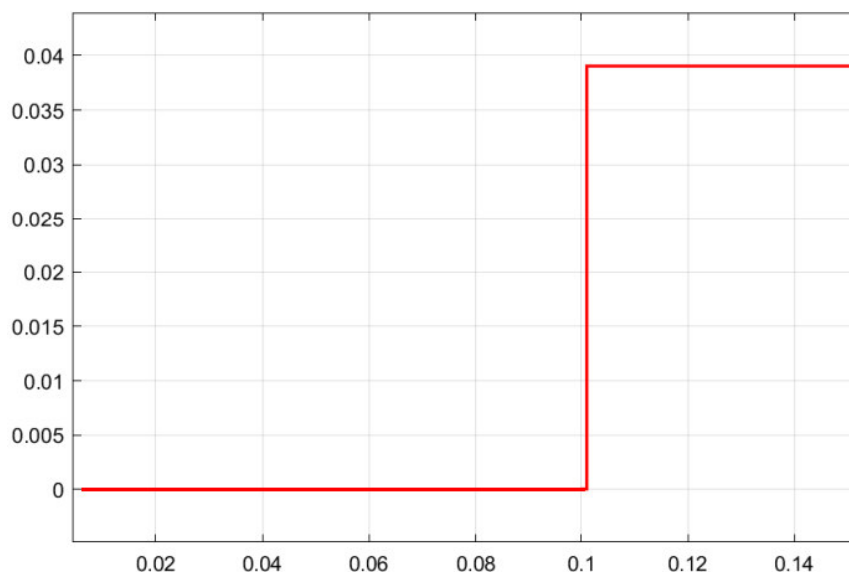


Рисунок 3.15 – Осцилограма зміни  $\tau$  в момент короткого замикання

Проаналізувавши отримані дані, можна прийти до висновку, що стала часу миттєво змінює своє значення в момент короткого замикання, мікропроцесорний захист віддає команду на відключення швидкодіючого вимикача о 0.103 с при значенні  $I_{7\text{км}} = 895.9$  А (враховуючи затримку по обробці інформації), не очікуючи спрацювання максимального струмового захисту, що відбудеться о 0.122 с (при струмі уставки 2800 А).



Отримані результати вимірювання  $\tau$  при двосторонньому живленні та однією колією виводяться на дисплей в усталеному режимі і відображені у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Зміна сталої часу з двома ПС однієї ділянки

l, км	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tau$ , с	0,03802	0,03853	0,03863	0,03876	0,03876	0,03876	0,03869	0,03853	0,03808

Подальші осцилограми зміни струму та сталої часу  $\tau$  (рисунок 3.18 та рисунок 3.19) визначені при короткому замиканні на 7 км контактної мережі.

