

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри

_____ /Д. О. Босий/

«_____» _____ 20____р.

ДИПЛОМНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Системи управління виробництвом та
розподілом електроенергії**

Тема **Покращення режиму напруги електрифікованої ділянки постійного
струму із застосуванням накопичувача енергії**

Theme **Improving the voltage regime of the electrified DC section with the use
of energy storage**

Керівник дипломної роботи

доц. _____ В. О. Дьяков

Нормоконтролер

доц. _____ В. М. Ляшук

Студент групи ЕС1922

_____ О. В. Сьомін

Student

Somin Oleksandr

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна
Факультет «Управління енергетичними процесами»
Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»
Галузь 14 Електрична інженерія
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Спеціалізація «Системи управління виробництвом і розподілом електроенергії»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»
В.о. зав. кафедри
Босий Д.О.
(підпис)
«17» вересня 2020р.

ЗАВДАННЯ

до дипломної роботи на здобуття ОС магістр
(освітньо-кваліфікаційний рівень)
студента групи ЕС1922 Сьомін О.В.
(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломного проекту (роботи) Покращення режиму напруги електрифікованої ділянки постійного струму із застосуванням накопичувача енергії

затверджена наказом по університету від «16» 09 2020 р. № 494 ст.

2 Термін подання студентом закінченої роботи «7» грудня 2020р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту (роботи) Розрахункова схема ділянки залізниці постійного струму.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки): аналіз проблеми режиму напруги в мережі, вибір накопичувачів електричної енергії, вивчення літератури.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва розділу	Термін виконання	Обсяг розділу, %
ВСТУП	19.09	5
АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕЖИМУ НАПРУГИ МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	25.09	10
АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ НАКОПИЧЕННІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	28.10	27
ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ РЕЖИМІВ НАПРУГИ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	2.11	12
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ	20.11	15
РОЗМІЩЕННЯ, ВИБІР НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ	25.11	22
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	5.12	2
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	6.12	7

Дата видачі завдання: « 17 » вересня 2020 р.

Керівник дипломної роботи

_____ к.т.н., доц. Дьяков В.О.
(підпис) (ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ Сьомін О.В.
(підпис) (ПІБ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка має обсяг 69 сторінок, складається з 5 розділів та містить 18 ілюстрацій, 3 таблиці, 71 бібліографічне джерело.

Об'єкт дослідження – система електричної тяги постійного струму.

Мета роботи - обґрунтування доцільності застосування накопичувачів електричної енергії в системах електричної тяги постійного струму для підвищення ефективності її роботи.

Метод дослідження – розробка імітаційної комп'ютерної моделі. Імітаційна комп'ютерна модель може бути використаний у навчальному процесі при підготовці магістрів та бакалаврів на кафедрі «Інтелектуальні системи електропостачання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Виконане імітаційне моделювання для ділянки залізниці з накопичувачем енергії на посту секціонування. Застосування накопичувача електричної енергії (НЕЕ) на посту секціонування дозволяє поліпшити основні енергетичні характеристики режиму роботи системи тягового електропостачання. Встановлено, що середня напруга за даний інтервал часу на приєднаннях контактної мережі суміжних підстанції можна збільшити на 3 %, а середній рівень тягового навантаження понизити на 2 %. Пропонований варіант застосування накопичувача електричної енергії на посту секціонування дозволяє скоротити втрати електричної енергії в контактній мережі на 0,85 % і сумарну витрату електроенергії на 1,71 %.

Розглянуте завдання оцінки ефективності розміщення НЕЕ на посту секціонування однієї із зон міжпідстанційної ділянки залізниці. Для вирішення завдання аналізувалася робота однієї з ділянок залізниці постійного струму, що складається з трьох міжпідстанційних зон.

Основну частину енергетичних витрат електрифікованих залізниць складають витрати на тягу потягів. Зважаючи на це енергозбережні технології необхідно впроваджувати в системах тягового електропостачання. В зв'язку з цим у дипломній магістерській роботі викладені основні можливості енергозбереження на залізничному транспорті з використанням ємнісного накопичувача електричної енергії.

Ключові слова: ЕЛЕКТРИФІКОВАНА ДІЛЯНКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ПОСТ СЕКЦІОНУВАННЯ, ПОКРАЩЕННЯ РЕЖИМУ НАПРУГИ, НАКОПИЧУВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, СКОРОЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ .

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕЖИМУ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	8
1.1 Сучасні проблеми напруги в тяговій мережі постійного струму	8
1.2 Світові перспективи використання накопичувачів електричної енергії в тяговій мережі	9
1.3 Аналіз режимів напруги	10
2. АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ НАКОПИЧЕННІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	15
2.1 Системи акумуляції енергії	15
2.2 Типи накопичувачів електричної енергії	16
2.2.1. Маховик	17
2.2.2 Суперконденсатори	18
2.2.3 Надпровідний індуктивний накопичувач (СПН)	20
2.2.4 Електрохімічні акумуляторні батареї	20
3. ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ РЕЖИМІВ НАПРУГИ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	32
3.1. Основні принципи підсилення системи тяги постійного струму	32
3.2 Забезпечення належного режиму напруги на струмоприймачах з використанням накопичувачів	35
4. РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ	38
4.1 Типи електрохімічних накопичувачів	38
4.2 Розрахунок електрохімічного накопичувача енергії	39
5. РОЗМІЩЕННЯ, ВИБІР НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ	46
5.1 Розміщення накопичувача електричної енергії	46
5.2 Вибір накопичувача електричної енергії	47
5.3 Розміщення накопичувачів електричної енергії на посту секціонування та його моделювання	48
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	62

					02.15.ЕС1922.РД.2020-ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розробник	Сьомін О.В.				Покращення режиму напруги електрифікованої ділянки постійного струму із застосуванням накопичувача енергії	Літ.	Арк.	Акрушів
ОП та БНС							5	69
Керівник	Дьяков В.О.					ДНУЗТ, ІСЕ, гр.ЕС1922		
Н. контр.	Ляшук В.М.							

ВСТУП

Основну частину енергетичних витрат електрифікованих залізниць складають витрати на тягу потягів. Зважаючи на це енергозберіжні технології необхідно впроваджувати в системах тягового електропостачання (СТЕ).

Актуальність роботи. Одним з найбільш ефективних методів енергозбереження є локальна буферизація електроенергії на різних стадіях її доставки до споживача, тобто введення в електроенергетичну систему (ЕЕС) транспорту накопичувачів енергії, здатних понизити капітальні вкладення на основне тягове електротехнічне устаткування і заощадити до 30% електроенергії, що витрачається на тягу потягів. У справжній роботі викладені основні можливості енергозбереження на залізничному транспорті з використанням різних типів накопичувачів енергії (НЕ). Об'єкт дослідження : система тягового електропостачання залізниці, в яку входять тягові підстанції (ТП), тягова мережа (ТМ), електрорухомий склад (ЕРС) і різного роду НЕ.

Зв'язок роботи з науковими програмами. Робота відповідає науковим напрямкам роботи кафедри «Інтелектуальні системи електроспоживання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

Мета і завдання роботи. Метою роботи є обґрунтування доцільності застосування накопичувачів електричної енергії в системах електричної тяги постійного струму для підвищення режиму напруги в тяговій мережі .

