

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»
(повна назва)

«ДО ЗАХИСТУ»
Зав. кафедри
Босий Д.О.
2020 р. _____ «___»

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття ОС «магістр»

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

Тема: «Несиметрична система тягового електропостачання постійного струму»

Theme: «Asymmetric traction DC power supply system»

Керівник дипломного проекту:	<u>доцент</u> (посада)	_____	<u>О.І. Бондарь</u> (ПІБ)
Нормоконтролер:	_____	_____	<u>В.М. Ляшк</u> (ПІБ)
Виконавець, студент групи:	<u>ЕС 1921</u>	_____	<u>І.Ю. Козіна</u> (ПІБ)
Student:			<u>I.Kozina</u>

Дніпро 2020

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»

Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»

Галузь знань 14 «Електрична інженерія»

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Електротехнічні системи електроспоживання»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

В.о зав. кафедри

Босий Д.О.

(підпис)

« 17 » вересня 2020 р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студентка групи ЕС1921 Козіна Ірина Юріївна

(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломного проекту «Несиметрична система тягового електропостачання постійного струму».

затверджена наказом по університету від «16» вересня 2020р. № 494 ст.

2 Термін подання студентом закінченого проекту «7» грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту: Схемні рішення та параметри елементів ділянки системи тягового електропостачання постійного струму, результати попередніх науково - дослідних робіт з дослідження роботи по удосконаленню несиметричної системи тягового електропостачання постійного струму.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки)

4.1 Аналіз існуючої структури та особливостей системи тягового електропостачання постійного струму. Сучасні тенденції модернізації СТЕ постійного струму при впровадженні високошвидкісного руху. Математичне моделювання ділянки СТЕ постійного струму_Визначення місць встановлення та потужностей підсилюючих пунктів. Розрахунок потужності пункту локального підсилення СТЕ. Моделювання впливу встановленого підсилюючого пункту на режим напруги ділянки СТЕ постійного струму

5 Перелік креслень. Схема живлення та секціонування ділянки СТЕ постійного струму. Принципова схема підсилюючого пункту. Розрахункова схема заміщення ділянки СТЕ. Результати розрахунків та висновки по роботі.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва розділу дипломного проекту (роботи)	Термін виконання	Обсяг розділу, %
1.	Вступ. Структура і параметри системи тягового електропостачання постійного струму залізниць України	17.09	3%
1.1	Аналіз існуючої структури та особливостей системи тягового електропостачання постійного струму	23.10	10%
1.2	Електричне навантаження в мережі постійного струму	27.10	5%
1.3	Режим напруги в тяговій мережі	31.10	5%
1.4	Сучасні тенденції модернізації СТЕ постійного струму при впровадженні високошвидкісного руху		
2.	Математичне моделювання ділянки СТЕ постійного струму		
2.1	Розрахункова схема і математична модель ділянки	15.11	5%
2.2	Розрахунки режиму напруги на ділянці при впровадженні високошвидкісного руху	19.11	10%
3.	Визначення місць встановлення та потужностей підсилюючих пунктів		
3.1	Розрахунок потужності пункту локального підсилення СТЕ	21.11	15%
3.2	Схемне рішення та особливості роботи ПП на основі використання відновлюваних джерел енергії	25.11	15%
3.3	Моделювання впливу встановленого підсилюючого пункту на режим напруги ділянки СТЕ постійного струму	27.11	15%
3.4	Дослідження впливу ПП з ВДЕ на струми короткого замикання в контактній мережі	29.11	10%
	Висновок та рекомендації	03.12	5%
	Список бібліографічних джерел	05.12	2%
	Додатки		

Дата видачі завдання: « 17 » вересня 2020 р.

Керівник дипломного проекту: доцент _____ О.І. Бондарь
(підпис)

Завдання прийняв до виконання: _____ І.Ю. Козіна
(підпис)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг сторінок 78, складається з 3 розділів, та містить ілюстрацій 45, таблиць 6 , 18 бібліографічних джерел.

В даному дипломному проекті було розглянуто новий підхід щодо підсилення тягової мережі для підвищення ефективності існуючої системи тягового електропостачання, що забезпечить необхідного рівня напруги на струмоприймачах електрорухомого складу при впровадженні швидкісного руху.

Ключові слова: несиметрична система, рівень напруги, схема підсилення, постійний струм, децентралізована система тягового електропостачання.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1. СТРУКТУРА І ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ.....	13
1.1.Аналіз існуючої структури та особливостей системи тягового електропостачання постійного струму	13
1.2.Електричне навантаження в мережі постійного струму	15
1.3.Режим напруги в тяговій мережі.....	32
1.4.Сучасні тенденції модернізації СТЕ постійного струму при впровадженні високошвидкісного руху	36
2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДІЛЯНКИ СТЕ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	41
2.1.Розрахункова схема і математична модель ділянки.....	41
2.2.Розрахунки режиму напруги на ділянці при впровадженні високошвидкісного руху.....	45
3. ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ПОТУЖНОСТЕЙ ПП....	54
3.1 Розрахунок потужності пункту локального підсилення СТЕ	54
3.2Схемне рішення та особливості роботи ПП на основі використання відновлюваних джерел енергії	64
3.3Моделювання впливу встановленого підсилюючого пункту на режим напруги ділянки СТЕ постійного струму.....	65
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	72
ДОДАТОК А.....	74

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	підпис	Дата			
Розробив	Козіна І. Ю.				Несиметрична система тягового електропостачання постійного струму	Літ.	Аркуш
Перевірів	Бондар О. І.						Аркушів
Н.Контр	Ляук В.М.						5
						ДНУЗТ, ІСЕ, гр. ЕС 1921	
Затверд							

ДОДАТОК Б.....	75
ДОДАТОК В.....	76
ДОДАТОК Г.....	77

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ		
Изм.	Лист	№ докум.	підпис	Дата	Несиметрична система тягового електропостачання постійного струму		
Розробив	Козіна І. Ю.						
Перевірів	Бондар О. І.						
Н.Контр	Ляук В.М.						
Затверд					ДНУЗТ, ІСЕ, гр. ЕС 1921		
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						5	77

ВСТУП

Для організації швидкісного руху на лініях постійного струму існує ряд вимог. Однією з найголовніших вимог до тягового електропостачання є підтримання рівня напруги на струмоприймачі поїзда 2900 В. Необхідно підвищувати техніко-економічні показники існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму. В умовах збереження рівня напруги 3,0 кВ значно підвищити якість електропостачання можна шляхом заміни системи централізованого живлення на розподілену [1-3,5].

На сьогодні вирішення цих проблем може бути досягнуто при проведенні таких технічних та організаційних заходів[3]:

- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій;
- використання пунктів паралельного з'єднання;
- застосування блоків розподіленого живлення;
- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;
- експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на випрямлячі з дванадцятьма пульсаціями в кривій випрямленої напруги;
- встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги;
- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів.

Значно підсилити тягове електропостачання може не лише впровадження новітніх технологій і сучасного устаткування, а й застосування систем розподіленого живлення, тобто, перехід до нової схемотехніки мережі

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

електротяги. Актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ є установка підсилюючих пунктів (ПП) на міжпідстанційній зоні, які будуть працювати за принципом децентралізованої системи. Перевагою цієї системи є потреба лише в підживленні контактної мережі, що не вимагає значної агрегатної потужності, а при використанні альтернативної енергії дозволяє значно знизити споживання електричної енергії з системи зовнішнього електропостачання[2]. На сьогодні опрацьовано декілька варіантів побудови такої системи, у тому числі і з застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення тягової мережі.

Нормований рівень напруги в тяговій мережі електрифікованої ділянки забезпечує рух поїздів з необхідною економічно доцільною швидкістю, встановленою умовами пропускної здатності. Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат в системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання [3]. Робота ділянки при вимушеному режимі напруги призводить до необхідності використання резервної потужності і перевантаження обладнання тягових підстанцій. При цьому напруга на струмоприймачах стає нижчою допустимого рівня і виникає необхідність у зниженні розмірів руху та збільшенні інтервалу між поїздами.

Використання нових, більш потужних електровозів або збільшення їх числа чи секцій для пропуску поїздів великої маси, супроводжується значним зростанням потужності та струму, що споживається з тягової мережі.

Вирішення проблеми вбачалося в знаходженні “оптимальної напруги” з регламентованими межами змін, яка забезпечить рух поїзда з визначеною швидкістю, необхідною для забезпечення завданого часу ходу по перегону з мінімальними витратами на тягу та втратами потужності [6]. Втрати напруги і електроенергії в тяговій мережі визначаються в основному струмом тягових двигунів електровозів і параметрами тягової мережі. При різних середніх напругах на струмоприймачі за рахунок відповідного підбору режиму ведення

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

поїздів можна одержати однаковий час ходу по ділянці (однакову криву швидкості руху), якому відповідає та ж сама корисна механічна робота по переміщенню поїзда. При цьому прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є умовою забезпечення номінального режиму тягових і допоміжних машин електровоза[7]. Вирішення цього завдання покладається на застосування пристроїв регулювання напруги.

Однак, на більшості залізниць постійного струму відсутні засоби регулювання напруги, а керівні впливи на її рівень здійснюються малозатратними тривіальними засобами підсилення тягової мережі, які не в змозі, як зазначалось вище, забезпечити необхідну стійкість системи тягового електропостачання (СТЕ) по напрузі.

Також ще одним способом вирішення проблеми є впровадження розосередженого тягового електропостачання та збільшення рівня рекуперації електроенергії до потенційно можливого значення. За рахунок розподілу тягового навантаження між локальними пунктами живлення децентралізація системи тягового електропостачання дає можливість знизити втрати енергії в тяговій мережі підвищити стабільність напруги на струмоприймачах електричного транспорту і знизити встановлену потужність силового обладнання СТЕ.

На сьогодні можна виділити два принципових напрями децентралізації тягового електропостачання, перший з яких полягає у використанні уніфікованих пунктів живлення, розподілених уздовж міжпідстанційної зони та приєднаних до високовольтної лінії (постійного або змінного струмів), яка живиться через централізовані тягові підстанції (ТП) від системи зовнішнього електропостачання (СЗЕ), що досліджено наприклад в роботі [1]

Другий напрям полягає у спільному використанні централізованого електропостачання з локальними пунктами живлення від відновлювальних джерел електроенергії, тип і розташування яких визначаються у відповідності до регіональних кліматичних особливостей та з урахуванням забезпечення

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійності електропостачання ЕТ, що досліджено наприклад в роботі [14], де в якості відновлювальних джерел розглянуті вітроенергетичні установки.

На даний час для потреб тягового електропостачання у якості локальних пунктів живлення досліджені і частково впроваджені вітрові і сонячні установки, оскільки вони є найбільш сумісними за своїми технічними характеристиками з тяговим електропостачанням. Крім того, для забезпечення стабільного електропостачання ЕТ в періоди зниження активності сонячної радіації або вітрових потоків передбачається що ТП з відновлювальними джерелами будуть обладнані накопичувачами енергії (механічними, індуктивними, ємнісними тощо).

Мета роботи. Розвинути новий підхід щодо локального підсилення тягової мережі для підвищення ефективності існуючої системи тягового електропостачання для забезпечення необхідного рівня напруги на струмоприймачах електрорухомого складу при впровадженні швидкісного руху за умови наявності можливих несиметрій навантаження.

Актуальність роботи. Впровадження швидкісного руху на діючих ділянках електрифікованих залізниць призведе до ускладнення умов експлуатації пристроїв електропостачання, оскільки при цьому не допускається зниження напруги на струмоприймачах електрорухомого складу нижче рівня 2900 В. Вирішення цих задач неможливе без пошуку нових структурних та схемних рішень як для системи тягового електропостачання в цілому, так і для окремих її ланок, а також без аналізу на стадії розробки системи процесів перетворення електроенергії, яка витрачається на процес перевезення. При заміні системи централізованого живлення на розподілену для живлення контактної мережі використовуються перетворювальні (підсилюючі) пункти, які підключаються до поздовжньої лінії електропередачі підвищеної напруги змінного чи постійного струму. Цей спосіб удосконалення тягової мережі є простим, дозволяє зменшити переріз проводів контактної мережі та втрати енергії, стає можливою підтримка

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідного рівня напруги в контактній мережі. Тому дослідження, направлене на розробку нової схемотехніки тягової мережі є актуальним.

Зв'язок роботи з науковими напрямками діяльності кафедри.

Обране дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, зокрема за наступними темами: «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії», № держреєстрації 0117U004481.

Мета та задачі дослідження. Забезпечення стабільного рівня напруги у тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху.

Об'єкт дослідження. Система тягового електропостачання постійного струму.

Предмет дослідження. Схема локального підсилення системи тягового електропостачання.

Методи дослідження. Методи статистичного аналізу, аналітичне дослідження режимів напруги. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням програмних засобів Excel, MathCAD та результатів експериментальних досліджень, які проводились на реальних перегонах.

Наукова новизна одержаних результатів. З метою забезпечення необхідного рівня напруги високошвидкісного руху на ділянці, яку електрифіковано за системою електропостачання постійного струму запропоновано та обґрунтовано підхід, який полягає у застосуванні несиметричної схеми підсилення тягової мережі, що дозволяє підвищити ефективність системи електричної тяги цієї ділянки Дослідження стійкості по напрузі виконано на основі математичного моделювання.

Практичне значення одержаних результатів. Результати досліджень можуть бути використані при впровадженні швидкісного руху на території України, для забезпечення необхідного рівня напруги та пропускної здатності.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати можна використати при впровадженні пристроїв поліпшення якості електроенергії на електроенергетичних об'єктах електрифікованих залізниць.

В роботі розроблено автоматизований документ в середовищі Excel для статистичного аналізу електричних величин з використанням якого може здійснюватись обґрунтування технічних рішень щодо впровадження на електрифікованій ділянці залізниці підсилюючих пунктів необхідної потужності.

Публікація. За результатами роботи опубліковано статтю у науковому журналі.

Муха А.М. Покращення електричних показників несиметричної системи тягового електропостачання постійного струму шляхом її локального підсилювання за рахунок відновлюваних джерел електроенергії//Муха А.М., Козіна І.Ю// «Вісник»-2020-№ 4-5 - С 51-57

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 СТРУКТУРА І ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРСТІЙНОГО СТРУМУ ЗАЛІЗНИЦЬ УКРАЇНИ

1.1 Аналіз існуючої структури та особливостей системи тягового електропостачання постійного струму

Живлення тягової мережі зазвичай здійснюється від шин 110 (220) кВ через знижувальний трансформатор, що в свою чергу забезпечує зниження напруги до 10 кВ. До шин 10 кВ підключений перетворювач, який складається з тягового трансформатора і випрямляча. Останній забезпечує перетворення змінного струму в постійний напругою на шинах 3,3 кВ. Контактна мережа підключається до «плюс шини», а рейки – до «мінус шини»[5].

Схема живлення електрифікованої ділянки залізниці постійного струму показана на рис. 1.1

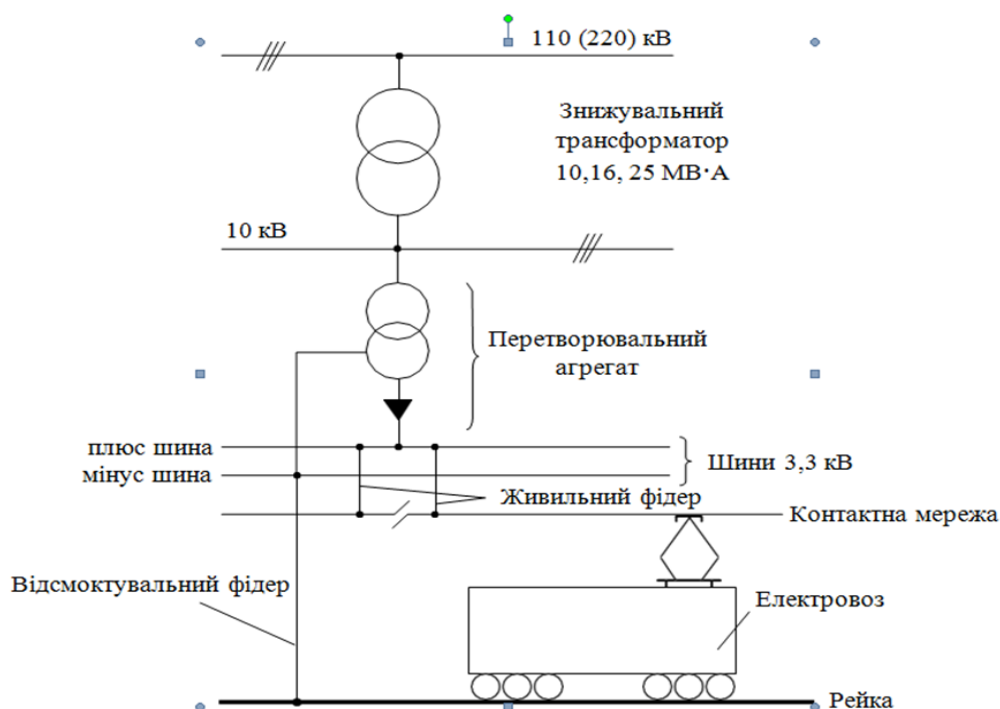


Рисунок 1.1 - Принципова схема живлення електрифікованої ділянки залізниці постійного струму з напругою в контактній мережі 3 Кв

Величина напруги живлення 3,3 кВ системи тягового електропостачання постійного струму пов'язана з тим, що тягові двигуни для електровозів і електропоїздів постійного струму розраховані на номінальну напругу 1,5 кВ або 750 В.[8]

Недоліки системи:

- внаслідок низької напруги в тяговій мережі збільшений струм споживання ЕРС (втрати електроенергії ~ 22 %);
- при великих струмових навантаженнях відстань між тяговими підстанціями дорівнює до 20 км, це передбачає велику вартість системи електропостачання і високі експлуатаційні витрати;
- великі струмові навантаження потребують застосування контактного підвісу більшого перерізу. Це вимагає значних перевитрат кольорових металів, а також при цьому зростають механічні навантаження на опори контактної мережі;
- при електричній тязі постійного струму має місце інтенсивна корозія підземних металевих споруд, у тому числі опор контактної мережі.

В даний час відбувається стрімке старіння основних фондів інфраструктури тягового електропостачання постійного струму. В той же час Україні необхідне проведення заходів щодо впровадження швидкісного руху, що вимагає модернізації існуючих електрифікованих ліній. Швидкісний рух можуть забезпечувати застосовувані в Україні системи тягового електропостачання як постійного, так і змінного струмів, але для забезпечення сталої швидкості руху необхідно збільшити енергоємність тягової мережі, в першу чергу, для електрифікованих ділянок постійного струму.

Існуюча зараз система тягового електропостачання постійного струму централізованого типу не завжди в змозі забезпечити передачу необхідної потужності для швидкісних потягів. До основних проблем відноситься зниження напруги на струмоприймачі електровоза нижче допустимого для швидкісного руху 2900 В і нагрівання проводів контактної мережі, що сприяє втраті їх механічної міцності.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						14
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Вирішення цих задач неможливе без пошуку нових структурних та схемних рішень як для системи тягового електропостачання в цілому, так і для окремих її ланок, а також без аналізу на стадії розробки системи процесів перетворення електроенергії, яка витрачається на процес перевезення.

1.2 Електричне навантаження в мережі постійного струму

Як відомо, з позицій теоретичної електротехніки, тягове навантаження електрифікованої ділянки СТЕ постійного струму представляє собою несинусоїдну неперіодичну часову залежність струму або потужності навантаження, яке отримує живлення від тягової підстанції. Можливий порядок експериментального визначення таких залежностей на фідері тягової підстанції описано нижче.

Використовуючи метод експертних оцінок встановлено, що для проведення необхідних експериментальних досліджень необхідне переведення дослідної ділянки на однопутну схему, з живленням від відокремленої фідерної зони, крім того час проведення досліджень повинен складати не менш однієї години. Враховуючи інтенсивність руху на ділянці від ст. П'ятихатки до ст. Синельникове, при одночасному зменшити інтенсивності руху з боку ст. Чаплине, для проведення експериментальних досліджень обрано ділянку між тяговими підстанціями ЕЧЕ-19 Роздори (254 км ПК5) та ЕЧЕ-20 Письменна (272 км ПК9), яка належить до дистанції електропостачання Нижньодніпровськ-Вузол (ЕЧ-2) Придніпровської залізниці.

Обрана ділянка є двоколійною та електрифікована за системою електричної тяги постійного струму. Загальна довжина складає 17,8 км (усього 4 блок-ділянки). При русі від Роздорів до Письменної профіль ділянки містить спочатку спуск 2,9 ‰ довжиною біля 8 км, а потім підйом 6,0 ‰ (решта ділянки). У межах ділянки знаходиться ст. Письменна. Схема живлення ділянки – двобічна з паралельним з'єднанням контактних підвісок колій. Перша колія отримує живлення з боку ЕЧЕ-19 Роздори по фідеру №3 через фідерний автомат ФА-3 та

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

роз'єднувачі ФЛ-3 та Ф-31, а з боку ЕЧЕ-20 Письменна по фідеру №1 через фідерний автомат ФА-1 та роз'єднувач ФЛ-1. Друга колія отримує живлення з боку ЕЧЕ-19 Роздори по фідеру №4 через фідерний автомат ФА-4 та роз'єднувачі ФЛ-4 та Ф-41, а з боку ЕЧЕ-20 Письменна по фідеру №2 через фідерний автомат ФА-2 та роз'єднувач ФЛ-2.

В середній частині зазначеної ділянки розташовано пост секціонування контактної мережі ПСК Терса (263 км ПК3) Пост підключено через роз'єднувач С1 та швидкодіючий вимикач БВ1 до 1 колії а через роз'єднувач С2 та швидкодіючий вимикач БВ2 до 2 колії з боку ЕЧЕ-19 Роздори. Аналогічно пост підключено через роз'єднувач С3 та швидкодіючий вимикач БВ3 до 1 колії а через роз'єднувач С4 та швидкодіючий вимикач БВ2 до 2 колії з боку ЕЧЕ-20 Письменна. При цьому поздовжні роз'єднувачі А та Б розташовані на ізолюючому сполученні біля ПСК є нормально відключеними.

Пункт паралельного з'єднання ППС 260 км (259 км ПК5) підключено через роз'єднувач С1 та швидкодіючий вимикач БВ до 1 колії а через роз'єднувач С2 та той самий швидкодіючий вимикач БВ до 2 колії з боку ЕЧЕ-19 Роздори.