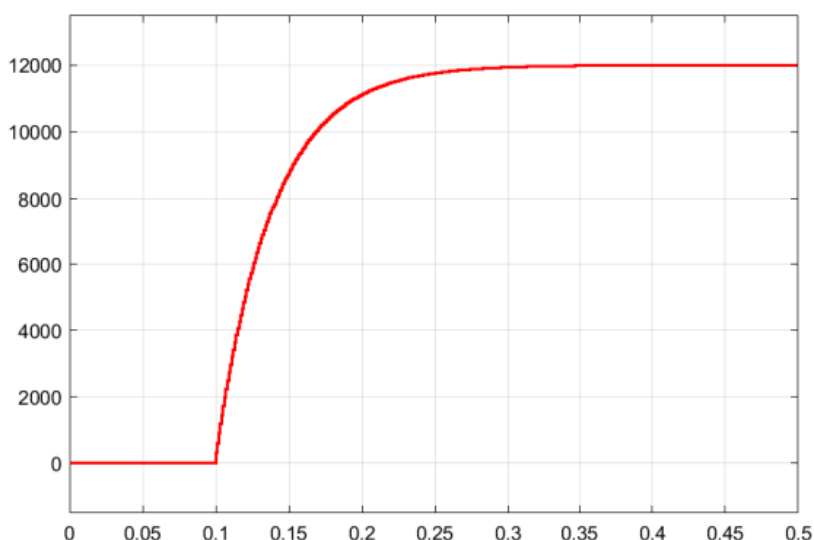


Рисунок 3.18 – Осцилограма зміни струму в момент короткого замикання

Стала часу знаходиться в постійному коливанні до короткого замикання (0.1 с) і стабілізується лише після початку перехідних процесів. Цифровий захист аналізує дані і визначивши усталені значення віддає команду на відключення швидкодіючого вимикача о 0.103 с при значенні  $I_{7\text{км}} = 985$  А. Відключення по максимальному струмовому захисту відбудеться 0.115 с (при струмі уставки 2800 А).



Розрахунок імітаційної моделі відбувається дискретним методом з кроком 0.001

с.

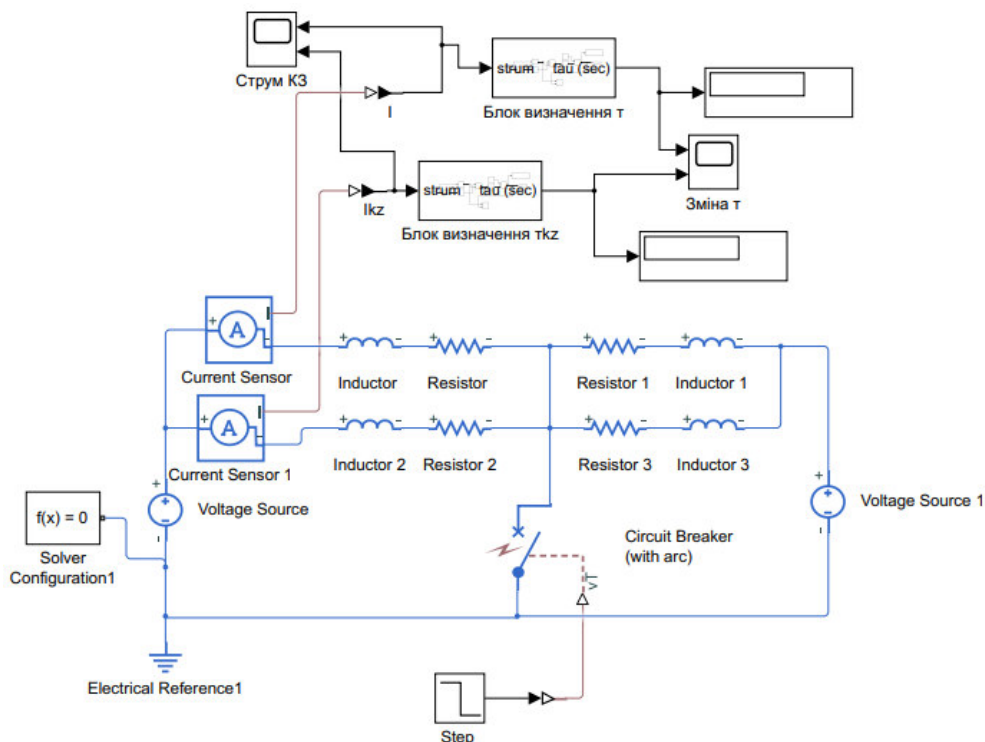


Рисунок 3.21 – Імітаційна модель двостороннього живлення з двома ділянками

Отримані результати вимірювання  $\tau$  при двосторонньому живленні та двома коліями виводяться на дисплей в усталеному режимі і відображені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Зміна сталої часу двоколійної ділянки без взаємоіндукції

l, км	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tau$ , с	0,06318	0,06686	0,06803	0,06887	0,06894	0,06385	0,06803	0,06686	0,06318
$\tau_{кз}$ , с	0,06809	0,07091	0,07185	0,07224	0,07235	0,07224	0,07185	0,07091	0,06807

Подальші осцилограми зміни струму та сталої часу  $\tau$  без впливу взаємоіндукції (рисунок 3.22 та рисунок 3.23) визначені при короткому замиканні на 7 км контактної мережі.



