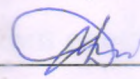


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Український державний університет науки і технологій  
Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

 Дмитро БОСИЙ

« 20 » 12 20 21 р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

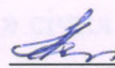
Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи  
електроспоживання**


Тема **Дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму**

Theme **Transients investigation in the DC traction network**

Керівник дипломної роботи

ст. викл.  Олексій ДАНИЛОВ

Нормоконтролер

доцент  Віталій Перцевий

Студент групи ЕС2021

 Віталій СІКСЯЄВ

Student

Siksiaiev Vitalii

Дніпро

2021



Український державний університет науки і технологій

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

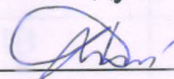
Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри



Дмитро БОСИЙ

« 25 » січня 2021 р.

### ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

студента групи ЕС2021 Сіксяєва Віталія Олександровича

1 Тема дипломної роботи: **«Дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму»**

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021р. № 32ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: технічні параметри фільтр-пристроїв, параметри обладнання підстанції.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): моделювання перехідних процесів при різних схемах фільтр-пристроїв.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис результатів досліджень.



## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
1.	ВСТУП	10.12	5
2.	1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ	01.09	16
3.	2 СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖ	01.11	40
4.	3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ	20.11	20
5.	4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	05.12	15
6.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	10.12	3
7.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	10.12	1

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи, ст..викладач



Олексій Данилов

Завдання прийняв до виконання






Віталій Сіксяєв



## ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ .....	10
1.1 Режими роботи тягової мережі постійного струму.....	10
1.2 Схеми заміщення .....	11
1.2.1 Елементи підстанції.....	12
1.2.2 Елементи тягової мережі .....	15
1.2.3 Особливості вимірювання напруги на тяговій підстанції постійного струму .....	17
2 СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ....	19
2.1 Опис бібліотеки Power... Simulink в середовищі MatLab .....	19
2.2 Опис моделі перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму .....	27
2.3 Перевірка моделі.....	29
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ .....	32
3.1 Аналіз існуючих фільтрів .....	32
3.1.1 Параметри фільтр-пристрою №1 .....	32
3.1.2 Параметри фільтр-пристрою №2 .....	33
3.1.3 Параметри фільтр-пристрою №3 .....	33
3.1.4 Параметри фільтр-пристрою №4 .....	34
3.1.5 Параметри фільтр-пристрою №5 .....	35
3.1.6 Параметри фільтр-пристрою №6 .....	36
3.1.7 Параметри фільтр-пристрою №7 .....	36
3.2 Результати проведених дослідів.....	37

02.15.ЕС2021.РД.2021-ПЗ

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму	Літ.	Арк.	Аркушів
Розробник	Сіксяєв В.О.			12.12.21			5	49
ОП та БНС								
Керівник	Данилов О.А.			12.12.21				
Економ.								
Н. контр	Перцевий В.							

УДУНТ, ІСЕ,  
ЕС2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
**Український державний університет науки і технологій**  
Кафедра Інтелектуальні системи енергопостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ /Дмитро БОСИЙ/

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи  
електроспоживання**

Тема **Дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму**

Theme **Transients investigation in the DC traction network**

Керівник дипломної роботи

ст. викл. \_\_\_\_\_ Олексій ДАНИЛОВ

Нормоконтролер

доцент \_\_\_\_\_ Віталій Перцевий

Студент групи ЕС2021

\_\_\_\_\_ Віталій СІКСЯЄВ

Student

Siksiaiev Vitalii

Дніпро

2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту

імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи енергопостачання»

Галузь 14 Електрична інженерія

Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о зав. кафедри

\_\_\_\_\_ Босий Д.О.

(підпис)

« 25 » січня 2021 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС \_\_\_\_\_ магістр

студента групи \_\_\_\_\_ ЕС2021 Сіксяєва Віталія Олександровича

1 Тема дипломної роботи: Дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму.

затверджена наказом по університету від «15» січня 2021р. № 32ст

2 Термін подання студентом закінченої роботи «15» грудня 2021р.

3 Вихідні дані до дипломної роботи: технічні параметри фільтр-пристроїв, параметри обладнання підстанції.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): моделювання перехідних процесів при різних схемах фільтр-пристроїв.

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу): ілюстрований опис

результатів досліджень.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу	Термін виконання	Об'єм розділу %
1.	ВСТУП	10.12	5
2.	1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ	01.09	16
3.	2 СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖ	01.11	40
4.	3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ	20.11	20
5.	4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ	05.12	15
6.	ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	10.12	3
7.	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	10.12	1

Дата видачі завдання «25» січня 2021 р.

Керівник дипломної роботи, ст..викладач

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Данилов О.А.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Сіксяєв В.О.

(ПІБ)

## **РЕФЕРАТ**

Пояснювальна записка має обсяг 49 сторінки, складається з 4 розділів та містить 46 ілюстрацій, 21 таблиць, 13 використаних джерел.

Метою роботи є дослідження впливу фільтр-пристрою на перехідні процеси в тяговій мережі постійного струму при коротких замиканнях.

У роботі розглянуті перехідні процеси, які виникають в тяговій мережі постійного струму при аварійних режимах. Розглядалося питання впливу параметрів фільтр-пристрою на характер зміни струму і напруги при коротких замиканнях. Для цього виконано моделювання тягової мережі постійного струму з пасивними елементами тягової підстанції. Проводились розрахунки для різних схем фільтр-пристроїв, які в даний час використовуються на електрифікованих залізницях України.

Ключові слова: ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ, КОРОТКЕ ЗАМИКАННЯ, ТЯГОВА МЕРЕЖА, МОДЕЛЮВАННЯ, ФІЛЬТР-ПРИСТРІЙ



## ЗМІСТ

ВСТУП .....	7
1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ.....	10
1.1 Режими роботи тягової мережі постійного струму.....	10
1.2 Схеми заміщення.....	11
1.2.1 Елементи підстанції .....	12
1.2.2 Елементи тягової мережі .....	15
1.2.3 Особливості вимірювання напруги на тяговій підстанції постійного струму.....	17
2 СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ.....	19
2.1 Опис бібліотеки Power... Simulink в середовищі MatLab.....	19
2.2 Опис моделі перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму.....	27
2.3 Перевірка моделі.....	29
3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ.....	32
3.1 Аналіз існуючих фільтрів .....	32
3.1.1 Параметри фільтр-пристрою №1 .....	32
3.1.2 Параметри фільтр-пристрою №2.....	33
3.1.3 Параметри фільтр-пристрою №3 .....	33
3.1.4 Параметри фільтр-пристрою №4.....	34
3.1.5 Параметри фільтр-пристрою №5.....	35
3.1.6 Параметри фільтр-пристрою №6.....	36

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробник	Сіксяєв В.О.				Дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму	Літ.	Арк.	Аркушів
ОП та БНС	.						5	49
Керівник	Данилов О.А.					УДУНТ, ІСЕ, гр.265		
Економ..								
Н. контр	Перцевий В.							

3.1.7 Параметри фільтр-пристрою №7 .....	36
3.2 Результати проведених дослідів.....	37
4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ.....	41
4.1 Розрахункові дані моделювання.....	41
4.2 Порівняння різних схем.....	43
ВИСНОВОК.....	47
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК.....	48

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		



## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Електрифіковані залізниці є важливим транспортним сполученням. Тому вони повиненні 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 спрацювання захисту залежить від відстані до короткого замикання та параметрів тягової мережі. З появою мікропроцесорних захистів з'явилась можливість ідентифікувати коротке замикання в перші 2-3 мілісекунди. Для цього використовується захист по швидкості зростання струму. Для його налаштування необхідно знати параметри контуру замикання, який має активно-індуктивний характер (RL). Постійна часу підстанції, за рахунок реактора, більша постійної часу контактної мережі. Чим далі від підстанції джерело збудження (коротке замикання, переключення позицій електровоза, відрив струмоприймача та інше), тим буде менша результуюча постійна часу. Тобто характер перехідного процесу залежить від відстані до тягової підстанції.

Складність розрахунків перехідного процесу додає наявність фільтр-пристрою, який представляє собою LC контури. Наявність ємності фільтр-пристрою переводить перехідний процес першого порядку у другий порядок, що значно ускладнює розрахунки зміни струму і напруги при коротких замиканнях. При цьому буде виникати коливальний процес.

Перехідні процеси в тяговій мережі постійного струму залежать від співвідношення активного опору, індуктивності та ємності контуру, в якому

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		

протікає цей процес. Активний опір в більшій своїй частині залежить від типу контактної підвіски, питомих фідерів, рейок і відстані від підстанції до джерела збудження. Індуктивність контуру складається з індуктивності підстанції і індуктивності контактної підвіски. Індуктивність підстанції в першу чергу обумовлена індуктивністю реактора. Індуктивність контактної підвіски залежить від конструктивних особливостей контактної мережі (відстань між проводами і землею, кількістю паралельних шляхів). Ємність залежить від типу фільтр-пристрою, кількості паралельних контурів.

Для розрахунку параметрів струму і напруги при перехідному процесі було використано моделювання в середовищі MatLab. Це дозволило швидко отримувати необхідні дані при змінних первинних параметрах: різних типів фільтр-пристрою.

**Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри.** Обране дослідження безпосередньо пов'язані з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

**Мета і завдання роботи.** Провести аналіз перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму, які виникають в процесі експлуатації. Дослідити вплив зміни параметрів фільтр-пристрою на швидкість зміни параметрів струму та напруги.

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

**Предмет дослідження** – перехідні процеси в тяговій мережі при коротких замиканнях при різних схемах фільтр-пристроїв на тяговій підстанції.

**Методи дослідження** – експериментальні дослідження та моделювання коротких замикань в тяговій мережі постійного струму.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Для дослідження перехідних процесів була створена математична модель в середовищі MatLab. Використовуючи модель були проаналізовані зміни струму і напруги при коротких

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		



замиканнях при різних схемах фільтр-пристроїв. Було показано, що фільтр-пристрій найбільше впливає на початку перехідного процесу

**Практичне значення отриманих результатів.** На основі приведених даних можна розглянути, як зміниться швидкість зміни струму та напруги. Аналіз перехідних процесів згідно цих даних дозволяє почати розробку чи вдосконалення захисту, який буде реагувати в відповідності до режиму роботи тягової мережі.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Здобувачем самостійно створена модель, проведені розрахунки, зіставлення та аналіз отриманих під час моделювання з експериментальними дослідженнями результатів.

### **Публікації.**

Сіксяєв В. О. Вплив фільтр-пристрою на перехідні процеси в тяговій мережі постійного струму / Енергетика та електромеханіка [електронний ресурс]: збірник тез доповідей секції 81 Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених, магістрантів та студентів «Наука і сталий розвиток транспорту» 28 жовтня 2021 р. – Дніпро: Дніпровський нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2021. – 20 с.

Данилов О. А., Сіксяєв В. О., Ісмагілов Є. В. Зменшення часу відключення високовольтних швидкодіючих вимикачів постійного струму. : матеріали 81 Міжнар. наук.-практ. конф. (Дніпро, 23–24 квітня, 2021 р.) С.69-70.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	№	Підпис	Дата	

# 1 ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ

Будь-яка зміна умов в роботі тягової мережі призводить до виникнення перехідних процесів, що в свою чергу призводять до зміни режиму роботи [1].

## 1.1 Режими роботи тягової мережі постійного струму

На даний момент залізниця є важливим шляхом сполучення для пасажиро- та вантажоперевезень в Україні. Безперебійність та надійність її роботи, в першу чергу залежить від режиму роботи системи електропостачання. Роботу тягової мережі постійного струму можна охарактеризувати наступними режимами: нормальним, вимушеним чи аварійним[2].

У **нормальному режимі** параметри усіх елементів системи електропостачання нижчі від гранично допустимих за нормами значень. Система забезпечує живлення контактної мережі при розрахункових розмірах руху та умов найбільшого опору руху ЕРС та найбільшого споживання електроенергії (включене опалення, максимальне заповнення пасажирами тощо). У нормальному режимі система електропостачання працює з найвищими техніко-економічними показниками.

Під розрахунковими розмірами руху розуміють:

- для магістрального та промислового транспорту період найбільш інтенсивного руху поїздів;
- тривалість цього періоду зазвичай становить 2 години;
- для міського електричного транспорту період ранкового та вечірнього часу інтенсивного перевезення пасажирів, так звані часи пік.

Розрахункові розміри руху визначають виходячи з добових графіків руху.

У **вимушеному режимі** тимчасові відключення будь-яких елементів системи електропостачання: лінії живлення, перетворювач або джерело живлення власних потреб тягової підстанції. У цьому випадку нормальна робота забезпечуватиметься за рахунок закладеного у системі резерву.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		



Параметри системи електропостачання вибираються з таким запасом, щоб схема залишалася надійною та працездатною у вимушеному режимі без обмеження розмірів та швидкостей руху. Але оскільки робота системи у цьому режимі протікає у складніших умовах, то не виключається можливість тимчасового обмеження розмірів руху.

Основні показники, що характеризують роботу системи електропостачання (електричні навантаження, втрати потужності та напруги), у вимушеному режимі можуть перевищувати відповідні значення нормального режиму, але не повинні виходити за межі допустимих значень. У вимушеному режимі техніко-економічні показники системи відповідають оптимальним.

В аварійному режимі робота системи електропостачання при розрахункових розмірах руху стає неможливою через порушення технічних нормативів, через що рух на лінії тимчасово або повністю припиняється.

В випадки виникнення аварійних режимів, спричинених короткими замиканнями основними причинами якого є пробій або механічне пошкодження ізоляції кабеля та котушок електричних машин, пробою напівпровідникових вентилів, круговий вогонь на колекторі тягового електродвигуна тощо.

Значення струму короткого замикання залежить від розташування аварійного ланцюга. Якщо вона розташована близько до джерела напруги, струм короткого замикання може бути в кілька десятків разів більший за номінальних струмів. При короткому замиканні на ділянці ланцюга, найбільш віддаленому від джерела, струм короткого замикання буде на багато більше номінального струму цієї ділянки, але струм джерела при цьому може майже не зміниться.