Відповідно до поставленої мети в роботі вирішено такі завдання:

- Підвищення рівня напруги в тяговій мережі.
- Зменшення втрат електричної енергії в тяговій мережі.

Об'єкт дослідження – система електричної тяги постійного струму.

Предмет дослідження – показники якості електроенергії в тяговій мережі.

Наукова новизна, та основні положення що виносяться на захист.

- Порівняння накопичувачів енергії.
- Вибір місця встановлення накопичувача електричної енергії.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Вибір накопичувача електричної енергії та його моделювання.

Практична цінність роботи. Набуті результати у ході моделювання дозволяють розширити межі знань науковців та дізнатись більше про процеси у тяговій мережі з залученням в неї пристроїв накопичення енергії.

Імітаційна модель може бути використана у реальному проектуванні систем тягового електропостачання та навчальному процесі при підготовці магістрів та бакалаврів на кафедрі «Інтелектуальні системи електроспоживання» Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна.

Особистий внесок здобувача. Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Здобувачем самостійно проведено комп'ютерне моделювання застосування накопичувача електричної енергії на посту секціонування, виконаний аналіз отриманих під час експериментальних досліджень результатів, формулювання висновків і рекомендацій.

Апробація результатів магістерської роботи.

Основні положення роботи і результати досліджень були викладені на міжнародній студентській науковій конференції «Теоретичне та практичне застосування результатів сучасної науки»(Запоріжжя, Україна: молодіжна наукова ліга, 27 листопада 2020 року).

Публікації

- Сьомін О.В. Переваги використання накопичувачі енергії в тягових електричних мережах [Текст] / Теоретичне та практичне застосування результатів сучасної науки: тез. докл. міжнародної студентської наукової конференції (Т.2), 27 листопада 2020 рік. - Запоріжжя, 2020. - с.55-56. ISBN 978-617-7171-56-9,DOI 10.36074/27.11.2020.v2.

					02.15.EC1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АНАЛІЗ ПРОБЛЕМИ РЕЖИМУ НАПРУГИ В МЕРЕЖІ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

1.1 Сучасні проблеми напруги в тяговій мережі постійного струму

Нерівномірність споживання енергії протягом доби – одна з основних проблем систем тягового електропостачання залізничного транспорту та енергетики в цілому. Типовий графік споживання електроенергії в системі електропостачання залізниці має свої максимальні та мінімальні значення впродовж доби та на інтервалах проходження ділянки рухомим складом. У результаті, спостерігаються локальні надлишок і нестача енергії, що призводить до виходу за встановлені норми показників якості електроенергії в системі електропостачання рухомого складу. У тягових мережах постійного струму 3 кВ найважливішими показниками якості електроенергії є відхилення та коливання напруги. Згідно з основним документом, що регламентує роботу залізниць України [1], в системі тягового електропостачання (СТЕ) постійного струму відповідність електроенергії нормам якості визначають лише за двома термінами, що встановлюють рівні напруги: найбільший та найменший. Відхилення та коливання напруги в [2] визначають, відповідно, як тривалі зміни напруги, що призводять до зміни швидкості руху електрорухомого складу та короточасні, що до такої зміни не призводять.

Очевидним засобом утилізації надлишкової енергії з наступним поверненням її до мережі під час нестачі є застосування накопичувачів електричної енергії. Застосування керованих накопичувачів електричної енергії в системі електроживлення дає змогу вирішувати широкий спектр завдань, таких як: зниження витрат на виробництво електроенергії шляхом згладжування профілю завантаження мережі; збільшення терміну експлуатації обладнання мережі, зниження пікового навантаження на тягові підстанції (ТП); поліпшення якості електричної енергії; підвищення загальної надійності енергетичних систем; дозволяє інтегрувати альтернативні джерела електричної енергії в існуючу електромережу, утилізувати енергію рекуперації.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

В свою чергу, використання накопичувачів електроенергії призведе до ускладнення розрахунку енергетичних показників СТЕ. Розрахунок керованої розподіленої СТЕ повинен передбачати розташування на міжпідстанційній зоні ряду підсилюючих пунктів (ПП) з можливістю регулювання їх вихідної потужності в режимі реального часу. Вочевидь зміна схеми електропостачання призведе до додаткових ускладнень при моделюванні. Такі ускладнення будуть пов'язані з 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 [3]. Априорі концепція розподіленого живлення з керованими (некерованими) тяговими підстанціями та керованими підсилюючими пунктами передбачає підсилення впливу явища вирівнюючих струмів і, як наслідок, ускладнення розрахунку цих струмів через наявність більшої кількості джерел з різною напругою на шинах.

Підвищення енергоефективності та зниження енергоємності залізничної галузі можливе за рахунок впровадження в існуючі системи електропостачання батарейних систем накопичення енергії (БСНЕ), призначених для компенсації піків споживаного струму, провалів напруги за рахунок повернення раніше запасеної енергії з накопичувача в контактну мережу. Наявність батарейних систем дозволяє здійснювати утилізацію рекуперативної енергії, інтеграцію відновлювальних джерел в наявну мережу електропостачання. Стрімкий розвиток силової електроніки та поява на ринку нових типів накопичувачів електричної енергії дозволяють створювати сучасні енергоефективні БСНЕ з високими динамічними властивостями, що дозволять покращити якість електричної енергії.

1.2 Світові перспективи використання накопичувачів електричної енергії в тяговій мережі

В даний час відомі різні види накопичувачів електроенергії, з притаманними їм перевагами і недоліками. Найбільш широке поширення в світі отримали електрохімічні накопичувачі, що виконуються на основі літій-іонних акумуляторів і їх модифікацій. Рівень напруги до 1000 В, що застосовується в вітчизняних та зарубіжних системах тягового електропостачання міського і в ряді випадків

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

приміського транспорту, дозволяє зняти проблеми щодо приєднання накопичувачів і використовувати їх без спеціальних перетворювачів напруги.

На сьогоднішній день накопичувачі електроенергії знайшли застосування в системах тягового електропостачання міського і приміського рейкового транспорту США, країнах Євросоюзу, Японії та ін. Не є винятком і Україна, де накопичувачі електроенергії знайшли своє застосування в системі тягового електропостачання метрополітену і міського транспорту. Енергоємність застосовуваних на транспорті систем накопичення, як правило, не перевищує 1000 кВт • год і визначається характеристиками тягового навантаження і вирішуваних завдань.

В якості основних завдань, що вирішуються накопичувачами електроенергії на транспорті, виділяють наступні: забезпечення необхідного рівня напруги при аварійному або технологічному відключенні; стабілізація рівня напруги в місці приєднання; підвищення ефективності застосування рекуперативного гальмування; підвищення енергетичної ефективності перевезень.