Пункт паралельного з'єднання ППС 269 км (269 км ПК3) підключено через роз'єднувач С1 та швидкодіючий вимикач БВ до 1 колії а через роз'єднувач С2 та той самий швидкодіючий вимикач БВ до 2 колії з боку ЕЧЕ-20 Письменна.

Поздовжнє секціонування по станції Роздори здійснено через ізолюючі сполучення, які обладнано поздовжніми роз'єднувачами: 1 колія - А (нормально увімкнений) та В (нормально відключений); 2 колія - Б (нормально увімкнений), В (нормально відключений) та Г1 (нормально увімкнений).

Поздовжнє секціонування по станції Письменна здійснено через ізолюючі сполучення, які обладнано поздовжніми роз'єднувачами: 1 колія - А (нормально увімкнений) та В (нормально відключений); 2 колія - Б (нормально увімкнений), В (нормально відключений) та Г1 (нормально увімкнений).

Усі роз'єднувачі у межах обраної ділянки мають моторний привод та підключені до телекерування за виключенням поперечного роз'єднувача П1 по

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						16
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

станції Письменна, на якому телекерування відсутнє.

Тягова підстанція ЕЧЕ-19 Роздори має первинну напругу 154 кВ і отримує живлення від системи зовнішнього електропостачання по двох вводах (Л-36А та Л-36Б), з'єднаних нормально увімкненою секційною перемичкою через нормально увімкнений вимикач С-1. До відкритої розподільчої установки ОРУ-154 кВ паралельно підключені своїми первинними обмотками два головні знижувальні трансформатори 1Т та 2Т. Їх обмотки середньої напруги підключено до ОРУ-35 кВ через вимикачі Т-31 (нормально увімкнений) та Т32 (нормально відключений). обмотки низької напруги трансформаторів 1Т та 2Т підключено до розподільчої установки РУ-10 кВ через вимикачі Т-11 та Т12 (обидва нормально увімкнені). Від РУ-10 кВ отримують живлення трансформатори власних потреб, лінії поздовжнього електропостачання та тягові трансформатори ТТ-1 – ТТ-6. Від трансформаторів ТТ-1 та ТТ-2 отримує живлення кремнієвий випрямляч КВ-1, Від трансформаторів ТТ-3 та ТТ-4 отримує живлення кремнієвий випрямляч КВ-2. Від трансформаторів ТТ-5 та ТТ-6 отримує живлення кремнієвий випрямляч КВ-3. Схема випрямлення – шостипульсова. Від КВ-1 – КВ-3 через швидкодіючі автомати зворотної дії (БАОД КВ-1 – БАОД КВ-3) отримує живлення РУ-3,3 кВ. При цьому нормально увімкнений лише БАОД КВ-3.

Живлення контактної мережі від РУ-3,3 кВ здійснюється по 5 фідерах (Ф-1 – Ф-5). Фідера Ф-1 та Ф-2 живлять відповідно 1 та 2 колію у бік ст. Синельникове, фідера Ф-3 та Ф-4 живлять відповідно 1 та 2 колію у бік ст. Письменна, фідер Ф-5 нормально відключений.

Тягова підстанція ЕЧЕ-20 Письменна має первинну напругу 154 кВ і отримує живлення від системи зовнішнього електропостачання по двох вводах (Л-35А та Л-35Б), з'єднаних нормально увімкненою секційною перемичкою через нормально увімкнений вимикач С-1. До відкритої розподільчої установки ОРУ-154 кВ паралельно підключені своїми первинними обмотками два головні знижувальні трансформатори 1Т та 2Т. Їх обмотки середньої напруги підключено до ОРУ-35 кВ через вимикачі Т-31 (нормально увімкнений) та Т32 (нормально

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відключений). обмотки низької напруги трансформаторів 1Т та 2Т підключено до розподільчої установки РУ-10 кВ через вимикачі Т-11 (нормально увімкнений) та Т12 (нормально відключений). Від РУ-10 кВ отримують живлення трансформатори власних потреб, лінії поздовжнього електропостачання та тягові трансформатори ТТ-1 – ТТ-6. Нормально включені при цьому лише тягові трансформатори ТТ-5, ТТ-6. Від трансформаторів ТТ-1 та ТТ-2 отримує живлення кремнієвий випрямляч КВ-1, Від трансформаторів ТТ-3 та ТТ-4 отримує живлення кремнієвий випрямляч КВ-2. Від трансформаторів ТТ-5 та ТТ-6 отримує живлення кремнієвий випрямляч КВ-3. Схема випрямлення – шостипульсова. Від КВ-1 – КВ-3 через швидкодіючі автомати зворотної дії (БАОД КВ-1 – БАОД КВ-3) отримує живлення РУ-3,3 кВ. При цьому нормально увімкнений лише КВ-3.

Живлення контактної мережі від РУ-3,3 кВ здійснюється по 5 фідерах (Ф-1 – Ф-5). Фідера Ф-1 та Ф-2 живлять відповідно 1 та 2 колію у бік ст. Роздори, фідера Ф-3 та Ф-4 живлять відповідно 1 та 2 колію у бік ст. Улянівка, фідер Ф-5 нормально відключений.

Пост секціонування контактної мережі ПСК Терса та пункти паралельного з'єднання ППС 260 км, ППС 269 км є нормально увімкнені, їх схеми головних електричних з'єднань описані вище.

Згідно затверджених Програм проведення експериментів по зняттю часових залежностей струму й напруги в нормальному й без навантажувальному режимах роботи системи тягового електропостачання на фідерній зоні підстанцій Роздори - Письмена (ЕЧ-2 Нижньодніпровськ-Вузол) були виконані наступні роботи.

На ЕЧЕ-19 Роздори встановлені комплекти вимірювального обладнання №3 й №4.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

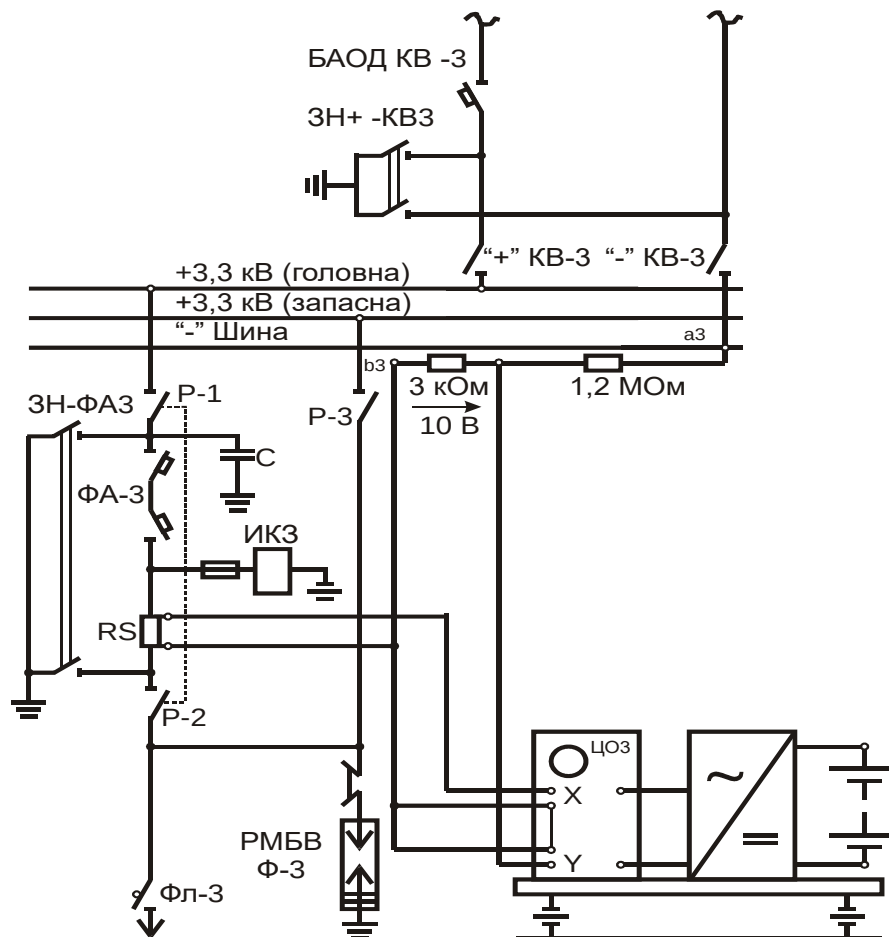


Рисунок 1.2- Схема включення осцилографа в ячейках БАОД KB-2 и Ф-3
тягового фидера ЭЧЭ-19

До складу кожного з комплектів входять ізолююча підставка, автономне джерело живлення у вигляді блоку «акумуляторна батарея - інвертор», подільник напруги (комплект №3), осцилографічний пристрій і ноутбук з відповідним програмним забезпеченням. Дані комплекти обладнання були скомпоновані на ізолюючих підставках і розміщені в приміщенні РУ-3,3 кВ ЕЧЕ-19 у центральному проході біля комірок фідерних автоматів ФА-3 і ФА-4. Після проведення організаційних і технічних заходів щодо зняття напруги зі струмоведучих частин осцилографічний пристрій комплекту №3 було підключено через канал Х к вимірювальним затискачам шунта встановленого в комірці ФА-3 за допомогою високовольного проведення, а через канал Y до вимірювальних

затискачів дільника напруги (плече низького опору). Плече високого опору подільника напруги було підключено до «-» шини в комірці БАОД КВ-1 за допомогою високовольтного проведення, прокладеного на опорних ізоляторах по підлозі РУ-3,3 кВ. При цьому загальною точкою підключення каналів осцилографа є вимірювальна клема вищого потенціалу на струмовому шунті. Загальний вигляд вимірювального комплексу №3 представлено на рис.1.3

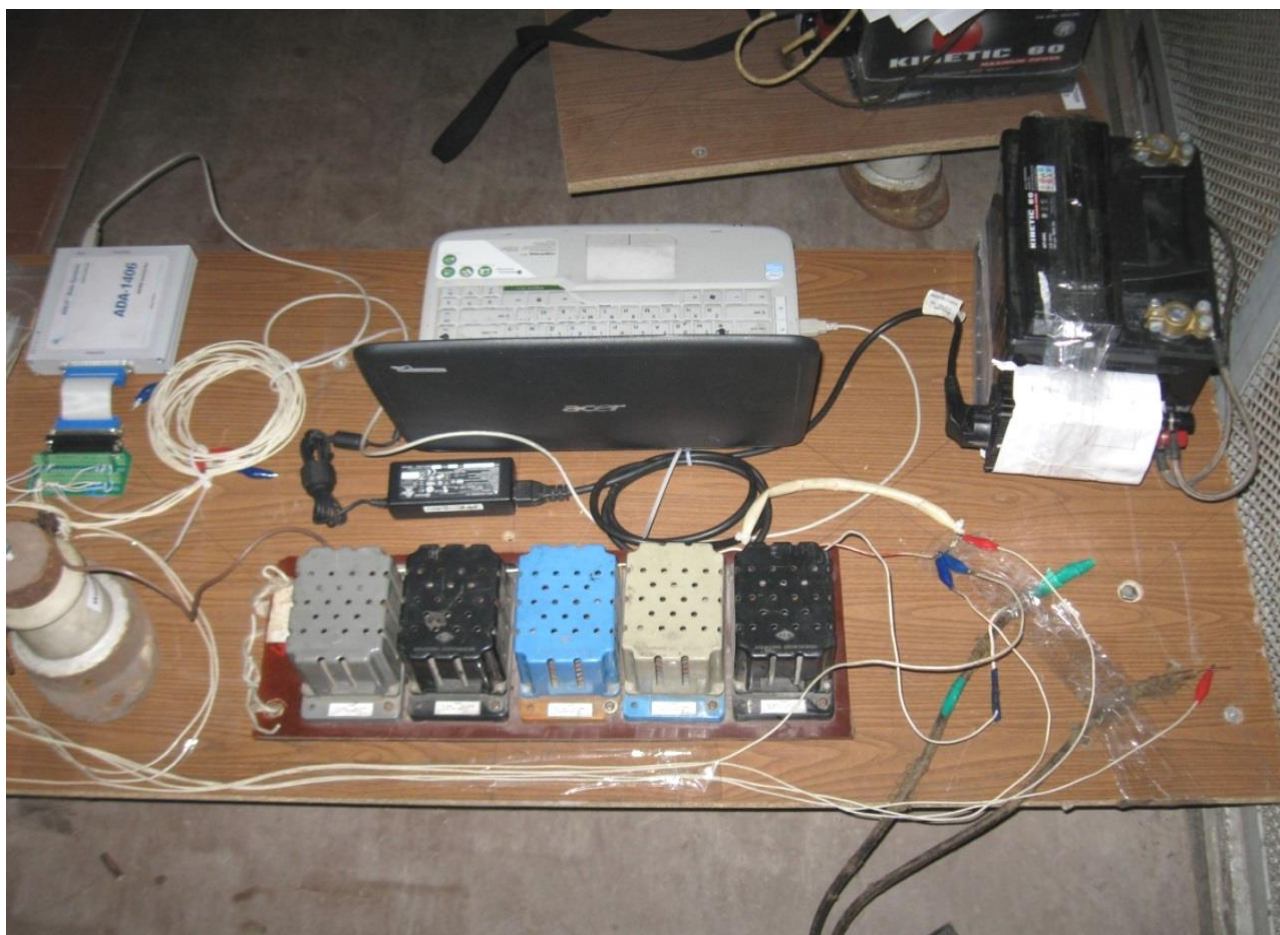


Рис. 1.3-Загальний вигляд вимірювального комплексу №3

Вимірювальний комплект №4 підключався через канал Х к вимірювальним затискачам шунта встановленого в комірці ФА-4 за допомогою високовольтного проведення. Канал У при цьому не задіявся. Далі було подане живлення на ноутбуки від інверторів, живлення осцилографічних пристроїв здійснювалося через USB шини ноутбуків.

Після включення в роботу приєднань ФА-3, ФА-4 і БАОД КВ-1 був

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

запущений запис значень електричних величин вимірюваних струмів і напруг. З метою забезпечення електробезпеки керування вимірювальними комплектами під час вимірів провадилося дистанційно за допомогою бездротових маніпуляторів типу «миша» через радіоканал. На рис.1.4 представлено загальний вигляд вимірювального комплектів №3 і №4 у приміщенні ЕЧЕ-19 під час проведення вимірів.



Рис. 1.4- Загальний вигляд вимірювального комплектів №3 і №4
у приміщенні ЕЧЕ-19

Далі на ЕЧЕ-20 Письмена були доставлені комплекти вимірювального встаткування №1 й №2. Див. рис. 1.5

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

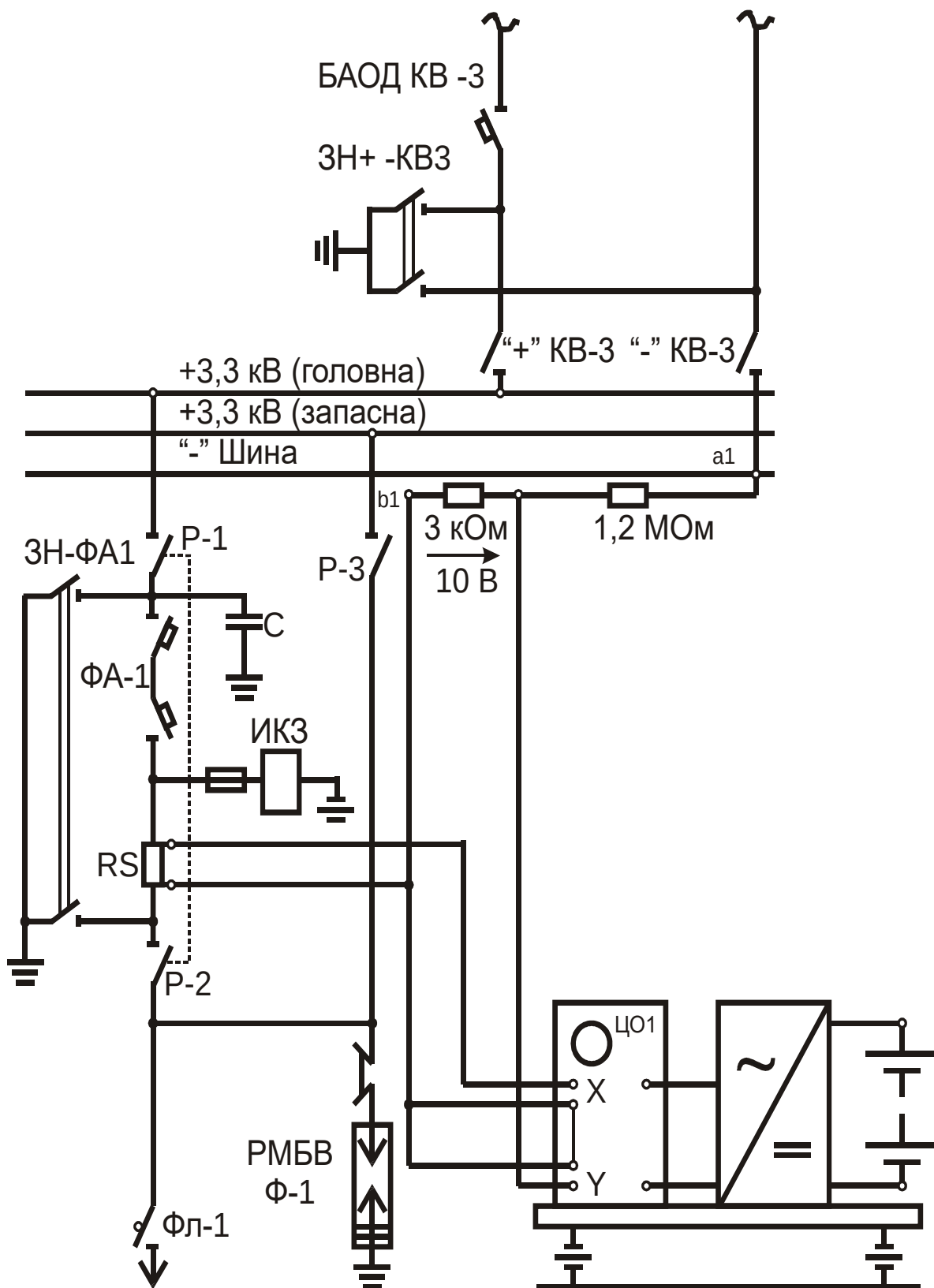


Рисунок 1.5- Схема включения осциллографа в ячейках БАОД КВ-3 и Φ-1 тягового фидера ЭЧЭ-20

Склад їх аналогічний відповідно комплектам №3 й №4. Дані комплекти обладнання були скомпоновані на ізолюючих підставках і розміщені в приміщенні РУ-3,3 кВ ЕЧЕ-20 у центральному проході біля осередків фідерних автоматів ФА-1 і ФА-2. Після проведення організаційних і технічних заходів щодо зняття напруги зі струмоведучих частин осцилографічний пристрій комплекту №1 було підключено через канал Х к вимірювальним затискачам шунта встановленого в комірці ФА-1 за допомогою високовольного проведення, а через канал У до вимірювальних затискачів подільника напруги (плече низького опору). Плече високого опору дільника напруги було підключено до «-» шини в комірці БАОД КВ-2 за допомогою високовольного проведення, прокладеного на опорних ізоляторах по підлозі РУ-3,3 кВ. При цьому спільною точкою підключення каналів осцилографа є вимірювальна клема вищого потенціалу на струмовому шунті.

Вимірювальний комплект №2 підключався через канал Х к вимірювальним затискачам шунта встановленого в комірці ФА-2 за допомогою високовольного проведення. Канал У при цьому не задіявся. Далі було подане живлення на ноутбуки від інверторів, живлення осцилографічних пристроїв здійснювалося через USB шини ноутбуків.

Керування вимірювальними комплексами №1 й №2 також здійснювалося дистанційно. Запис часових залежностей струмів і напруг проводилася протягом приблизно 3 год. 15 хв., час закінчення експериментів - 14.15. Після виконання вимірів все доставлене для експериментів вимірювальне встаткування було вилучено з території тягових підстанцій.