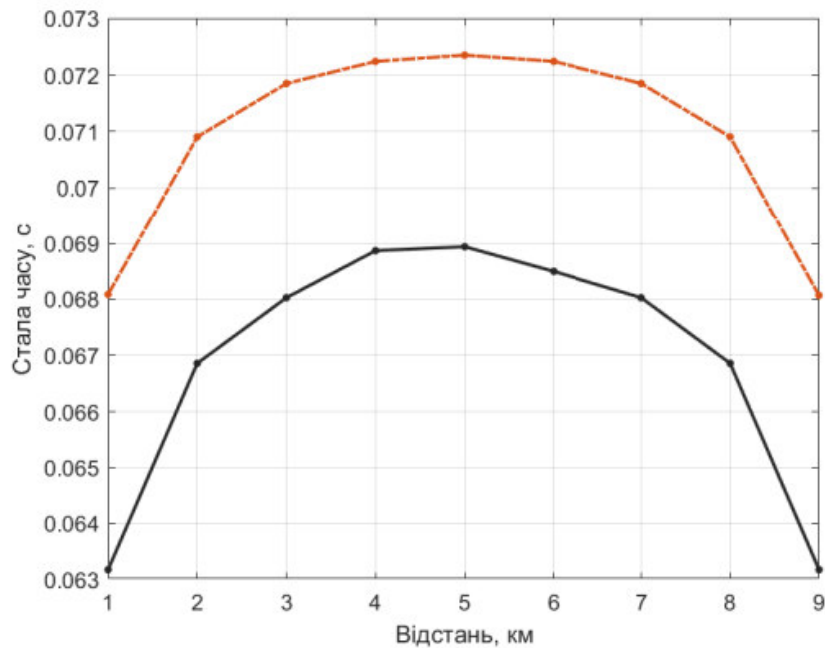


Рисунок 3.24 – Графік зміни  $\tau$  від довжини ділянки

### 3.3.3 Схема двостороннього живлення з двоколією ділянкою з впливом взаємоіндукції контактної мережі

Вплив взаємоіндукції між коліями відіграє важливу роль при розрахунках сталої часу, та в перехідних процесах тягової мережі саме тому виникає необхідність включити в розрахунки її вплив.

Розрахунок імітаційної моделі відбувається дискретним методом з кроком 0.001 с.

Отримані результати вимірювання  $\tau$  при двосторонньому живленні та двома коліями з впливом взаємоіндукції виводяться на дисплей в усталеному режимі і відображені у таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Зміна сталої часу двоколії ділянки з взаємоіндукцією

l, км	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\tau$ , с	0,06319	0,06687	0,06804	0,06851	0,06864	0,06851	0,06804	0,06687	0,06319
$\tau_{кз}$ , с	0,06809	0,07091	0,07186	0,07224	0,07235	0,07224	0,07186	0,07091	0,06809



Графік зміни  $\tau$  в залежності від довжини ділянки з впливом взаємоіндукції показаний на рисунку 3.27.