## 1.2 Схеми заміщення

Для обраної схеми живлення з урахуванням заданих обмежень була складена схема заміщення системи тягового електропостачання, що приведена на рисунку 1.1.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		

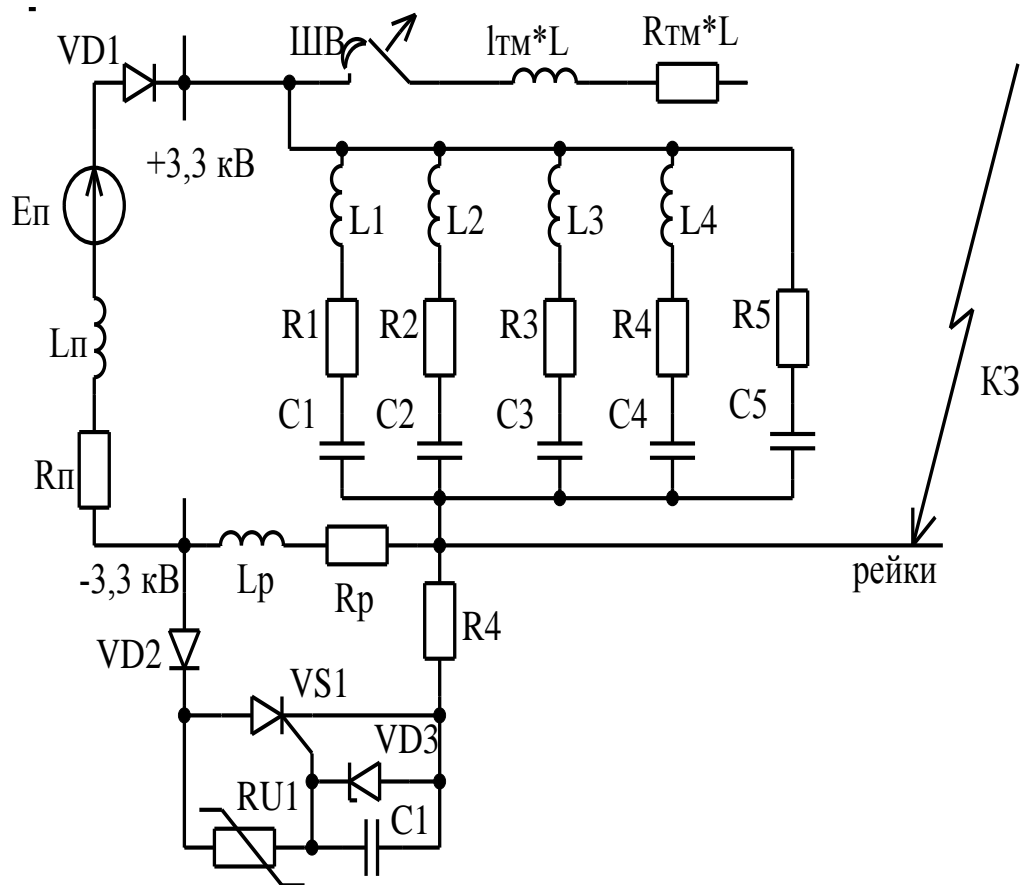


Рис. 1.1 - Схема системи тягового електропостачання в режимі короткого замикання

Всі складові частини цієї схеми будуть розглянуті в наступному підрозділі. Як добре видно на рис. 1.2.1, схема заміщення містить декілька контурів з реактивними й нелінійними елементами, що у загальному випадку описується системою нелінійних диференціальних рівнянь, рішення яких можливо тільки із залученням обчислювальної техніки.

### 1.2.1 Елементи підстанції

В якості основних елементів тягової підстанції для проведення дослідження по вище наведеній схемі рис.1.2.1 були підібрані: силовий трансформатор; перетворювач частоти, роду струму; фільтр-пристрій; розрядний пристрій. Нижче представлено більш детальний розбір зазначених елементів.

## Тяговий трансформатор

Силовим елементом підстанції буде виступати тяговий трансформатор ТРДП-12500/35Ж-У1.  $P=12500$  кВА;  $U=35$  кВ. Принципова схема підключення[3] представлена нижче рисунок 1.2.

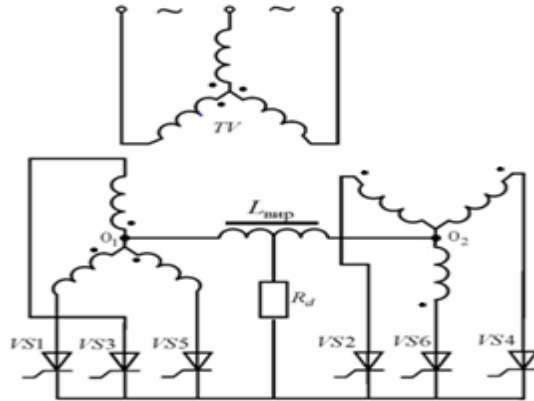


Рисунок 1.2 - Схема заміщення тягового трансформатора

## Випрямляч

Для дослідів взята дванадцятипульсова схема випрямлення перетворювального агрегату. Були прийняті такі припущення :

- внутрішній активний опір випрямляча [4] рівний  $r_B = 0.011$  Ом;
- активний опір перетворювального трансформатора [4]  $r_B = 0.002$  Ом;
- індуктивний опір перетворювального трансформатора [4]  $x_T = 0,3$  мГн.

Звідси отримуємо наступні параметри перетворювального агрегата приведенного на рисунку 1.3:

$$E_{\Pi} = 3600 \text{ В}, L_{\Pi} = x_T = 0,3 \text{ мГн}, R_{\Pi} = r_B + r_T = 0,013 \text{ Ом}.$$

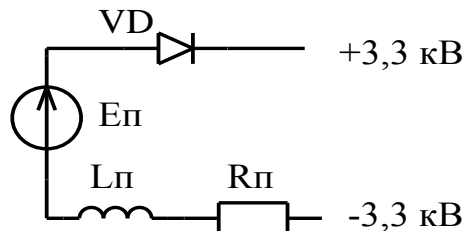


Рисунок 1.3 - Схема заміщення перетворювального агрегату



### Фільтр-пристрою

Вплив згладжуючого пристрою на перехідні процеси при виникненні і відключенні КЗ в даній роботі досліджувались на схемі одноланкового фільтра, за винятком фільтр-пристрою на ділянці Сартана де було застосовано дволанковий фільтр. За основу було взято фільтр-пристрій тягової підстанції ЕЧЕ-18 Південної залізниці приведеної на рисунку 1.4.

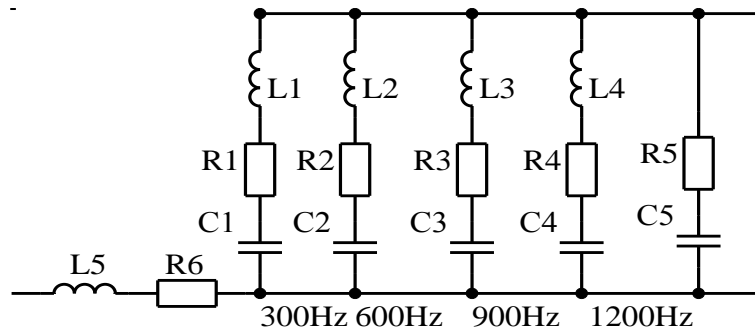


Рисунок 1.4 - Принципова схема заміщення фільтра-пристрою

### Елементи схеми заміщення

Елементи резонансних контурів моделювалися у вигляді послідовно ввімкнених RLC ланок, дані яких наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 - Параметри елементів схеми зображеної на рис. 1.4

Частота ланки, Гц	Опір ланки, Ом	Індуктивність ланки, мГн	Ємність ланки, мкФ
300	0,15	3,15	90
600	0,1	1,76	40
900	0,1	1,25	25
1200	0,1	1,17	15
Згладжуючий реактор	0,06	5	—
Паралельний конденсатор	0,1	—	30

## Розрядний пристрій

Розрядний пристрій в даному випадку використовується як поглинач енергії, що накопичується в індуктивності реактора що згладжує в даній роботі, сама схема розрядного пристрою зображена на рисунку 1.5. Треба додати, що кола захисту і сигналізації від пробоя теристорів, що не впливають на роботу пристрою тут не наводяться.

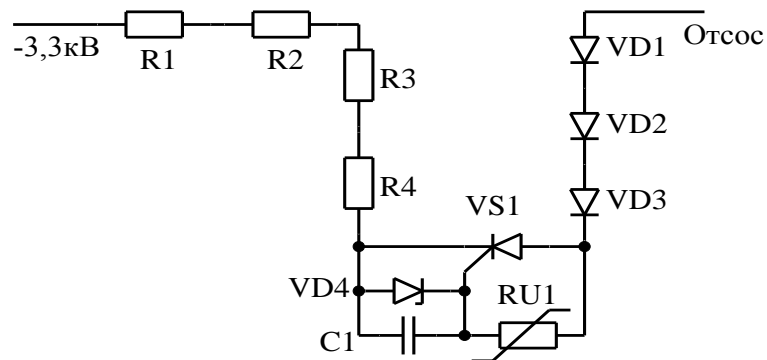


Рис. 1.5 - Схема заміщення розрядного пристрою

### Елементи схеми заміщення

Номінальні значення елементів розрядного пристрою необхідні для його моделювання подані в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Параметри елементів схеми зображеної на рис. 1.5

Позиційне позначення	Тип	Номінальні значення
R1...R4	6TP.662.021	0,077 Ом
VD1...VD3	ДЛ153	-
VS1	T253	-
UR1	CH2-2A	1300В
C1	K73-11	2,2 мкФ
VD4	Д815Г	12В

### 1.2.2 Елементи тягової мережі

До елементів тягової мережі конструктивно відносяться: контактна підвіска, рейки та питомі фідера.

Дані використаних типів контактних підвісок та рейок [5] представлені в наведених нижче таблицях 1.3 та 1.4.

Таблиця 1.3 - Параметри елементів контактної підвіски

Тип контактної підвіски	Питомий опір до/мережі і 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	0,054	0,049	0,026
M120+2МФ-100+2A185	0,044	0,04	0,021
M120+2МФ-100+3A185	0,038	0,034	0,018
ПБСМ95+2МФ-100	0,094	0,089	0,046
ПБСМ95+2МФ-100+A185	0,064	0,06	0,032

Таблиця 1.4 - Параметри елементів рейок

Тип рейок	Опір 1 км рейок постійному струму, Ом/км		
	Однієї цілої рейки	з урахуванням стиків	
		одного шляху	двох шляхів
P75	0,0218	0,0131	0,0065
P65	0,0254	0,0155	0,0077
P50	0,0318	0,0195	0,0097

В якості дослідної ділянки була вибрана двоколійна ділянка контактної мережі довжиною 8.9км, без поста секціонування, підвіска M120+2МФ-100 , рейки P65.

Питомий активний опір контактної підвіски приймаємо згідно  $R = 0,07$  Ом/км.

Питома індуктивність тягової мережі в загальному випадку може змінюватися в діапазоні від 1,1 до 1,5 мГн/км. Приймаємо для даної роботи  $L=1,1$  мГн/км.

Питомий фідер так як він встановлюється в місцях з великим навантаженням тобто на перегоні, а довжина плеча живлення може суттєво відрізнятись в переважно більшості випадків даний провід беруть 4А185. Оскільки він відповідає технічним параметрам, та є більш дешевшим на відміну від міді.

Питомий активний опір фідера приймаємо  $R = 0,104 \text{ Ом}$ .

Питома індуктивність приймаємо  $L=0,5 \text{ мГн}$ .

### **1.2.3 Особливості вимірювання напруги на тяговій підстанції постійного струму**

Головною особливістю вимірювання напруги на тяговій підстанції є те, що вимірювання відбувається безпосередньо підключається до шини з напругою 3,3 кВ. Внутрішній дільник підключений між шиною 3,3 кВ і шиною внутрішнього заземлення. За такою схемою підключення мікропроцесорний захист буде міряти напругу між рейками і шиною +3,3 кВ, а не напругу на шинах підстанції, як зазначено в документації. Для струмових захистів це не важливо, але в захистах де використовується напруга це треба враховувати.

На рис1..6 пояснено в чому полягає різниця виміру напруги мікропроцесорним захистом і фактичною напругою на шинах підстанції. При сталому процесі зміни струму підстанції ці напруги не відрізняються, завдяки малому активному опору реактора. Але при великій швидкості зміни струму ця різниця буде значною завдяки великій індуктивності реактора і це треба враховувати. Саме такі швидкі зміни струму відбуваються при аварійних режимах. При значній швидкості зростання струму в реакторі виникне протиелектрорушійна сила плюсом до рейки і захист заміряє напругу менше на цю величину.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		



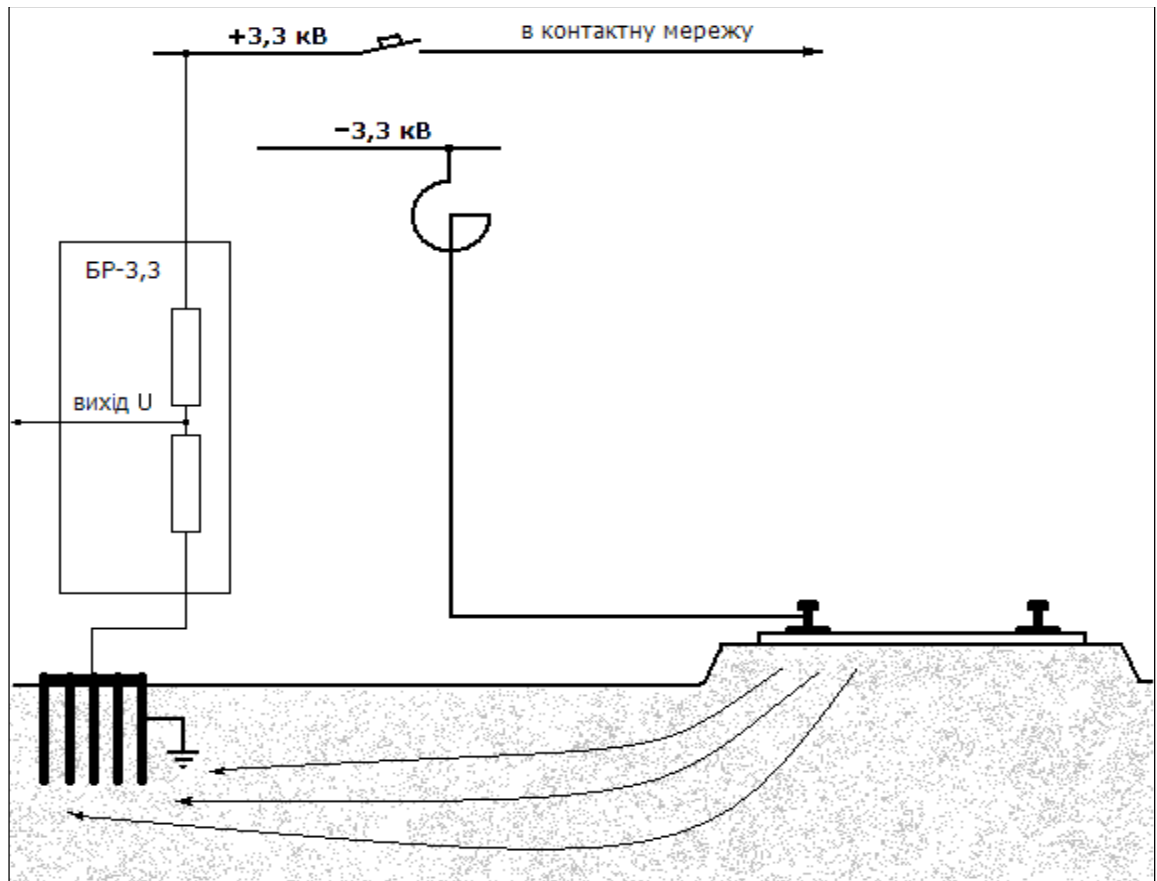


Рисунок 1.6 - Вимірювання напруги мікропроцесорним захистом

Треба зазначити, що шина -3,3 кВ в тяговій мережі постійного струму не з'єднана ні з внутрішнім, ні з зовнішнім контуром заземлення тягової підстанції. Схема заміщення вимірювання напруги мікропроцесорними захистами показана на рис.1.7.

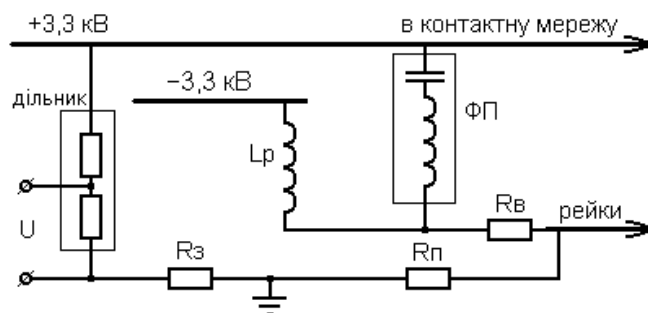


Рисунок 1.7 - Схема заміщення вимірювання напруги

На схемі зображені наступні елементи:  $R_z$  – сумарний опір заземлення,  $R_v$  – опір відсмоктуючого проводу;  $L_p$  – індуктивність реактора;  $R_p$  – перехідний опір землі між рейками и зовнішнім контуром заземлення;  $\Phi П$  – фільтр-пристрій.