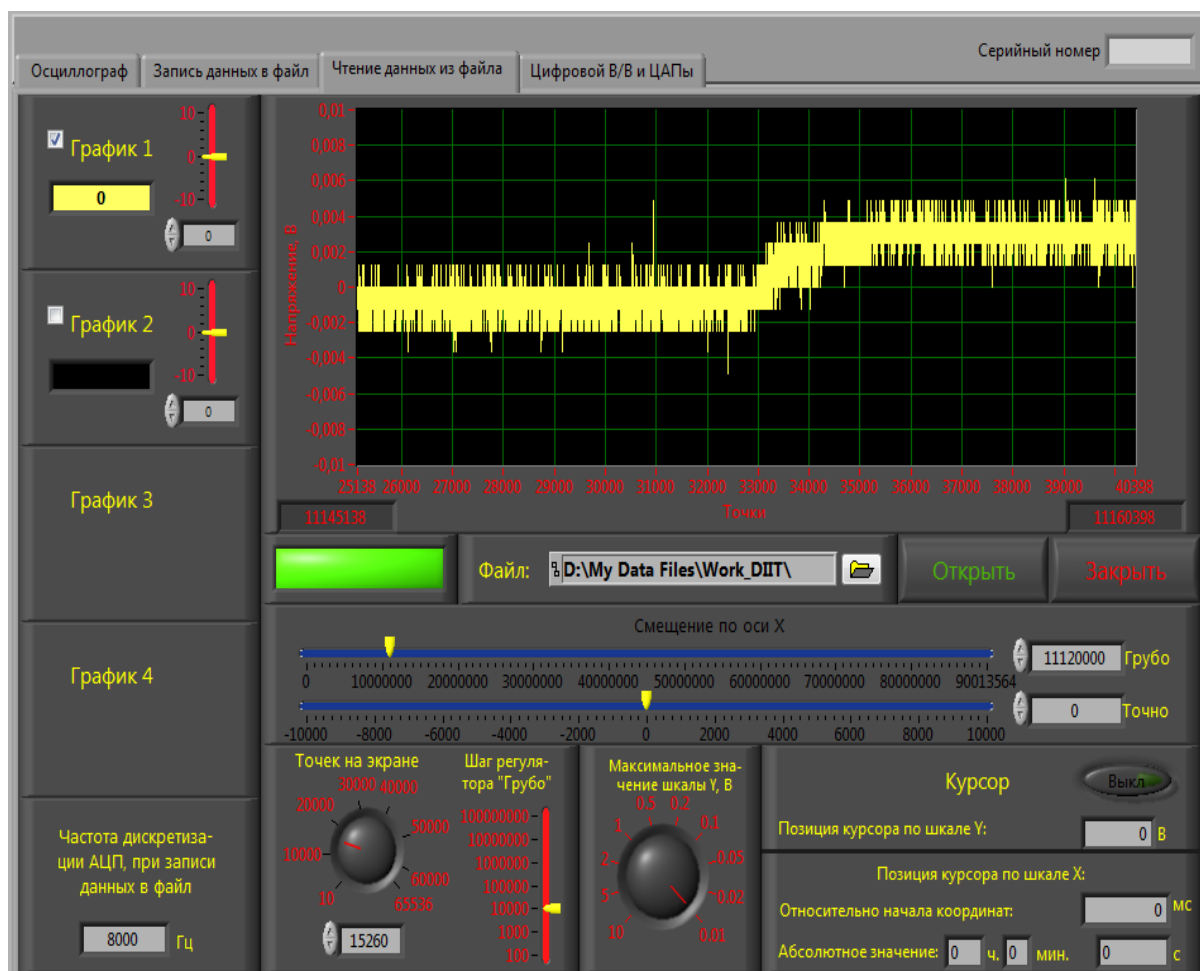
У результаті проведених експериментів на тягових підстанціях Роздори та Письмена отримані осцилограми струмів і напруг фідерів, що дозволяють визначити характер процесів, що відбуваються в системі тягового енергопостачання при режимах роботи електрорухомого складу. Зокрема, у ході експерименту, були зафіксовані: зміна тягового струму й напруги на фідері, при переході ЕРС у режим тяги (рис.1.6); зміна тягового струму й напруги (рис.1.7),

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

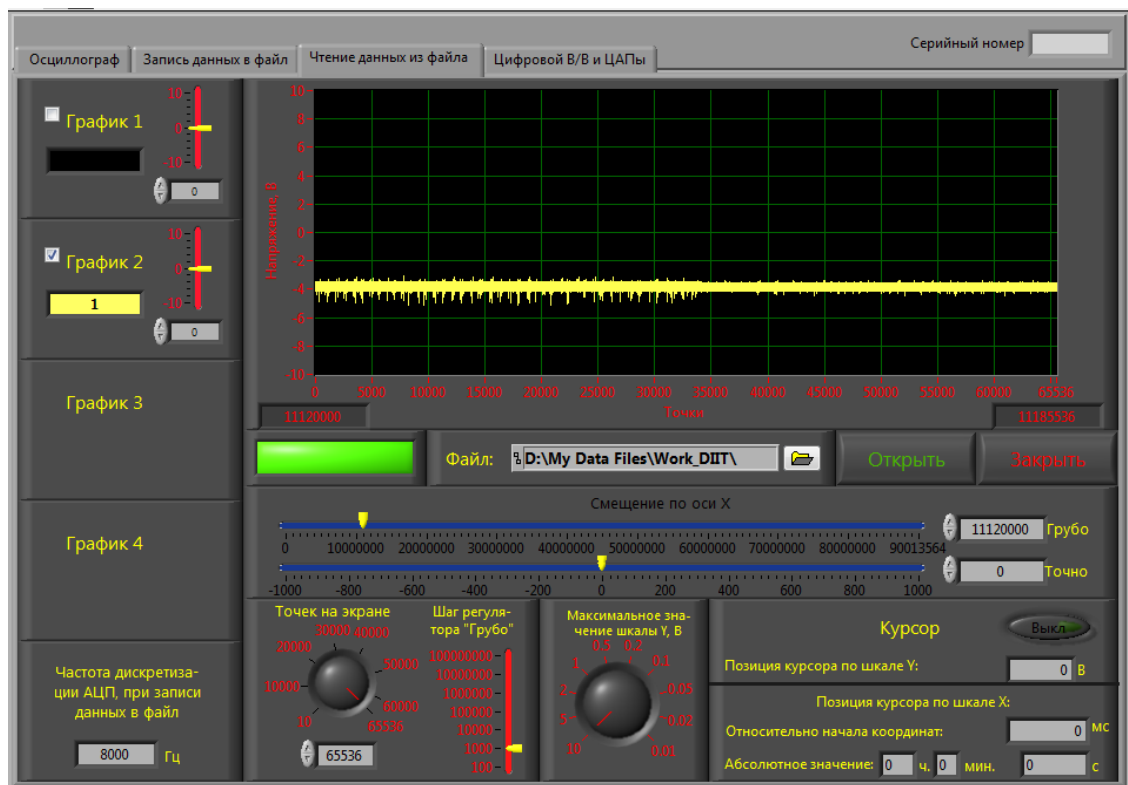
при русі на вибігу або відсутності тягових одиниць на фідерній зоні; моменти зниження тягового струму (рис.1.8), а також зміна тягового струму й напруги при можливому застосуванні рекуперативного гальмування (рис.3.6). Останній режим є визначальним для даного дослідження.

Осцилограми представлені у вікні програмної оболонки Pi-Graph 1.3, що є супровідним програмним забезпеченням для цифрового осцилографа ADA1406, використовуваного як інструмент зняття даних у поточних дослідженнях.

ADA1406 являє собою багатфункціональний вимірювальний модуль, що підключає до персонального комп'ютера через інтерфейс USB, що дозволяє здійснювати виміру аналогових і цифрових сигналів у режимах 16 однопровідних каналів із спільною землею або 8 диференціальних каналів.

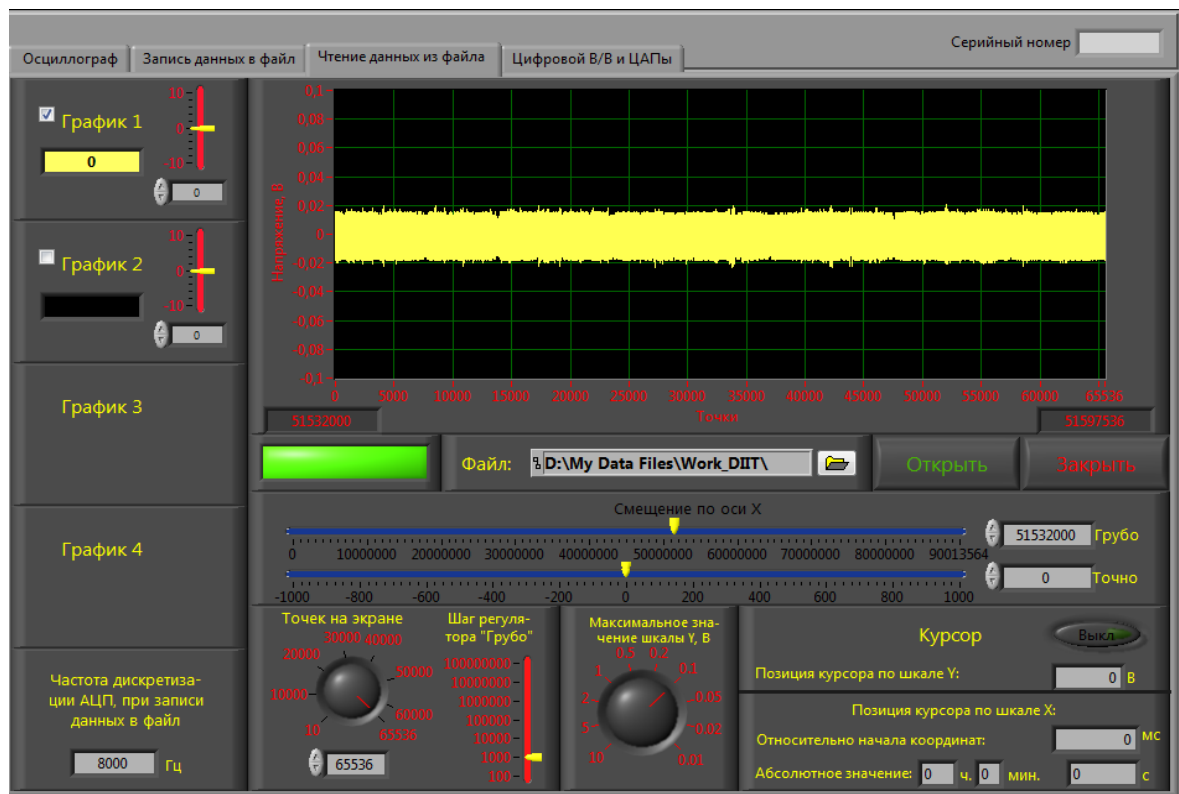


а)

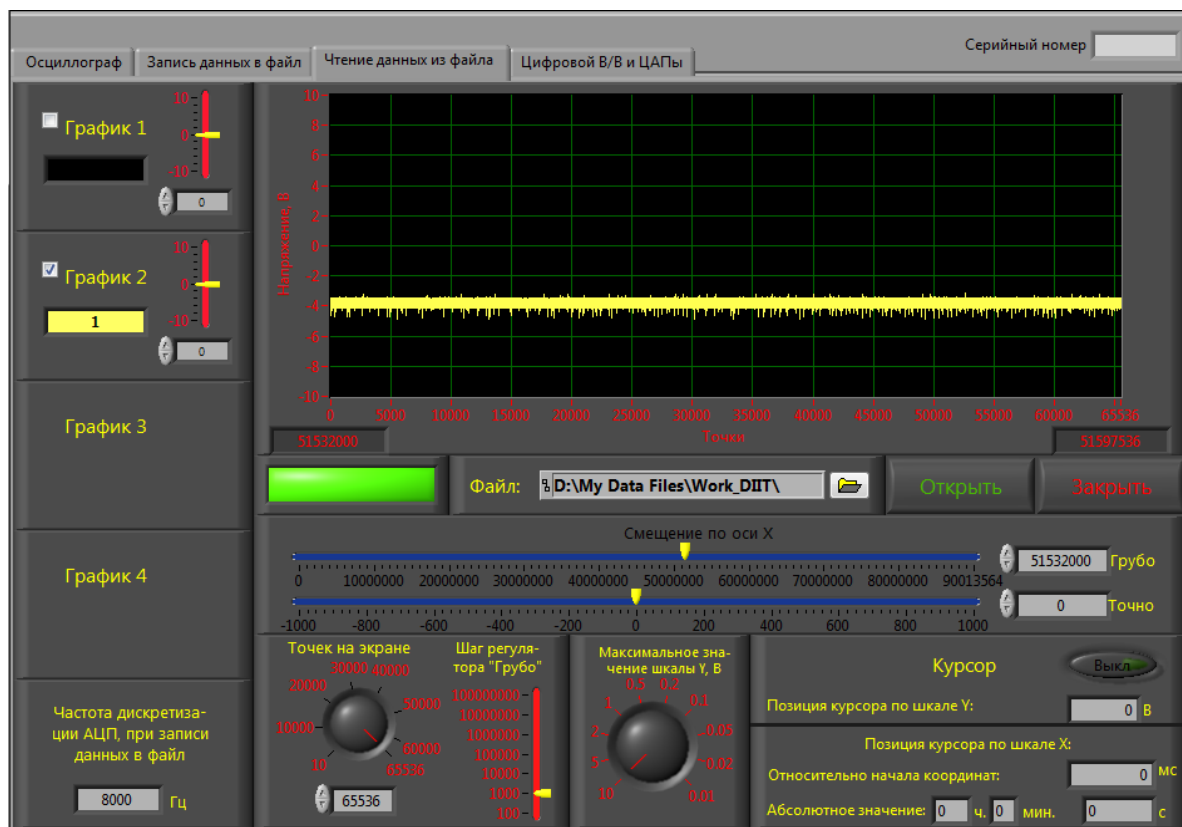


б)

Рис.1.6- Осцилограмми зміни струму (а) і напруги (б) фідера в режимі тяги ЕРС

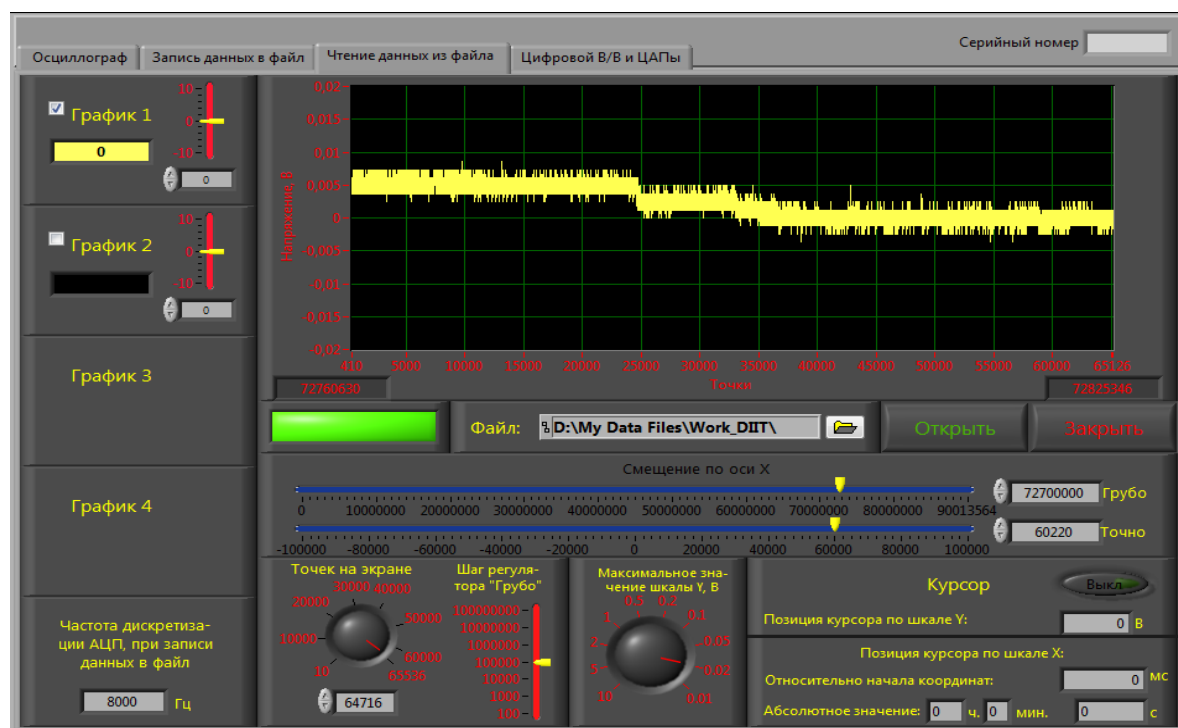


а)



б)

Рис.1.7- Осцилограми зміни струму (а) і напруги (б) фідера при русі ЕРС на вибігу або відсутності тягових одиниць на фідерній зоні



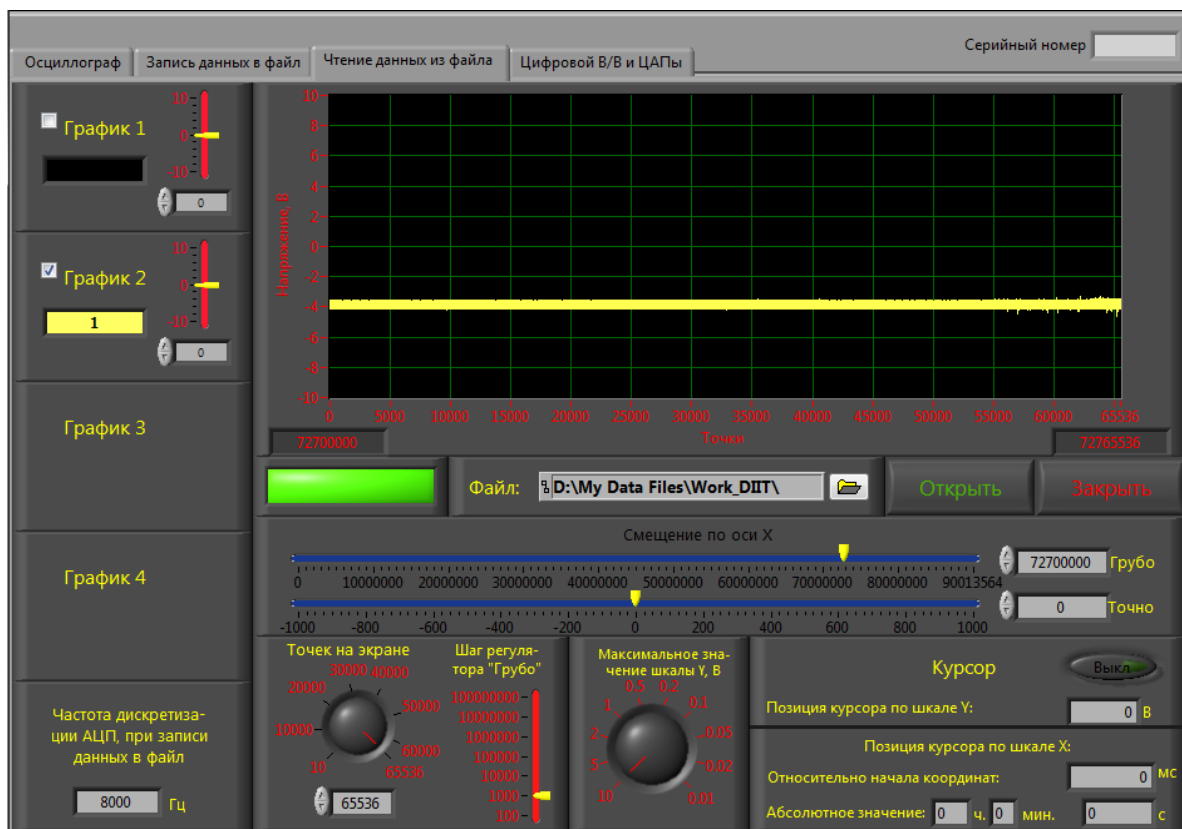
а)

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ

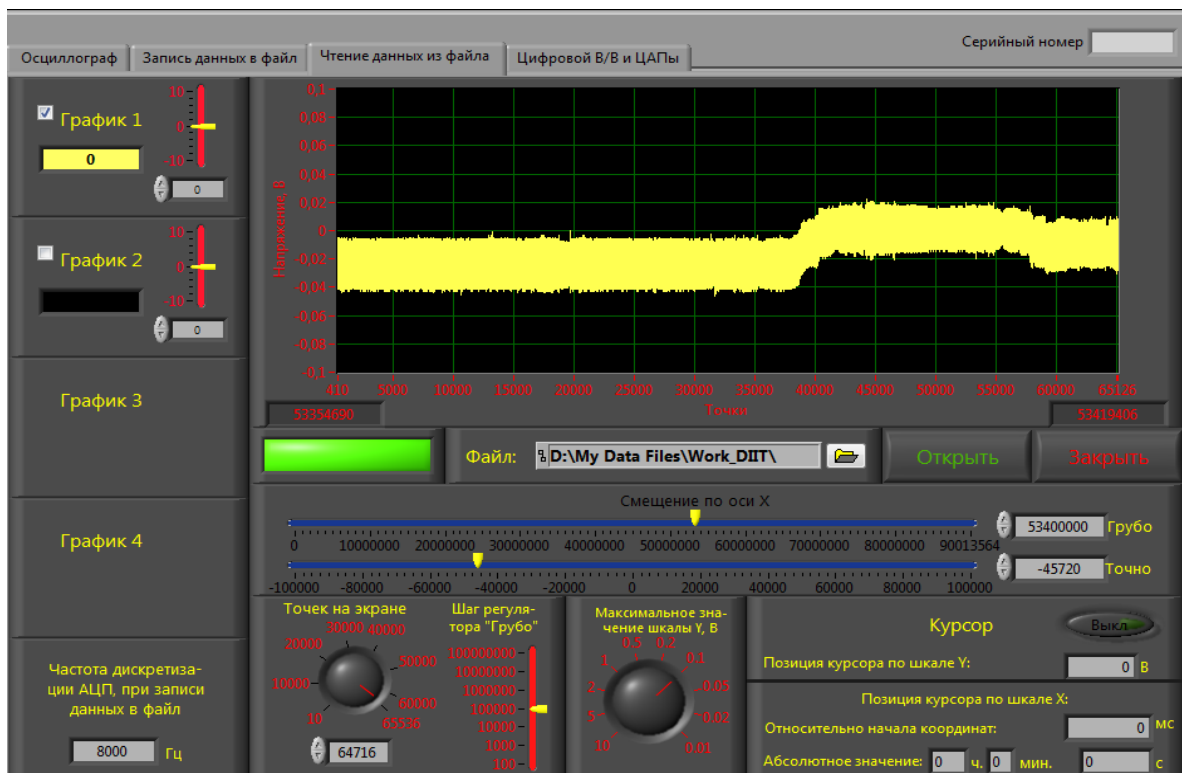
Арк.