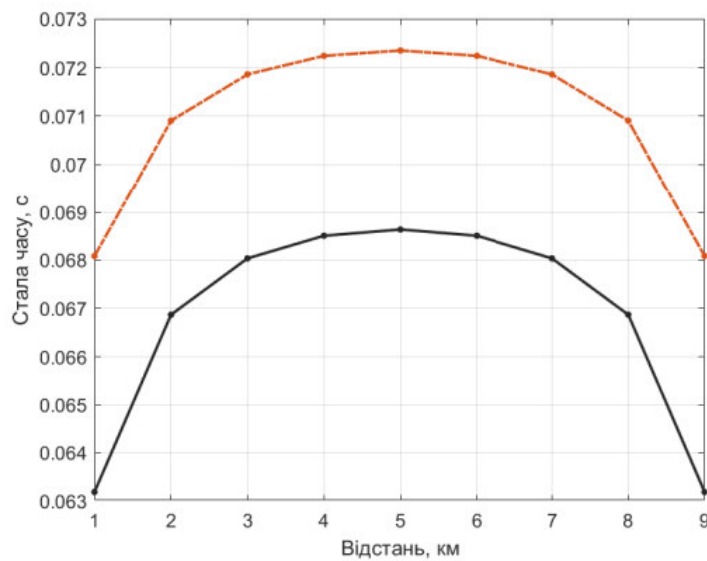


Рисунок 3.27 – Графік зміни  $\tau$  від довжини ділянки

### 3.3.4 Схема двостороннього живлення з КЗ на ТП-2

Дана спрощена модель двостороннього живлення з коротким замиканням на сусідній ПС дала можливість перевірки виконання функції телеблокування. Розрахунок імітаційної моделі відбувається дискретним методом з кроком 0.001.

Схема імітаційної моделі двостороннього живлення з коротким замиканням на сусідній підстанції показана на рисунку 3.28.

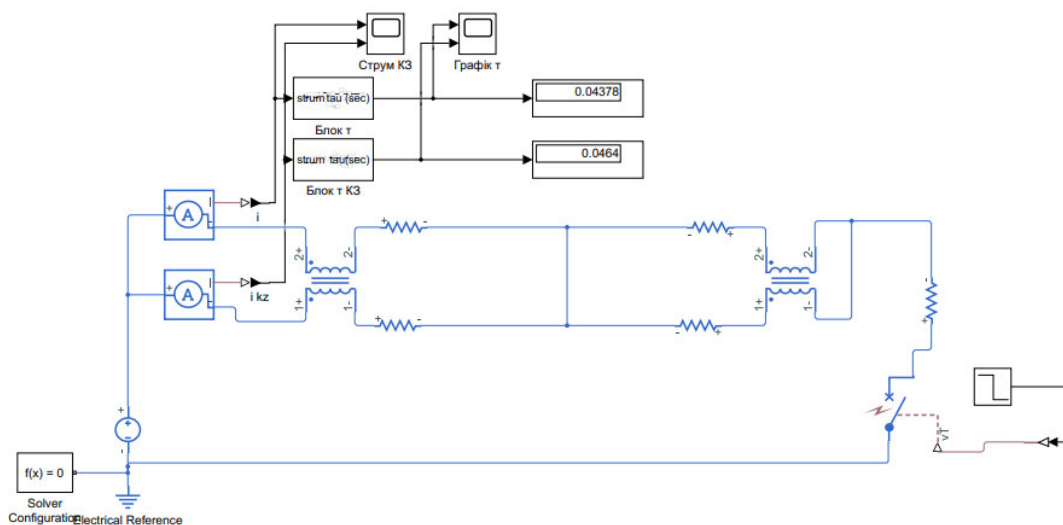


Рисунок 3.28 – Імітаційна модель двостороннього живлення з КЗ на ТП-2





### 3.3.5 Схема перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму

Основним завданням даної імітаційної моделі було визначення можливості виконання функції телеблокування (щось на кшталт дистанційного захисту тягової мережі змінного струму) на першій підстанції у випадку короткого замикання на другій ПС. Оскільки при КЗ на сусідній підстанції струм в мережі наростає поступово, його вплив негативно сказується на елементах контактної мережі та підстанції на якій КЗ не було.

Телеблокування фідерів постійного струму призначена для видачі команди аварійного примусового відключення сблокування фідерного вимикача фідерної зони «тягова підстанція – тягова підстанція», «тягова підстанція – пост секціонування», при аварійному відключенні на цій зоні будь-якого з двох фідерних вимикачів.

Імітаційна модель для дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму ділянки з впливом фільтр-пристроїв та внутрішніх елементів підстанцій (рисунок 3.32) [8].

За основу для моделювання взятий типовий фільтр-пристрій 3,3кВ [11]. З параметрами, що вказані у блоці контурів згладжуючого фільтру (рисунок 3.33)

Загальний вигляд блоку короткого замикання в системі MatLab показаний на рисунку 3.34.

Використаний умовно непрацюючий швидкодіючий вимикач постійного струму Gerapid 4207 [9], [10].