1.3 Аналіз режимів напруги

На електрифікованому залізничному транспорті від значення напруги в тяговій мережі в першу чергу залежить швидкість руху електровозів, пропускна та провізна спроможність ділянки. Правилами улаштування системи тягового електропостачання залізниць України встановлені діючі значення напруги на шинах тягових підстанцій і струмоприймачах електрорухомого складу (ЕРС) у нормальному і вимушеному режимах системи електричної тяги. Очевидно, що напруга на струмоприймачах електровозів, які знаходяться на фідерній зоні, не може бути постійною і рівною 3,0 кВ навіть за наявності на зоні пристроїв регулювання. Однак прагнення до звуження діапазону відхилення напруги є основною умовою забезпечення номінального режиму роботи тягових і допоміжних машин електровоза. При цьому необхідно враховувати, що підвищення рівня напруги на струмоприймачі електровоза сприяє підвищенню технічної швидкості руху поїзда, а при збереженні споживаної потужності веде до

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

зниження струму електровоза. Тому для досягнення більш високих енергетичних показників системи тягового електропостачання постійного струму та підвищення енергоефективності ЕРС при високих швидкостях руху необхідно впроваджувати системи для звуження діапазону відхилення напруги на струмоприймачах швидкісного ЕРС.

Основними вимогами, що висуваються з боку електрорухомого складу до системи тягового електропостачання є забезпечення рівня напруги на струмоприймачі, який би гарантував досягнення заданої швидкості, обумовленої

графіком руху, та забезпечував надійну та справну роботу всіх елементів ЕРС. Вплив зміни напруги на зміну швидкості руху електровозів постійного струму з двигунами послідовного збудження з врахуванням схеми з'єднання тягових двигунів, приведенного ухилу, коефіцієнту послаблення збудження та ваги поїзда змінюється в межах :

$$\frac{dv}{dU} = 0,01...0,03 \frac{\text{км / год}}{\text{В}}. \quad (1.1)$$

Як видно з (1.1), в усталеному режимі роботи ЕРС залежність зміни швидкості від зміни напруги невелика, що обумовлено значною інерційністю поїзда. Але при зниженій напрузі збільшується час розгону поїзда для досягнення встановленої швидкості та час ходу електровоза під струмом для її збереження. Таким чином, збільшується загальний час ходу електровозу під струмом, що призводить до додаткових витрат електроенергії. При слідуванні поїзда розрахунковим підйомом зниження напруги на струмоприймачі призводить до зростання температури обмоток електродвигунів та зниження пропускної спроможності ділянки через збільшення часу ходу поїзда. Також зниження напруги зменшує продуктивність роботи допоміжного обладнання, а саме мотор-вентиляторів та мотор-компресорів. Внаслідок цього погіршуються умови охолодження тягових двигунів та іншого електрообладнання, збільшується час відпуску пневматичних гальм поїзда. За умовами надійності роботи ЕРС, з одного

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

боку, повинен забезпечуватись рівень напруги, не нижчий за мінімально допустимий з умов нагрівання тягових двигунів та двигунів допоміжного обладнання. З іншого – не перевищувати максимально допустимого значення за потенційними умовами на колекторі для запобігання виникнення кругового вогню. На ділянках з можливістю рекуперації напруга в тяговій мережі повинна забезпечувати мінімально допустиме значення на струмоприймачах електровозів, що знаходяться в режимі тяги і не перевищувати значення на струмоприймачі рекуперуючого електровозу. Таким чином, напруга в тяговій мережі повинна задовольняти вимогам (1.2) для забезпечення сталої швидкості поїзда та умов для режиму рекуперації. Також значення напруги в контактній мережі повинне забезпечувати мінімальні втрати електроенергії при реалізації графіка руху поїздів.

$$U_{\min} < U_{\text{етяг}} \leq U_{\text{тм}} < U_{\text{ерекуп}} \leq U_{\max}, \quad (1.2)$$

де $U_{\min}$ – мінімально допустиме значення напруги в контактній мережі, В;

$U_{\text{етяг}}$ – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі тяги, В;

$U_{\text{тм}}$ – напруга в тяговій мережі, В;

$U_{\text{ерекуп}}$ – значення напруги на струмоприймачі електровозу, якій знаходиться в режимі рекуперації, В;

$U_{\max}$ – максимальне значення напруги в контактній мережі, В.

Але чітке дотримання поставлених вимог неможливе, оскільки на величину розмаху і тривалість змін напруги діє багато чинників, тому даний процес можна розглядати як стохастичний. Серед впливаючих факторів, можна відзначити рівень напруги на шинах тягових підстанцій, який характеризується досить великим розкидом значень, викликаних коливаннями напруги в живлячій енергосистемі та змінами тягового навантаження. Не менш важливими є втрати напруги в тяговій мережі, які, в свою чергу, залежать від струму електровозу, його місцезнаходження та взаємного розташування інших потягів на фідерній зоні та їх режимів роботи.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Очевидно, доцільним було б забезпечення такого режиму напруги в тяговій мережі, який би найбільшою мірою задовольняв поставленій умові (1.2). Застосування на тягових підстанціях пристроїв автоматичного регулювання та керованих перетворювальних агрегатів зі стабілізацією вихідної напруги дозволяє ліквідувати лише вплив коливань живлячої енергосистеми та падіння напруги на внутрішньому опорі тягових підстанцій. Вплив втрат напруги в опорі проводів контактної мережі міжпідстанційної зони від тягового навантаження зберігається. Тому, в окремих випадках, при жорстких вимогах до якості напруги, наприклад, на ділянках зі швидкісним рухом, впровадження стабілізації лише на шинах тягових підстанцій буде недостатнім.

Для вирішення даної проблеми додатково стабілізують напругу в контактній мережі. Досягнення і стабілізація заданого рівня напруги на міжпідстанційній зоні потребує побудови розподіленої системи вимірювань та на її основі системи керування у реальному часі. Однак, як зазначалось створення такої слідкуючої системи при наявності декількох потягів в зоні, коли втрата напруги до кожного з них буде відрізнатись, дуже важке та не доцільне. Тому широкого застосування набули системи стабілізації на посту секціонування, які довели свою ефективність значно знизивши коефіцієнт варіації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу. На сучасному етапі розвитку техніки та технологій стає можливим створення слідкуючої системи автоматичного керування та побудова на її базі системи для забезпечення заданого рівня напруги на струмоприймачах електровозів, що дозволить досягти енергооптимальних режимів роботи СТЕ.

На сьогоднішній день широко використовуються морально застарілі системи електроживлення залізниць, які не в змозі забезпечити високу пропускну здатність залізничного транспорту, не відповідають нормам, що висувуються для швидкісних електропоїздів. Як наслідок, відбувається збільшення потужності втрат в контактній мережі, а іноді й виходу з ладу обладнання швидкісних локомотивів. Однією з основних проблем є пікові провали рівня напруги в

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

контактній мережі нижче припустимого рівня – 2700 В (для ділянки швидкісного руху – 2900 В) [1-2]. На рис. 1.1 наведено результати вимірів рівня напруги на струмоприймачі рухомого складу.