## 2 СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ

### 2.1 Опис бібліотеки Power... Simulink в середовищі MatLab

Пакет розширення Simulink системи MATLAB[6] є ядром інтерактивного програмного комплексу, призначеного для математичного моделювання лінійних і нелінійних динамічних систем і пристроїв, представлених своєю функціональною блок-схемою, іменованою S-моделлю, або просто моделлю. При цьому можливі різні варіанти моделювання: у часовій області, у частотній області, із подійним керуванням, на основі спектральних перетворень Фур'є, з використанням методу Монте-Карло (реакція на впливи випадкового характеру) тощо.

Для побудови функціональної блок-схеми модельованих пристроїв Simulink має велику бібліотеку блокових компонентів і зручний редактор блок-схем. Він заснований на графічному інтерфейсі користувача та по суті є типовим засобом візуально-орієнтованого програмування[7]. Використовуючи палітри компонентів (набори блоків), користувач за допомогою миші переносить потрібні блоки з палітр на робочий стіл пакета Simulink і з'єднує лініями входи й виходи блоків. Таким чином, створюється діаграма (блок-схема) системи або 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 слід зазначити, що ці файли дуже громіздкі й навіть для досить простих моделей можуть містити тисячі рядків програмного коду. Програма в кодах автоматично генерується в процесі введення обраних блоків компонентів, їхніх з'єднань і завдання параметрів компонентів, користувач практично не має справи із програмуванням[8].

Simulink автоматизує наступний, найбільш трудомісткий етап моделювання: він складає та вирішує складні системи алгебраїчних і диференціальних рівнянь, що описують задану функціональну схему (модель), забезпечуючи зручний і наочний візуальний контроль за поведінкою створеного

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						19
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		

користувачем віртуального пристрою. Досить уточнити (якщо потрібно) вид аналізу й запустити Simulink у режимі симуляції (звідки й назва пакета Simulink) створену модель системи або пристрою. Simulink практично миттєво змінює математичний опис моделі в міру введення її нових блоків, навіть у тому випадку, коли цей процес супроводжується зміною порядку системи рівнянь і веде до істотної якісної зміни поведінки системи. Втім, це є однією з головних цілей пакета Simulink.

Цінність Simulink полягає й у великій, відкритій для вивчення й модифікації, бібліотеці компонентів (блоків). Вона включає джерела впливів (сигналів) із практично будь-якими часовими залежностями, масштабуючі, лінійні й нелінійні перетворювачі з різноманітними формами передатних характеристик, квантуючі пристрої, інтегруючі і диференціюючі блоки тощо.

У бібліотеці є набір віртуальних пристроїв, що реєструють, - від простих вимірників типу вольтметра або амперметра до універсальних осцилографів, що дозволяють переглядати часові залежності вихідних параметрів модельованих систем, наприклад струмів і напруг, переміщень, тисків і т.п. Simulink має засоби анімації й звукового супроводу. А в додаткових бібліотеках можна відшукати й такі «дорогі прилади», як аналізатори спектру складних сигналів, багатоканальні самописці й засоби анімації графіків[9].

Інтеграція однієї з найшвидших матричних математичних систем - MATLAB з пакетом Simulink - відкрила нові можливості використання найсучасніших математичних методів для рішення задач динамічного й ситуаційного моделювання складних систем і пристроїв.

Важлива перевага Simulink - це інтеграція не тільки із системою MATLAB, але й з рядом інших пакетів розширення, що забезпечує, по суті, необмежені можливості застосування Simulink для рішення практично будь-яких задач імітаційного й подійного моделювання.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		

Бібліотека блоків SimPowerSystems (Power System Blockset) є однією з додаткових бібліотек Simulink, орієнтованих на моделювання конкретних пристроїв. SimPowerSystems містить набір блоків для імітаційного моделювання електротехнічних пристроїв. До складу бібліотеки входять моделі пасивних і активних електротехнічних елементів, джерел енергії, електродвигунів, трансформаторів, ліній електропередачі й тому подібного встаткування. Є також розділ, що містить блоки для моделювання пристроїв силової електроніки, включаючи системи керування для них. Комбінуючи можливості Simulink і SimPowerSystems, користувач може не тільки імітувати роботу пристроїв у часовій області, але й виконувати різні види аналізу таких пристроїв.

Безсумнівною перевагою SimPowerSystems є те, що складні електротехнічні системи можна моделювати, сполучаючи методи імітаційного й структурного моделювання[10]. Наприклад, силову частину напівпровідникового перетворювача електричної енергії можна виконати з використанням імітаційних блоків SimPowerSystems, а систему керування - за допомогою звичайних блоків Simulink, що відображають лише алгоритм її роботи, а не її електричну схему. Такий підхід, на відміну від пакетів схемотехнічного моделювання, дозволяє значно спростити всю модель, а виходить, підвищити її стійкість і швидкість роботи. Крім того, у моделі з використанням блоків SimPowerSystems можна використовувати блоки й інших бібліотек Simulink, а також функції самого MATLAB, що дає практично не обмежені можливості для моделювання електротехнічних систем.

Бібліотека SimPowerSystems досить велика. У тому випадку, якщо все-таки потрібного блоку в бібліотеці немає, є можливість самостійно створити свій власний блок як за допомогою вже наявних у бібліотеці блоків, реалізуючи можливості Simulink по створенню підсистем, так і на основі блоків основної бібліотеки Simulink і керованих джерел струму або напруги.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.№	Підпис	Дата		



Таким чином, SimPowerSystems у складі Simulink на теперішній час може вважатися одним із кращих пакетів для моделювання електротехнічних пристроїв і систем.

Для побудови в середовищі Simulink розрахункової схеми та моделі швидкодіючого вимикача необхідні наступні функціональні блоки, що знаходяться в бібліотеках Simulink[11].

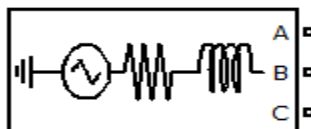
Series RLC Branch – послідовна RLC - ділянка. Моделює послідовне включення опору, індуктивності та ємності рисунок 2.1.



Series RLC Branch

Рисунок 2.1 - Послідовна RLC – ділянка

Three-Phase Source – модулює трифазне джерело напруги рисунок 2.2. Кожна фаза джерела має внутрішній активно-індуктивний опір. Внутрішній опір джерела може бути задано за допомогою значень опору та індуктивності фази або опосередковано, за допомогою параметрів короткого замикання.



Three-Phase Source

Рисунок 2.2 - Ідеальне джерело постійної напруги

Controlled Voltage Source – кероване джерело напруги рисунок 2.3. Виробляє напругу відповідно до керуючого сигналу. Сигнал керування є безрозмірним Simulink - сигналом. Джерело Controlled Voltage Source може бути ініціалізований як джерело постійної або змінної напруги.

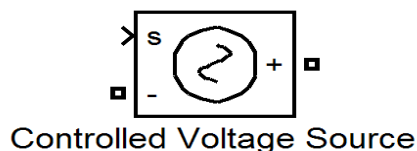


Рисунок 2.3 - Кероване джерело напруги

Breaker – вимикач струму рисунок 2.4. Моделює пристрій включення та відключення струму. Вимикач Breaker може керуватись зовнішнім вхідним сигналом або від вбудованого таймера. Включення пристрою виконується одиничним керуючим сигналом. Команда на відключення подається нульовим рівнем сигналу, при цьому відключення відбувається при зменшенні струму до нуля. Пристрій має вбудовану іскрогасильну RC – ділянку, ввімкнену паралельно контактам вимикача.

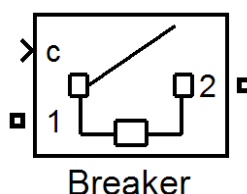


Рисунок 2.4 - Вимикач змінного струму

Ideal Switch – ідеальний ключ рисунок 2.5. Моделює ідеальний ключ. Модель ключа Ideal Switch складається з послідовно з'єднаних резистора і ключа. Ввімкнення приладу відбувається у випадку подачі на керуючий вхід одиничного позитивного сигналу, відключення – при зменшенні керуючого сигналу до нуля. В моделі паралельно контактам ключа приєднана послідовна RC-ділянка, яка виконує демпфуючі функції.

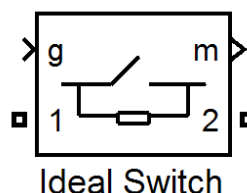


Рисунок 2.5 - Ідеальний ключ

Current Measurement – вимірювач струму рисунок 2.6. Виконує вимірювання миттєвого значення струму, що протікає через з’єднувальну лінію (провід). Вихідним сигналом блока Current Measurement є звичайний сигнал Simulink, який може використовуватись будь-яким Simulink –блоком.

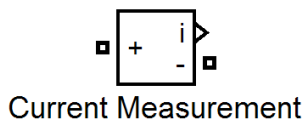


Рисунок 2.6 - Вимірювач струму

Voltage Measurement – вимірювач напруги рисунок 2.7. Виконує вимірювання миттєвого значення напруги між двома вузлами схеми. Вихідним сигналом блока Voltage Measurement є звичайний сигнал Simulink, який може використовуватись будь-яким Simulink - блоком.

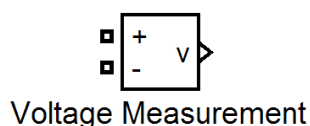


Рисунок 2.7 - Вимірювач напруги

Scope – віртуальний осцилограф рисунок 2.8. Дозволяє представити результати моделювання у формі, що нагадує осцилограми сучасного високоточного осцилографа з оцифрованою масштабною сіткою і променями різного кольору.

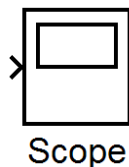


Рисунок 2.8 - Осцилограф

Gain – блок масштабування вхідної величини рисунок 2.9. Коефіцієнт передачі та метод масштабування задається у вікні параметрів. Блок імітує роботу ідеального підсилювача.

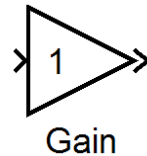


Рисунок 2.9 - Блок масштабування

Step – джерело одиночного перепаду рисунок 2.10. Перепад може бути як додатнім, так і від’ємним, що задається відповідними початковими значеннями.

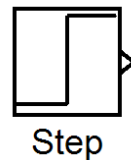


Рисунок 2.10 - Джерело одиночного перепаду

Relay – релейний блок рисунок 2.11. Блок має розривну передатну функцію. Якщо сигнал на вході досягає заданого порогу, то блок вмикається (вимикається). У вікні параметрів блоку можна задавати рівні сигналу на виході при ввімкненому та вимкненому станах, а також верхній та нижній порогові рівні спрацьовування.

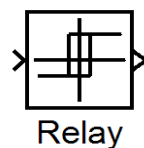


Рисунок 2.11 - Релейний блок

Repeating Sequence Interpolated – повторювана послідовність рисунок 2.12. Блок відноситься до джерел складних сигналів. Джерело повторюваних послідовностей Repeating Sequence Interpolated служить для генерації послідовності, що задана векторами моментів часу і значеннями сигналу в ці моменти.



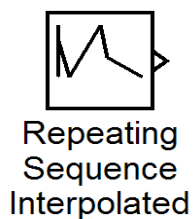


Рисунок 2.12 - Блок повторюваної послідовності

Enabled Subsystem – підсистема, яка починає працювати тільки при наявності на спеціальному керуючому вході дозволяючого сигналу, рівень якого перевищує 0 рисунок 2.13. Таку підсистему можливо збудувати і окремо з простої підсистеми (або створеної) шляхом внесення в неї блоку Enable, який надає ознаку керованості підсистемі і нікуди не підключається.

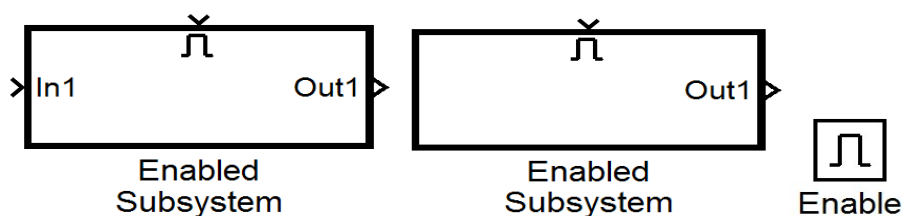


Рисунок 2.13 - Блок повторюваної послідовності

## 2.2 Опис моделі перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму

Імітаційна[12] модель для дослідження перехідних процесів в тяговій мережі рисунок 2.14.

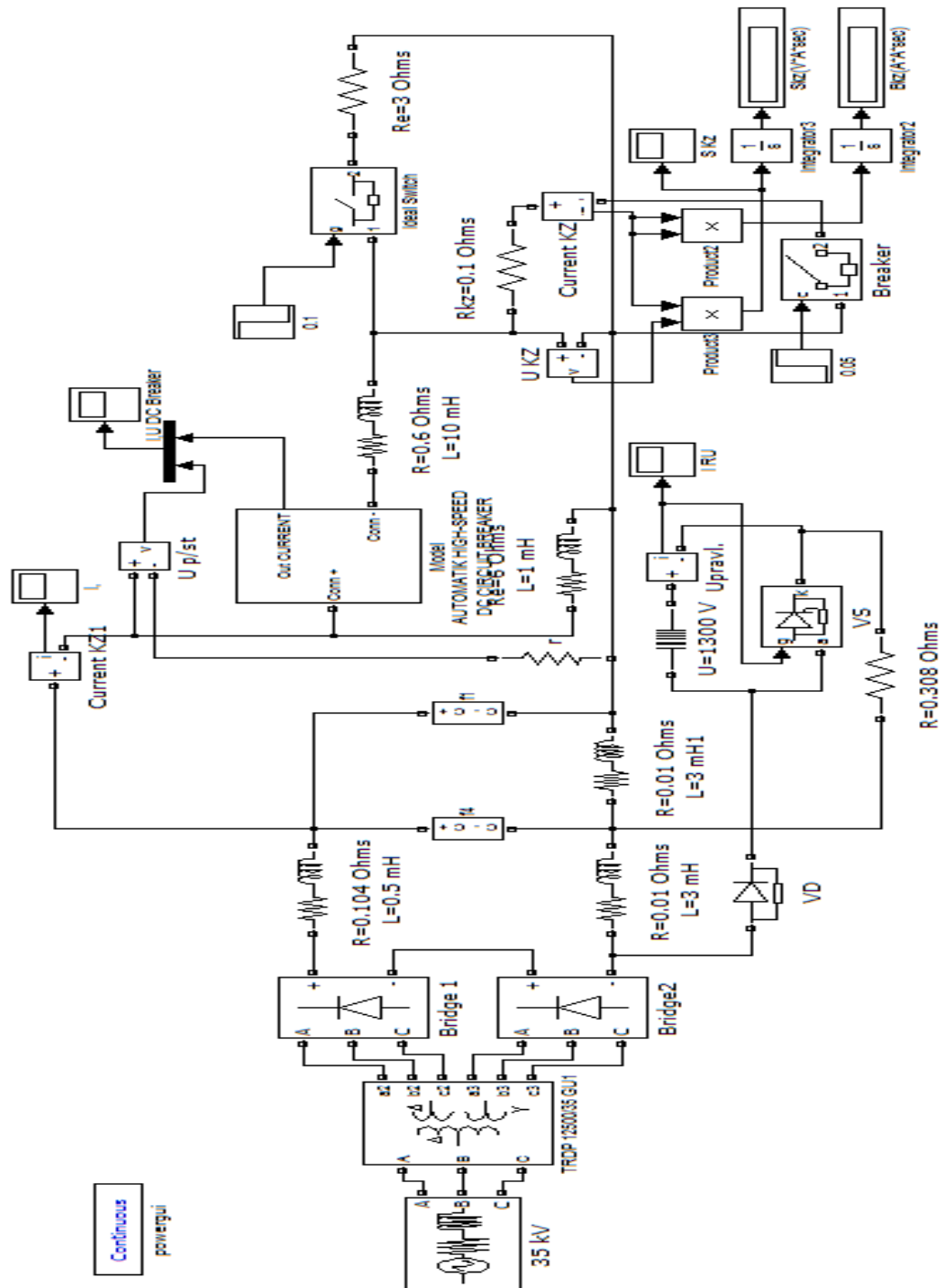


Рисунок.2.14 - Імітаційна модель системи тягового електропостачання в програмі MatLab, пакет SimPowerSystems (Simulink)

Далі представлені додаткові функціональні блоки[13] моделі, а саме блок швидкодіючого вимикача рисунок 2.15 та блок контурів згладжуючого фільтра рисунок 2.16.