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

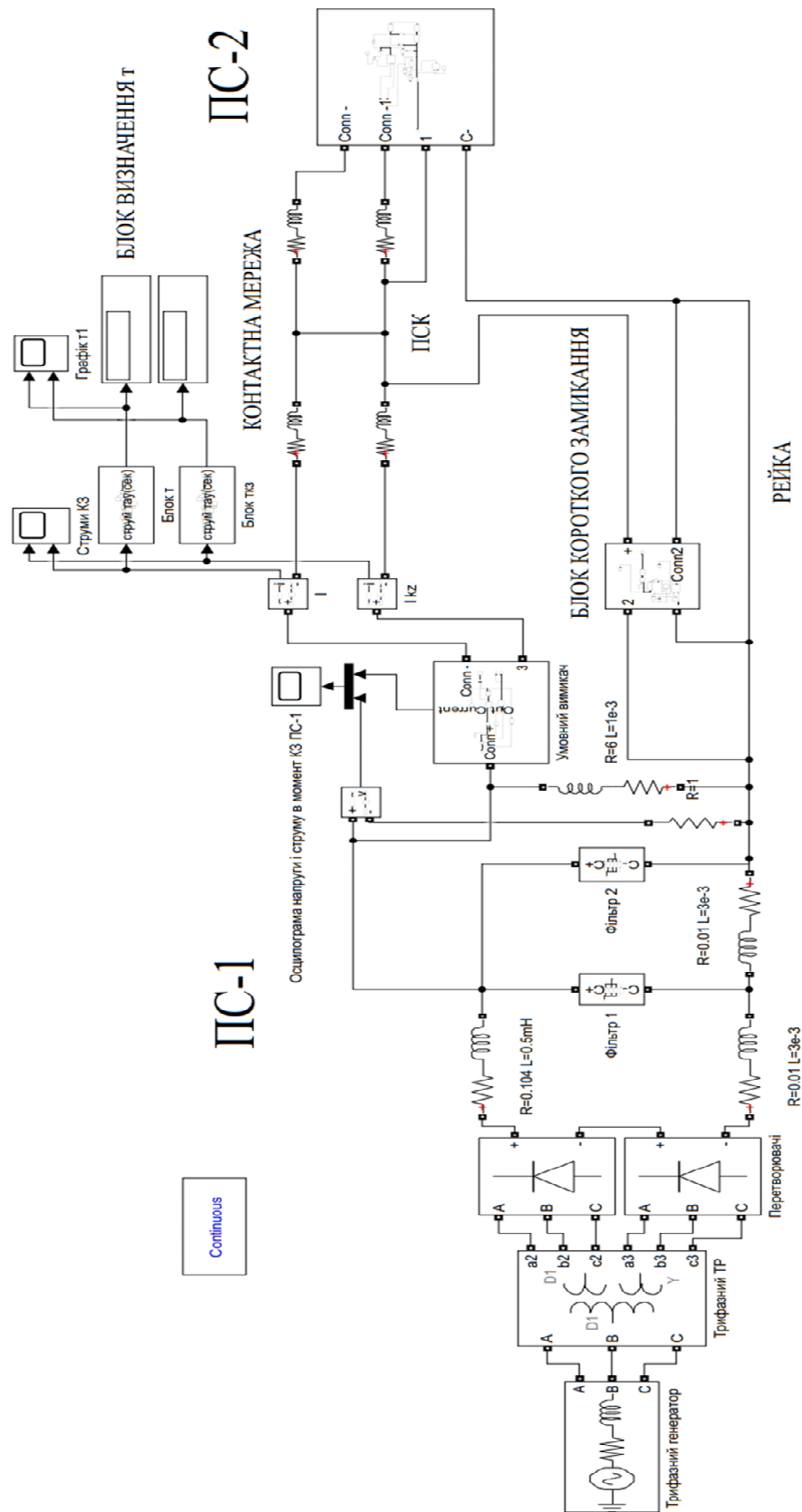


Рисунок 3.32 - Імітаційна модель системи тягового електропостачання ділянки постійного струму в програмі MatLab, пакету SimPowerSystem