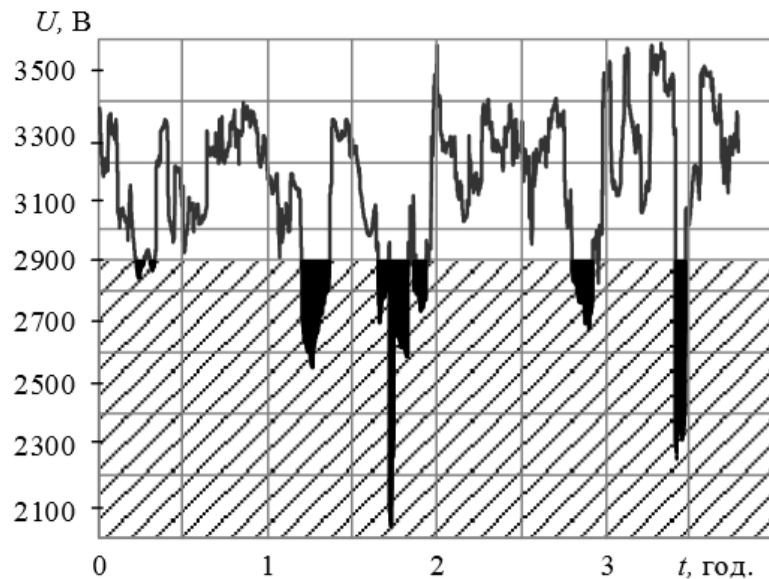


Рисунок 1.1 – Рівень напруги на струмоприймачі

Як видно, впродовж достатньо тривалого часу (18% часу руху) спостерігається провали рівня напруги нижче припустимого рівня.

Факт просадки напруги пояснюється пульсуючим характером потужності споживання. Пульсуючий характер потужності призводить до збільшення потужності втрат, і має бути скомпенсованим. Існують відомі шляхи компенсації пульсацій потужності: установка додаткових трансформаторних підстанцій в місцях найбільшої просадки напруги; підвищення потужності контактної мережі за допомогою додаткового контактного дроту; використання акумуляторних підсилюючих пунктів.

2 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ПРИ НАКОПИЧЕННІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Системи акумуляції енергії

Незважаючи на широку номенклатуру акумуляторних накопичувачів електричної енергії, специфіка використання їх в енергетиці накладає досить серйозні обмеження на вибір типу акумулятора: висока енергоємність; термін служби акумуляторної батареї (без обслуговування); відсутність «ефекту пам'яті»; допустимість режимів швидкого заряду батареї; здатність працювати в режимі великих струмових перевантажень; безпека використання; низька вартість. До 2003 р. найпрогресивнішими вважалися літій-іонні акумулятори, що мали найбільш високі енергетичні показники. На сьогоднішній день перевага надається LiFePO₄ акумуляторним батареям, що поєднують в собі всі переваги літій-іонних акумуляторів, є вибухо- і пожежобезпечними, дозволяють здійснювати до 7000 зарядо-розрядних циклів за умови дотримання вимог використання.

Експериментальні дослідження [4] показали, що літій-залізофосфатні акумулятори мають достатньо високі часові характеристики, проте, для компенсації пульсацій потужності в широкому частотному діапазоні з одночасним зменшенням зарядо-розрядних циклів акумуляторів, рекомендовано застосування в складі підсилювальних пунктів двох різних видів накопичувачів: акумуляторів і двошарових електролітичних конденсаторів.

Системи акумуляції енергії (технології відновлення) використовуються для підтримки безперервності електропостачання навантажень в умовах поганої якості електроенергії. На рис. 2.1 представлена схема технології відновлення, на рис. 2.2 представлена схема принципу дії системи акумуляції енергії

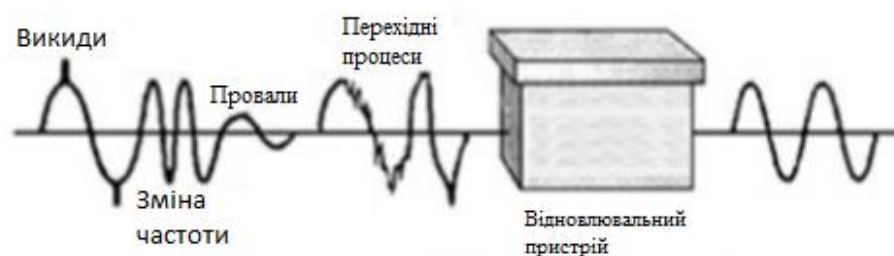


Рисунок 2.1 - Принцип технології відновлення

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

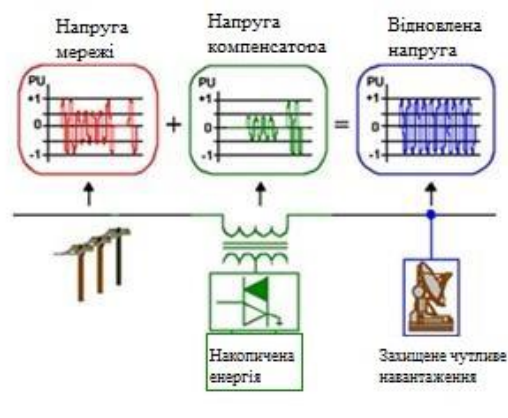


Рисунок 2.2 - Принцип дії системи акумулювання електричної енергії

Останні досягнення в областях силової електроніки і технологій акумуляції привели до того, що технології відновлення стали одним з кращих рішень для зменшення проблем якості електроенергії.

Першою технологією акумуляції енергії, використаної в області якості електроенергії і найчастіше використовуваної нині являється застосування електрохімічних батарей. Незважаючи на появу нових технологій, таких як інерційні накопичувачі (маховики), суперконденсатори, надпровідні індуктивні накопичувачі (СПН), які мають багато переваг, електрохімічні батареї як і раніше переважають завдяки їх низькій вартості і розвиненості внутрішньої технології.

2.2 Типи накопичувачів електричної енергії

Акумуляторні батареї - накопичують електроенергію для використання. Також вони вирівнюють і стабілізують вихідну напругу з генератора. Живлення вашого об'єкта йде від акумуляторних батарей.

Акумуляторні батареї використовуються як накопичувачі енергії в системах безперебійного живлення. Також застосовуються для запуску тролінгових або стартових човнових електромоторів, автомобільних стартерів і бензинових

човнових двигунів. Акумуляторні батареї можуть відрізнятися не тільки ціною, але й основними параметрами.

Різниця акумуляторів по основним параметрам:

- Максимальний термін експлуатації
- Ємність акумулятора
- Кількість циклів перезарядки
- Параметри саморозрядки
- Габаритні розміри
- Робочий температурний діапазон
- Можливість прискореної зарядки
- Максимальний термін зберігання

2.2.1.Маховик - цей електромеханічний пристрій, яке поєднує в собі електричну машину (двигун/генератор), що обертається, з тілом великої маси, що обертається, для короткочасної акумуляції активної енергії. Двигун/генератор забезпечує обертання ротора пристрою за рахунок енергії приватний . При порушенні живлення кінетична енергія, запасена в роторі, за допомогою генератора перетвориться в електричну енергію постійного струму, і енергія видається через перетворювач і систему управління з постійними частотою і напругою. На рис. 2.3 зображена схема маховика.



Рисунок 2.3 - Маховик

Традиційні ротори маховика зазвичай виготовляються із сталі і мають обмеження швидкості обертання на рівні декількох тисяч обертів за хвилину. Сучасні маховики виготовлені із застосуванням вуглецевого волокна і магнітних підшипників, можуть обертатися у вакуумі із швидкістю 40 000 - 60 000 про/мін . Величина енергії, що акумулюється, пропорційна моменту інерції і квадрату швидкості обертання, тому високошвидкісні маховики можуть запасати значно більше енергії, чим звичайні.