26

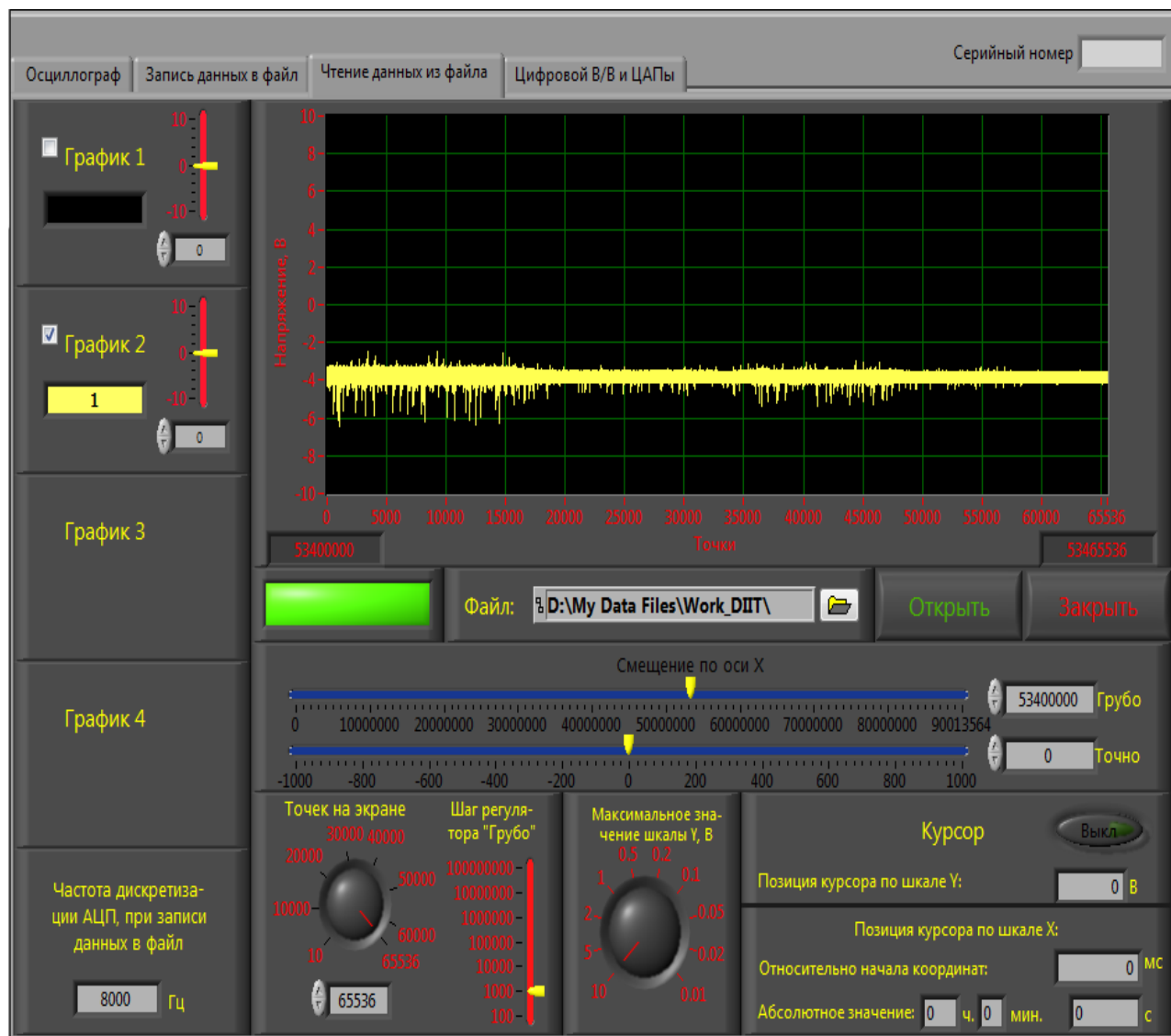


б)

Рис.3.5. Осцилограмми відповідні моменту зниження тягового струму.



а)



б)

Рис. 1.8 Осцилограмми зміни струму (а) і напруги (б) при можливому режимі рекуперативного гальмування.

Основною перевагою даного модуля є наявність 14-розрядного аналого-цифрового перетворювача з відносно низькою опорною напругою, а також 4 додаткових диференціальних каналів з індивідуальними підсилювачами. Дана перевага дозволяє здійснювати виміри сигналів малої амплітуди, що в нашому випадку є необхідним тому що виміри струмів фідерів виконувались за допомогою вимірювальних шунтів із низькою вихідною напругою – 75 мВ, що відповідає струму в 3000 А.

Як бачимо, наведені осцилограми містять значну частку електромагнітних перешкод, що значно ускладнює їхній аналіз. Крім того значення амплітуд струмів і напруг наведені без обліку перевідних коефіцієнтів, що дозволяють визначити їхні реальні значення - відповідно до постійного струмового шунта (коефіцієнта шунтування) і коефіцієнта передачі подільника напруги.

У цей час одним зі способів підвищення точності аналізу осцилограм, за рахунок зменшення перешкод, є застосування програмних фільтрів, що входять до складу спеціалізованого програмного забезпечення. У нашому випадку таким програмним забезпеченням є програмна оболонка OriginPro 8.

Як приклад розглянемо застосування програмного фільтра з метою зменшення рівня перешкод для осцилограми зміни струму фідера, що відповідає руху ЕРС у режимі тяги. Дана осцилограма, побудована в програмній оболонці OriginPro 8 має вигляд, зображений на рис.1.9. У цьому випадку осцилограма наведена з урахуванням масштабного коефіцієнта - постійної струмового шунта, що з обліком зазначених вище граничних значень останнього становить:

$$C_{III} = \frac{3000}{0,075} = 40000 \text{ A/B}; \quad (1.1)$$

Як видно з даної осцилограми крива струму насичена значною кількістю високочастотних складових, що вимагає застосування фільтра низьких частот. Даний фільтр ефективно пропускає частотний спектр сигналу нижче деякої частоти (частоти зрізу), і зменшує (придушує) частоти сигналу вище цієї частоти. При застосуванні даного фільтра варто враховувати, що на обох підстанціях тягові випрямлячі зібрані по трифазній мостовій схемі із частотою випрямленої напруги основної гармоніки 300 Гц. Тому як частота зрізу при виконанні фільтрації приймемо дану частоту. Результат фільтрації наведений на рис.1.10.

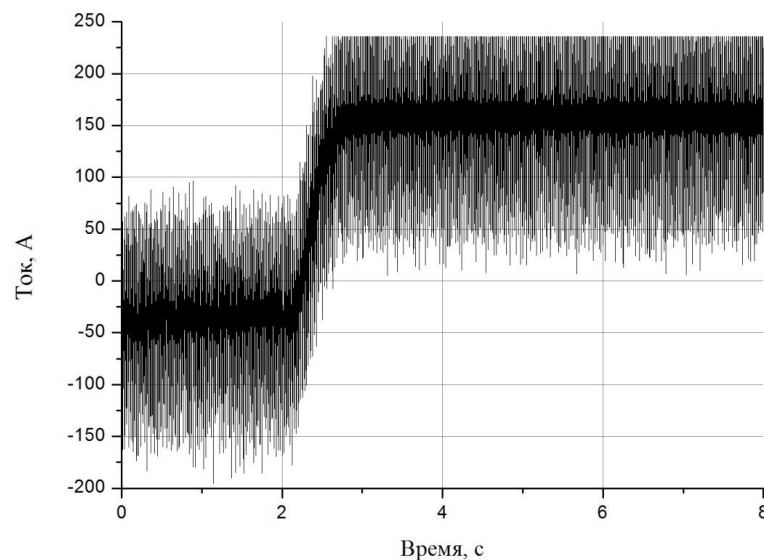


Рис.1.9 - Осцилограма струму фідера при роботі ЕРС у режимі тяги, конвертована в програмну оболонку OriginPro 8

З рис. 1.10 бачимо, що корисний сигнал продовжує містити сигнали перешкоди, але амплітуди частот цих сигналів значно нижче. Цей факт, а також те, що поточне дослідження не припускає виконання гармонійного аналізу криві струму й напруги, а пов'язане з аналізом їхніх числових значень пропонується визначення останніх здійснювати, у першому наближенні, шляхом подальшого усереднення перелічених відфільтрованих кривих (рис.1.11).

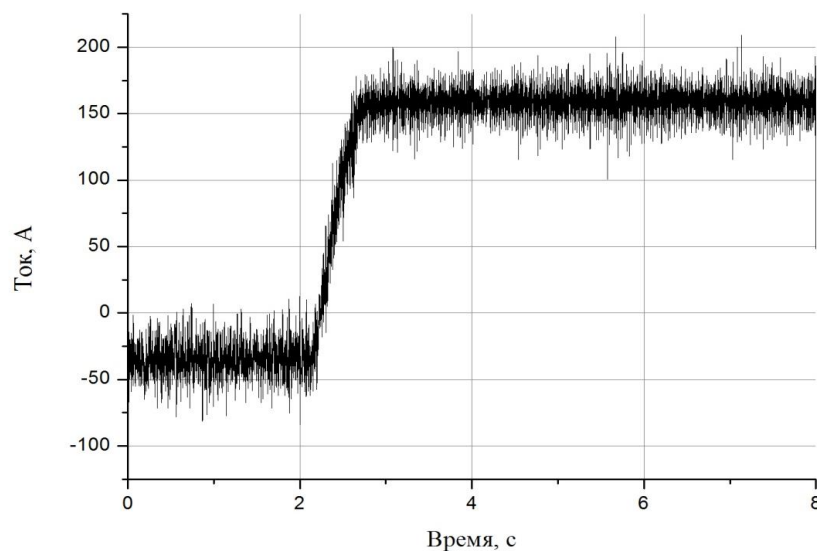


Рис.1.10- Осцилограма струму фідера при роботі ЕРС у режимі тяги, з урахуванням застосування фільтра низьких частот

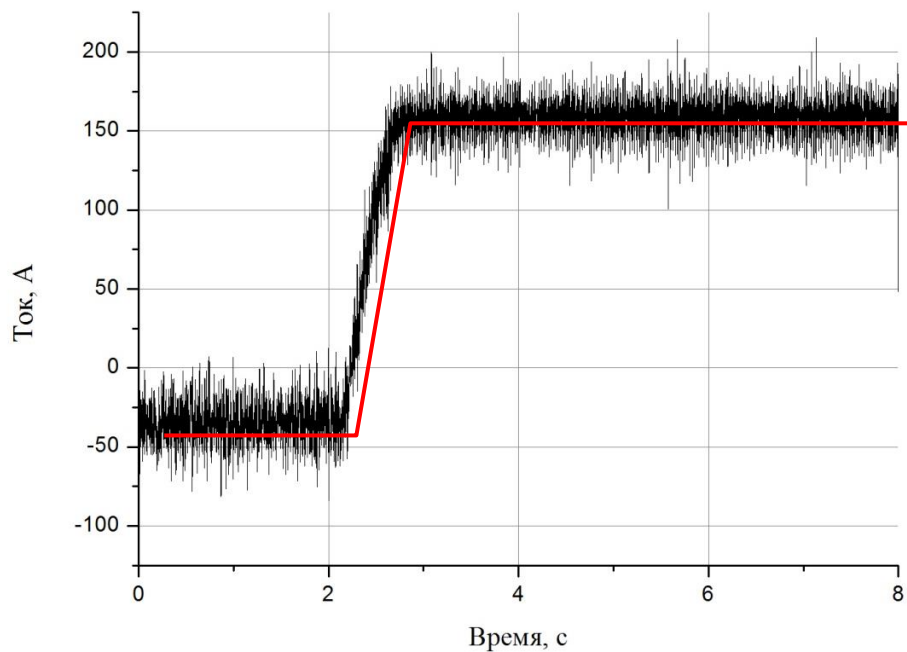


Рис.1.11 - Усереднення кривих струму фідера після фільтрації.

На рис.1.12 та 1.13 представлені часова діаграма струму фідера ФА-3 ЕЧЕ-19 Роздори та напруги контактної мережі, що були зняті під час проведення експерименту.

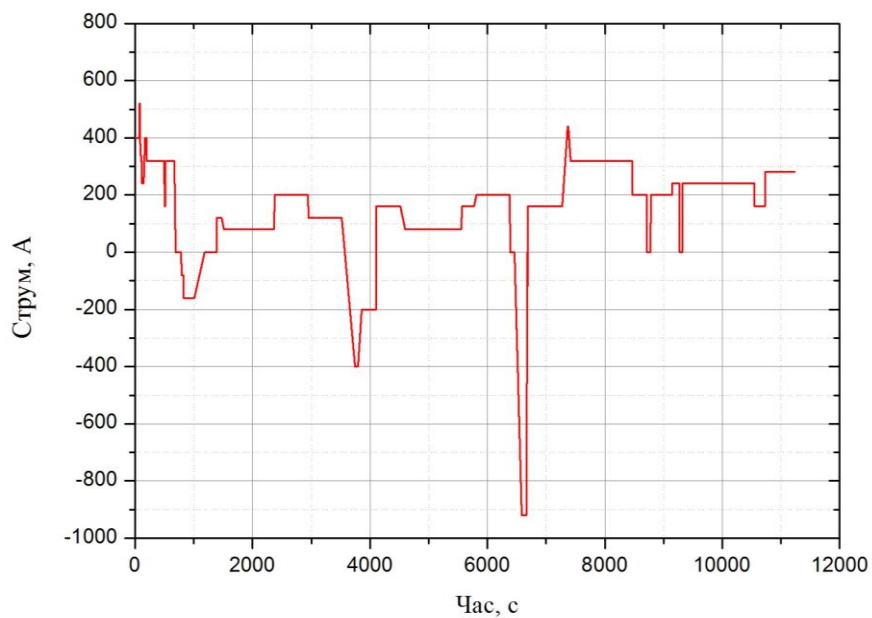


Рис.1.12- Часова діаграма струму фідера ФА-3 ЕЧЕ-19 Роздори.

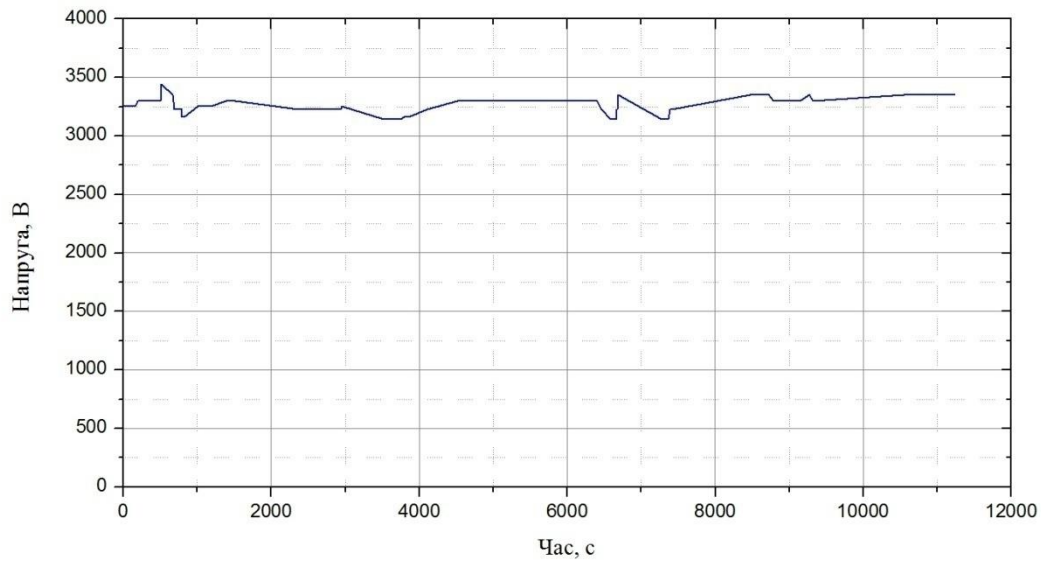


Рис.1.13 – Часова діаграма напруги контактної мережі.

1.3 Режим напруги в тяговій мережі

Визначення режиму напруги в системі тягового електропостачання і оцінка його впливу на роботу електрорухомого складу і пристроїв електропостачання є одним з найбільш важливих завдань при побудові сучасної системи електроживлення залізничного транспорту. Від режиму напруги залежать такі параметри, як швидкість руху поїзда, зміна струму і тягового зусилля електровоза, можливість подолання інерційних підйомів, навантаження і робота окремих пристроїв електропостачання. Режим напруги залежить від великої кількості взаємопов'язаних і взаємовпливаючих факторів. Насамперед, це якість напруги, режими роботи системи зовнішнього електропостачання, кількість електрорухомого складу на фідерній зоні, параметри системи тягового електропостачання та режим ведення кожного електровоза. У свою чергу, кожен із зазначених факторів залежить від певних чинників. Так, наприклад, режим ведення електровозу залежить від кваліфікації і досвіду машиніста, профілю ділянки, ваги поїзда, його складу і типу електровозу. Нормований рівень напруги в тяговій мережі електрифікованої ділянки забезпечує рух поїздів з необхідною економічно доцільною швидкістю, встановленою умовами пропускної здатності.

Такий режим забезпечує регламентовані витрати енергії на тягу з урахуванням втрат в системі електропостачання, необхідну надійність роботи електрорухомого складу (ЕРС) та пристроїв електропостачання [14]. Робота ділянки при вимушеному режимі напруги призводить до необхідності використання резервної потужності і перевантаження обладнання тягових підстанцій. При цьому напруга на струмоприймачах стає нижчою допустимого рівня і виникає необхідність у зниженні розмірів руху та збільшенні інтервалу між поїздами.

Деякі результати експериментальних досліджень режимів напруги, виконаних на кафедрі Інтелектуальні системи електропостачання наведені на рис. 1.14, рис. 1.15.

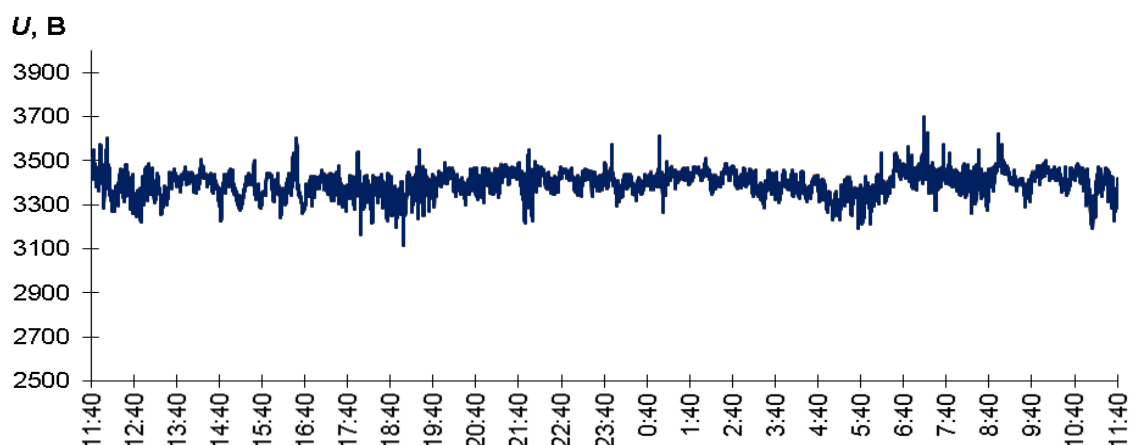


Рис. 1.14 - Напруга на шині 3,3 кВ ТП Верхівцеве

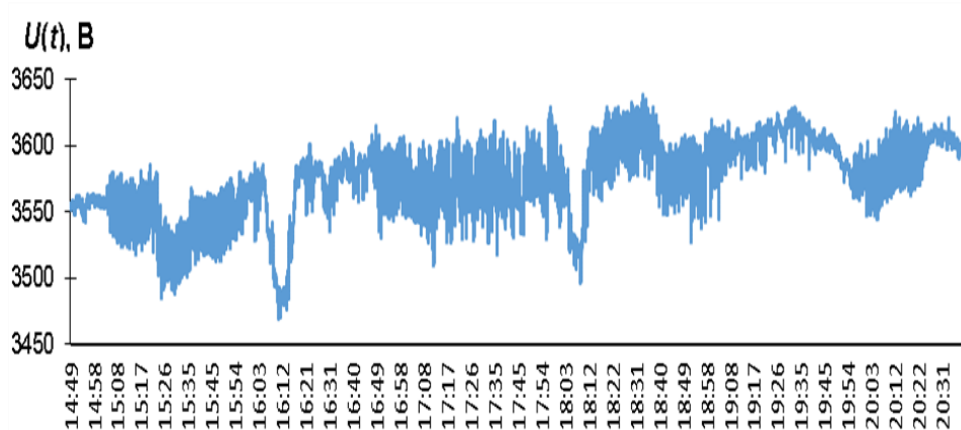


Рис. 1.15- Напруга на шині 3,3 кВ тягової підстанції Тухля

Результати вимірювань показують, що значення напруги на шинах 3,3 кВ тягових підстанцій завищені відносно номінального рівня, але не перевищують нормованого значення. Розмах зміни напруги на тягових підстанціях знаходився в межах 250 В.

При переведенні ТП Ерастівка була переведена в режим поста секціонування, ділянка Верхівцеве – П'ятихатки працювала у вимушеному режимі. Внаслідок збільшення міжпідстанційної зони на ТП Ерастівка було зафіксовано значне зниження напруги при встановленому розмірі руху (рис. 1.16). З аналізу рисунку 3 напруги у різних режимах видно значну різницю у діапазоні зміни напруги: 3185 – 3600 В в режимі тягової підстанції, 2600 – 3780 В в режимі поста секціонування.

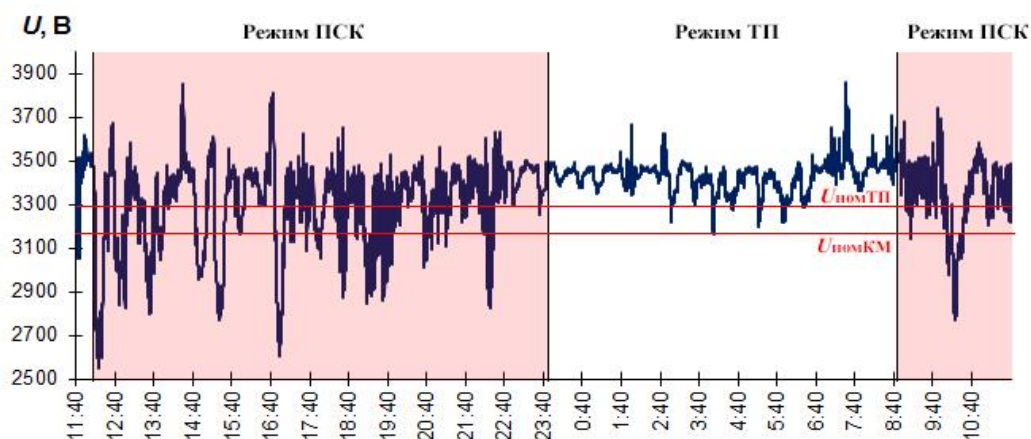


Рис. 1.16. Напруга на шинах 3,3 кВ ТП Ерастівка у вимушеному режимі

Використання нових, більш потужних електровозів або збільшення їх числа чи секцій для пропуску поїздів великої маси, супроводжується значним зростанням потужності та струму, що споживається з тягової мережі. Так, наприклад, на Придніпровській залізниці на ділянці К–Н при масі поїзда 6004 т два електровози ВЛ11 встановленою потужністю 4,6 МВт кожен, споживали сумарний тяговий струм до 3 кА (рис. 1.17). При цьому, в режимі тяги, напруга на струмоприймачах виходила за межі допустимих значень (рис. 1.18). В режимі вибігу також мали місце рівні напруги, які не відповідали нормованим значенням (рис. 6). Вони можуть бути обумовлені або коливаннями напруги на шинах

тягових підстанцій, або короточасними піками тягових навантажень, які представляють собою наслідок співпадання пускових струмів окремих електровозів або їх накладання на тягові струми, що споживаються іншими поїздами, які знаходяться на міжпідстанційній зоні.

Аналіз рисунків 1.17-1.19 показує, що на струмоприймачі електровоза напруга також має різкозмінний характер. Максимальні коливання в режимі тяги можуть досягати значення 545 В, а в режимі вибігу – 618 В. Отримані результати обумовлюють необхідність зменшення коливань напруги в тяговій мережі та забезпечення сталості його ймовірнісних характеристик в межах, передбачених нормативними документами для швидкісного транспорту [17]. При цьому для забезпечення більш високих енергетичних показників функціонування ЕРС необхідно ставити задачу зменшення діапазону зміни напруги на струмоприймачах протягом всього часу руху поїзда по перегону.