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата



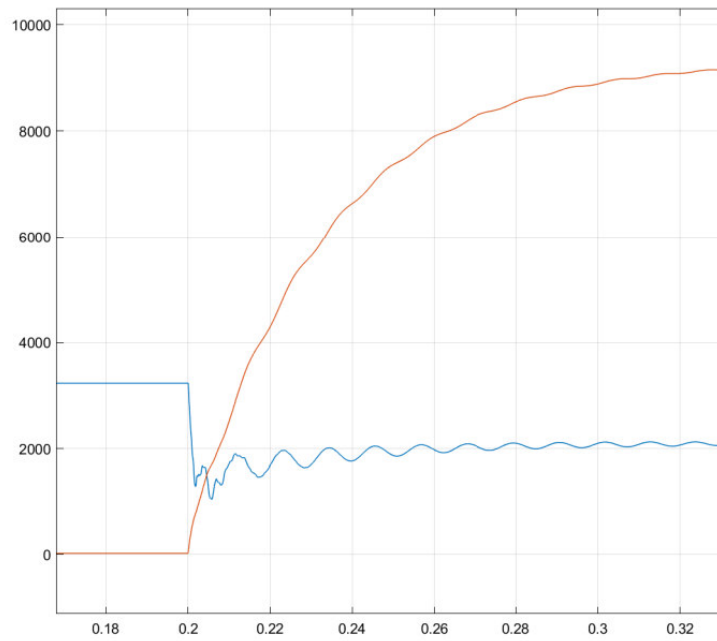


Рисунок 3.35 – Процес розвитку короткого замикання з впливом параметрів підстанції

Осцилограма зміни сталої часу  $\tau$  кожної ділянки з впливом взаємоіндукції колій (рисунок 3.36) визначені при короткому замиканні на 7 км контактної мережі.

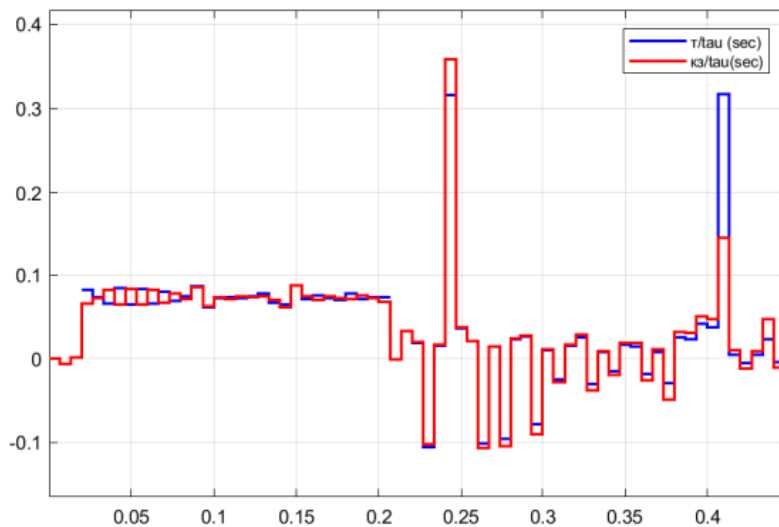


Рисунок 3.36 – Осцилограма зміни  $\tau$  в момент короткого замикання на 7-му км ділянки

Осцилограма зміни сталої часу при КЗ на ПС-2 показана на рисунку 3.37.