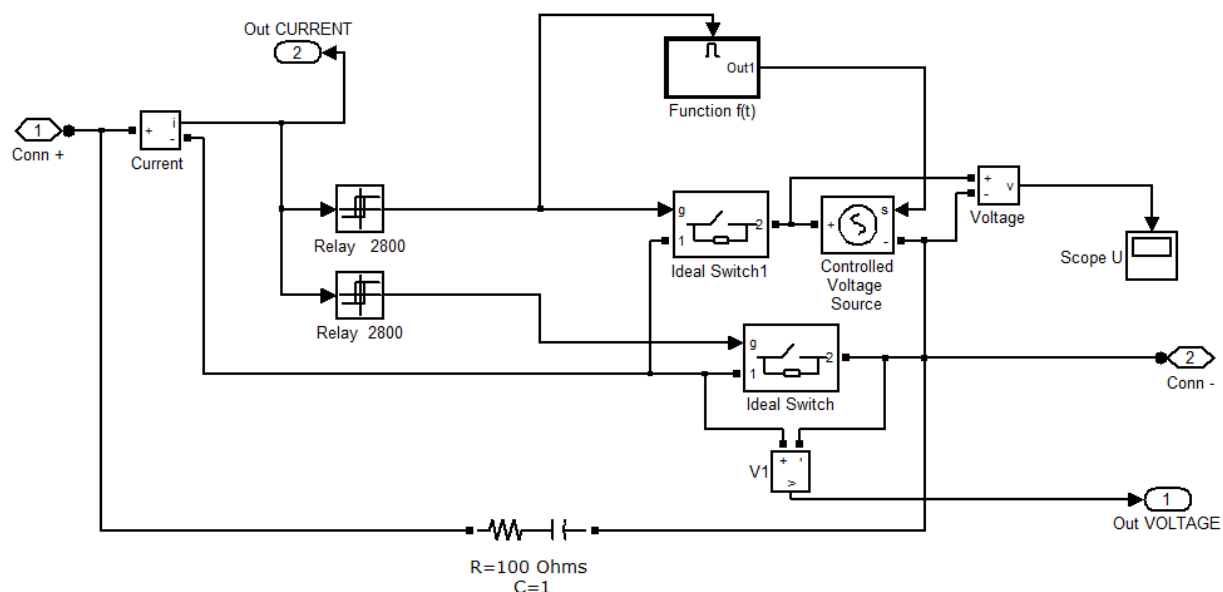


Рисунок 2.15 - Блок швидкодіючого вимикача

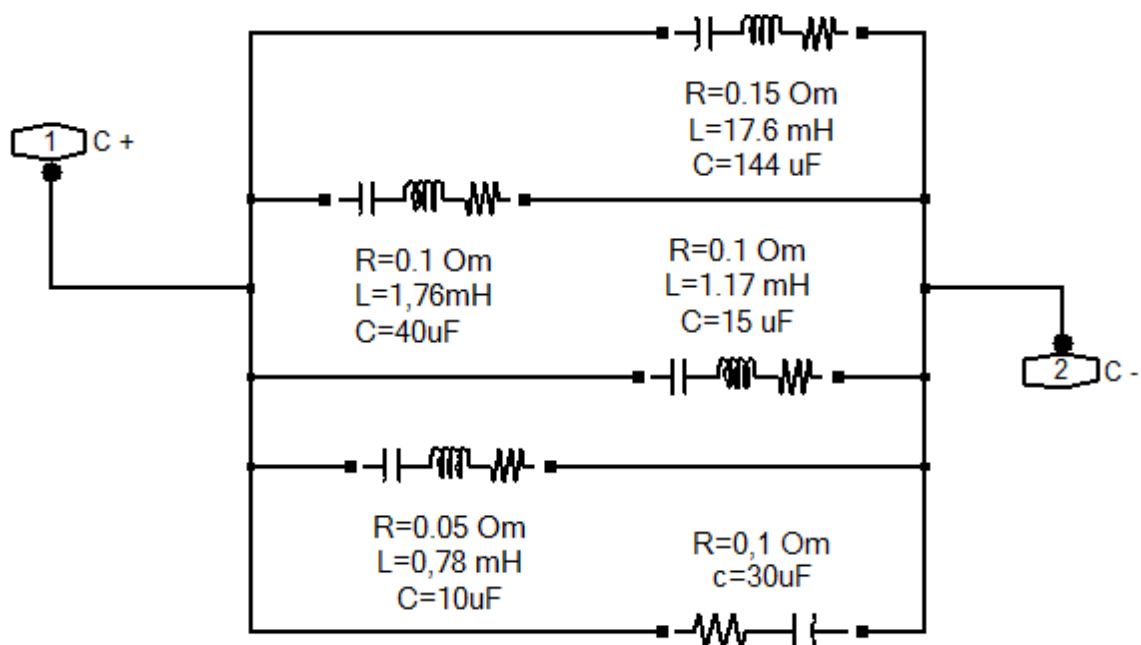


Рисунок 2.16 - Блок контурів згладжуючого фільтра

### 2.3 Перевірка моделі

Криві струму й напруги наведені на рис. 2.17 є прикладом ідеальних параметрів напруги та струму при короткому замиканні в тяговій мережі.

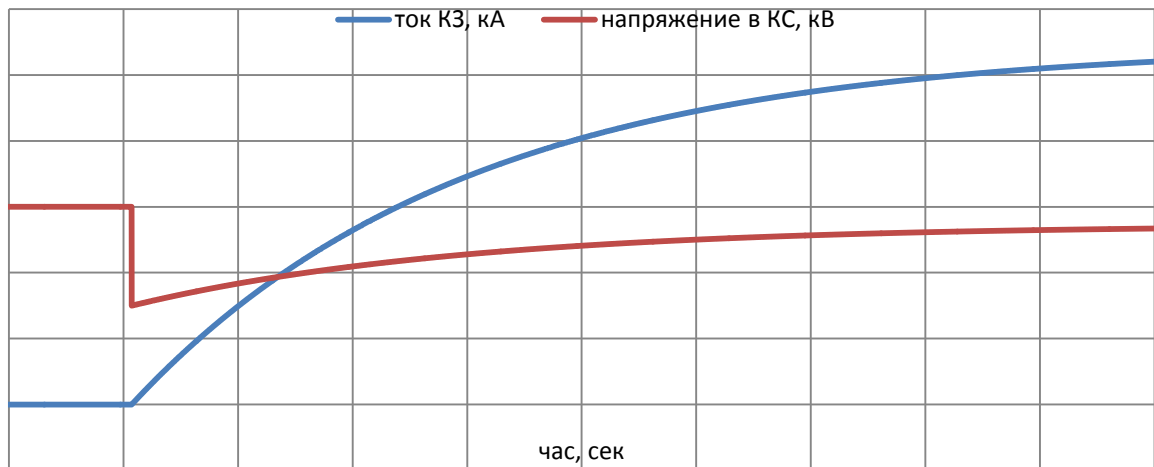


Рисунок 2.17 - Ідеалізовані криві струму та напруги при короткого замикання в тяговій мережі

Одним з елементів системи тягового електропостачання на постійному струмі, що дотепер не враховувався при аналізі перехідних процесів, є згладжуючий пристрій (ЗП). Схема заміщення ФП наведена на рис. 2.18.

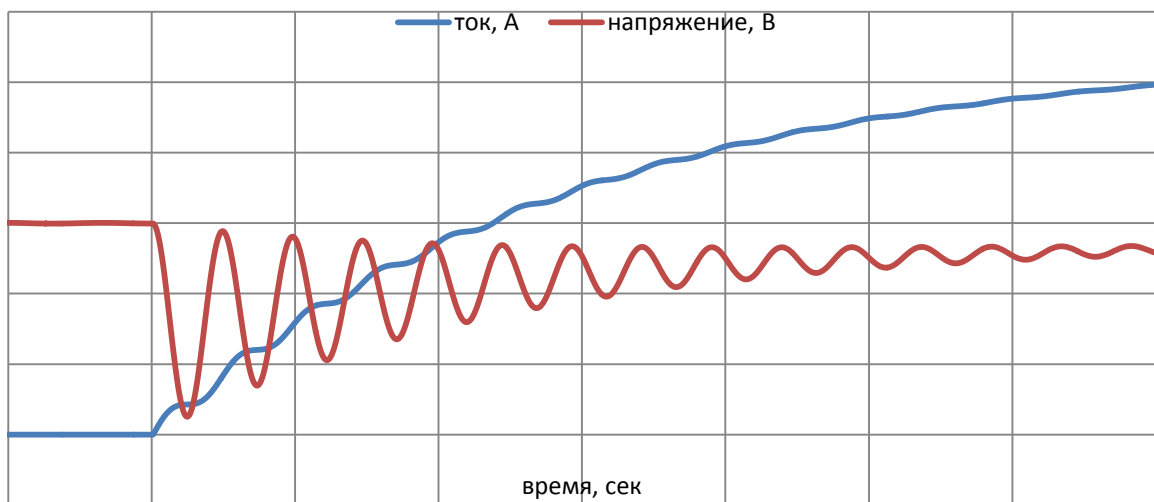


Рисунок 2.18 - Процес розвитку короткого замикання із урахуванням впливу фільтр-промстрою

На вже створеній імітаційній моделі проведено порівняння реакції перехідних процесів на зміну параметрів схеми шляхом заміни фільтр-пристрою. На приведеній нижче осцилограмі відображені реальні параметри зміни струму та напруги при короткому замиканні були зняті всередині ділянки з контактною підвіскою М120+2МФ100 рисунок 2.19.

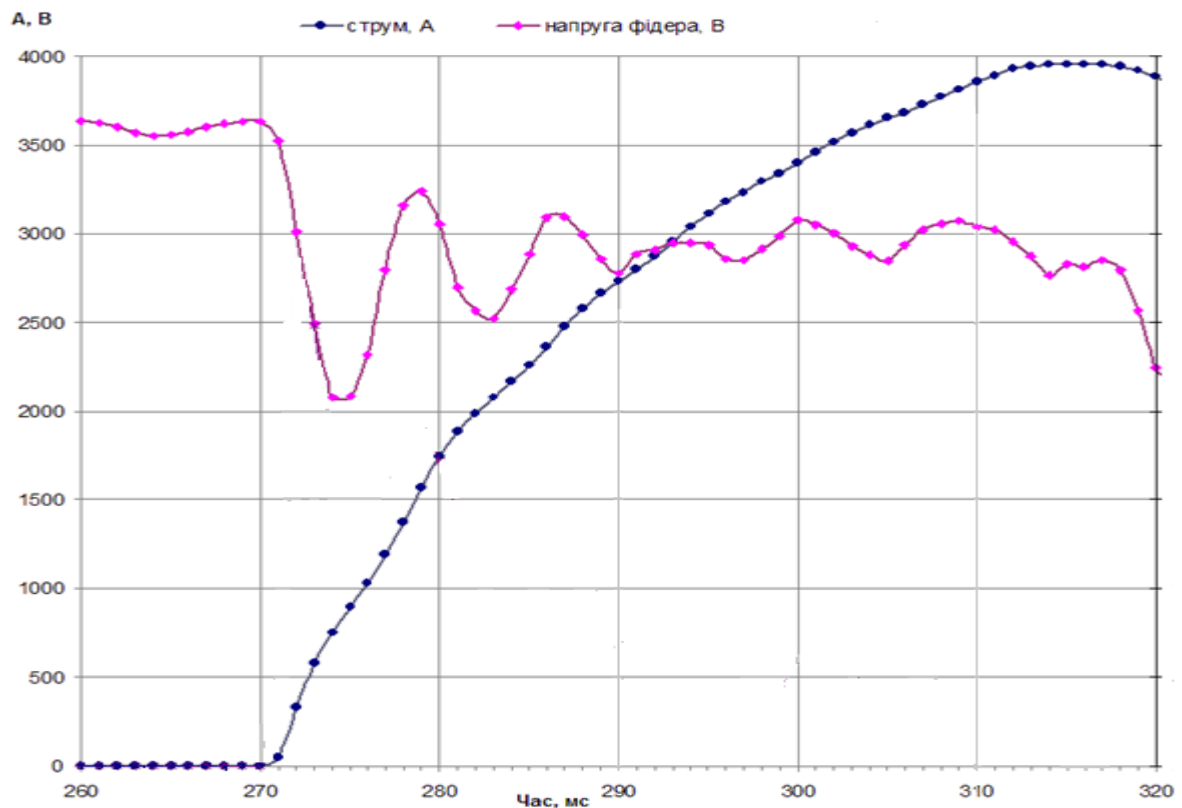


Рисунок 2.19 - Осцилограми короткого замикання ділянки Сартана – Кальчик на відстані 8,9 км від підстанції Сартана

Спрацювала МТЗ ЦЗАФ з уставкою 2800 А.

Опираючись на даний графік перевіримо відповідність роботи моделі.

Даний дослід буде проведений з застосуванням фільтру 1 Сартана. Дана модель працює доволі добре і співпадіння з реальним випадком короткого замикання є майже повністю, а отже модель є працездатною для подальшого проведення дослідження. Результат у вигляді показань осцилограми приведений на рисунку 2.20.