Маховик забезпечує живлення впродовж періоду часу між пропажею енергії від постачальника і відновленням її подання або запуском системи резервного живлення (наприклад дизель-генератора). Час підтримки енергопостачання за допомогою крутня зазвичай складає 1 - 100 з, а резервні генератори можуть бути готові до роботи через 5 - 20 с.

2.2.2 Суперконденсатори

Суперконденсатори (чи ультраконденсатори) - це джерела активної енергії постійного струму, представлені на рис. 2.4.

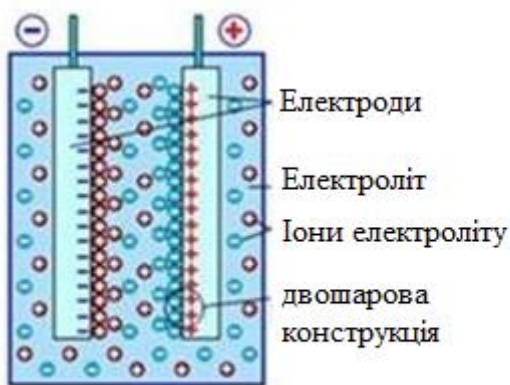


Рисунок 2.4 - Двошаровий електричний суперконденсатор

Вони повинні підключатися до мережі за допомогою статичного облаштування забезпечення якості електроенергії, яка видає енергію на частоті мережі. Суперконденсатор забезпечує живлення під час короткочасних переривань

або провалів напруги. Суперконденсатори середньої величини (1 Мдж) є комерційно доступними для реалізації безперервності електропостачання малопотужного електронного устаткування. Великі суперконденсатори нині знаходяться в розробці, але можуть скоро стати звичайним компонентом систем акумуляції енергії.

Велика величина місткості досягається за рахунок своєю дуже малої відстані між обкладаннями (декілька ангстремів) і великої площі поверхні провідника (приміром, активованого вуглецю), яка досягає 1500 - 2000 м²/г (16 000 - 21 500 фт²/г). Тому величина енергії, що запасається, в таких конденсаторах може досягати всього 50 - 60 Джоулів/г.

Недоліки іоністорів :

- висока ціна іоністорів з великими розрядними струмами, що перешкоджає їх широкому застосуванню;
- напруга безпосередньо залежить від міри зарядженої; - можливість вигорання внутрішніх контактів при короткому замиканні для іоністорів великої місткості і з низьким внутрішнім опором;
- низька робоча напруга по порівнянню облаштування з більшістю конденсаторів інших типів
- значно більший, в порівнянні з акумуляторами, саморозряд: близько 1 мкА у іоністора 2 Ф × 2,5 В;
- істотно менша швидкість віддачі заряду навіть в порівнянні із звичайними конденсаторами.

Переваги іоністорів :

- великі максимальні струми зарядки і розрядки;
 - мала деградація навіть після сотень тисяч циклів заряду/розряду.
- Проводилися дослідження за визначенням максимального числа циклів заряд-розряд. Після 100 000 циклів не спостерігалось погіршення характеристик;
- високий внутрішній опір у більшості іоністорів (перешкоджає швидкому саморозряду, а також перегріванню і руйнуванню);

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

- іоністор має тривалий термін служби (0.6 Уном. близько 40000 годин з незначним зниженням місткості);

- низька токсичність матеріалів (окрім органічних електролітів- неполярність (проте на іоністорах і вказані "+" і "-", це робиться для позначення полярності залишкової напруги після його зарядки на заводі-виготівнику);

- мала залежність від навколишньої температури: можуть працювати як на морозі, так і на жарі ;

- велика механічна міцність : виносять багатократні перевантаження.

2.2.3 Надпровідний індуктивний накопичувач (СПН)

При циркуляції постійного струму в замкнутій котушці з надпровідного провідника створюється магнітне поле. Струм, що протікає через котушку, може уриватися за допомогою безконтактного комутатора. Завдяки високій індуктивності котушки при розмиканні ключа вона стає джерелом струму і може жити перетворювач, який вироблятиме напругу з певним рівнем. При відповідній модуляції безконтактного комутатора на перетворювачі підтримуватиметься напруга в межах заданого діапазону, яку потім буде перетворено з постійного в змінне. Системи СПН мають високу потужність, вони зазвичай використовуються впродовж короткого часу, наприклад, при перемиканні джерел енергопостачання.

2.2.4 Електрохімічні акумуляторні батареї

Акумуляторні батареї можуть бути виконані у вигляді одного або декількох елементів, послідовно з'єднаних між собою, в одному корпусі. Електроліт знаходиться в акумуляторі може бути як у рідкому стані, так і в гелеобразному. У звичайних свинцево-кислотних акумуляторах електроліт знаходиться в рідкому стані і акумулятору необхідне обслуговування, заміна електроліту і доливання води. У гелевих необслуговуваних акумуляторах електроліт загущений до стану гелю. Дані акумулятори зручні в експлуатації, не вимагають обслуговування і встановлюються в будь-якому положенні.

На що треба звернути увагу при підборі акумуляторних батарей:

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У Вольтах (В), виражається напруга акумуляторних батарей. Вхідна напруга в інвертор і вихідна напруга з генератора повинні бути рівним загальній напрузі всіх підключених акумуляторних батарей. Якщо вихідна напруга з Вашого генератора становить 48 Вольт, то для цього необхідні чотири акумуляторні батареї з напругою 12 Вольт або дві акумуляторні батареї з напругою 24 Вольта.

У Ампер-годинах (Аг) виражається ємність акумуляторних батарей. Термін автономної роботи Вашого об'єкту при безвітренності, залежить від ємності акумуляторних батарей. Вітрогенератор накопичує електроенергію в акумуляторних батареях і чим більше їх місткість, тим більше запасу в них електроенергії, і тим довше термін автономної роботи Вашого об'єкту.

Приблизна ємність акумуляторних батарей. Якщо взяти акумуляторну батарею 12 В-200 Аг, її може вистачити приблизно на 2 години роботи, при навантаженні 1 кВт або на 1:00 при навантаженні 2 кВт. Батарея 12 В-150 Ач - 1,5 години при навантаженні 1 кВт, або 45 хвилин при навантаженні 2 кВт. Акумуляторна батарея 12 В-100 Аг зможе протриматися приблизно 1 годину при навантаженні 1 кВт, або 30 хвилин при навантаженні 2 кВт, і так далі по порядку спадання. Тобто, чим більше навантаження, тим менше час автономної роботи.

Ці розрахунки звичайно приблизні, оскільки є чинники, які впливають на тривалість роботи батарей, це такі як, температурний режим експлуатації батарей, особливості будови самих батарей і їх марок, режим використання накопиченого заряду і так далі. У будь-якому випадку, батареї повинні бути однакові, однієї марки, моделі та з однаковим терміном експлуатації.

Типи акумуляторних батарей.