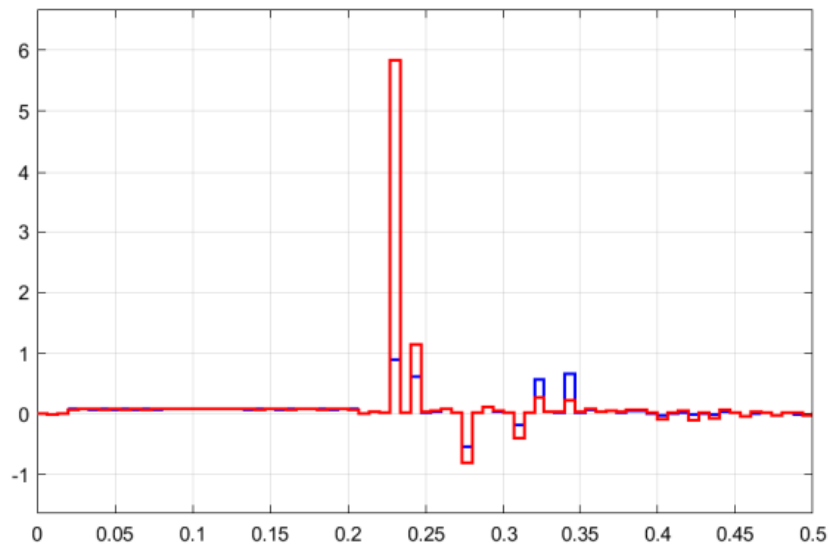


Рисунок 3.37 – Осцилограма зміни  $\tau$  в момент короткого замикання на сусідній підстанції

Аналізуючи поведінку  $\tau$  в момент короткого замикання на ділянці та на сусідній підстанції можна сказати, що в загальному випадку до моменту КЗ стала часу знаходиться в стабільному режимі і має невеликі коливання по амплітуді. Після початку перехідних процесів, з невеликою затримкою вона починає стрибкоподібно змінюватись, та в подальшому стабілізуватись в залежності від відстані та часу.

Виконання функції телеблокування можна вважати можливим, при врахуванні сталої часу. З її допомогою можна більш точно визначити місце короткого замикання, та оперативно подати сигнал на відключення ШВ.

Зміни сталої часу та струму відключення імітаційної моделі двоколіїної ділянки показана в таблиці 3.9.

Таблиця 3.9 – Зміна сталої часу імітаційної моделі двоколіїної ділянки

$l$ , км	5	6	7	8	9	10
$t_{шв}$ , с	0,224	0,226	0,229	0,231	0,234	0,236
$I_{kz шв}$ , А	2800	2800	2800	2800	2800	2800
$t_{\tau}$ , с	0,207	0,207	0,207	0,210	0,225	0,227
$I_{kz \tau}$ , А	1070	998	937	1166	2334	2340
$t_{кз}$ , с	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Графік спрацювання захисту по МТЗ та по постійній часу показаний на рисунку 3.38.

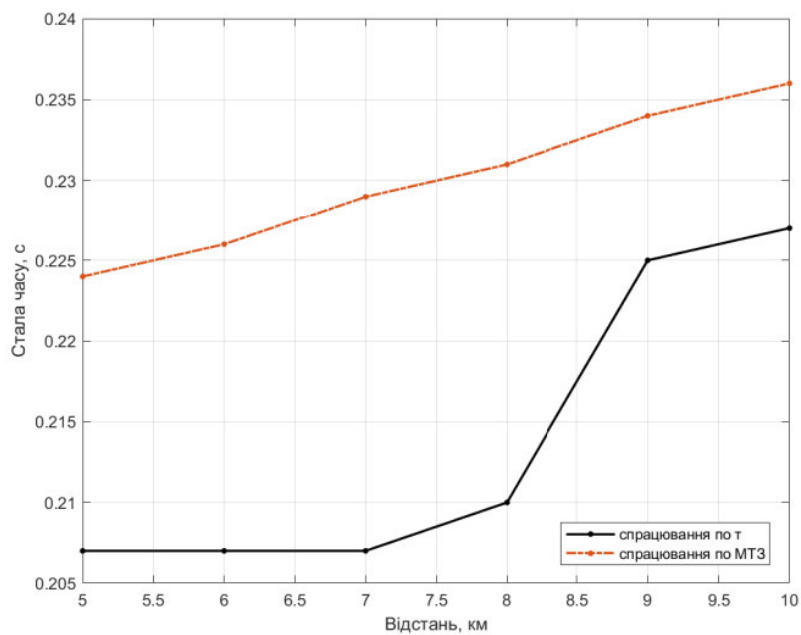


Рисунок 3.38 – Спрацювання захисту по МТЗ та по постійній часу

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

На основі проведеного аналізу зміни сталої часу, як додаткового параметру при аналізі струму короткого замикання, при різній геометрії контактної мережі та різних схемах живлення, яка виникає під час експлуатації, з метою покращення мікропроцесорного захисту тягової мережі постійного струму отримані позитивні результати, серед яких: покращення селективності, збільшення швидкодії, виконання функції телеблокування.