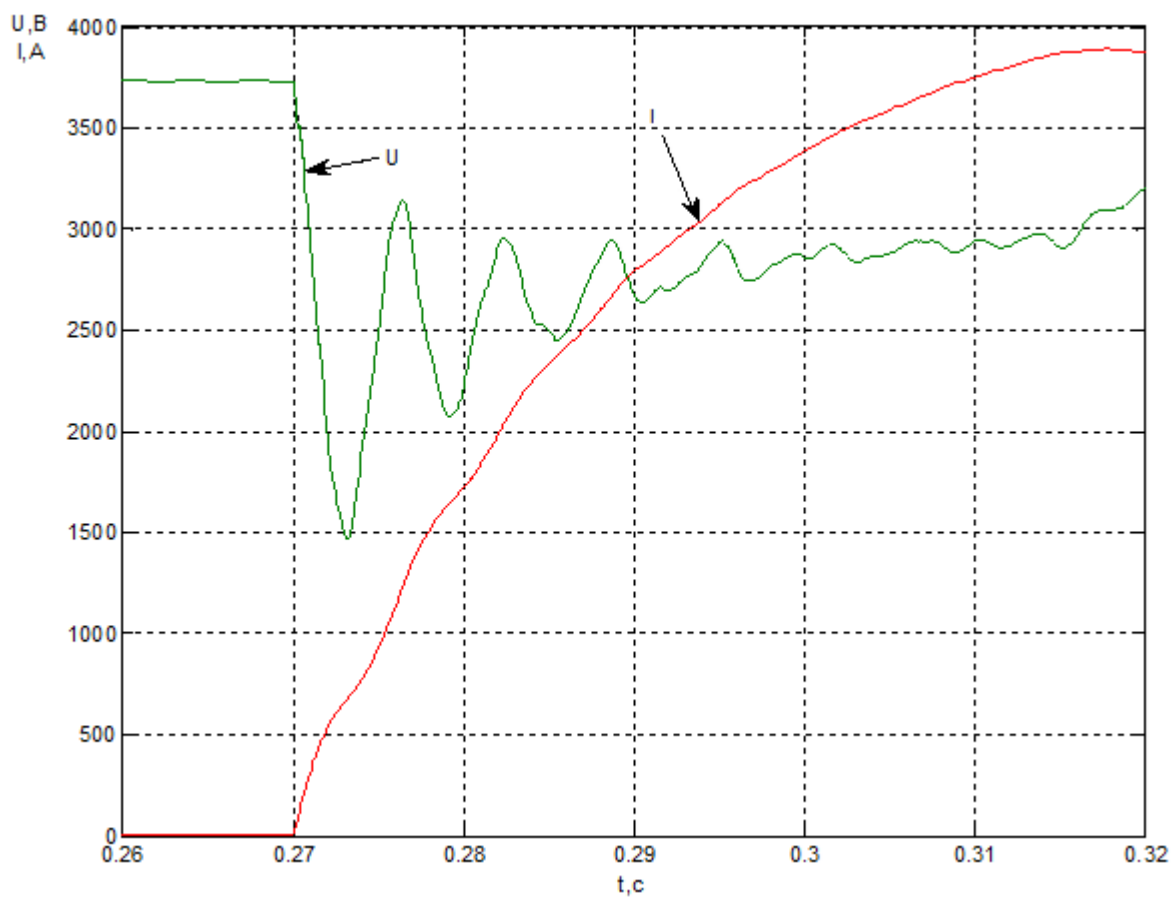


Рисунок 2.20 - Результати моделювання з параметрами експериментального короткого замикання

## 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ РІЗНИХ ПАРАМЕТРАХ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ

### 3.1 Аналіз існуючих фільтрів

В даному підрозділі приведені фільтр-пристрої, на основі їх параметрів будуть приведені кінцеві результати для обробки даних.

Для більш зручнішого подальшого використання представлених фільтрів їм буде присвоєна нумерація.

#### 3.1.1 Параметри фільтр-пристрою №1

Двохланковий фільтр-пристрій з реактором, даний фільтр застосовується на тяговій підстанції Сартана представлений надалі як фільтр 1. Вихідні данні фільтру, як і його принципова схема представлені на рисунку 3.1 та в таблиці 3.1:

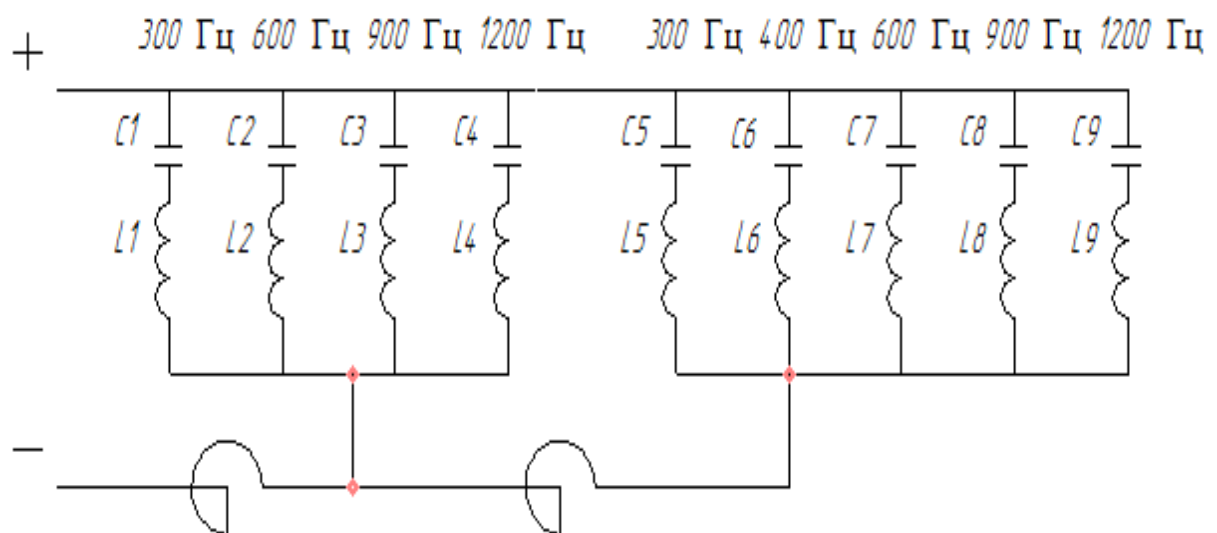


Рисунок 3.1 - Принципова схема фільтра №1

Таблиця 3.1 - Елементи контуру фільтр-пристрою №1

	Ланка 1				Ланка 2				
f, Гц	300	600	900	1200	300	400	600	900	1200
R, Ом	0.15	0.1	0.1	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1
L, мГн	14	1.76	1.25	1.17	14	3.96	1.76	1.25	1.17
C, мкФ	20	40	25	15	20	40	40	25	15

### 3.1.2 Параметри фільтр-пристрою №2

Двохланковий семиконтурний фільтр-пристрій з реактором далі фільтр 2. Особливістю даного фільтра є те що паралельно до реактора в другому ланцюзі підключений додатковий контур, що містить LC елементи, елементи даного контуру разом з реактором утворюють так звану фільтр-пробку для згладжування гармонік високої частоти. Вихідні данні фільтру, як і його принципова схема представлені на рисунку 3.2 та в таблиці 3.2:

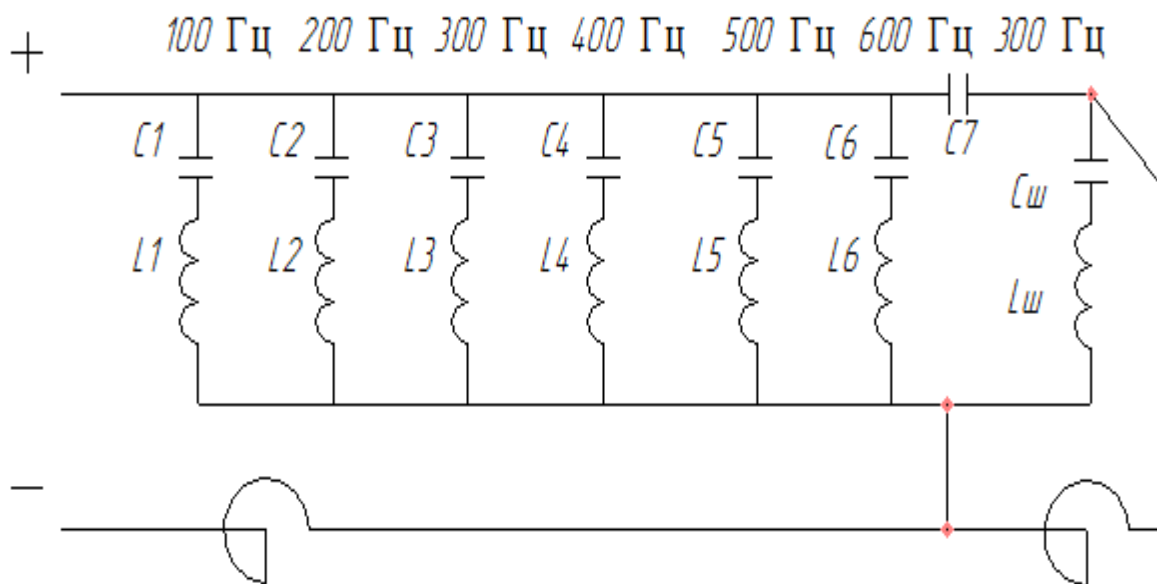


Рисунок 3.2 - Принципова схема фільтру №2

Таблиця 3.2 - Елементи контуру фільтру №2

f, Гц	100	200	300	400	500	600	300
R, Ом	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
L, мГн	17.6	6.63	2.93	2.6	2.1	1.96	
C, мкФ	144	96	96	60	48	36	204

### 3.1.3 Параметри фільтр-пристрою №3

Одноланковий фільтр-пристрій, даний фільтр застосовується на тяговій підстанції Пятихатки представлений надалі як фільтр 3. Вихідні данні фільтру, як і його принципова схема представлені на рисунку 3.3 та в таблиці 3.3:

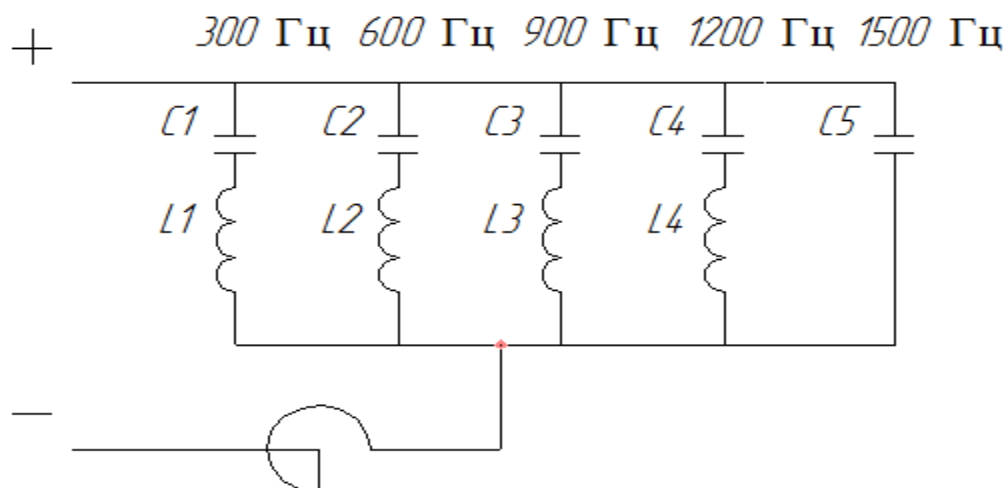


Рисунок 3.3 - Принципова схема фільтр №3

Таблиця 3.3 - Елементи контуру фільтр №3

f, Гц	300	600	900	1200	1500
R, Ом	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1
L, мГн	4.9	1.76	1.3	1.17	
C, мкФ	58	40	24	15	32

### 3.1.4 Параметри фільтр-пристрою №4

Одноланковий фільтр-пристрій, даний фільтр застосовується на тяговій підстанції Південно-Західної залізниці представлений надалі як фільтр 4. Вихідні данні фільтру, як і його принципова схема представлені на рисунку 3.4 та в таблиці 3.4:

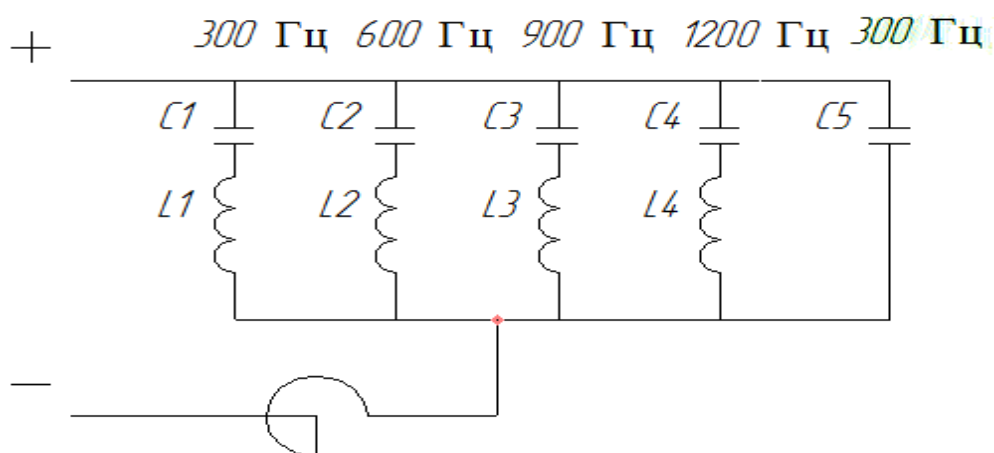


Рисунок 3.4 - Принципова схема фільтр №4

Таблиця 3.4 - Елементи контуру фільтр №4

f, Гц	300	600	900	1200	300
R, Ом	0.15	0.1	0.1	0.1	0.1
L, мГн	3.15	1.76	1.25	1.17	
C, мкФ	90	40	25	15	30

### 3.1.5 Параметри фільтр-пристрою №5

Одноланковий фільтр-пристрій, даний фільтр застосовується на тяговій підстанції Західно-Сибірської залізниці представлений надалі як фільтр 5. Вихідні данні фільтру, як і його принципова схема представлені на рисунку 3.5 та в таблиці 3.5:

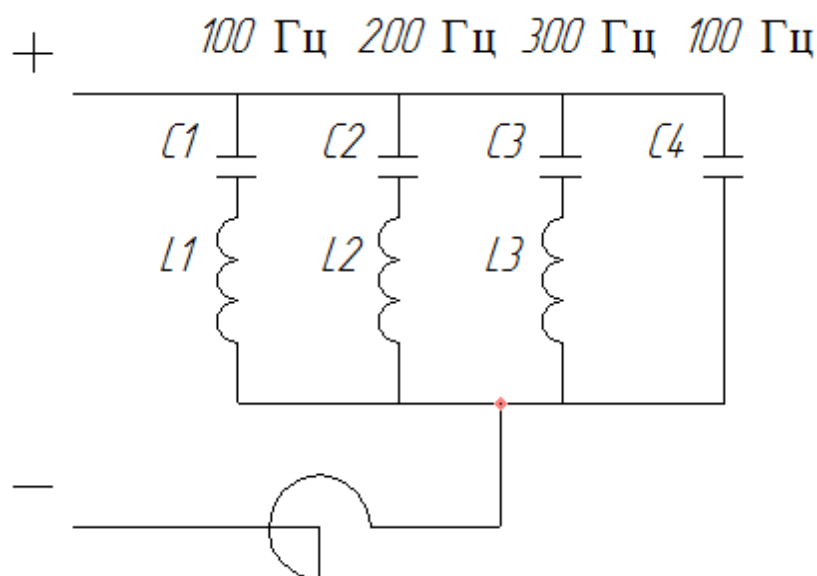


Рисунок 3.5 - Принципова схема фільтр №5

Таблиця 3.5 - Елементи контуру фільтр №5

f, Гц	100	200	300	100
R, Ом	0.15	0.1	0.1	0.1
L, мГн	17.6	6.63	2.93	-
C, мкФ	144	96	96	216

### 3.1.6 Параметри фільтр-пристрою №6

Одноланковий фільтр-пристрій який застосовується на тяговій підстанції Мінеральна, далі як фільтр № 6. Вихідні данні фільтру, як і його принципова схема представлені на рисунку 3.6 та в таблиці 3.6:

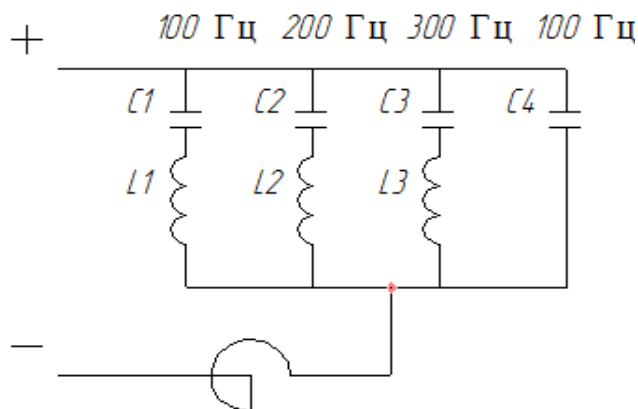


Рисунок 3.6 - Принципова схема фільтр №6

Таблиця 3.6 - Елементи контуру фільтр №6

f, Гц	100	200	300	100
R, Ом	0.15	0.1	0.1	0.1
L, мГн	18.1	6.3	3.1	
C, мкФ	140	100	90	280

### 3.1.7 Параметри фільтр-пристрою №7

Дволанцюговий фільтр-пристрій. Вихідні данні фільтру, як і його принципова схема представлені на рисунку 3.7 та в таблиці 3.7/

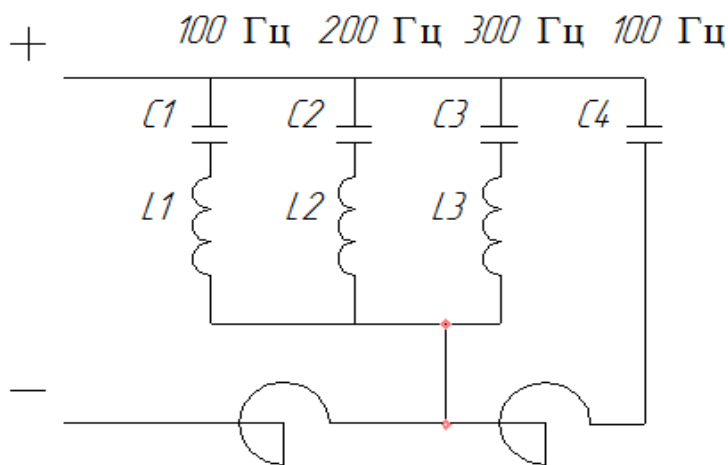


Рисунок 3.7 - Принципова схема фільтр-пристрою №7



Таблиця 3.7 - Елементи контуру фільтр-пристрою №7

f, Гц	100	200	300	100
R, Ом	0.15	0.1	0.1	0.1
L, мГн	22.6	10.8	7.6	9
C, мкФ	140	100	90	280

### 3.2 Результати проведених дослідів

Результати моделювання роботи тягової мережі при зміні параметрів в фільтр-пристрою буде проведено ще шість разів. Осцилограми дослідів приведені на рисунках 3.8-3.14.

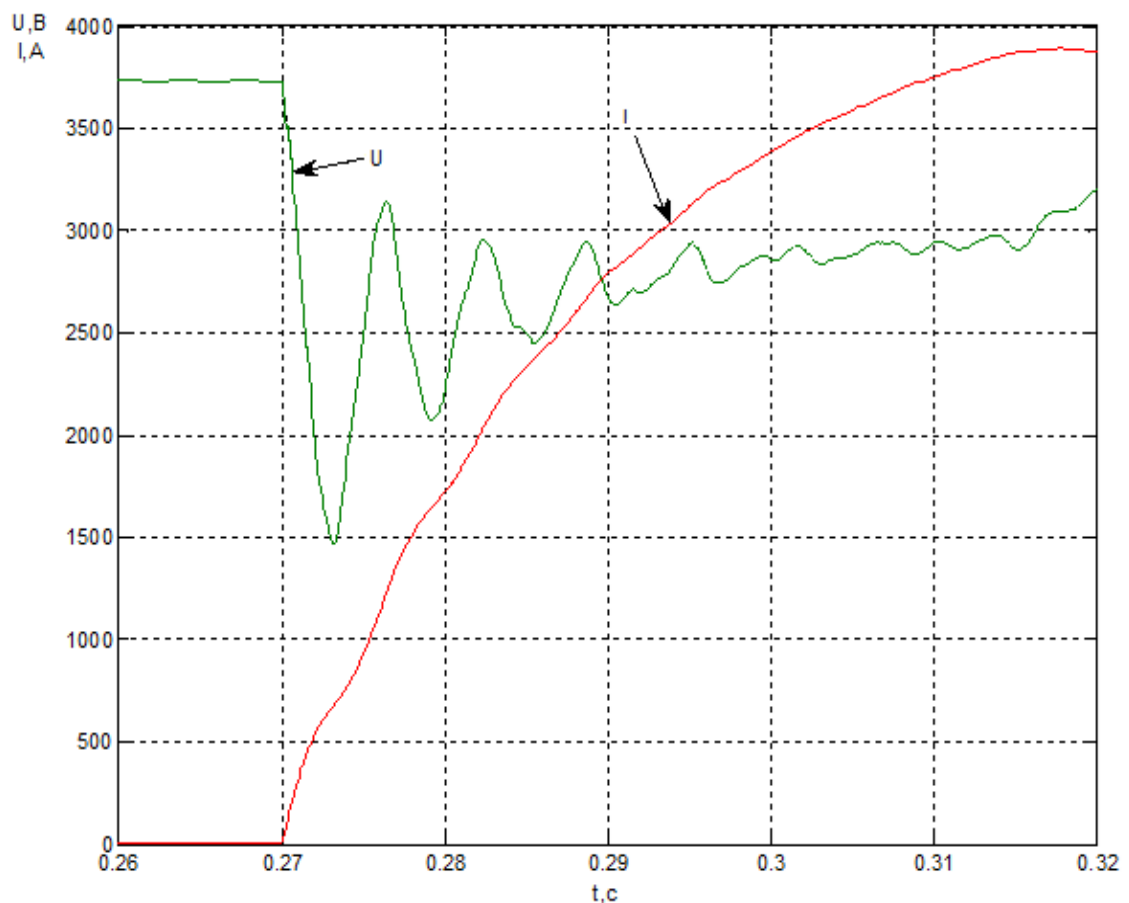


Рисунок 3.8 - Результати моделювання короткого замикання схема № 1

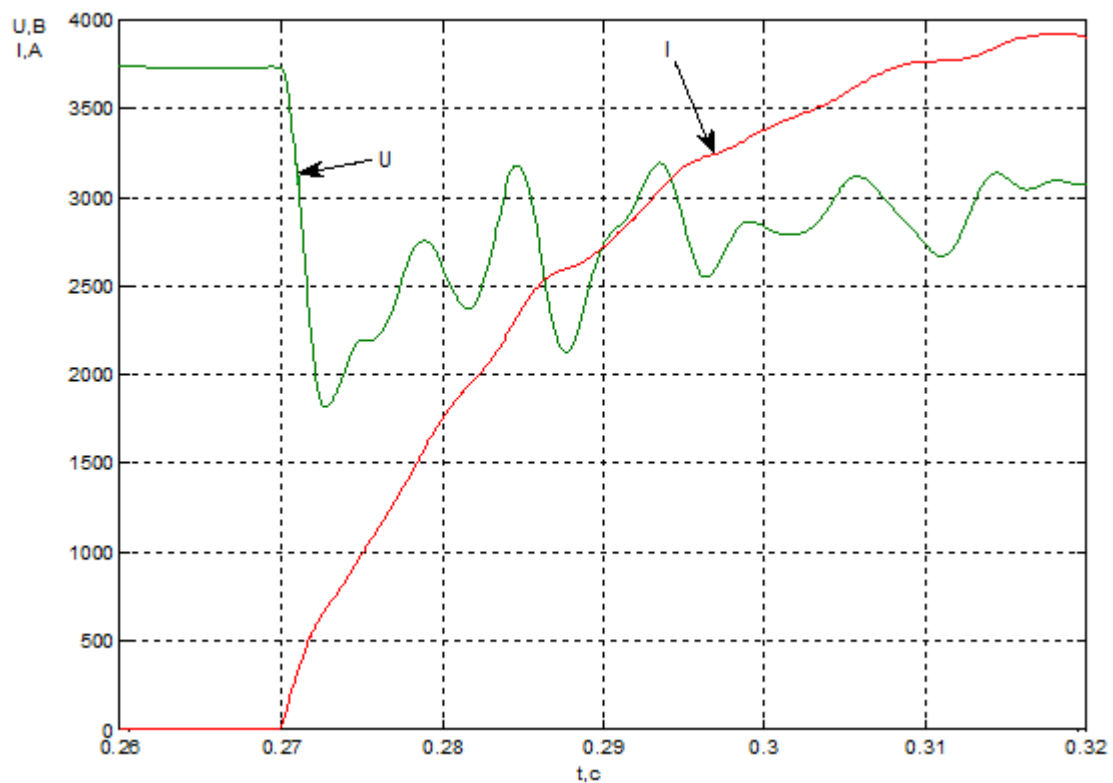


Рисунок 3.9 - Результаты моделирования короткого замыкания схема № 2

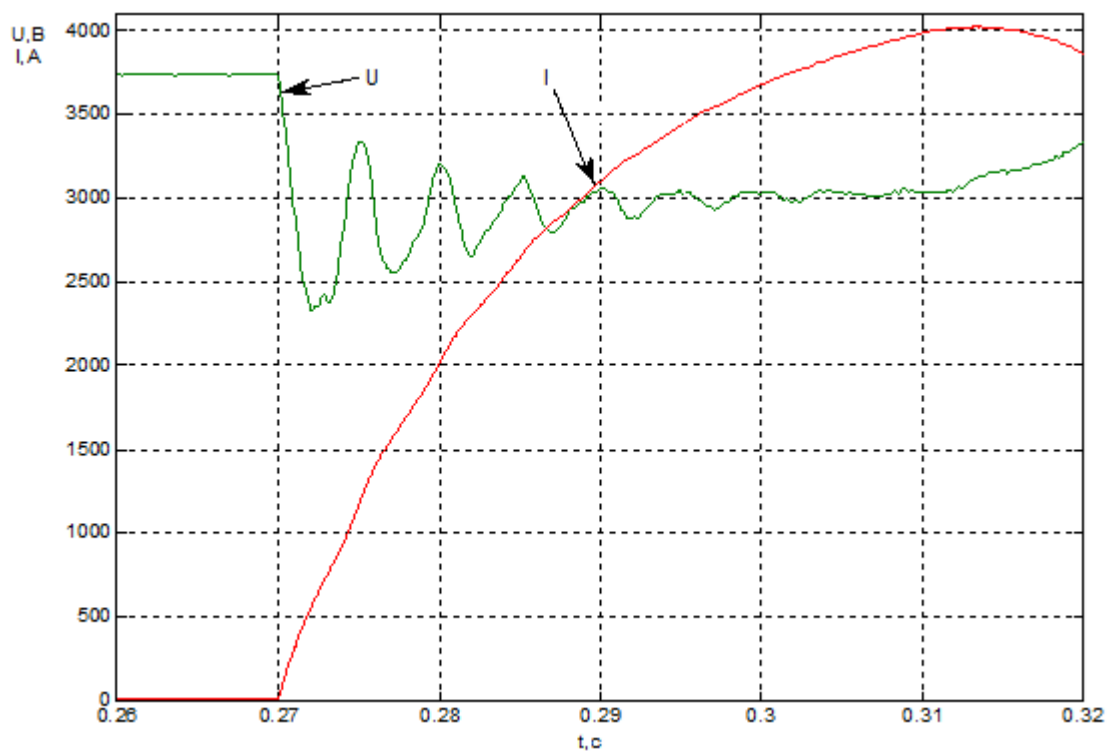


Рисунок 3.10 - Результаты моделирования короткого замыкания схема № 3

Змн.	Арк.А	№ докум.№	Подпись	Дата

02.15.265м.РД.2021-ПЗ

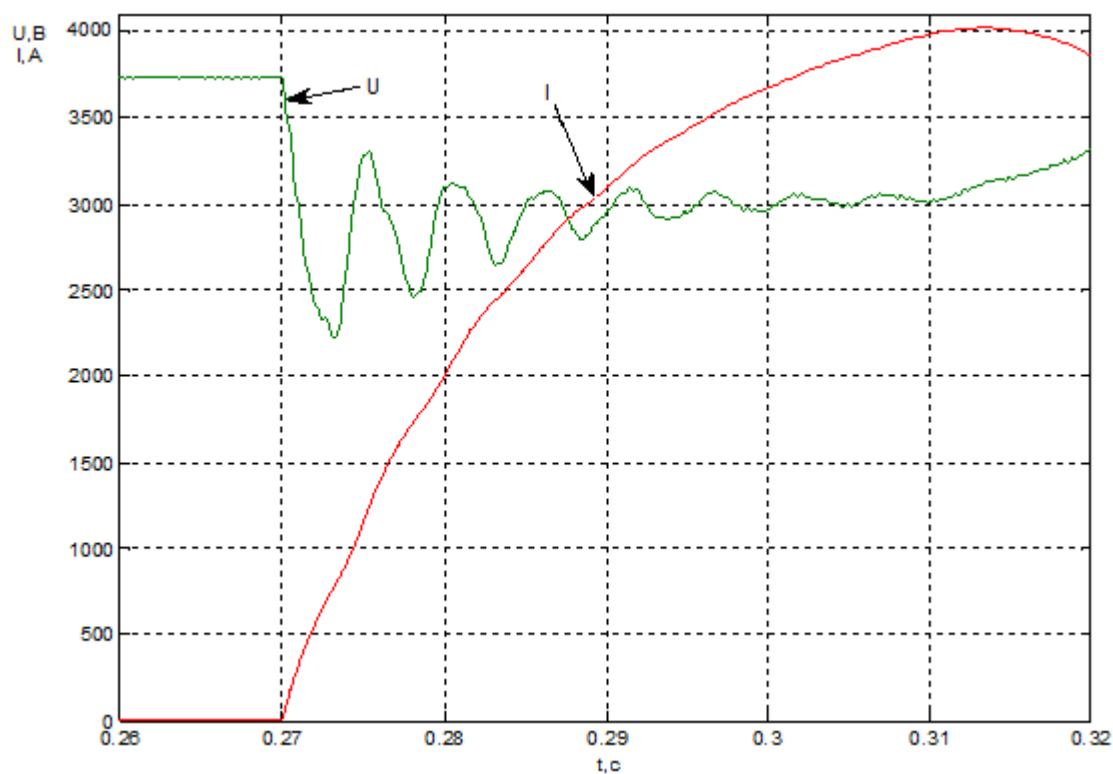


Рисунок 3.11 - Результаты моделирования короткого замыкания схема № 4

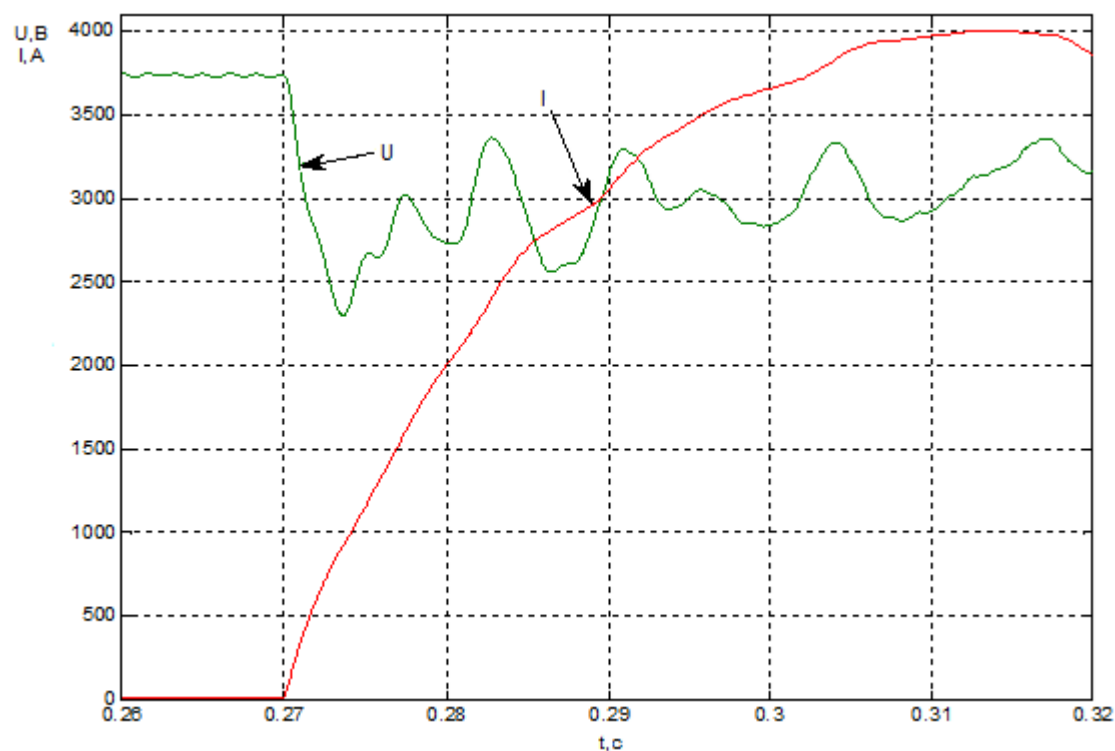


Рисунок 3.12 - Результаты моделирования короткого замыкания схема № 5

Змн.	Арк.А	№ докум.№	Подпись	Дата

02.15.265м.РД.2021-ПЗ

Арк.