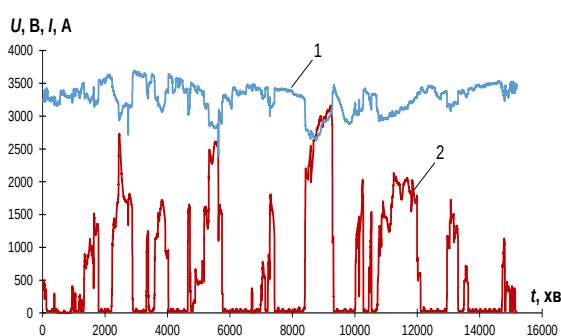


Рис. 1.17- Реалізація струму і напруги зведеного поїзда на дослідній ділянці:

- 1 – напруга на струмоприймачах;
2 – споживаний струм

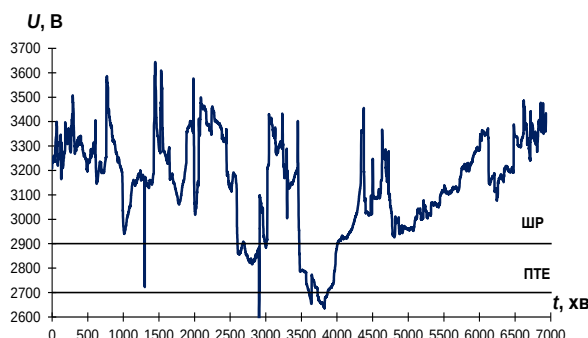


Рис. 1.18 - Напруга на струмоприймачах в режимі тяги: ШР – норма напруги для швидкісного руху; ПТЕ – норма напруги за ПТЕ

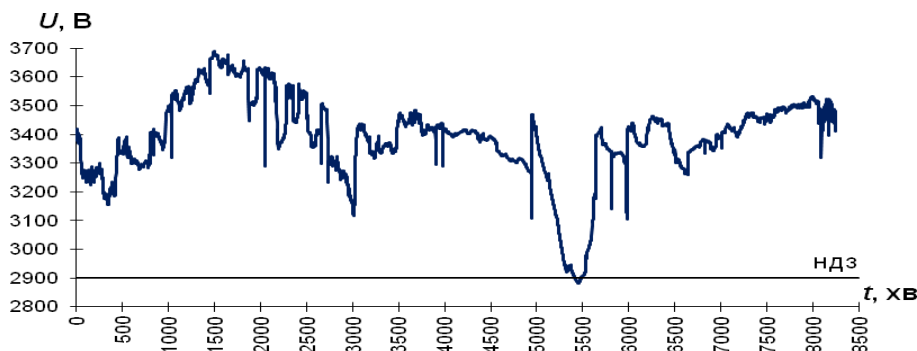


Рис. 1.19 - Напруга на струмоприймачах в режимі вибігу

Проведені дослідження режимів напруги показали неспроможність централізованої системи тягового електропостачання забезпечити потрібний рівень потужності на кілометр.

1.4 Сучасні тенденції модернізації СТЕ постійного струму при впровадженні високошвидкісного руху

При організації швидкісного руху на лініях постійного струму однією з найважливіших вимог до тягового електропостачання є підтримання рівня напруги на струмоприймачі поїзда 2900 В. Однак, виконання цієї вимоги неможливе без вдосконалення цієї системи, її модернізації та реконструкції. Підвищення техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму може бути досягнуто при проведенні певних технічних та організаційних заходів. Розглянемо деякі з них [7]:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій;
- застосування блоків розподіленого живлення;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на випрямлячі з дванадцятьма пульсаціями в кривій випрямленої напруги;
- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;
- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів;
- експлуатаційне освоєння ефективних схем згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму;
- встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги;
- використання перетворювальних трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Значно підсилити тягове електропостачання може не лише впровадження новітніх технологій і сучасного устаткування, а й застосування систем розподіленого живлення, тобто, перехід до нової схемотехніки мережі електротяги. Актуальним варіантом підсилення системи 3,0 кВ є установка підсилюючих пунктів (ПП) на міжпідстанційній зоні, які будуть працювати за принципом децентралізованої системи. Перевагою цієї системи є потреба лише в підживленні контактної мережі, що не вимагає значної агрегатної потужності, а при використанні альтернативної енергії дозволяє значно знизити споживання електричної енергії з системи зовнішнього електропостачання. На сьогодні опрацьовано декілька варіантів побудови такої системи, у тому числі і з застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення тягової мережі.

Економічний ефект досягається за рахунок зменшення перетину проводів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі і збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного обладнання при зниженні його встановленої потужності. А окреме управління кожним ПП в режимі реального часу надасть можливість перерозподіляти згенеровану потужність вздовж тягової мережі та створить підґрунтя для побудови системи інтелектуального живлення. Необхідно зазначити, що ефективність системи розподіленого типу, особливо при застосуванні альтернативних джерел живлення, буде значно вищою при застосуванні накопичувачів енергії (ESS). Використання ESS в системі тягового електропостачання дозволяє частково або повністю усунути нерівномірності енергоспоживання, приймати надлишкову енергію рекуперації, підтримувати на певному рівні потужність тягової підстанції під час експлуатації та зменшити втрати енергії в зовнішній системі електропостачання. Окрім цього, накопичення і зберігання цієї енергії для повторного використання приведе до зменшення первинного енергоспоживання від зовнішньої системи електропостачання, що

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

може привести до зниження встановленої потужності усіх агрегатів тягових підстанцій [5].

На сьогоднішній день одним з найперспективніших засобів підсилення системи тягового електропостачання постійного струму (СТЕ) є застосування систем розподіленого живлення (СРЖ). Підвищення ефективності в цих системах досягається за рахунок зменшення перерізу дротів контактної мережі, зменшення втрат енергії, підтримки необхідного рівня напруги в контактній мережі і збільшення коефіцієнта використання потужності основного енергетичного устаткування при зниженні його встановленої потужності. Підсилення на основі розподіленого живлення припускає перехід до нової схемотехніки тягової мережі. Перевагою цієї системи також є підсилення тягової мережі, що не вимагає додаткової агрегатної потужності, а при використанні альтернативної енергії значно знижується витрата електричної енергії. Необхідно також відзначити, що в системі тягового електропостачання розподіленого типу більш простіше знімаються критичні фактори як з боку пікових навантажень на зовнішнє електропостачання, так і з боку споживання збиткової енергії рекуперації навіть без використання випрямно-інверторних агрегатів на головних тягових підстанціях.

Енергетичні канали для живлення розподіленої СТЕ повинні забезпечувати надійність та безперебійність живлення, стійкість до непередбачуваних впливів та високу енергоефективність. На сучасному етапі, окрім вказаного, вони повинні бути електроенергоефективними та електромагнітносумісними з оточуючим середовищем на всіх рівнях передачі, перетворення та споживання електричної енергії. Вказані процеси забезпечуються низкою різноманітних пристроїв, утворюючих, власне, енергетичні канали (ЕК): лінії електропередачі, трансформатори, перетворювачі, інфраструктура тягової мережі та споживачі електричної енергії. Взаємодія підсистем ЕК представляє складний стохастичний процес, характеристики якого змінюються у просторі, площині та часі[4]

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При швидкостях 300 км / год і вище значно підвищуються тягові навантаження в проводах контактної мережі, тому вважається, що для високошвидкісного руху необхідно застосування змінного струму.

Однак досвід використання системи електропостачання змінного струму (25 кВ, 50 Гц) показав: тяга на змінному струмі породила нові проблеми, які не вирішені остаточно досі. Її основні недоліки чітко визначив професор МГУПС Р.Р. Мамошін:

- несиметричність (однофазної або двофазної) навантаження, що підключається до симетричній системі зовнішнього напруги електропостачання, веде до погіршення якості електричної енергії і збільшення втрат в мережі живлення і силових трансформаторах підстанцій на 25-100%;

- потужності силових трансформаторів тягових підстанцій використовуються на 68%;

- погано використовуються потужності підстанцій, так як живлення тягового навантаження проводиться тільки від двох підстанцій, що веде до завищення їх встановленої потужності на 15-20%;

При швидкостях 300 км / год і вище значно підвищуються тягові навантаження в проводах контактної мережі, тому вважається, що для високошвидкісного руху необхідно застосування змінного струму.

Однак досвід використання системи електропостачання змінного струму (25 кВ, 50 Гц) показав: тяга на змінному струмі породила нові проблеми, які не вирішені остаточно досі. Її основні недоліки чітко визначив професор МГУПС Р.Р. Мамошін:

З розвитком силової керованої напівпровідникової техніки залишається актуальним пошук рішень подальшого підвищення рівня напруги в електротяговій мережі системи постійного струму до 12, 18, 24 кВ.

На необхідність підвищення напруги в контактній мережі постійного струму вказувалося ще в 1931 році. Проведені розрахунки показали, що втрати напруги в тяговій мережі змінного струму 20 кВ відповідають системі постійного струму.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У 1960-і роки в Закавказзі була зроблена невдала спроба створення системи електричної тяги постійного струму 6 кВ. Застосування на електровозах ігнітрони перетворювачів напруги постійного струму 6 кВ в 3 кВ продемонструвало їх експлуатаційну ненадійність.

У 1970 році в Уральському електромеханічному інституті інженерів залізничного транспорту були проведені розрахунки по електрифікації доріг на постійному струмі підвищеної напруги 12 кВ. Виявилося, система змінного струму 25 кВ по втратах електроенергії, напрузі і економічним відстаням між підстанціями відповідає системі постійного струму напругою 11-16 кВ. а напругою 6 кВ

Створення обладнання для отримання 24 кВ і його ізоляція на тягових підстанціях не викликають особливих труднощів. Складність полягає в розробці преобразовательного модуля постійно-постійного струму 24/3 кВ для електрорухомого складу постійного струму в якості вхідного перетворювача.

Створення системи електричної тяги постійного струму підвищеної напруги 24 кВ, природно, пов'язано з великими і важкими технічними рішеннями. Мова йде не тільки про перетворювачі, а й про комутуючу і захисну апаратуру на тягових підстанціях і електровозах.

Тому на першому етапі, можливо, слід зупинитися на системі постійного струму напругою 12 кВ. Таке рішення підтверджується дослідженнями, переконують, що ця система за основними показниками не поступається системі змінного струму 25 кВ і навіть матиме перед нею деякі переваги за якістю споживаної енергії, особливо за коефіцієнтом потужності. І ще: при перекладі існуючої системи постійного струму 3 кВ на 12 кВ при напрузі до 15 кВ не потрібно посилювати ізолятори і ізолюючі проміжки діючої контактної мережі.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДІЛЯНКИ СТЕ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

2.1 Розрахункова схема і математична модель ділянки

Розрахунок режимів роботи і визначення навантажувальної здатності систем тягового електропостачання (СТЕ) є актуальним при їх проектуванні та експлуатації. Розрахунок СТЕ має певні особливості на відміну від розрахунку систем зі стаціонарними споживачами електричної енергії. На режим роботи системи тягового електропостачання впливає багато факторів, які мають детермінований характер. Такими факторами можуть бути число і ваговий склад поїздів, режими їх роботи та розміщення у часі і просторі, пропускна здатність ділянки, метеорологічні умови, план і профіль ділянки та ряд інших факторів, пов'язаних з організацією експлуатації залізниці [17].

Розрахунок керованої розподіленої системи тягового електропостачання є ще більш складним, оскільки математична модель такої СТЕ повинна враховувати розташування на міжпідстанційній зоні декількох підсилюючих пунктів (ПП) з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу. Авжеж зміна схеми електропостачання призведе до додаткових ускладнень при моделюванні. Такі складнощі будуть в необхідності урахуванням впливу сусідніх фідерних зон та раціональним примусовим розподілом потужності паралельно працюючих тягових підстанцій і підсилюючих пунктів для забезпечення мінімуму втрат електричної енергії в тяговій мережі [16]. В будь-якому випадку концепція розподіленого живлення з керованими (некерованими) тяговими підстанціями та керованими підсилюючими пунктами передбачає збільшення явища впливу вирівнюючих струмів і, як наслідок, ускладнення розрахунку цих струмів через наявність більшої кількості джерел з різною напругою на шинах [18].

Вихідна інформація для розрахунку задається у матричному вигляді. Матриця схеми визначає топологію розрахункової ділянки на координатній сітці, напругу холостого ходу тягових підстанцій та підсилюючих пунктів, їх

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

внутрішній опір, вузли підключення живлячих фідерів до контактної мережі та вузли з'єднання контактних підвісок.

Стовпчики матриці визначають координату кожного підключення, а рядки – тип підключення та параметр джерела живлення. Для ділянки рис. 2.1, матриця схеми матиме вигляд рис 2.2.



Рис. .2.1 Схема розрахункової ділянки

$S =$	0	6	10	16	19	29	34	Координата, км
	1	1	0	0	1	1	1	Підключення ТП/ПП до першої колії
	0	0	1	1	0	0	0	Підключення ПСК/ППЗ
	1	1	0	0	1	1	1	Підключення ТП/ПП до другої колії
	$U_{ххТП}$	$U_{ххПП}$	0	0	$U_{ххТП}$	$U_{ххПП}$	$U_{ххТП}$	Напряга холостого ходу ТП/ПП, В
	$\rho_{ТП}$	$\rho_{ПП}$	0	0	$\rho_{ТП}$	$\rho_{ПП}$	$\rho_{ТП}$	Внутрішній опір ТП/ПП, Ом

Рис. 2.2- Матриця схеми розрахункової ділянки

Визначення напруги холостого ходу та внутрішнього опору тягових підстанцій і підсилюючих пунктів відбувається відповідно до [15] з урахуванням двонаправленості перетворювальних агрегатів. В подальших розрахунках матриця схеми використовується в якості аргументу різних функцій.

Зважаючи на те, що на залізницях України тягові підстанції обладнані некерованими випрямлячами, доцільно розглядати ділянку саме з такими тяговими підстанціями та з підсилюючими пунктами, що обладнані випрямно-інверторними агрегатами. Завдяки двонаправленому перетворювачу

підсилюючого пункту останній сприймається системою, як навантаження. У випадку нерівності напруги тягових підстанцій та підсилюючих пунктів ($U_{ТП}$, $U_{ПП}$) починає протікати вирівнювальний струм, який, споживається підсилюючими пунктами для заряду накопичувача. Слід відзначити, що при відсутності навантаження на міжпідстанційній зоні доцільно навмисно занижувати вихідну напругу ПП для додаткового заряду накопичувача. Встановлення зворотної нерівності напруги ($U_{ПП}$, $U_{ТП}$) буде доцільним лише у випадку, коли тягові підстанції обладнані випрямноінверторними агрегатами, а накопичувачі підсилюючих пунктів повністю заряджені. Тоді енергія, згенерована альтернативним джерелом живлення, перетікаючи від підсилюючих пунктів до тягових підстанцій, далі буде спрямована в систему зовнішнього електропостачання. Таким чином, в даній системі, за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами, можуть протікати вирівнювальні струми без наявності електрорухомого складу на ділянці.

Для розрахунку струмів в СТЕ без навантаження за умови розміщення на міжпідстанційній зоні підсилюючих пунктів з двонаправленими перетворювачами необхідно визначити, які струми протікають від кожної тягової підстанції при заданій конфігурації системи тягового електропостачання та рівня напруги холостого ходу відповідної тягової підстанції. Для вирішення цього завдання скористаємося методом накладання. Суть методу накладання полягає в тому, що струм у будь-якій вітці кола, створений кількома джерелами, які діють у даному колі, дорівнює алгебраїчній сумі струмів, створених кожним з цих джерел окремо.

Для реалізації розрахунку розглянемо схему ділянки, яка зображена на міжпідстанційна зона задається еквівалентним опором тягової мережі, який враховує схему живлення та кількість колій. Розрахункова ділянка може складатись з будь-якої кількості тягових підстанцій, підсилюючих пунктів та міжпідстанційних зон. Для прикладу будемо використовувати еквівалентну схему

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

заміщення електрифікованої ділянки (рис. 2.3) обмежену $i-2$ та $i+2$ тяговими підстанціями, яка має два підсилюючих пункти $i-1$ та $i+1$ (рис.2.4).

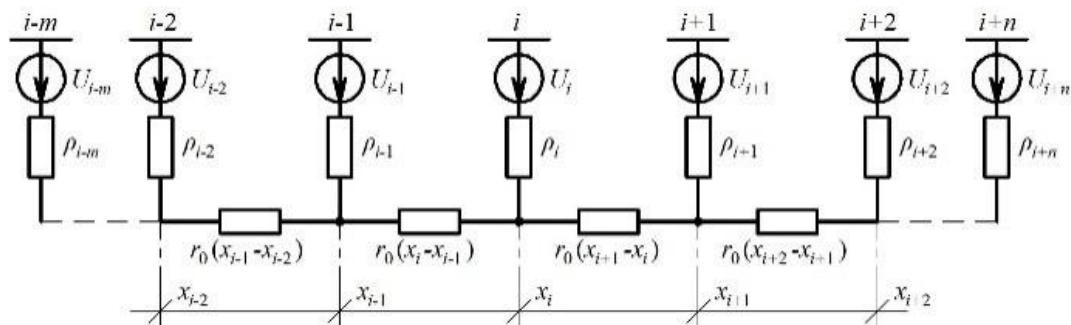


Рисунок 2.3 Еквівалентна схема заміщення електрифікованої ділянки

Для використання методу накладання, на розрахунковій ділянці необхідно вибрати деяку i -ту тягову підстанцію з кількістю m тягових підстанцій та підсилюючих пунктів ліворуч від обраної та з n тяговими підстанціями та підсилюючими пунктами праворуч. Тоді розрахункова схема буде мати вигляд рис. 2.4.

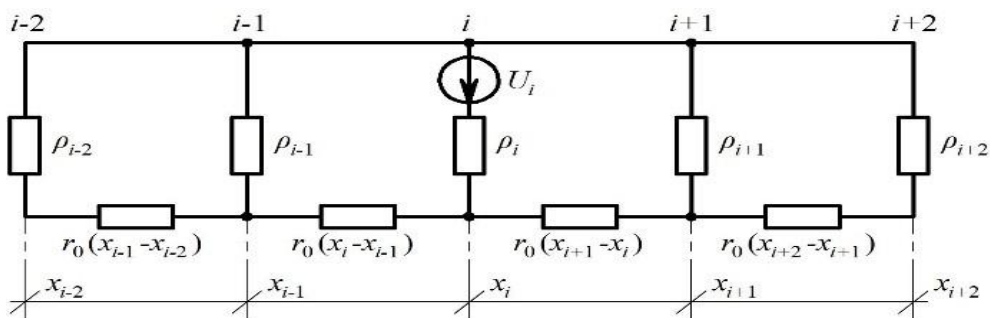


Рисунок 2.4- Розрахункова схема для i -тої тягової підстанції: ρ – внутрішній опір відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту; U – напруга холостого ходу відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту; r_0 опір 1 км контактної мережі; x - координата відповідної тягової підстанції / підсилюючого пункту

Для визначення струму I_i від i -тої тягової підстанції або підсилюючого пункту за умови відсутності навантаження на дослідній ділянці скористаємось законом Ома. Для визначення еквівалентного опору необхідно ліву та праву частину розрахункової схеми відносно i -тої тягової підстанції звести до єдиного опору.

2.2 Розрахунки режиму напруги на ділянці при впровадженні високошвидкісного руху

У результаті вимірів ми отримали статистичну вибірку ($x_1, x_2, \dots, x_n$) випадкових величин. Нам потрібно встановити закономірності зміни цієї випадкової величини. А як відомо, ці закономірності характеризуються законом розподілення та числовими характеристиками випадкових величин. Отже, потрібно визначити математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, моду, медіану, коефіцієнт асиметрії, ексцес, а також встановити закон розподілення цієї величини.

Тягова напруга U (в В)

3625 3525 3710 3475 3625 3720 3600 3525 3806 3964 3590 3718 3724
 3848 3500 3650 3675 3640 3555 3711 3560 3428 3400 3460 3475 3650
 3700 3350 3480 3570 3460 3370 3785 3750 3666 3790 3600 3525 3700
 3650 3375 3625 3600 3625 3550 3680 3550 3650 3490 3775 3725 3743
 3625 3450 3650 3625 3735 3500 3675 3550 3500 3860 3750 3706 3580
 3450 3600 3350 3575 3625 3350 3625 3430 3650 3575 3480 3525 3650
 3790 3760 3750 3550 3725 3580 3610 3640 3740 3670 3480 3520 3610
 3490 3780 3750 3670 3590 3735 3680 3460 3870 3900 3450 3640 3575

Методика розрахунку цих величин полягає в виконанні таких етапів.

1. Оцінимо достатність отриманого статистичного матеріалу (статистичної сукупності), тобто вибірки, для якісного статистичного аналізу, для цього визначимо мінімальну необхідність вибірки за такою формулою:

$$n_{min} = \frac{N \cdot \sigma_U^2 \cdot t^2}{N \cdot \Delta^2 + \sigma_U^2 \cdot t^2}, \quad (2.1)$$

де N – загальна кількість спостережених значень випадкових величин U_p в статистичній сукупності, $N=n=104$;

σ_U^2 – найбільша дисперсія значень, встановлена на підставі попередніх випробувань;

Δ – допустима границя помилки вимірювань величини, 1% від математичного очікування «малої» вибірки;

t – аргумент інтегральної функції Лапласа $F(t)$ (з імовірністю якої забезпечується задана точність), $t = 1,96$ при $F(t) = 0,95$.

Для визначення величини у формулі (1) із заданої нормальної статистичної сукупності вибирається «мала» статистична сукупність десь 20-30 значень із заданої сукупності, при цьому в будь-якому порядку.