До найбільш вживаних ставляться такі типи акумуляторів:

- нікелево-кадмієві (Ni-Cd);
- нікелево-металогідридні (Ni-MH);
- літієво-іонні (Li-Ion);
- герметичні свинцево-кислотні (SLA);
- літієво-полімерні (Li-polymer).

					02.15.EC1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Різні типи акумуляторів мають не тільки різну вартість, але і відрізняються за основними параметрами: кількістю циклів перезарядки, максимального терміну зберігання, що віддається ємності, розмірами, температурному діапазону роботи, можливостям прискореної зарядки і т. д. Акумулятори виконуються як у вигляді одного елемента, так і декількох, послідовно включених і оформлених в одному корпусі елементів - батареї. Деякі моделі акумуляторів включають в себе електронні елементи управління, що забезпечують контроль режиму заряду і захист акумулятора від неправильної експлуатації.

Як правило, кожен виробник використовує оригінальну технологію виробництва, і, відповідно, свої власні розробки по конструкції тих чи інших моделей. Тим не менше можна виділити кілька загальних підходів до конструкції різних типів акумуляторів.

Наприклад, свинцево-кислотний акумулятор складається, як правило, з двох пластин (електродів), поміщених в електроліт (водний розчин сірчаної кислоти).

У нікелево-кадмієвого елемента негативні і позитивні пластини скатані разом і поміщені в металевий циліндр. Позитивна пластина складається з гідроксиду нікелю, а негативна - з гідроксиду кадмію. Дві пластини ізольовані роздільником, який зволожений електролітом.

Нікелево-металогідридний акумулятор конструктивно схожий на нікелево-кадмієвий акумулятор, але має інший хімічний склад електроліту і електродів. У літієво-іонному акумуляторі електроди й сепаратор (роздільник) поміщені в електроліт з літієвої солі. Ємність, що виражається в ампер-годинах ($A \cdot \text{год.}$, $\text{mA} \cdot \text{год.}$) або ват-годинах ($\text{Вт} \cdot \text{год.}$), - це кількість енергії, яку батарея може віддати в навантаження за одну годину. На практиці ємність батареї зазвичай вимірюється аналізатором акумуляторних батарей. Наприклад, акумуляторна батарея номінальною ємністю $1200 \text{ mA} \cdot \text{год.}$ віддає в навантаження струм 1200 mA протягом однієї години.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

По ідеї витрата енергії в більш короткий час повина бути такою ж, як і у випадку більш повільного розряду, так як віддається така ж кількість енергії, тільки протягом більш короткого часу - однак на практиці це не так, головним чином через кінцевого значення внутрішнього опору акумулятора. При розряді акумулятора, встановленого в аналізатор, який дозволяє регулювати різні струми розряду, більш висока енергія буде віддаватися в тому випадку, якщо батарея розряджається більш низьким струмом.

Нікелево-кадмієві (Ni-Cd) акумулятори.

Нікелево-кадмієві акумулятори випускаються в різних країнах світу приблизно з 1950 року. На сьогоднішній день більше 50% всіх акумуляторів для портативного обладнання є нікелево-кадмієві.

Основні переваги цього типу акумуляторів:

- низька вартість;
- висока стійкість до перепадів температур;
- хороша стійкість до великих струмів заряду і розряду, так як малий внутрішній опір дозволяє віддавати великі струми (інші типи акумуляторів це не влаштовує);
- велика кількість циклів "заряду-розряду".

Серед усіх типів акумуляторів нікелево-кадмієвий - єдиний, який найкраще віддає максимальну ємність, забезпечує велику кількість циклів заряду, розряду, якщо періодично здійснюються глибокі розряди (до 1 В на елемент).

Недоліки нікелево-кадмієвого акумулятора:

- наявність так званого "ефекту пам'яті";
- даний тип акумулятора екологічно забруднений, так як кадмій є високотоксичною речовиною. Також з'являються додаткові проблеми з її переробкою;
- порівняно низька питома ємність, хоча і не у всіх випадках це є критично.

Нікелево-металогідридні (Ni-MH) акумулятори.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Відомі на ринку з кінця 80-х років. Поштовхом до розробки і виробництва цих акумуляторів з'явилася, головним чином, їх більш висока щільність енергії в порівнянні з Ni-Cd.

Деякі з відмітних переваг сьогоdnішнього Ni-MH акумулятора в порівнянні з Ni-Cd:

- велика питома ємність (при тих же габаритних розмірах значення ємності на 30% більше), меншу вагу;
- менш схильний до "ефекту пам'яті";
- до складу акумулятора входить менша кількість токсичних металів, і в даний час він вважається екологічно чистим.

На жаль, Ni-MH акумулятор має і недоліки в порівнянні з Ni-Cd акумулятором, а саме:

- має набагато меншу кількість циклів заряду розряду;
- ціна Ni-MH акумулятора вище, ніж Ni-Cd, хоча і не завжди може бути головною проблемою, якщо користувач віддає перевагу невеликому розміру і вазі;
- температурний режим роботи менше, ніж у Ni-Cd акумулятора.
- в порівнянні з Ni-Cd і Li-Ion акумуляторами, у Ni-MH акумулятора найнижча навантажувальна здатність - він не може віддавати великі струми;
- цей тип акумуляторів <боїться> глибоких розрядів, тому що довговічність батареї безпосередньо пов'язана з глибиною розряду;
- саморозряд більш ніж в 1,5 рази вище, ніж у Ni-Cd акумулятора, що є важливим параметром при зберіганні.

Ni-MH не любить великого зарядного струму, як Ni-Cd, так як в процесі зарядки виділяється значно більша кількість тепла. Крім того, в зарядному пристрої потрібно більш складний алгоритм для виявлення повного заряду, ніж для Ni-Cd акумулятора. Сучасна Ni-MH батарея обладнана внутрішнім зчитувачем температури, щоб допомогти виявленню повного заряду. Перезаряд акумулятора в дешевому зарядному пристрої (ЗУ) (не має автоматичного відключення) може привести до перегріву і повного руйнування акумулятора.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Літєво-іонні (Li-Ion) акумуляторні батареї.

Виробництво літєво-іонних акумуляторних батарей почалося на початку 90-х років. На сьогоднішній день найбільшим постачальником цього типу батарей є компанія Sony. Головна перевага літєво-іонних акумуляторів полягає у високій питомій ємності Li-Ion, що принаймні, в два рази більша, ніж у Ni-Cd акумулятора.

Літій - дуже легкий метал, має найбільший електрохімічний потенціал і забезпечує найбільший вміст енергії. Крім того, Li-Ion має відносно низький саморозряд і в ньому повністю відсутній "ефект пам'яті", завдяки чому час від часу можна дозаряджати і не зовсім розряджений акумулятор. Кількість циклів "заряду-розряду" за даними більшості виробників (так як у кожного виробника свої технології і відповідно кількість циклів дещо відрізняється) трохи більше, ніж у Ni-MH акумулятора.

Основний недолік літєво-іонних (Li-Ion) батарей висока вартість і малий діапазон робочих температур, хоча це і не завжди є критичним фактором.

У конструкції сучасних літєво-іонних (Li-Ion) акумуляторів присутні так звані smart-мікросхеми. Це дозволяє управляти зарядним пристроєм таким чином, щоб процес зарядки був найбільш ефективним в залежності від пропрацював кількості циклів "заряду-розряду".