39

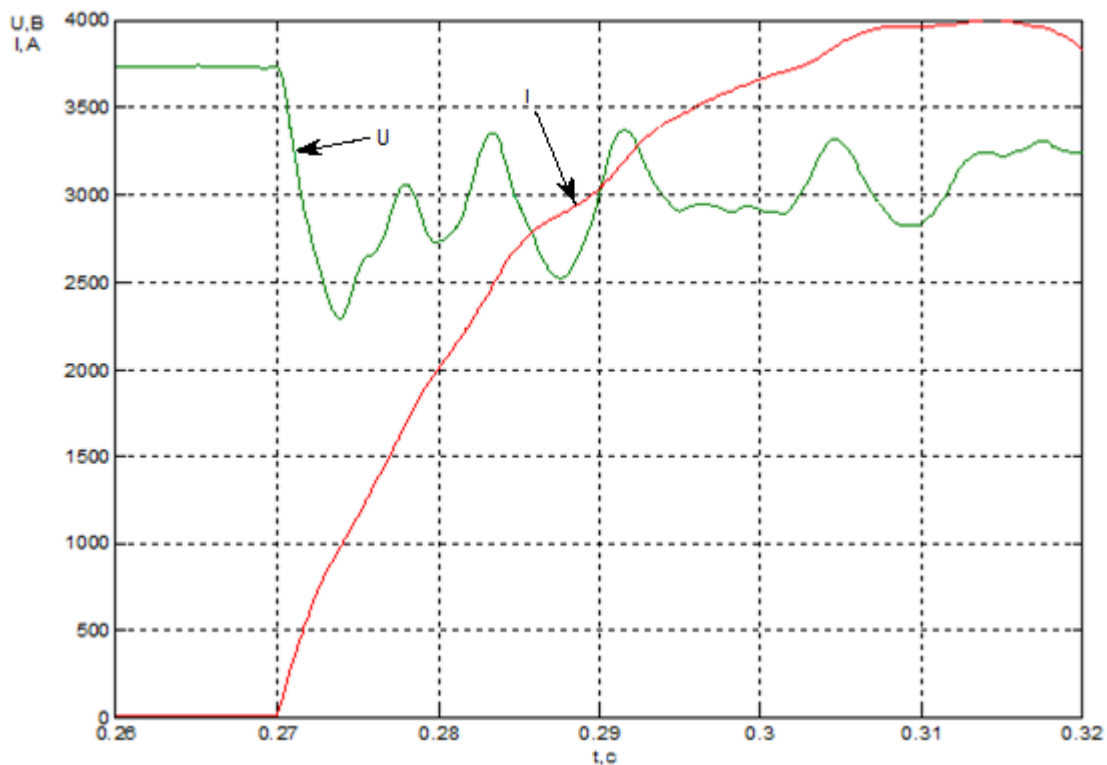


Рисунок 3.13 - Результати моделювання короткого замикання схема № 6

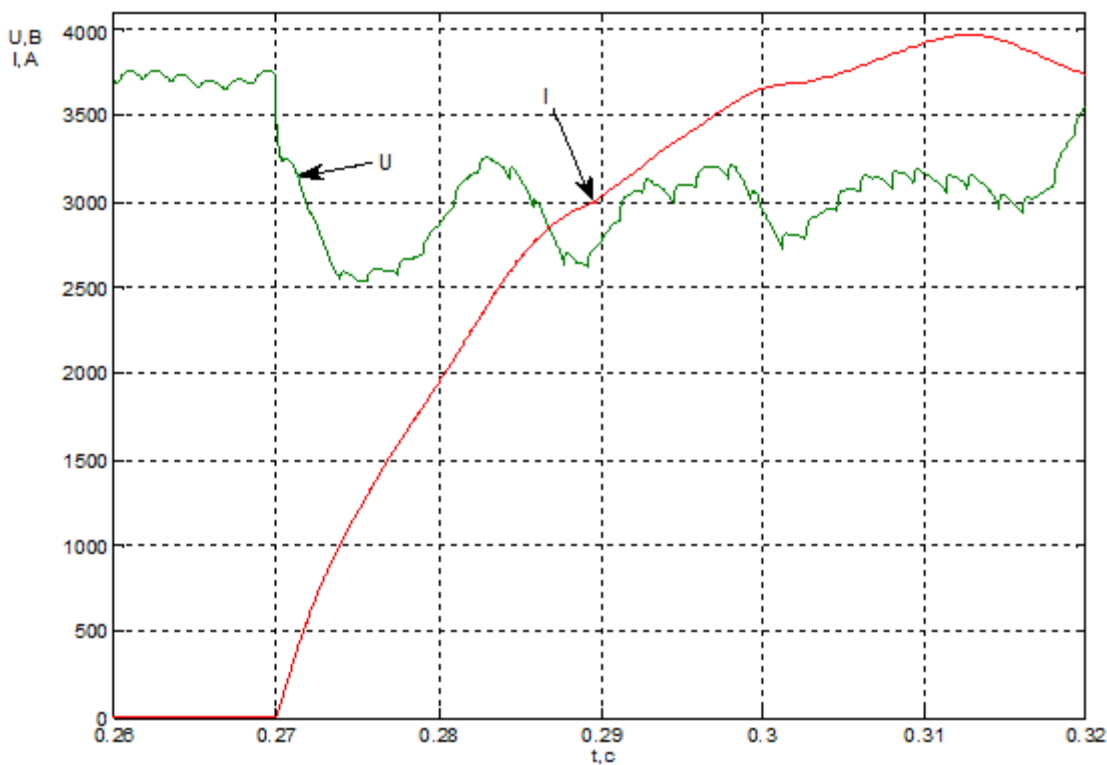


Рисунок 3.14 - Результати моделювання короткого замикання схема № 7

Змн.	Арк.А	№ докум.№	Подпись	Дата

02.15.265м.РД.2021-ПЗ

Арк.

40

## 4 АНАЛІЗ ОТРИМАНИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

### 4.1 Розрахункові дані моделювання

Розрахунки проведених досліджень представлені в табличному форматі.

Дані двох ланкового фільтр-пристрою з реактором №1 ділянки Сартана приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Розраховані параметри фільтр-пристрою №1

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
U, В	3732	2237.9	2670.1	2860.5	2941.7	3212.3
I, А	0	1723.9	2790.4	3387	3752.1	3874.1
R, Ом		1.3	0.96	0.84	0.78	0.83
dI/dt, кА/с	1723.9	1066.5	596.6	366.1	122	0

Дані двох ланкового фільтр-пристрою з пробкою №2 ділянки Утішна приведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Розраховані параметри фільтр-пристрою №2

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
U, В	3740	2792.1	2843.8	2975	2790.3	3301.5
I, А	0	2009.6	3026.6	3659.4	3987.5	3825.3
R, Ом		1.4	0.94	0.81	0.7	0.86
dI/dt, кА/с	2009.6	1017	632.8	328.1	-164	0

Дані одно ланкового фільтр-пристрою №3 ділянки Пятихатки приведені в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Розраховані параметри фільтр-пристрою №3

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
U, В	3738.6	3205.9	3056.1	3026.2	3035.2	3334.8
I, А	0	2021.2	3100.7	3677.4	3985.4	3858.9
R, Ом		1.59	0.99	0.82	0.76	0.86
dI/dt, кА/с	2021.2	1079.5	576.7	308	-126.5	0

Дані одно ланкового фільтр-пристрою №4 ділянки Південо-Західної залізниці приведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Розраховані параметри фільтр-пристрою №4

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
U, В	3741.2	3102.6	2949.2	2963.5	3009.2	3325.2
I, А	0	2004.8	3090.5	3673.4	3984.6	3858.4
R, Ом		1.55	0.95	0.81	0.76	0.86
dI/dt, кА/с	2004.8	1085.7	582.9	311.2	-126.2	0

Дані двох ланкового фільтр-пристрою №5 ділянки Західно-Сибірської залізниці приведені в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 - Розраховані параметри фільтр-пристрою №5

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
U, В	3741.7	2734.8	3131.3	2839.7	2924.2	3161.6
I, А	0	2001.6	3051	3657.6	3970.9	3849.1
R, Ом		1.37	1.03	0.78	0.74	0.82
dI/dt, кА/с	2001.6	1049.4	606.6	313.3	-121.8	0

Дані двох ланкового фільтр-пристрою №6 ділянки Мінеральна приведені в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 - Розраховані параметри фільтр-пристрою №6

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
U, В	3738.8	2730	3008	2915.2	2832.4	3244.6
I, А	0	2004.6	3036.8	3664.1	3971.3	3834.6
R, Ом		1.36	0.99	0.8	0.71	0.85
dI/dt, кА/с	2004.6	1332.2	627.3	307.2	-136.7	0

Дані двох ланкового фільтр-пристрою з реактором №7 ділянки Мінеральна з реактором приведені в таблиці 4.7.

Таблиця 4.7 - Розраховані параметри фільтр-пристрою №7

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
U, В	3731.2	2865.2	2765.8	2954.2	3162.6	3552.9
I, А	0	1949.5	3029.3	3657.1	3923.5	3733.5
R, Ом		1.47	0.91	0.81	0.81	0.95



Продовження - Таблиці 4.7

t, с	0.27	0.28	0.29	0.30	0.31	0.32
dI/dt, кА/с	1949.5	1079.8	627.8	266.4	-190	0

## 4.2 Порівняння різних схем

Аналіз результатів дослідів приведений в таблиці 4.8 параметри струму та таблиця 4.9 параметри напруги. Необхідно відзначити як мале число дослідів такі те що особливо важливі саме величина параметрів в перші декілька мілісекунд оскільки на їх величину налаштовується спрацювання захисту на підстанції.

Таблиця 4.8 - Розраховані параметри фільтр-пристроїв по струму

Схема	$\Delta I$ (1 мс)	$\Delta I$ (2 мс)	$\Delta I$ (3 мс)
Фільтр-1	321.3	534.1	661.4
Фільтр-2	343.2	618.6	830.4
Фільтр-3	321.1	546.4	738.1
Фільтр-4	323.5	558	746.2
Фільтр-5	337.9	599	811.1
Фільтр-6	341.9	607	819.2
Фільтр-7	315.2	590.7	824.9

Таблиця 4.9 - Розраховані параметри фільтр- пристроїв по напрузі

Схема	$\Delta U$ (1 мс)	$\Delta U$ (2 мс)	$\Delta U$ (3 мс)
Фільтр-1	2879.1	1990.6	1492.7
Фільтр-2	3343.1	2815.7	2457
Фільтр-3	2901.7	2328.1	2401.5
Фільтр-4	2987.1	2419.9	2246.3
Фільтр-5	3165.4	2792.7	2425.8
Фільтр-6	3247.6	2788.3	2463.9
Фільтр-7	3212.3	2944.9	2739.3

На рисунках 4.1 та 4.3 представлені в графічному виді зміна параметрів струму та напруги вилучені з імітаційної моделі, а на рисунках 4.2 та 4.4 представлені усереднені значення даних параметрів.