3475;3525;3724;3675;3555;3400;3700;3460;2666;3700;3600;2550;2725;3650;3675;
3750;3600;3625;3650;3650;3550;3640;3520;2750;3725;3460;3450

Для цієї «малої» вибірки необхідно визначити математичне очікування за формулою:

$$m_U^* = \frac{\sum_{i=1}^{27} U_i}{27}, \quad (2.2)$$

$$m_U^* = 3609,2592 \text{ В.}$$

Аналогічно для цієї «малої» вибірки визначаємо середньоквадратичне відхилення за формулою:

$$\sigma_U^* = \sqrt{D_U^*}, \quad (2.3)$$

де D_U^* – дисперсія випадкової величини:

$$D_U^* = \frac{\sum_{i=1}^{n=27} (U_i - m_U^*)^2}{27-1}, \quad (2.4)$$

$$D_U^* = 10036,67 \text{ В}^2.$$

$$\sigma_U^* = 100,18 \text{ В.}$$

$$\Delta = 3.$$

$$n_{min} = \frac{104 \cdot 100,18^2 \cdot 1,96^2}{104 \cdot 3^2 + 100,18^2 \cdot 1,96^2} \approx 100,47.$$

Отримали $n_{min} \approx 100,47$, а задана сукупність $n = 104$, отже заданої нормальної статичної сукупності достатньо для якісного статистичного аналізу.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. Візуально аналізуємо заданий статистичний матеріал і розділяємо його на інтервали, для чого із заданого матеріалу виділяємо max і min

$$U_{\max} = 3964 \text{ В}; U_{\min} = 3350 \text{ В}.$$

Визначаємо інтервал зміни досліду випадкової величини за такою формулою:

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{1 + 3.2 \lg n}, \quad (2.5)$$

$$\Delta U = \frac{3964 - 3350}{1 + 3.2 \cdot \lg 104} = 81 \text{ В}.$$

3. Визначаємо межі інтервалів зміни і записуємо їх у таблицю 2.1. Перший інтервал буде мати такі значення (ліву та праву): $U_{\min} \dots U_{\min} + \Delta U$.

Таблиця 2.1

Межі інтервалів $U_i - U_{i+1}$, В	Розрахунок частот в інтервалі, х	Частота інтервалах, m	Частість інтервалі, $p_i = m_i/n$
3350-3431		10	0,09615
3431-3512		18	0.17308
3512-3593		20	0,19231
3593-3674		30	0,28846
3674-3755		14	0,13462
3755-3836		7	0,06773
3836-3917		4	0,03846
3917-4028		1	0,00962

4. За даними стовпців таблиці 2.1 будуємо так зване статистичне розподілення досліджуваної випадкової величини, будуємо гістограму. По вісі абсцис гістограми відкладаємо значення інтервалів, а по вісі ординат відкладаємо значення частоти; в результаті отримуємо рис. 2.5.

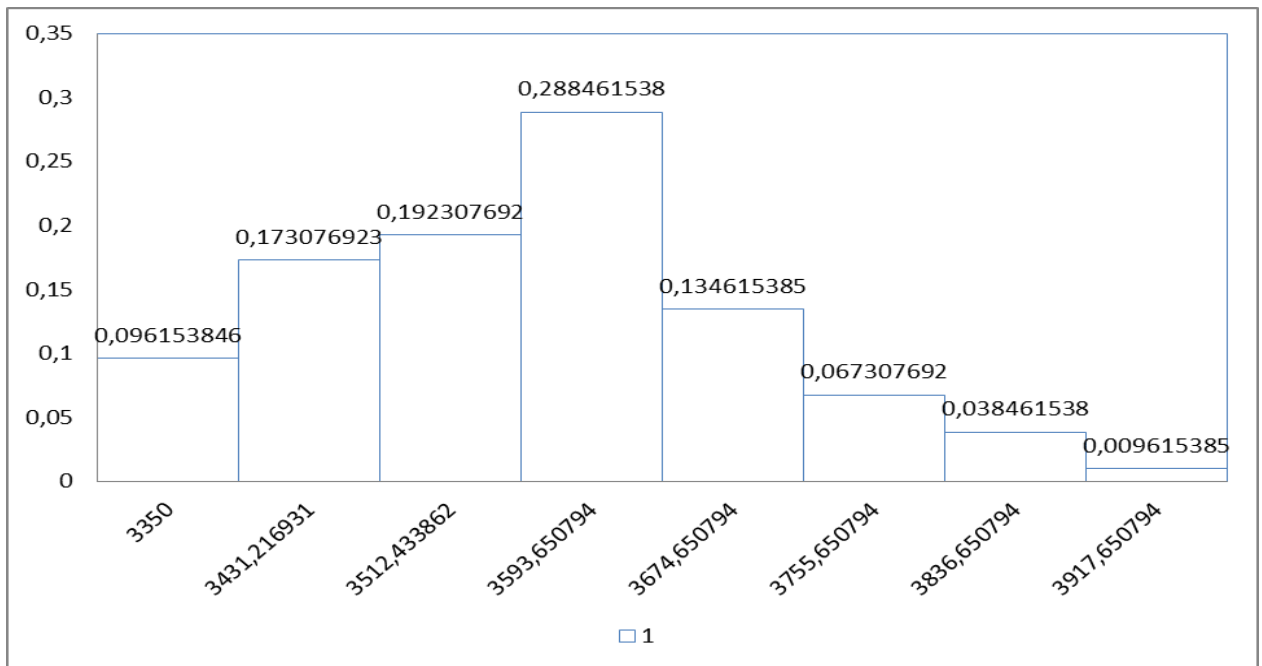


Рисунок 2.5- Гістограма

5. Визначаємо числові статистичні характеристики досліджуваної величини заданої нормальної сукупності, тобто математичне очікування, дисперсію, середньоквадратичне відхилення, коефіцієнт асиметрії, ексцес.

Математичне очікування:

$$m_U = \frac{\sum_{i=1}^{112} U_i}{104}, \quad (2.6)$$

$$m_U = 3616 \text{ В.}$$

Дисперсія:

$$D_U = \frac{\sum_{i=1}^{n=112} (U_i - m_U)^2}{104 - 1}, \quad (2.7)$$

$$D_U = 16366,097 \text{ В}^2.$$

Середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_U = \sqrt{D_U}, \quad (2.8)$$

$$\sigma_U = 127,93 \text{ В}$$

Коефіцієнт асиметрії:

$$A_s = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i - m_U)^3}{n \cdot \sigma_U^3}, \quad (2.9)$$

$$A_s = 0,0399 \text{ в.о.}$$

Ексцес:

$$E_x = \frac{\sum_{i=1}^n (U_i - m_U)^4}{n \cdot \sigma_U^4} - 3, \quad (2.10)$$

$$E_x = -0,315 \text{ в.о.}$$

6. Підбираємо теоретичний закон розподілу для отриманого статистичного розподілу (гістограма, рис.2.5), тобто закон, який виражається якоюсь формулою, виразом, який у подальшому використовується в інших дисциплінах.

Закон приймається таким, графічний вигляд якого найбільше підходить до вигляду гістограми.

В нашій задачі вигляд гістограми свідчить, що найбільше підходить нормальний закон або закон Гауса.

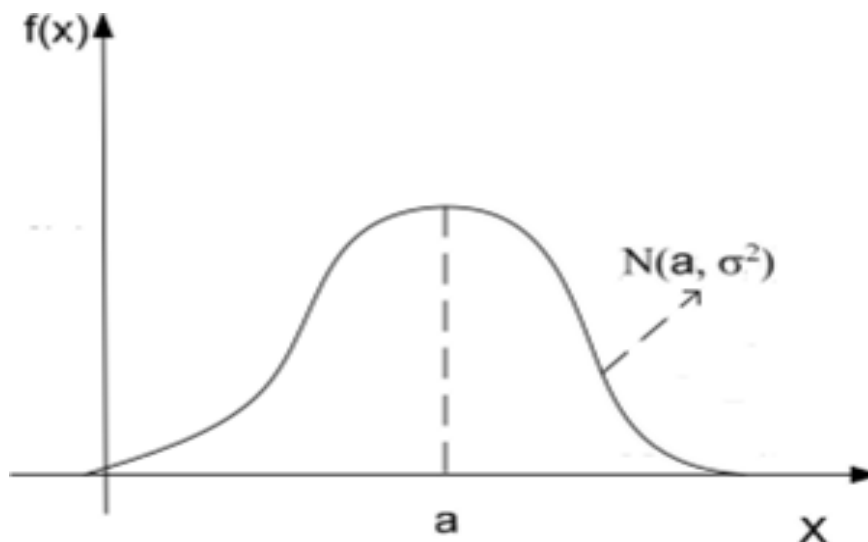


Рисунок 2.6- Теоретичний закон розподілу

$$f(U) = \left(\frac{1}{\sigma_U \sqrt{2\pi}} e^{-\left[\frac{(U - m_U)^2}{2 \cdot \sigma_U^2} \right]} \right) \cdot \Delta U \quad (2.11)$$

У цю формулу послідовно підставляються значення меж інтервалів гістограми, а також значення їх середини і визначається $f(U)$, які множаться на довжину інтервалу ΔU (табл. 2.2). Отриманні значення $f(U)$ відкладаються на рисунку 2.7. В результаті отримуємо неперервну плавну криву (2) $f(U)$.

Таблиця 2.2

№	Значення меж і середин інтервалів U , В	$\frac{(U - m_U)^2}{2 \cdot \sigma_U^2}$	$e^{-(3)}$	$f(U)$
1	2	3	4	5
1	3350	2,1616	0,115	0,029
2	3390,5	1,553	0,211	0,053
3	3431	1,0456	0,351	0,089
4	3471,5	0,6379	0,5284	0,133
5	3512	0,3304	0,7186	0,182
6	3552,5	0,123	0,8841	0,224
7	3593	0,01616	0,9839	0,25
8	3633,5	0,0093	0,9907	0,251
9	3674	0,10277	0,902	0,228
10	3714,5	0,2964	0,7434	0,188
11	3755	0,59027	0,5541	0,1403
12	3795,5	0,9843	0,3736	0,094
13	3836	1,47	0,2279	0,057
14	3876,5	2,073	0,125	0,032
15	3917	2,768	0,062	0,015
16	3957,5	3,562	0,028	0,007
17	4028	5,186	0,0055	0,0014

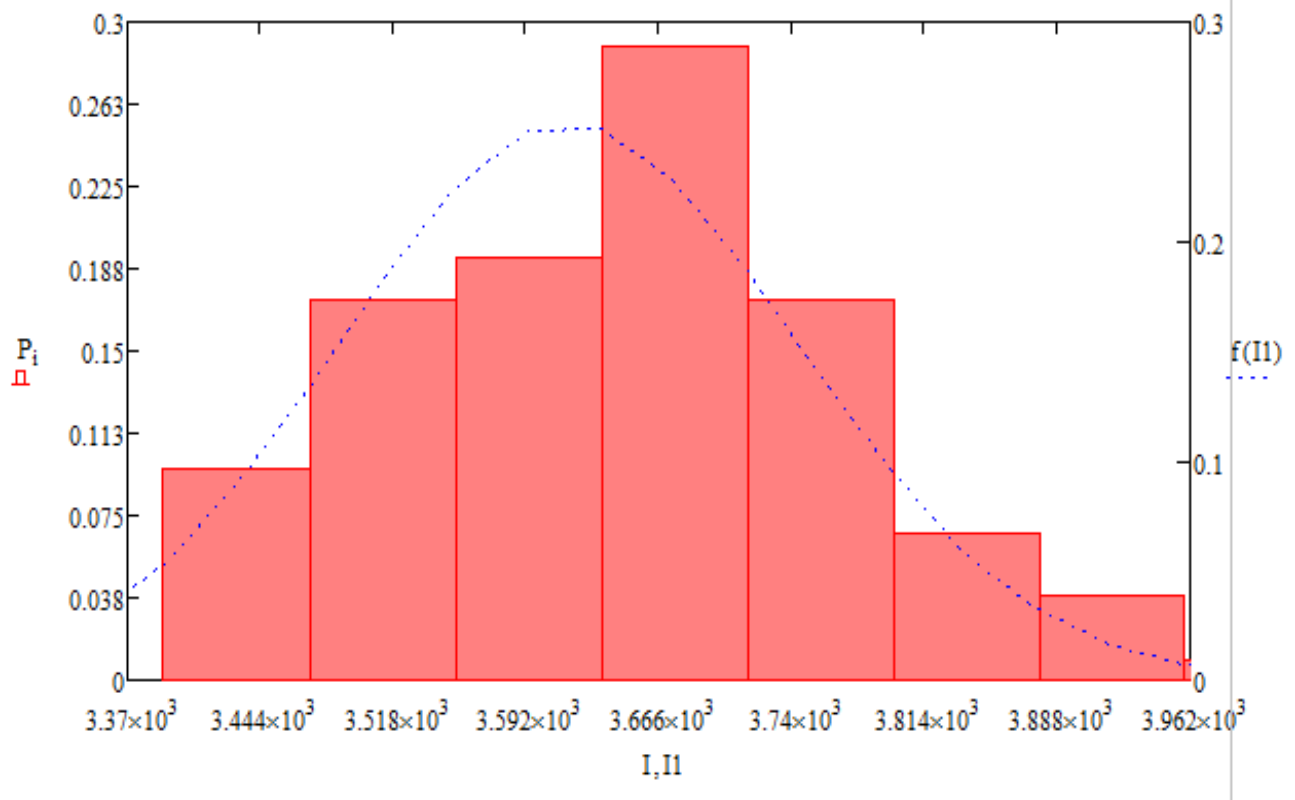


Рисунок 2.7-1 – статистичне розподілення досліджуваної випадкової величини;
2 – теоретичний закон розподілення

7. Виконуємо перевірку узгодженостей теоретичного і статистичного розподілень, гістограми з вибраним теоретичним законом розподілення. Тобто перевіримо, чи достатньо якісно крива (2) вирівнює ступінчасту гістограму (1). В теорії імовірностей найчастіше це виконують за так названим критерієм Пірсона, згідно формули:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^l \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}, \quad (2.12)$$

де l – кількість інтервалів, $l = 8$;

m_i – кількість частоти інтервалів (стовпчик 3, табл. 1);

n – загальна статистична сукупність, $n = 104$;

p_i – імовірність значень досліджуваної випадкової величини в кожному інтервалі.

Для розрахунку χ^2 потрібно виконувати такі табличні розрахунки (табл. 2.3).

Таблиця 2.3

Інтервали	Частота в інтервалах, m_i	$\frac{U_{i+1} - m_U}{\sigma_U}$ в.о.	Φ^* , в.о.	$\frac{U_i - m_U}{\sigma_U}$ в.о.	Φ^* , в.о.	$P_i = \Phi^* - \Phi^*$	np_i	$\frac{(m_i - np_i)}{np_i}$
3350-3431	10	-1,44	0,102	-2,079	0,0288	0,037	9,97	8,94
3431-3512	18	-0,809	0,2611	-1,444	0,102	0,159	20,38	0,28
3512-3593	20	-0,17	0,492	-0,809	0,2611	0,2309	25,07	1,028
3593-3674	30	0,45	0,7291	-0,17	0,492	0,2371	25,59	0,75
3674-3755	14	1,09	0,8907	0,45	0,7291	0,1616	15,72	0,188
3755-3836	7	1,72	0,9686	1,09	0,8907	0,0779	6,46	-0,044
3836-3917	4	2,35	0,9938	1,72	0,9686	0,0252	1,78	2,76
3917-4028	1	2,99	0,990	2,35	0,9938	0,0052	0,21	4,45

Значення стовпців Φ отримані із таблиці 1 підручника Вентцель О.С.

$$\chi^2 = 9,5$$

Кількість накладених зв'язків, $S=3$.

Тоді, кількість ступенів вільності:

$$r = l - S = 8 - 3 = 5 \quad (2.13)$$

Тоді з таблиці 4 підручника Вентцеля, при $\chi^2 = 9,5$ з $r = 5$, маємо $p = 0$

Це імовірність того, що вибране теоретичне розподілення не описує статистичне розподілення (гістограму).

8. Майже завжди, якщо виконується статистичний аналіз, то обов'язково треба розрахувати так званий довірчий інтервал для розрахованого вже математичного очікування, тобто визначити імовірність певного розкиду математичного очікування, це виконується таким чином.

а) Приймається так звана довірча імовірність, найчастіше (0,9; 0,95; 0,99). Фізично довірча імовірність β свідчить з якою імовірністю буде існувати розкид математичного очікування. Той розкид який зараз розраховується.

Нехай $\beta = 0,95$.

б) З таблиці 14.3.1 підручника Вентцеля, при $\beta = 0,95$ маємо параметр $t_\beta = 1.96$

в) Визначається середньоквадратичне відхилення за формулою:

$$\sigma_{m_U} = \sqrt{\frac{D_U}{n}} = \sqrt{\frac{16366}{104}} = 12,08 \text{ В.} \quad (2.14)$$

г) Визначаємо величину зміни розрахованого математичного очікування:

$$\varepsilon_\beta = t_\beta \cdot \sigma_{m_U} = 1,96 \cdot 12,08 = 23,69 \text{ В} \quad (2.15)$$

д) Отже, довірчий інтервал математичного очікування буде таким:

$$I_U = \begin{cases} 3616 - 23,69 \\ 3616 + 23,69 \end{cases} \quad (2.16)$$

$$I_U = (3592,31; 3639,69) \text{ В}$$

Отже, з імовірністю 0,95 розраховане математичне очікування буде знаходитися в інтервалі (3592,31; 3639,69) В.

9. Користуючись отриманим законом розподілення визначаємо моду і медіану досліджуємої випадкової величини.

Мода: $M_o = 3625 \text{ В}$;

Медіана: $M_e = 3625 \text{ В}$.

3. ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЬ ВСТАНОВЛЕННЯ ТА ПОТУЖНОСТЕЙ ПП

3.1 Розрахунок потужності підсилюючих пунктів

Потужності ПП визначається, як добуток середнього значення струму за час роботи окремого ПП та середнього значення напруги в точці його підключення [15]

Визначення струмів підсилюючих пунктів відбувалось за рахунок вирішення задачі оптимізації з мінімізацією цільової функції по зменшенню втрат електричної енергії в тяговій мережі

Оскільки втрати електроенергії визначались, як сума втрат потужності на певному інтервалі часу, то можна перейти до наступних умов оптимізації: у кожний момент часу, при зниженні напруги на струмоприймачі ЕРС нижче нормованого рівня необхідно визначити струми підсилюючих пунктів які б забезпечували при даних умовах напругу рівну або вище U_3 з мінімально можливим рівнем миттєвих втрат потужності в системі тягового електропостачання при обмеженнях $U_3 \leq U_{e_i} \leq U_{\max}$ (18).

$$\begin{cases} \Delta P(t_{\text{ПТ}}, \vec{I}) \rightarrow \min, U_{t_1} \leq U \\ \Delta P(t_{\text{ПТ}}, \vec{I}) \rightarrow \min, U_{t_2} \leq U \\ \dots \\ \Delta P(t_n, \vec{I}_{\text{ПП}}) \rightarrow \min, U_{t_n} \leq U_3 \end{cases} \quad (3.1)$$

Виконані варіантні розрахунки показали, що при прямованні поїздів міжпідстанційною зоною залежно від графіка руху, втрати електроенергії знижуються в межах 1-3 % від споживання електроенергії на тягу.

Слід відзначити, що при такому підході, хоча і зменшувались втрати електроенергії та забезпечувався заданий рівень напруги (2900 В) на струмоприймачах ЕРС (рис. 3.1, рис. 3.2), розрахункова пікова потужність підсилюючих пунктів набувала великих значень (6 МВт) та перевищувала розрахункову середню потужність у 3-5 разів, що свідчить про низький коефіцієнт її використання.

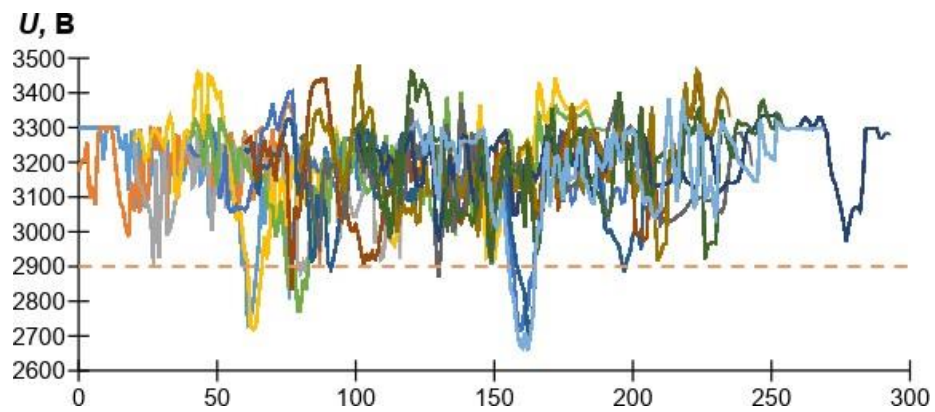


Рисунок 3.1- Напруга на струмоприймачах ЕРС до використання підсилюючих пунктів

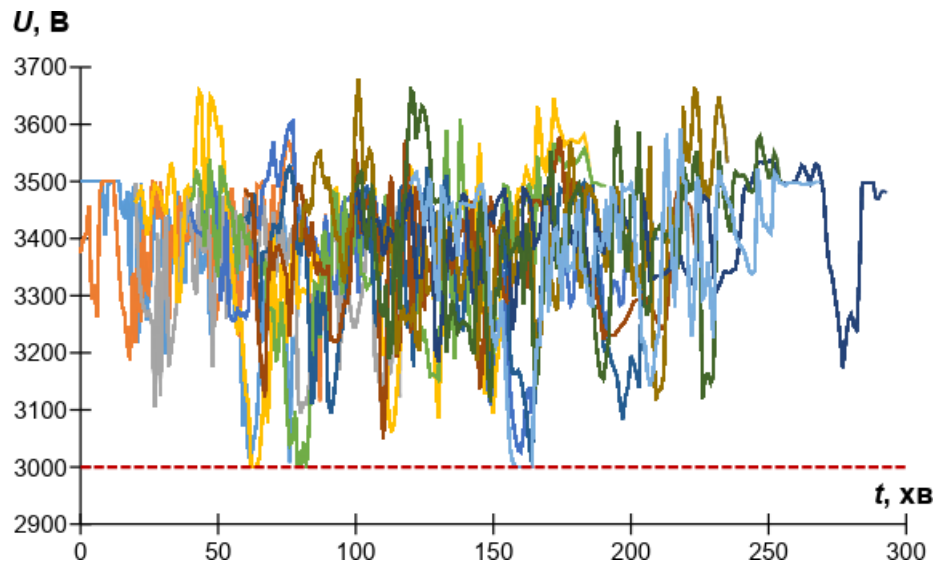


Рисунок - 3.2. Напруга на струмоприймачах ЕРС після використання підсилюючих пунктів

Таким чином, для зменшення встановленої потужності підсилюючих пунктів та більш повного її використання в роботі було прийняте рішення з підвищення напруги на шинах тягових підстанцій, з цією ж метою були введені додаткові обмеження за максимальним струмом підсилення $I_{ПП} \leq I_{\max}$

Отримані в результаті розрахунку струми підсилюючих пунктів та їх потужності зображені на рис. 3.3 та зведені в табл. 3.1.