Літєво-полімерні акумуляторні батареї (Li-polymer).

Первісна концепція батареї літій-полімеру заснована на використанні твердого електроліту на полімерній основі. Ця ідея передбачає технологічність у виробництві, і відповідно низьку ціну. Щільність енергії цього типу батарей ще більше, тобто приблизно в три рази вище, ніж у нікелево-кадмієвого акумулятора, а саморозряд значно нижче.

Використання твердого електроліту дозволяє довести розміри елементів акумулятора до 1 мм в товщині. Так як дана конструкція не містить рідкого електроліту і реалізується набором різних плівок, то можна отримувати дуже гнучкі конструктивні форми. Акумулятор такого типу має дуже малу товщину, що дозволяє йому надавати необхідну форму.

					02.15.EC1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Недолік літієво-полімерного акумулятора в тому, що він не може віддавати великі струми розряду і, також, як і літієво-іонний (Li-Ion), не любить низьких температур.

Свинцево-кислотні (LEAD ACID) акумуляторні батареї.

На відміну від інших типів акумуляторних батарей свинцево-кислотна батарея зазвичай використовується, коли потрібна велика ємність, вимоги до ваги не критичні і вартість батареї повинна зберегтися низькою.

Переваги герметичних свинцево-кислотних (SLA) акумуляторних батарей:

- відносно невисока вартість;
- повна відсутність "ефекту пам'яті";
- низький саморозряд;
- в сучасних герметичних свинцево-кислотних акумуляторах, в залежності від середньої глибини розрядки, кількість циклів може досягати 800-1000.

Недоліки SLA-батарей:

- акумуляторні батареї SLA мають найнижчу питому ємність, хоча в багатьох випадках це може бути і не критичним;
- на відміну від Ni-Cd SLA страшенні глибокі цикли розряду (це безпосередньо веде до скорочення кількості циклів "заряду-розряду").

Основне автономне джерело електроенергії для запуску всіх типів двигунів, живлення ланцюгів управління і резервного живлення будь-яких енергоспоживачів на залізничному транспорті - електрохімічні акумулятори та складені з них акумуляторні батареї.

Як і у всіх галузях промисловості, тут використовуються акумулятори трьох типів (класів): швидкого (Н), середнього (М) і тривалого (L) розряду.

Акумулятори швидкого розряду застосовуються як стартерні - для запуску двигунів внутрішнього згорання тепловозів, рефрижераторних секцій, дизель-поїздів і стаціонарних енергоагрегатів.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Акумулятори класу «М» широко використовуються як основне джерело електроживлення в пасажирських вагонах і рефрижераторних секціях при низьких швидкостях руху і на стоянках.

Третій клас акумуляторних батарей (L) застосовується як резервне джерело в агрегатах безперебійного живлення при основній мережі змінного струму або в буфері з основним електроджерелом постійного струму в пристроях сигналізації, централізації і блокування (СЦБ) і зв'язку, а також у допоміжних низьковольтних ланцюгах електропідстанцій та інших стаціонарних установок залізничного транспорту. Поки працює основне джерело енергії, батарея знаходиться в режимі підзарядки, а при виході з ладу або тимчасового відключення джерела використовується для живлення відповідальних електроспоживачів.

Всі акумулятори та батареї, в тому числі застосовуються на залізничному транспорті, поділяються за типом використовуваної електрохімічної системи, як правило, лужної або кислотної.

Вибір системи залежить від того, на якому об'єкті застосовується акумулятор і який клас розряду потрібно в даному випадку.

Так, потужні кислотні акумулятори найкраще використовувати в якості стартерних. Як тягових акумуляторів (середнього класу розряду) краще застосування лужних, особливо нікель-кадмієвих батарей. Вони більш надійні при низьких температурах і мають більший строк служби. При цьому свинцево кислотні акумулятори тих же габаритів і потужності відрізняються значно меншою вартістю.

Проблема полягає в тому, що робоча ємність всіх основних типів і класів акумуляторів і зібраних з них батарей при низьких зовнішніх температурах значно знижується. Це призводить до необхідності доливання дистильованої води в жарку пору року і періодичному проведенню відновлювальних зарядних циклів, що вимагають зняття батарей з рухомого складу, що збільшує експлуатаційні витрати.

Крім цього, хронічний недозаряд акумуляторів при негативних температурах призводить до незворотної втрати робочої ємності і швидкого виходу

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аккумуляторів з ладу через пасивації активних мас електродів у лужних батареї і сульфатації - у кислотних.

Посилює проблему те, що всі використовувані на залізниці типи аккумуляторів створені для інших галузей промисловості, де система і сам процес заряду відрізняються від умов роботи на залізничному транспорті, особливо на рухомому складі.

Ще більші труднощі виявилися при спробах використання на залізничному транспорті більш перспективних аккумуляторів закритого типу. Герметизовані батареї кількох зарубіжних аккумуляторних фірм були випробувані на рухомому складі та деяких стаціонарних установках залізничного транспорту. Надійно необслуговувані аккумулятори працювали тільки в якості резервних джерел живлення. При роботі ж на рухомому складі, особливо в пасажирських вагонах, герметизовані аккумулятори або повністю виходили з ладу, або за півроку втрачали більше половини потужності.

Найгірше показали себе аккумулятори з гелієвим електролітом, які не розраховані на швидкий і постійно повторюваний заряд і розряд. До того ж їх реальна ємність при негативних зовнішніх температурах невисока.

Існує й інший тип герметичних аккумуляторних батарей (в основному свинцевих). У них за рахунок використання сепараторів типу AGM забезпечується рекомбінація газових носіїв (водню і кисню), що виділяються при заряді будь-яких аккумуляторів, і зменшується газовиділення за рахунок використання свинцево кальцієвих сплавів в електродах.

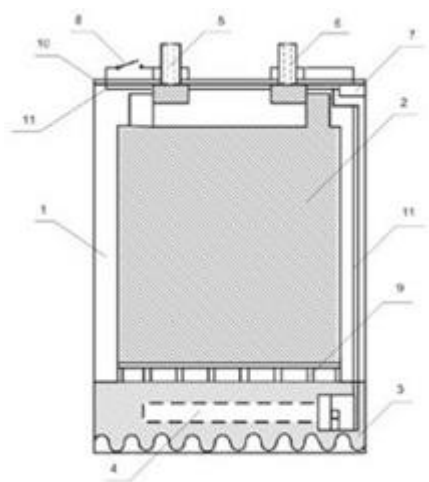
Як показали дослідження авторів, тип аккумуляторів з рекомбінацією газових носіїв при позитивних температурах (до +40 ° C) здатний стійко працювати в умовах зарядно-розрядних циклів, але має дуже низьку реальну ємність при низьких температурах. Це означає, що і цей тип аккумуляторів непридатний для використання на залізничному транспорті в українському кліматі.