Загальні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Розроблені імітаційні моделі системи тягового електропостачання постійного струму з блоками визначення постійної часу.

2. Проведено імітаційне моделювання різних видів живлення контактної мережі, визначені струми короткого замикання та сталої часу при короткому замиканні на різній відстані фідерної зони.

3. Визначено збільшення швидкодії максимального струмового захисту, в середньому на 50%.

4. Зменшено струм короткого замикання при якому спрацьовує максимальний струмовий захист на 47%.

5. Визначений алгоритм аналізу сталої часу мікропроцесорним захистом.

За результатами дослідження визначена можливість використання функції телеблокування в тяговій мережі постійного струму. Визначена поведінка сталої часу при різній геометрії контактної мережі та схемах живлення. Рекомендовано ввести даний параметр для покращення швидкодії мікропроцесорного захисту на ділянках тягової мережі постійного струму.

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## БІБЛЮГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Фигурнов Е.П. Релейная защита. Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей транспортных и других вузов.-К.:Транспорт Украины, 2004., 565с.
2. Основи релейного захисту та автоматизації енергосистем: навчальний посібник. Ч. 2 / укл.: Д.П. Козярьський, Е.В. Майструк, І.П. Козярьський. Чернівці: Чернівецький нац. ун., 2019., 133 с.
3. Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем [Електронне видання]: навч. посіб./ О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко; під загальною редакцією д.т.н. О.С. Яндульського. – К.: НТУУ «КПІ», 2016. – 102 с.
4. Кідиба В.П. Релейний захист електроенергетичних систем: Підручник. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2013. – 533 с.
5. Особливості функціонування релейного захисту в розподілених системах тягового електропостачання / В. Г. Сиченко, Є. М. Косарєв, О. А. Данилов, П. В. Губський, В. А. Зубенко, М. М. Пулін // Вісн. нац. техн. ун-ту «ХПІ». Серія : Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. – Харків, 2018. – № 9 (1285). – С. 70–75. – DOI: 10.20998/2413-4295.2018.09.10.
6. Система моніторингу та захисту тягової мережі «SMTN-3». Керівництво по експлуатації ЗРДР0.0002 РЕ. 2015 г., 143 с.
7. Методичні рекомендації до виконання та порядку захисту магістерських робіт [Текст]: методичні вказівки до магістерських робіт / уклад.: О.В. Жевжик, І.Ю. Потапчук; Український державний університет науки і технологій. – Д.: Вид-во Український державний університет науки і технологій, 2022. – 20 с.
8. Забара С.С. Моделювання систем у середовищі MATLAB: Університет "Україна", 2011.-137с.

									Арк.
									56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата					

02.15.265М.РД.2022-ПЗ

9. Михаліченко, П. Є. Застосування пакету MATLAB/Simulink для комп'ютерного моделювання перехідних аварійних режимів в системі тягового електропостачання залізниць України : [препринт] / П. Є. Михаліченко // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. «Силова електроніка та енергоефективність». – 2011. – Ч. 2 – С. 210-214.
10. Зубенко, В. А. Модель швидкодіючого вимикача постійного струму / В. А. Зубенко, Б. А. Рябокiнь, В. Г. Сиченко // Технічна електродинаміка: темат. вип. – 2010. – С. 226–229.
11. Сіксяєв В. О. Дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму : дипломна робота на здобуття кваліфікаційного ступеня магістра : спец. 141- Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / наук. керівник О. А. Данилов ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. Дніпро, 2021, 49 с.
12. Hoffmann J. MATLAB und SIMULINK in Signalverarbeitung und Kommunikationstechnik.: Addison Wesley/Longman, 1999. – 482 с.:

					02.15.265М.РД.2022-ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		