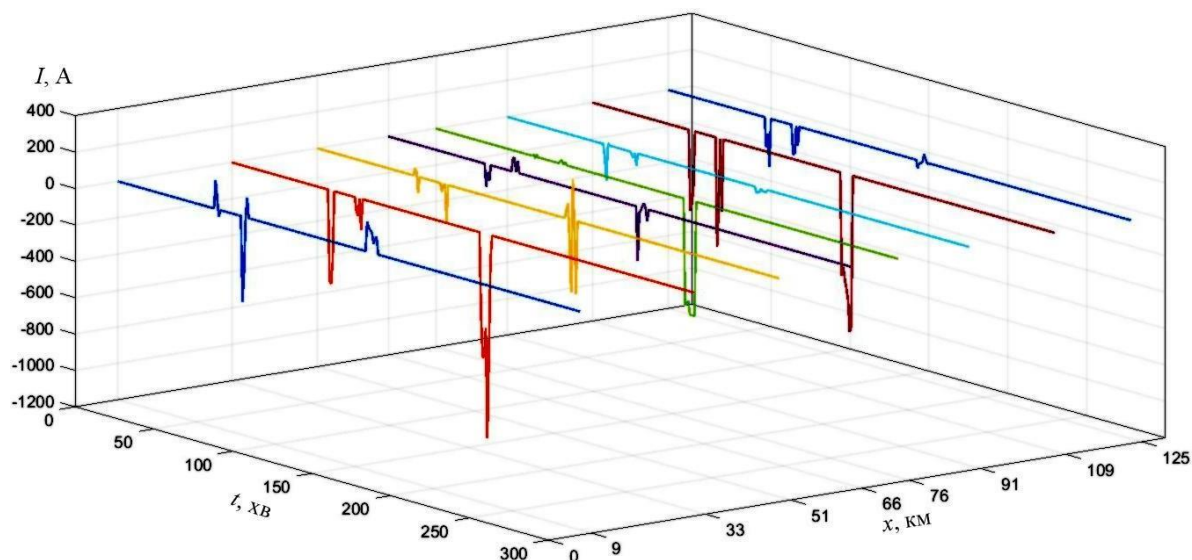


Рисунок 3.3. Струми підсилюючих пунктів

Таблиця 3.1 – Параметри підсилюючих пунктів

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Середній струм підсилюючого пункту, А	147	459	135	70	334	41	556	82
Установлена потужність, кВт	500	1600	400	250	1000	160	2000	250
Струм обмеження, А	470	1150	400	300	630	200	860	350

Результати дослідження для розрахункової ділянки з параметрами підсилюючих пунктів для графіка руху відповідно приведені на рис.3.4.

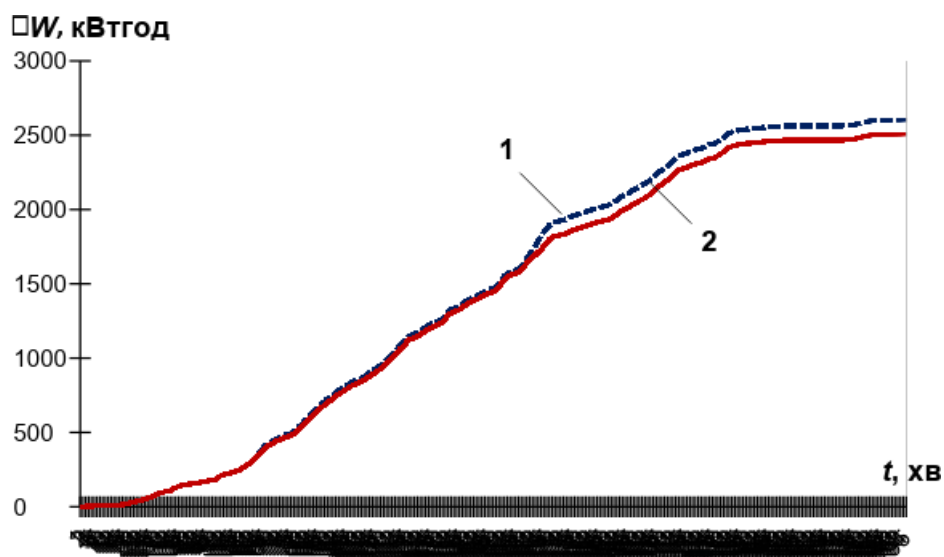


Рис.3.4. Втрати електроенергії в тяговій мережі: 1 – до використання підсилюючих пунктів; 2 – після використання підсилюючих пунктів

Досліджуючи варіантні розрахунки отримано результати, які показують, що в залежності від щільності графіка руху поїздів, економія на втратах електроенергії може складати до 4 % в порівнянні з базовим варіантом.[14]

Визначення рівня обмеження мінімального значення напруги на струмоприймчі ЕРС

Як слідує з рис. 3.8 за допомогою запропонованої системи стає можливим обмеження нижнього рівня напруги, але залишається не вирішеним питання про оптимальне значення рівня напруги для забезпечення найбільш раціонального енергетичного режиму роботи системи тягового електропостачання.

При дослідженні даного питання проводились варіантні розрахунки для визначення впливу обмеження напруги в тяговій мережі на втрати електричної енергії при русі навантаження розрахунковою ділянкою [14] (рис. 3.5).

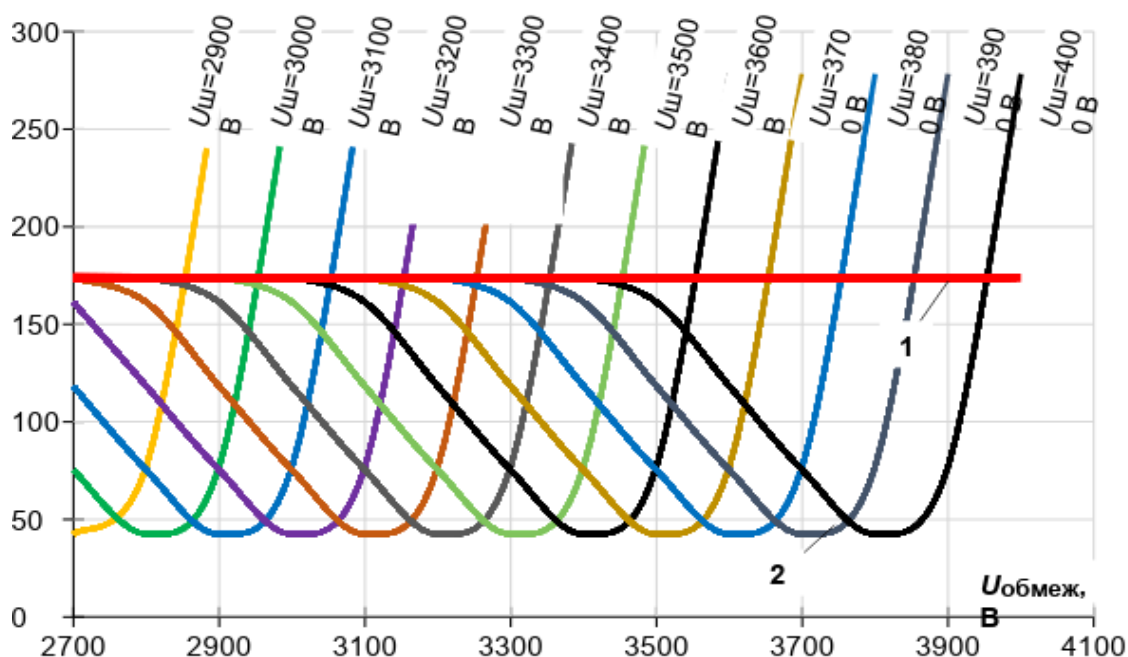


Рис. 3.5. Розрахункові криві втрат електричної енергії: 1 – базовий розрахунок без підсилення; 2 – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Для ділянки також були проведені варіантні розрахунки при реалізації графіка руху ГРП № 4. Для визначення оптимальних рівнів напруги проводились розрахунки на математичній моделі при поступовому підвищенні напруги

одночасно на шинах всіх тягових підстанцій від 3300 до 3600 В. При цьому змінювалась задана межа мінімального значення напруги на струмоприймачах ЕРС в діапазоні від 2900 В до значення напруги на шинах тягових підстанцій. Час реалізації графіка руху становив 300 хв.

В результаті виконаних досліджень, для ряду напруг на шинах тягових підстанцій отримано відсоток зміни втрат електроенергії в тяговій мережі в залежності від рівня обмеження напруги (рис. 3.6). На графіку, по осі абсцис відкладено рівень обмеження напруги в тяговій мережі у відсотках по відношенню до напруги на шинах тягових підстанцій, по осі ординат – відсоток зменшення втрат електроенергії по відношенню до базового розрахунку без підсилення системи (за 100 % прийнято рівень втрат електроенергії при базовому розрахунку без підсилення).

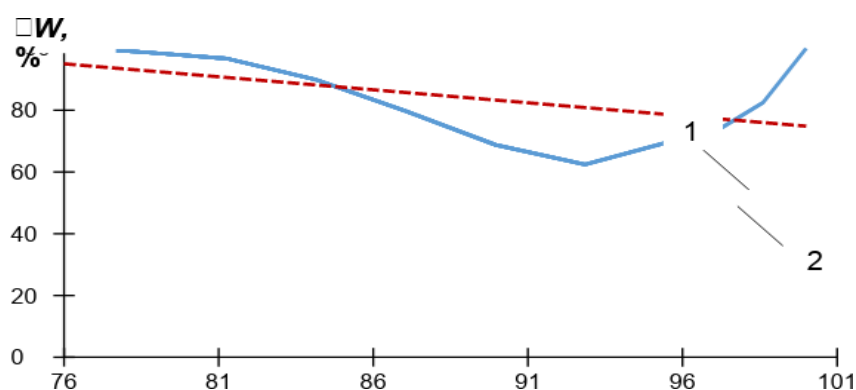


Рис. 3.6. Залежність рівня втрат потужності в тяговій мережі від рівня обмеження напруги:

1 – розрахункова крива; 2 – апроксимована крива

Для визначення раціонального рівня обмеження напруги, отриману залежність було апроксимовано поліномом третього ступеня (20) та визначено точки екстремуму відсотка втрат електроенергії, як функції від рівня обмеження напруги.

$$\Delta W(U_{\text{обм}}) = -A \cdot U_{\text{обм}}^3 + B \cdot U_{\text{обм}}^2 - C \cdot U_{\text{обм}} + D \quad (3.2)$$

де A, B, C, D – поліноміальні коефіцієнти: $A=0,024$; $B=6,1792$;

$C = 525,87$; $D = 14724$.

Максимальному зменшенню втрат електроенергії відповідає напруга обмеження на рівні 93 % від напруги на шинах тягових підстанцій. Таким чином, залежність раціонального рівня обмеження напруги в тяговій мережі від значення напруги холостого ходу тягових підстанцій має вигляд (3.3).

$$U_{\text{обм}} = 0,93 \cdot U_{\text{хх}} \quad (3.3)$$

де $U_{\text{обм}}$ – рівень обмеження напруги в тяговій мережі;

$U_{\text{хх}}$ – значення напруги холостого ходу тягових підстанцій.

Отримані результати розрахунків показують, що при напрузі холостого ходу тягових підстанцій 3500 В та за інших рівних обставин, обмеження нижнього рівня напруги на значенні 3000 В дозволяє зекономити на втратах електроенергії до 4 % в порівнянні з базовим розрахунком без підсилення, а при обмеженні нижнього рівня напруги на значенні $0,93U_{\text{хх}}$ (3255 В) економія на втратах електроенергії зростає до 33%.

Проаналізувавши отриману залежність (рис. 2.11) можна відзначити, що доцільно підтримувати напругу на струмоприймачах на рівні, що відповідає інтервалу спаду кривої втрат електроенергії від вихідного до мінімального значення. Забезпечення рівня напруги близького до значення на шинах ТП недоцільне через зростання втрат енергії в результаті надлишкового регулювання та значного збільшення встановленої потужності підсилюючого пункту. Раціональний рівень напруги в контактній мережі можна визначити із співставлення величини втрат електроенергії та потужності підсилюючих пункту, необхідної для його забезпечення. Однак оптимальний рівень напруги в контактній мережі буде також залежати від строку окупності підсилюючого пункту, розрахованого на необхідну потужність. Остаточне визначення заданого рівня напруги повинно також враховувати потреби локомотивного господарства в неперервному та енергоефективному виконанні експлуатаційної роботи.

Результати розрахунку енергетичних показників розподіленої системи

На рис. 3.7 – 3.9 показано результати розрахунку розробленої системи тягового електропостачання для реальної ділянки. Розглянута ділянка «Роздори-Письменна» Придніпровської залізниці має вісім міжпідстанційних зон, та дев'ять тягових підстанцій. При розрахунках враховувалось реальне, струмоспоживання, в залежності від профілю ділянки, внутрішні опори тягових підстанцій та параметри схем живлення. Напруга холостого ходу тягових підстанцій становить 3500 В, при цьому, відповідно до (2.6), напруга обмеження встановлена на рівні 3255 В.

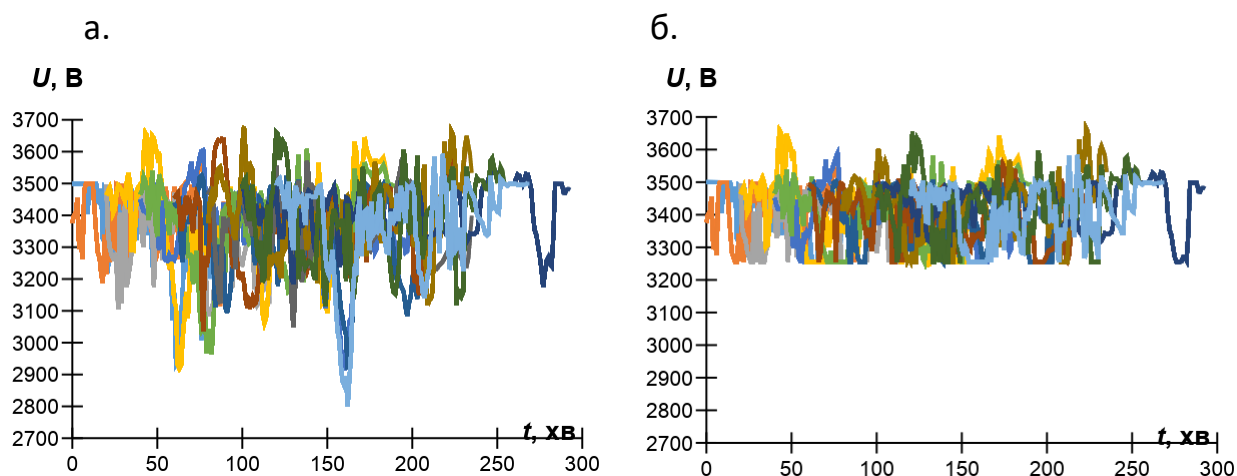


Рис. 3.7. Напруга на струмоприймачах ЕРС:

а – базовий розрахунок без підсилення;

б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Оцінка напруги на струмоприймачах електрорухомого складу показала, що при підсиленні системи тягового електропостачання усереднене значення математичного очікування напруги 13 електровозів зросло на 47 В при цьому 95% довірчий інтервал його зміни звужився вдвічі (3.8). Значення математичного очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС зросло на 25 – 90 В при звуженні 95 % довірчого інтервалу на 30 % (рис. 3.9).

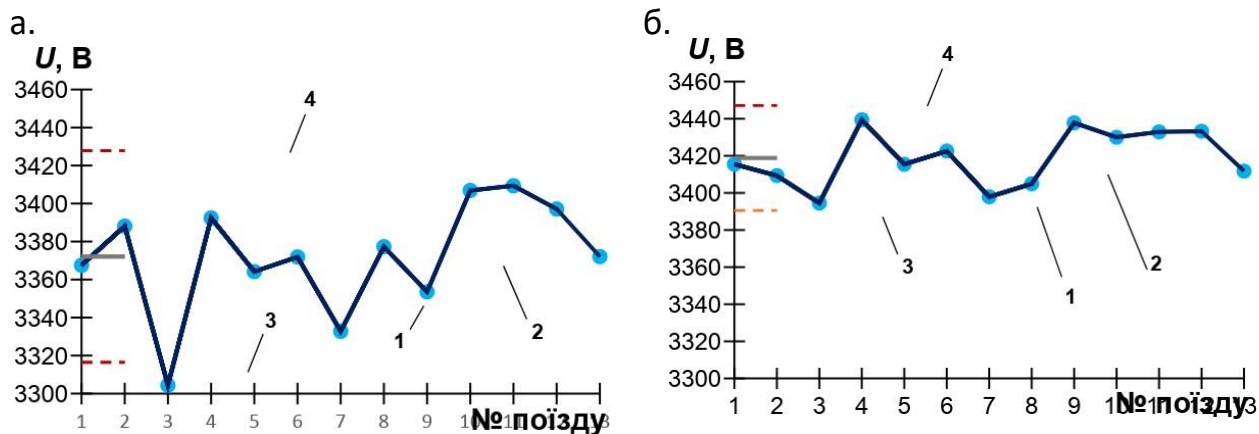


Рис. 3.8 Математичне очікування напруги на струмоприймачах ЕРС: а – базовий розрахунок без підсилення; б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами; 1 – математичне очікування напруги на струмоприймачі окремого ЕРС; 2 – усереднене значення математичного очікування; 3 – нижня довірча межа; 4 – верхня довірча межа

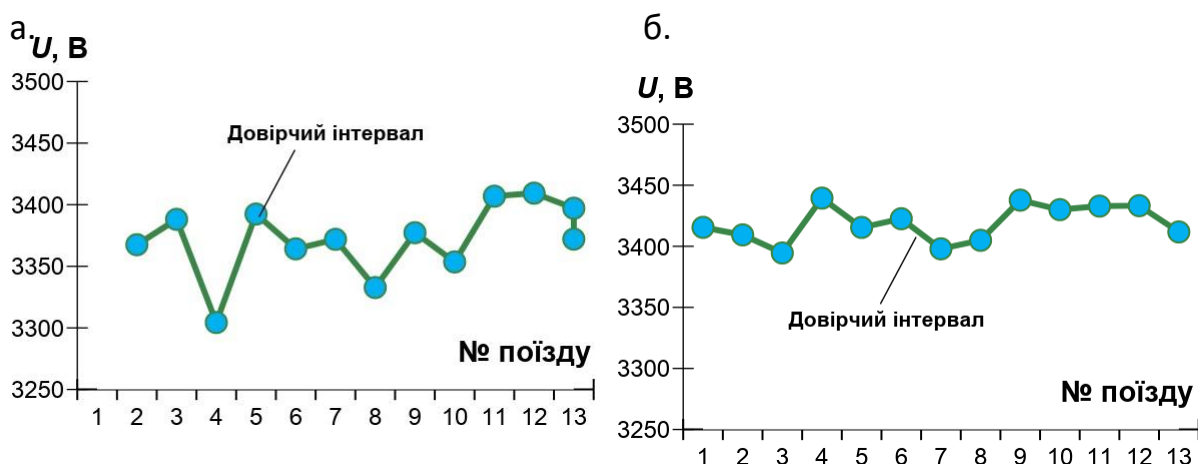


Рис.3.9-. Математичне очікування напруги та її довірчий інтервал зміни на струмоприймачах ЕРС:
а – базовий розрахунок без підсилення;
б – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

Числові значення статистичних показників напруги на струмоприймачах 13 ЕРС зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Числові характеристики напруги на ділянці

№ поїзд у	Статистичний показник напруги на струмоприймачі ЕРС							
	До підсилення				Після підсилення			
	$M(U)$	$\Gamma(U)$	$\min(U)$	$\max(U)$	$M(U)$	$\Gamma(U)$	$\min(U)$	$\max(U)$
1	3360.5	147.2	2937	3500	3416.5	85.2	3255	3505
2	3389.1	99.2	3113	3574	3404.3	79.6	3256	3548
3	3305.3	113.7	3065	3475	3398.5	83.7	3278	3513
4	3390.4	150.5	2917	3657	3436.4	104	3247	3656
5	3365.2	123.0	2917	3605	3413.4	78.3	3256	3587
6	3374.9	135.2	2966	3611	3427.6	84.3	3244	3589
7	3339.7	138.8	2914	3528	3394.9	89.4	3259	3523
8	3375.3	125.1	3039	3649	3403.9	89.6	3259	3555
9	3359.5	106.1	3044	3576	3438.8	84.7	3255	3660
10	3403.9	119.1	3119	3689	3431.0	88.7	3258	3654
11	3407.4	81.2	3173	3534	3437.9	71.4	3259	3533
12	3398.1	128.6	3118	3660	3434.2	92.8	3252	3655
13	3373.1	154.7	2801	3594	3416.7	86.6	3257	3587

Обмеження нижнього рівня напруги на струмоприймачах, підвищення її середнього значення та звуження діапазону зміни при децентралізованій системі живлення дозволило зменшити миттєві втрати потужності в тяговій мережі до 75 %. За час виконання заданого графіка руху поїздів зменшення миттєвих втрат потужності забезпечило економію електричної енергії в межах 33 % в порівнянні з розрахунком без підсилення (рис.3.10).