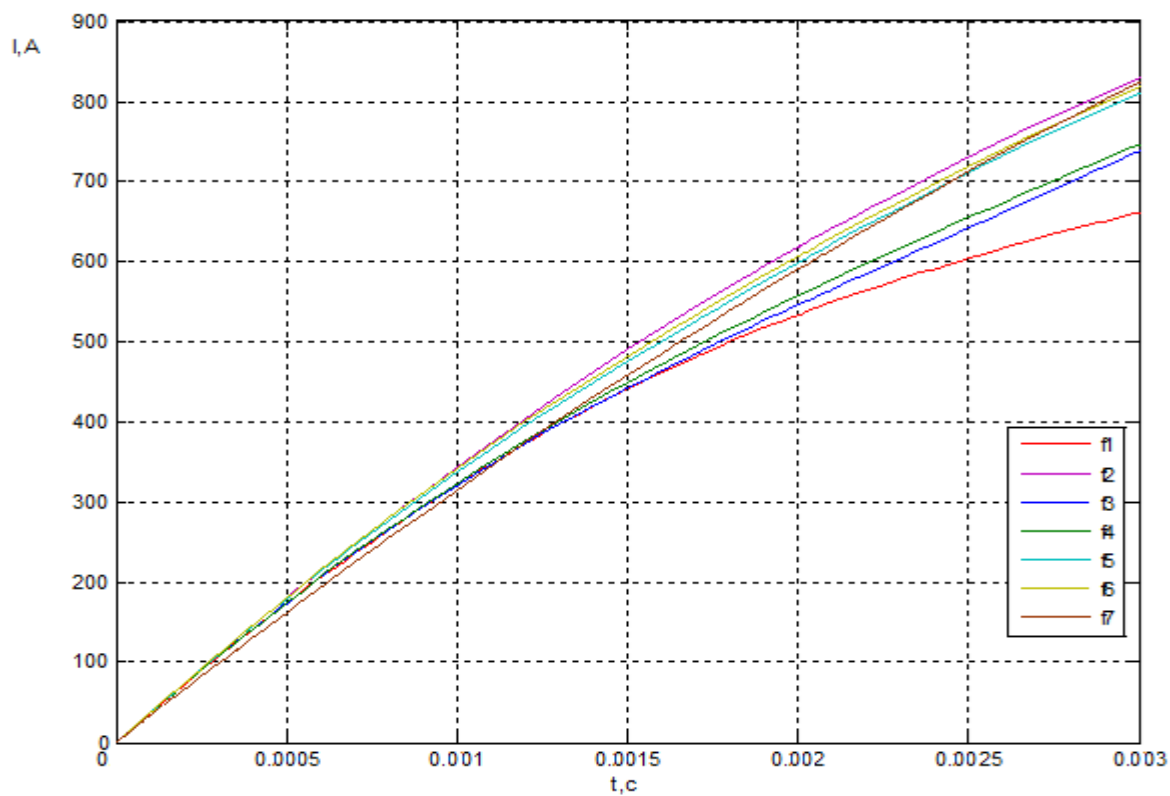


Рисунок 4.1 - Результати значення  $I$  за перші 3 мс

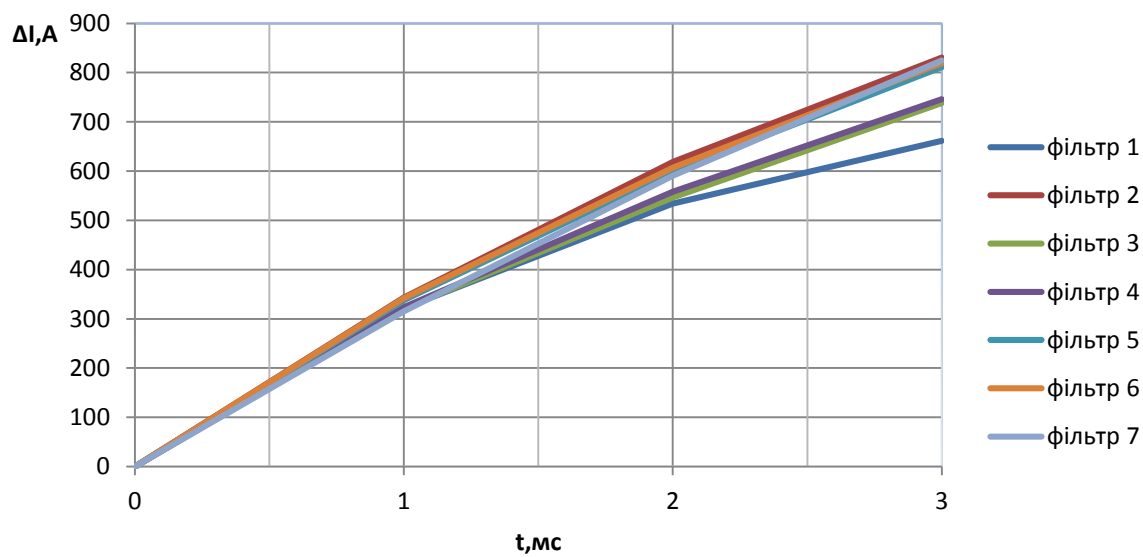


Рисунок 4.2 - Результати усереднені значення  $\Delta I$  за перші 3 мс

Змн.	Арк. А	№ докум. №	Підпись	Дата

02.15.265м.РД.2021-ПЗ

Арк.

44

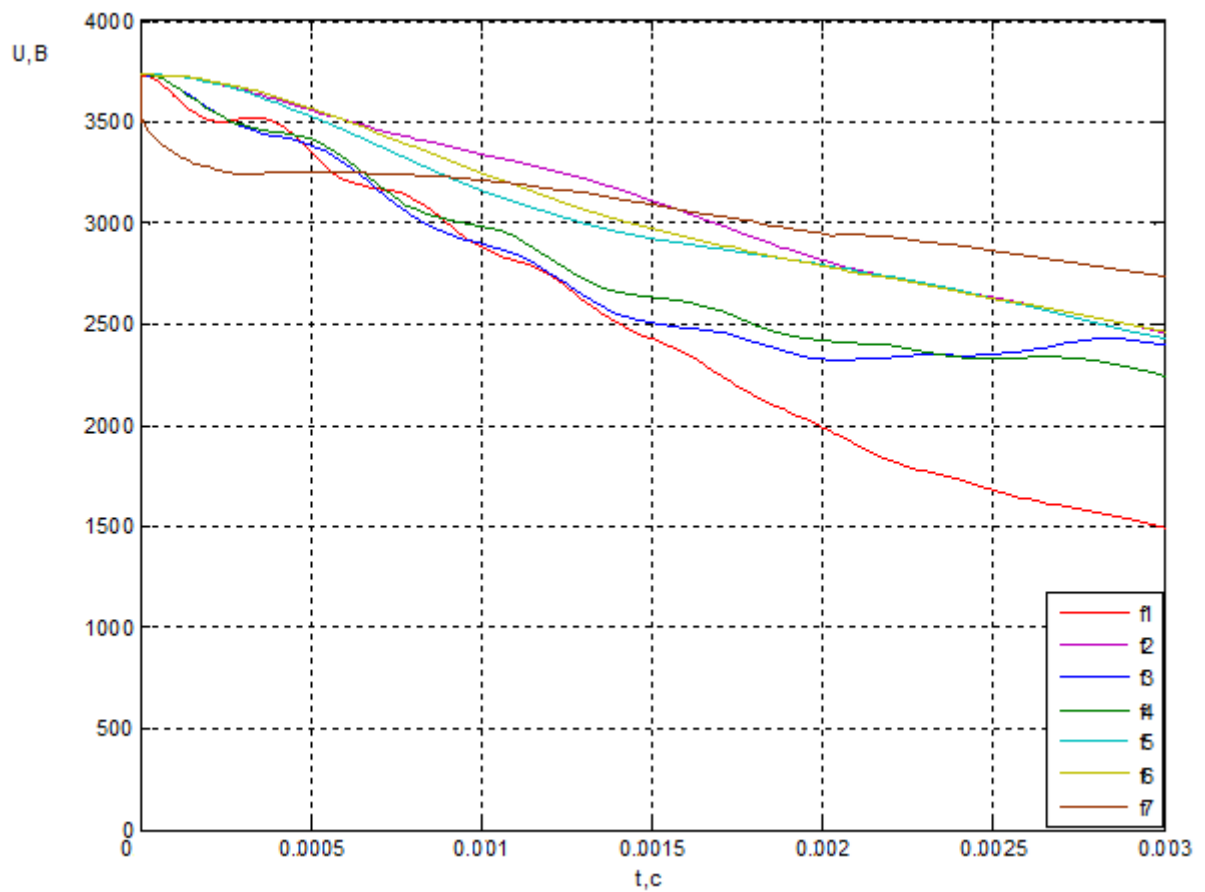


Рисунок 4.3 - Результати значення U за перші 3 мс

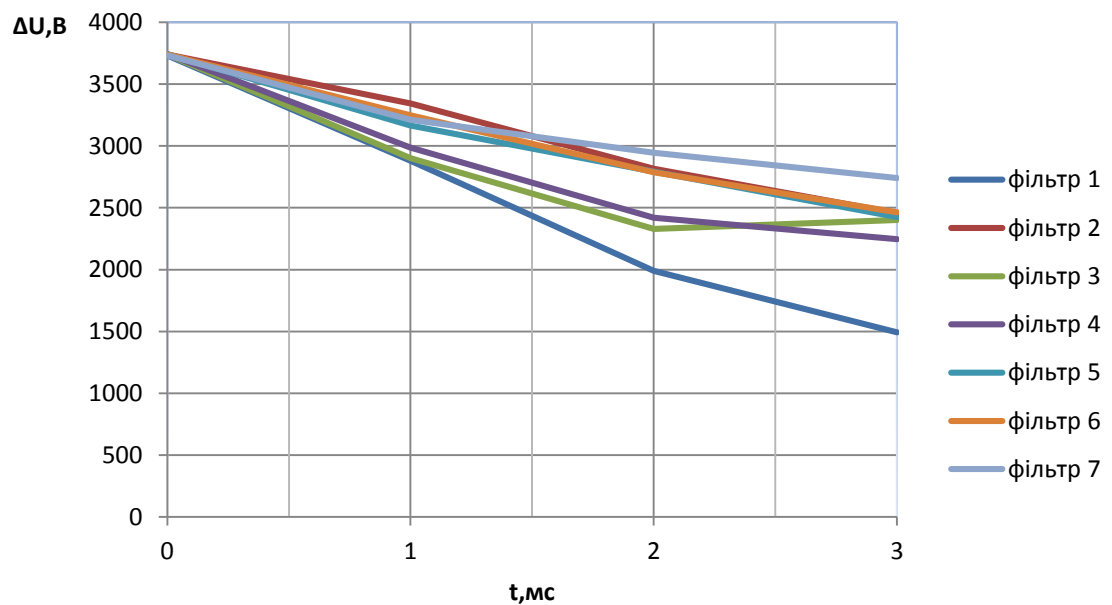


Рисунок 4.4 - Результати усереднені значення  $\Delta U$  за перші 3 мс

Розраховані параметри зміни опору в тяговій мережі представлені в таблиці 4.10 та на рисунку 4.5.

Таблиця 4.10 - Розраховані параметри зміни опору в тяговій мережі

Схема	R (1 мс)	R (2 мс)	R (3 мс)
Фільтр-1	8.96	3.73	2.25
Фільтр-2	9.74	4.55	2.96
Фільтр-3	9.04	4.26	3.25
Фільтр-4	9.23	4.34	3.01
Фільтр-5	9.37	4.66	2.99
Фільтр-6	9.5	4.59	3.01
Фільтр-7	10.19	4.98	3.32

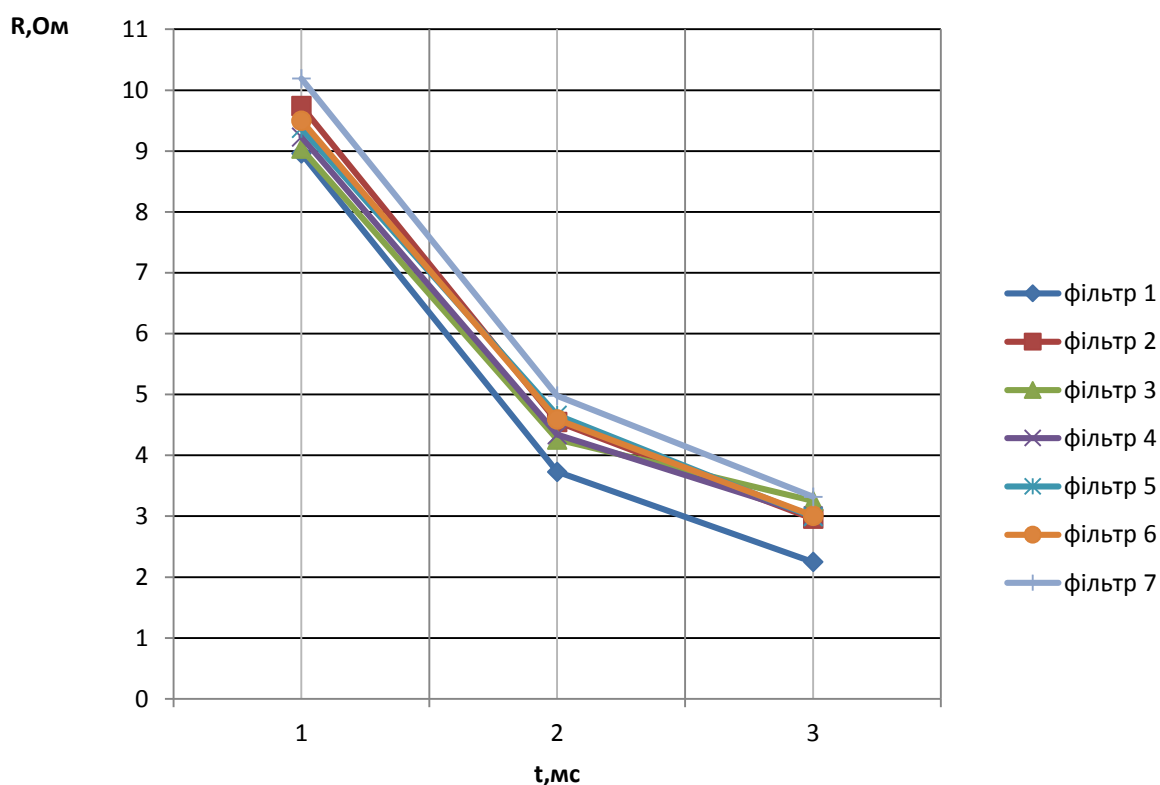


Рисунок 4.4 - Результати усереднені значення R за перші 3 мс

## ВИСНОВОК

1. В тяговій мережі постійного струму аварійні і нормальні режими по зміні струму та напруги достатньо схожі. Перехідні процеси виникають, як при аваріях так і в нормальному режимі. Для аналізу перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму необхідно враховувати всі пасивні елементи на підстанції, зокрема фільтр-пристрій.

2. На підстанціях електрифікованих залізниць України використовують різні схеми випрямлення і фільтр-пристроїв. Параметри фільтр-пристрою, зокрема ємність, впливають на перехідні процеси в тяговій мережі при різних змінах струму, характерних при короткому замиканні. При сталих режимах вплив фільтр-пристрою на перехідні процеси незначний.

3. Швидкість зміни струму і напруги на початку короткого замикання залежить від схеми фільтр-пристрою і його параметрів. При збільшенні швидкості зміни напруги, швидкості зміни струму зменшується.

4. Моделювання показало, що при різних схемах фільтр-пристрою такий параметр, як швидкість зростання струму, який використовується для налаштування мікропроцесорних захистів, може змінюватися від 534 А/мс до 618 А/мс що складає 15 % різниці. Тому при розрахунках параметрів для налаштування мікропроцесорного захисту необхідно враховувати схему фільтр-пристрою на підстанції.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						47
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Підпись	Дата		

## БІБЛОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Методичні вказівки до виконання дипломних проектів та робіт [Текст] / уклад.: Босий Д.О., Дьяков В.О., Габрінець В.О., Данилов О.А.; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д. : Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2021. – 19 с.
2. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог.-М.:Транспорт,1982.-528с.
3. Векслер М.И.Защита тяговой сети постоянного тока от токов короткого замыкания.-М.:Транспорт,1976.-120с.
4. Кучма К. Г., Марквард Г. Г., Пупынин В. М. Защита от токов короткого замыкания в контактной сети. –М., Трансжелдориздат, 1960. – 259 с.
5. Фигурнов Е.П.Релейная защита.Учебник для студентов электротехнических и электромеханических специальностей транспортных и других вузов.- К.:Транспорт Украины, 2004.-565с.
6. Забара С.С. Моделювання систем у середовищі MATLAB : Університет”Україна”,2011.-137с.
7. Стефан Онисик, Моделювання об’єктів керування.:Львівська політехніка 2019.-292с.
8. Постников Ю. В., Соколинский С. Б. Моделирование систем управления в среде Simulink.СПб.:Изд-во СПбГЭТИ”ЛЭТИ”, 2000.-21 с.
9. Дьяконов В. П., Круглов В. В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник.СПб.:Питер, 2001.-448 с.
10. Хвищун І.О. Програмування і математичне моделювання: Підручник. - К: Видавничий Дім «Ін Юре», 2007. — 544 с.
11. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК-Пресс; спб.; Питер, 2008. – 288 с.: ил.
12. Chen E.J. Craft of Simulation Programming.-Singapore: World Scientific Publishing Co,2016.-308с.

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						48
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Подпись	Дата		

13. Hoffmann J. MATLAB und SIMULINK in Signalverarbeitung und Kommunikationstechnik.: Addison Wesley/Longman, 1999. – 482 с.:

					02.15.265м.РД.2021-ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.А	№ докум.№	Подпись	Дата		