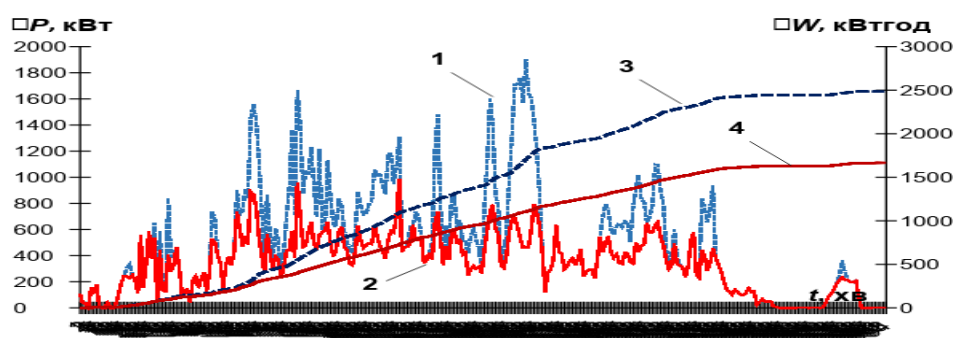


Рис. 3.10. Втрати в тяговій мережі:

1–миттєві втрати потужності при розрахунку без підсилення; 2– миттєві втрати потужності при підсиленні тягової мережі підсилюючими пунктами; 3–втрати електроенергії при розрахунку без підсилення; 4–втрати електроенергії при підсиленні тягової мережі підсилюючими пунктами

Для забезпечення заданого рівня обмеження напруги та максимального зменшення втрат електричної енергії в розрахунках були використані наступні параметри пунктів підсилення для кожної міжпідстанційної зони (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Параметри підсилюючих пунктів розподіленої системи

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Середній струм ПП, А	300.1	515.2	239.3	165.7	267.8	193.3	422.1	180.4
Установлена потужність, кВт	1000	1600	800	630	1000	630	1600	630
Струм обмеження, А	2000							

Підвищення рівня обмеження напруги на струмоприймачах ЕРС призвело до необхідності збільшення встановленої потужності підсилюючих пунктів, але, в свою чергу, це також сприяє зменшенню споживання електричної енергії тяговими підстанціями з системи зовнішнього електропостачання (рис. 3.11).

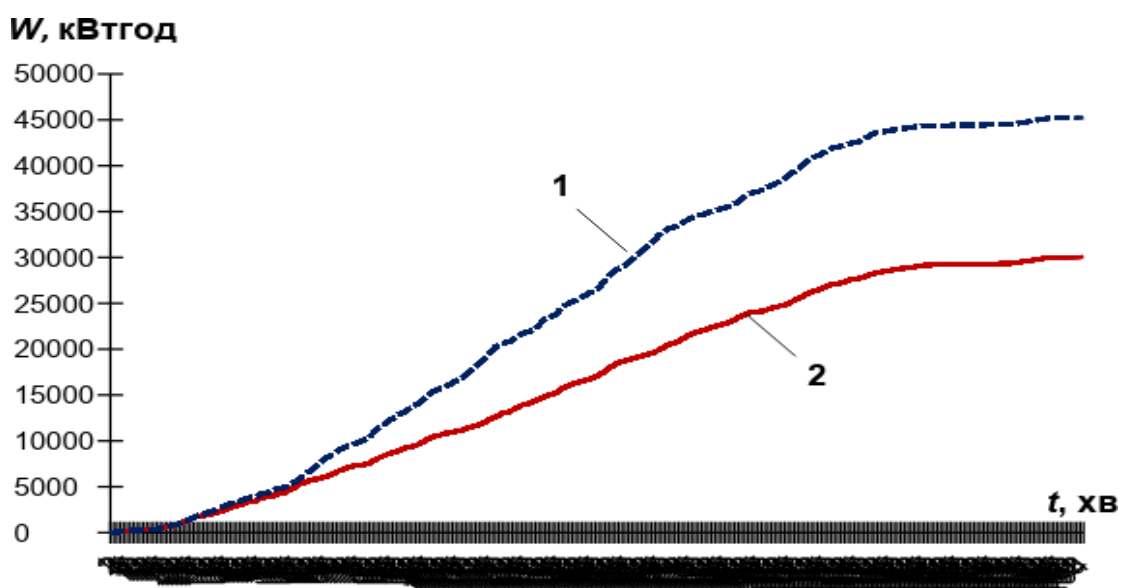


Рис. 3.11- Витрати електричної енергії тяговими підстанціями на тягу поїздів: 1 – базовий розрахунок без підсилення; 2 – підсилення тягової мережі підсилюючими пунктами

В результаті виконання поставлених розрахунків на дослідній ділянці втрати електроенергії при виконанні заданого графіка руху поїздів склали 2,5 МВт·год. За допомогою розподіленого електропостачання можливо зменшити ці втрати до значення 1,66 МВт·год. Крім того, при децентралізованому електропостачанні забезпечується заданий рівень обмеження напруги на струмоприймачах ЕРС, підвищується її середнє значення та звужується діапазон зміни, що позитивно впливає на безпеку руху та експлуатацію електрорухомого складу.

3.2 Схемне рішення та особливості роботи ПП на основі використання відновлюваних джерел енергії

Для підсилення СТЕ постійного струму пропонується використовувати керовані підсилюючі пункти, розподілені вздовж міжпідстанційної зони. Джерелом живлення таких пунктів можуть слугувати сонячні елементи, розміщені вздовж міжпідстанційної зони залізниці. Така система [1] складається з фотомодулів, що приєднані до інвертора, встановленого на ПП. В залежності від ступеня нерівномірності розподілу споживання потужності вздовж міжпідстанційної зони та вимог по забезпеченню заданого рівня напруги на струмоприймачі ЕРС потужність ПП пропонується обирати в діапазоні 0,5...1,5 МВт [2]. Підсилюючий пункт розміщується на опорах контактної мережі та побудований за схемою підвищуючого повномостового імпульсного перетворювача (рис3.12) Показана на рис3.12. Сх додатково передбачає здійснення транзиту надлишкової потужності СЕС до низьковольтної мережі 0,4 кВ у періоди зменшення тягових навантажень.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

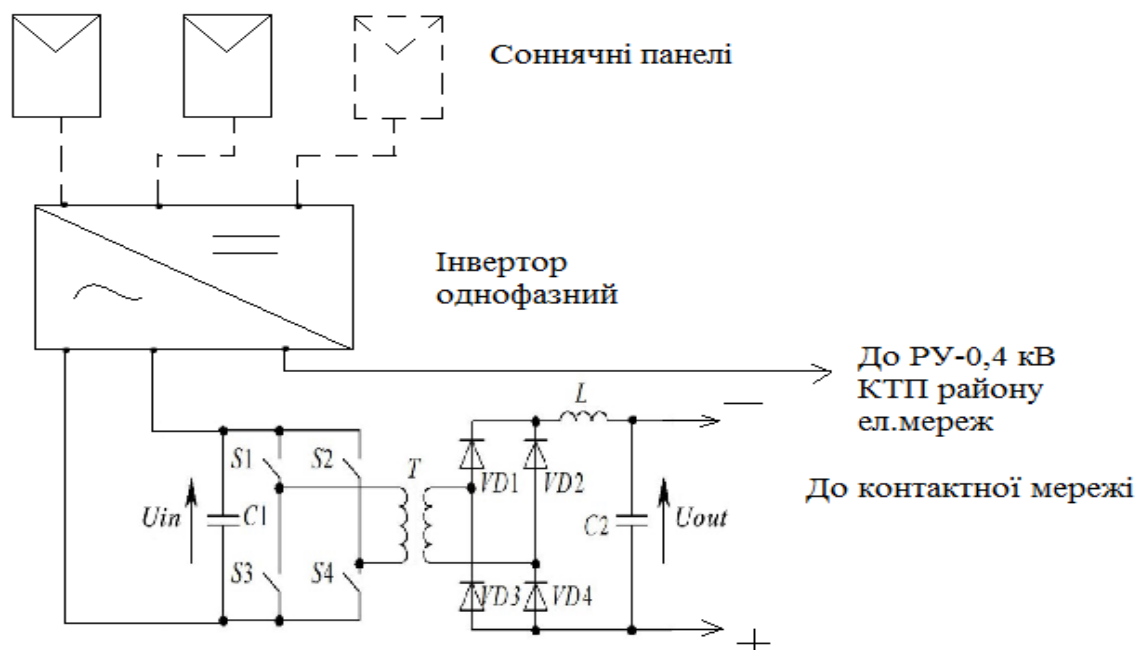


Рис. 3.12-Схема підключення підсилюючого пункту

Обрана схема забезпечує високий рівень вихідної потужності та коефіцієнт корисної дії (ККД), здійснює гальванічну розв'язку первинних і вторинних кіл та, в порівнянні з іншими схемами, має менше навантаження на комутаційні елементи [3]. Зважаючи на те, що ПП буде розміщуватись на опорах контактної мережі, необхідно досягти якомога менших масогабаритних показників пристрою. В перетворювальних ланцюгах джерел живлення трансформатор є найбільш громіздким елементом, і тому доцільним є зменшення його об'єму. Існує три основні способи підвищення компактності трансформатора:

1. Застосування надпровідних обмоток;
2. Застосування для магнітопроводу нових матеріалів з більшою індукцією насичення;
3. Підвищення робочої частоти напруги.

3.3 Моделювання впливу встановленого підсилюючого пункту на режим напруги ділянки СТЕ постійного струму

Кожний пункт підсилення може керуватися на основі закону керування, який формується в ході реального часу. Параметри цього закону визначаються значеннями координати та струму електрорухомого складу, який розташовується

в міжпідстанційній зоні, необхідними рівнями генерації потужності та компенсації втрат напруги, що дозволяє оптимізувати режим напруги в тяговій мережі. Цільова функція оптимізації, таким чином, матиме такий вигляд:(3.4)

$$\Delta P = f(I_{nn1}, I_{nn2}, I_{nn3}, U_{nn1}, U_{nn2}, U_{nn3}, x). \quad (3.4)$$

Таким чином, залежно від координати розташування поїзда, струми генерації пунктів підсилення повинні мати таке значення, щоб при дотриманні оптимального рівня напруги забезпечувався мінімум цільової функції ΔP , тобто витримувалися критерії оптимізації.

Для врахування складніших варіантів методика розрахунку не змінюється, кількість пунктів підсилення буде враховуватись кількістю доданків у формулі (7) з конкретними вихідними даними щодо їх розташування та потужності. Для розрахунку інших схем живлення необхідно застосувати

відповідну функцію опору $f(x)$ з роботи [9].

Необхідно зазначити, що кількість і потужність ПП має визначатись за двома критеріями: компенсації втрат напруги та забезпечення нормативу необхідної питомої потужності тягової мережі [10]. За умовами організації руху поїздів при нормальному режимі руху, в залежності від реальних довжин блокдільниць, відстань між поїздами може складати 3,5...5 км, тому, в першому наближенні, така схема може бути прийнятою за основу для попередніх оптимізаційних розрахунків.

Розрахунки виконувалися для таких вихідних даних: довжина ділянки 20 км; потужність електровоза 10 МВт; струм електровоза при номінальній напрузі 3000 А [8]; питомий опір тягової мережі М120 + 2МФ100 + А185 + Р65 0,051 Ом/км; схема живлення тягової мережі повна паралельна; розрахунковий час проходження ділянки електровозом 12 хв; мінімально допустимий рівень напруги на струмоприймачі 2900 В; на міжпідстанційній зоні встановлено некеровані пункти підсилення. Розрахунки проводились за допомогою методики [9] та виразів з використанням аналітичних функцій опору для рівнів напруги на шинах

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

тягових підстанцій: 3300, 3500, 3600, 3800; при цьому потужність пунктів підсилення для кожного розрахунку становила 0,5; 1,5 МВт.

Для врахування підвищення напруги на струмоприймачі електровозу від дії пунктів підсилення додатково визначається розподіл підвищення напруги вздовж міжпідстанційної зони від кожного з них (3.5):

$$dU(x, l_{\text{пп}}, I_{\text{пп}}) = \begin{cases} \frac{1}{l_{\text{пп}}} I_{\text{пп}} f(l_{\text{пп}}) x; & 0 \leq x \leq l_{\text{пп}}; \\ \frac{I_{\text{пп}} f(l_{\text{пп}})}{L - l_{\text{пп}}} (L - x); & l_{\text{пп}} \leq x \leq L, \end{cases} \quad (3.5)$$

Напруга на струмоприймачі ЕРС при роботі трьох пунктів підсилення визначається за формулою

$$U_e(x) = U_{\text{III}} - I(x)f(x) + \sum dU(x, l_{\text{пп}_i}, I_{\text{пп}_i}) \quad (3.6)$$

Для порівняльного аналізу для кожного з варіантів проведено базовий розрахунок без пунктів підсилення, тобто $I_{\text{пп}} = 0$. Виходячи із значення напруги в точці підключення пунктів підсилення розраховані їх струми. При потужності пунктів підсилення 0,5 МВт струм становить 142...171 А, за потужності 1,5 МВт — 426...514 А. Вибіркові результати розрахунків показані на рис. 4, 5

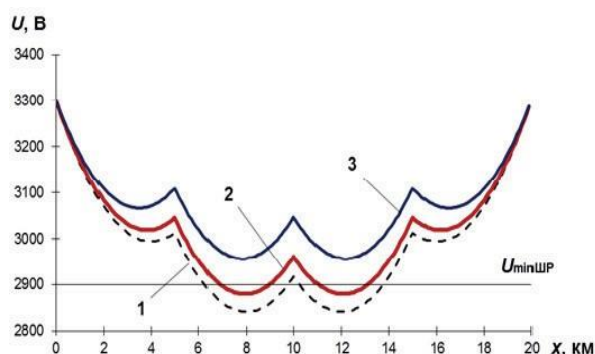


Рис. 3.13- Значення напруги на струмоприймачі електровозу за напруги на шинах ТП 3300 В: 1 — базовий розрахунок; 2 — розрахунок при роботі 3-х пунктів підсилення потужністю 0,5 МВт; 3 — розрахунок при роботі 3-х пунктів підсилення потужністю 1,5 МВт

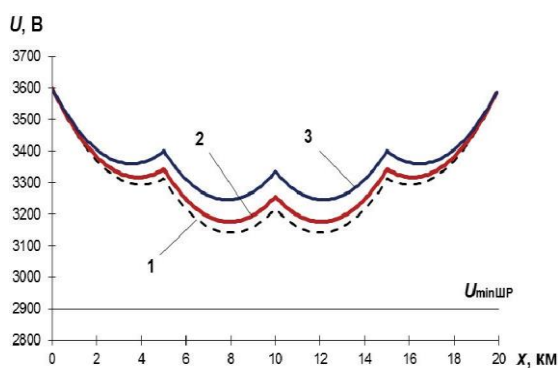


Рис. 3.14- Значення напруги на струмоприймачі електровозу за напруги на шинах ТП 3600 В: 1 — базовий розрахунок; 2 — розрахунок при роботі 3-х пунктів підсилення потужністю 0,5 МВт; 3 — розрахунок при роботі 3-х пунктів підсилення потужністю 1,5 МВт

Як показує їх аналіз, за номінальної напруги на шинах тягового навантаження необхідний режим напруги в тяговій мережі витримується при потужності пункту підсилення близько 1,5 МВт. На рис. 3.15 показані усереднені результати розрахунку втрат потужності в залежності від потужності пунктів підсилення.

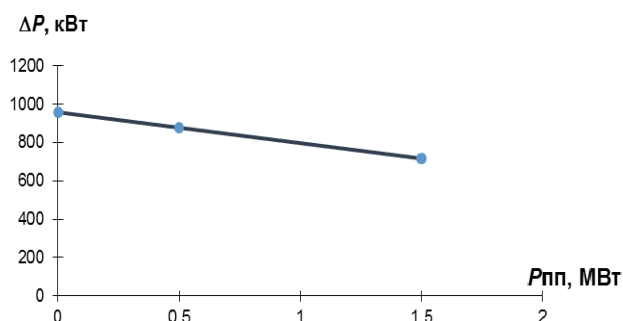


Рис 3.15- Усереднені результати розрахунку втрат потужності

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ

Арк.

68

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Існуючі на сьогодні системи тягового електропостачання подекуди не в змозі у повному обсязі забезпечити провізну спроможність залізниць. Особливо гостро ця проблема стосується системи електричної тяги постійного струму 3 кВ на великих транспортних вузлах. Отже, необхідно шукати способи підвищення тягово-енергетичних можливостей експлуатованих систем тягового електропостачання для того, щоб сучасні енергетичні канали систем тягового електропостачання могли у повній мірі забезпечувати надійність та безперебійність живлення, стійкість до непередбачуваних впливів та високу енергоефективність.

2. Аналіз систем живлення показує, що розподілені системи живлення тягового навантаження мають кращі техніко-економічні показники ніж централізована система живлення. При цьому в пристроях тягового електропостачання може використовуватися енергія, що отримується від відновлюваних джерел.

3. З отриманих розрахунків та результатів наявних експериментальних досліджень можна зробити висновок, що децентралізована система тягового електропостачання також в деяких випадках не спроможна забезпечити необхідну стійкість по напрузі, а також допустимі втрати потужності при впровадженні високошвидкісного руху. Дослідження проблеми стійкості по напрузі є фундаментом розробки технічних заходів по плануванню резервів потужності у системі тягового електропостачання постійного струму, направлених на підвищення режимної безпеки у ній як сьогодні, так і в найближчій перспективі.

4. Запропонована схема несиметричного підсилення тягової мережі електрифікованих ділянок постійного струму дозволяє забезпечувати необхідний рівень напруги в тяговій мережі при швидкісному русі, нормовану стійкість по напрузі з мінімізацією втрат потужності. Зокрема як показують результати математичного моделювання для розглянутої ділянки з метою забезпечення

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідного рівня напруги на протязі всієї фідерної зони потужності ПП мають знаходитись у межах 0,5-1,5 кВт в залежності від наявних розмірів руху на ділянці.

5. Як показує аналіз статистичних сукупностей величин тягового навантаження розглянутої ділянки можна говорити про його несиметричний характер на її окремих частинах. Тобто система тягового електропостачання має окремі «вузькі» місця, які можуть бути модифіковані шляхом їх локального підсилення. Отже розподіл місць розташування підсилюючих пунктів по ділянці має враховувати необхідність усунення обмежень, які виникають в наслідок існування зазначених місць. Тобто ПП мають встановлюватись локально безпосередньо в місцях розташування тих ПСК та ППЗ, біля яких має місце невідповідність рівня напруги встановленим нормам за потрібних розмірів та швидкостей руху. Зокрема на ряді точок розглянутої ділянки рівень напруги на струмоприймачах електрорухомого складу до встановлення ПП складав 2700 В , що менше існуючої мінімальної норми 2900 В. За рахунок локального підсилення прогнозоване мінімальне значення напруги в тих же точках можливо підняти до 3000 В за умови наявності ПП потужністю 1,5 МВт.

6. Запропоноване в роботі локальне підсилення окремих ділянок в мережі позитивно впливає на підвищення енергоефективності СТЕ , як показують результати розрахунків втрати потужності пов'язані з її передачею до тягових споживачів зменшуються до 10%.

7. Оскільки тягові навантаження електрифікованої ділянки постійного струму мають імовірнісний характер і представляють собою змінні неперіодичні функції часу математичне моделювання режимів роботи цієї ділянки потребує застосування апарату статистичного аналізу. З метою автоматизації відповідних розрахунків в роботі запропоновано використовувати електронний документ оригінальної розробки в середовищі MS Excel. Результати статистичної обробки за цим документом можуть бути використані в процесі моделювання з метою

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обґрунтування технічних заходів щодо локального підсилення в окремих вузлів та ділянок СТЕ.

8. На нашу думку подальших досліджень у розглянутій в цій роботі проблематиці потребує перед усім питання розробки математичних моделей ділянок розподіленої СТЕ з накопичувачами електричної енергії в ПП. Використання таких накопичувачів , особливо в поєднанні з ВДЕ відкривають нові перспективи у подальшому підвищенні енергоефективності сучасних систем тягового електропостачання , а отже і у збільшенні конкурентно спроможності залізничного транспорту в цілому.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Аржанников Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б.А. Аржанников – Екатеринбург: УрГУПС, 2010. – 176 с.
2. Сыченко В.Г. Матусевич А.А., Рогоза А.В., Павличенко М.Е., Васильев И.Л., Пулин Н.Н. «Повышение энергетической эффективности в эволюционирующих системах электроснабжения» Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». № 27(1249), с. 182-186. 2017.
3. Б.А. Аржанников, Ю. В. Ткачев, Методика получения зависимости потери эл. эн. в тяг. сети от среднего напряжения на токоприемнике электровоза при заданном времени хода поезда по участку. Свердловск, Россия: Уральский электромех. ин-т инж. ж.д. трансп, 1986.
4. Правила технічної експлуатації залізниць. Київ, Україна: 1997. 48 с.
5. Марквардт К.Г. Электроснабжение электрических железных дорог / К.Г. Марквардт – М: Трансжелдориздат, 1958. – 288 с.
6. Мирошниченко Р.И. Режимы работы электрифицированных участков / Р.И. Мирошниченко – М.: Транспорт, 1982. – 207 с.
7. О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко, Є.В. Зорін, «Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою», Технічна електродинаміка. №3 с. 59-66. 2010.
8. В.М. Авраменко, П.О. Черненко, Н.Т. Юнєєва, «Оцінювання поточного запасу статичної стійкості енергосистеми з використанням оперативного прогнозу вузлових навантажень», Вісник Вінницького політехнічного інституту. № 1, с. 90-93. 2013.
9. Стійкість енергосистем. Керівні вказівки: СОУ-Н МЕН 40.1 – 00100227 – 68: 2012.– Київ, Україна: ГРІФРЕ: Міненерговугілля України, 2012. – 35 с.

					02.15.ЕС-1722.РД.2020-ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. В.Г. Сиченко, Ю.Л. Саенко, Д.А. Босий Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць: монографія/ За редакцією В.Г. Сиченка – Дн-вск: Видавництво ПФ «Стандарт-Сервіс» ,2015.-344с.- ISBN 978-966-97463-8-2

11. В. Г. Сиченко Вплив електроенергетичних процесів у системах тягового електропостачання на якість електричної енергії

12. С.И. Осипов, Ред., Рациональные режимы вождения поездов и испытания локомотивов. Москва, Россия: Транспорт, 1984.

13. Д.Г. Дерев'янка, «Особенности оценки запаса стойкости локальных систем с разнородными джерелами генерації», ЕНЕРГЕТИКА економіка, технології, екологія. Спецвипуск, Матеріали аспірантських читань пам'яті А.В. Праховника, с. 15-19. 2013.

14. Косорев Є.М. Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму /Є.М. Косарев //Електрифікація транспорту. – 2015.-№9,с.37-43.

15. Сиченко В.Г. Оптимізація керування режимом напруги в тягових мережах електрифікованих залізниць /В.Г. Сиченко, Д.А. Босий Є.М. Косарев// Вісник Вінницького політехнічного інституту. №6-2015,-с. 95-103.

16. Косарев Є.М. Матиматична модель керованої розподіленої системи тягового електропостачання постійного струму//Косаре Є.М.//Електрифікація транспорту № 14. – 2017,-с. 15-27.

17. Є.М. Косарев, В.Г. Сиченко, А.М. Муха, К.О. Хань Розробка керованого підсилюючого пункту для розподіленої системи тягового електропостачання// Електротехніка і Електромеханіка - 2016. №4,-с. 89-93.