Зі сказаного вище випливає, що наміри необхідність розробки універсального аккумулятора, для залізничного транспорту України. Такі

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аккумулятори та батареї повинні бути здатні працювати у всіх кліматичних зонах протягом 8 ~ 10 років в режимі постійного заряду і розряду і з віддачею по ємності до 50% від номіналу. При цьому головний енергетичний показник - коефіцієнт віддачі загальних аккумуляторів (відношення відданої ємності при розряді до величини ємності, отриманої при заряді) - повинен бути збільшений при негативних температурах в 10 ~ 15 разів у порівнянні з тим же показником зарубіжних герметичних аккумуляторів.

Як показали дослідження фахівців ВАТ «ВНИИЖТ» і ТОВ «Транспорт» (м.Москва), подібні характеристики для закритого типу аккумуляторів можуть бути досягнуті за рахунок внутрішнього нагрівання повітря портативним нагрівальним елементом, що підключається спеціальним терморегулятором до клем аккумулятора при температурі нижче - 10 ° С і розташованим всередині аккумулятора (рис.2.5).



1 - корпус аккумуляторного блоку; 2 - блок електродів; 3 - металевий радіатор; 4 - нагрівальний елемент; 5,6 - електроди аккумуляторного блоку; 7 - термореле; 8 - виконуючий(пусковий) елемент; 9 - опорна решітка електродів; 10 - кришка аккумуляторного блоку; 11 - з'єднувальні дроти

Рисунок 2.5 - Аккумулятор закритого типу

При цьому габарити аккумулятора не повинні збільшуватися, а живлення нагрівального елемента від аккумулятора повинно здійснюватися тільки в процесі його заряду з діапазоном напруги 2,5 ÷ 2,75 В (для аккумуляторів кислотної системи), і 1,4 ÷ 1,7 (для лужної системи). Таким вимогам в даний час не відповідає

жоден акумулятор, який використовується на залізничному транспорті при роботі в усіх кліматичних зонах України.

Рішення поставлених вище завдань досягнуто в результаті досліджень ВАТ «ВНИИЖТ» і ТОВ «Транспорт» (м.Москва), що спеціалізуються в тому числі на розробці та вдосконаленні залізничного енергетичного обладнання.

Спільними зусиллями було створено універсальний герметизований акумулятор на базі сепараторів AGM, що забезпечує повну рекомбінацію газових носіїв практично при будь-якій зовнішній температурі (від -45°C до $+40^{\circ}\text{C}$). Для забезпечення роботи при низьких зовнішніх температурах в донну частину (під підставку блоку електродів) звичайного призматичного свинцево кислотного акумулятора був введений електронагрівач потужністю $30 \div 35$ Вт стрічкового типу з свинцевого сплаву з кислотійкою ізоляцією, автоматично підключається до клем при низьких зовнішніх температурах.

Терморегулятор виконаний на основі електронного блоку, що забезпечує ефективну роботу акумуляторів при русі рухомого складу, а стаціонарних установок - при їх живленні від батарей при температурі близько 0°C . Досягається це за рахунок ефективної роботи активних мас електродів при низьких позитивних температурах, що роблять їх роботу еквівалентної звичайним акумуляторів без внутрішнього підігріву при зовнішній температурі $0 \sim +5^{\circ}\text{C}$.

Як уже згадувалося, управління роботою нагрівального елементу здійснюється електронним комутатором, змонтованим на друкованій платі, основним елементом якої є спеціальний терморегулятор (резистивний датчик температури всередині акумулятора), що володіє здатністю різко збільшувати свій опір при температурах зовнішнього повітря нижче 0°C . Терморегулятор масою 150 г має габарити $50 \times 70 \times 10$ мм і кріпиться над кришкою акумулятора (на рис. 2.5 показана конструкція створеного акумулятора).

При цьому розрахунки показують, що при використанні розробленого пристрою управління внутрішнім нагрівом вартість акумуляторів потужністю 100 А • ч і більше зростає всього на 5-7%. Всебічні випробування дослідних зразків

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

створених акумуляторів (PzV350P) показали, що при температурі -20°C ємність акумуляторів в три рази перевищує ємність зарубіжних акумуляторів аналогічної потужності в тих же умовах. При температурі -40°C ємність вітчизняної розробки перевищує показники аналогів в 10 разів! Віддача у досвідчених акумуляторів при розряді номінальним стабільним струмом 60 А становить 160 А · год, що більше, ніж в акумуляторів відкритого типу, в 4-5 разів при аналогічних умовах заряду.

На рис. 2.6 наведені характеристики зміни розрядного струму і напруги для відомих акумуляторів з рекомбінацією газових носіїв, але без улаштування внутрішнього підігріву при зовнішній температурі -40° .

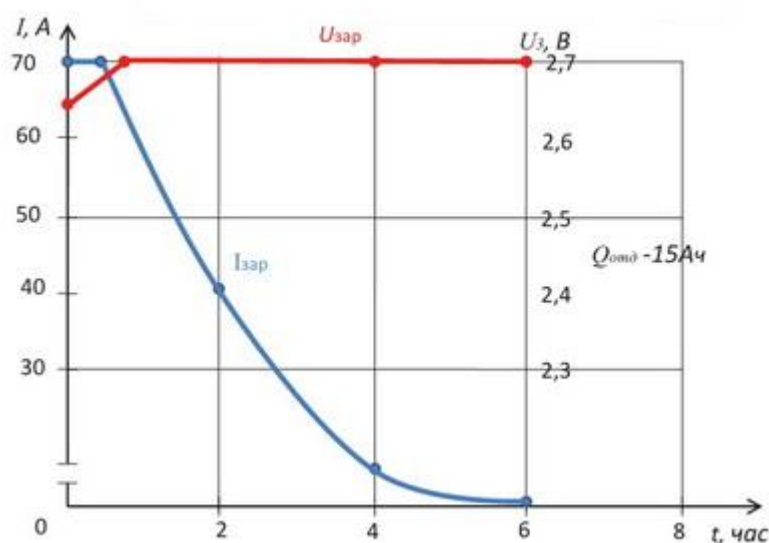


Рисунок 2.6 - Графік зміни зарядного струму і напруги герметизованих акумуляторів існуючої конструкції.

3 ШЛЯХИ ПОКРАЩЕННЯ РЕЖИМІВ НАПРУГИ У СИСТЕМІ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

3.1. Основні принципи підсилення системи тяги постійного струму

Створення транспортних коридорів з організацією руху швидкісних та високошвидкісних пасажирських поїздів і вантажних поїздів підвищеної маси потребують підсилення існуючої системи тягового електропостачання постійного струму 3,0 кВ для забезпечення відповідних режимів напруги на струмоприймачах ЕРС. Існуючі і перспективні способи підсилення системи тягового електропостачання постійного струму відповідно до [5] і [6] можна розділити на способи, що зберігають рівень напруги 3,0 кВ в тяговій мережі і способи, що потребують підвищення рівня напруги; способи, що зберігають рівень споживаної потужності з системи зовнішнього електропостачання та способи, що потребують підвищення споживання потужності (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 - Способи підсилення системи тягового електропостачання постійного струму

Основні концепції і принципи підсилення системи тяги постійного струму 3,0 кВ описані ще в 60 – 80 роках минулого сторіччя [6-10]. Сучасне підсилення СТЕ 3,0 кВ не зазнало значних структурних змін, а змінювалась лише елементна база обумовлена розвитком науки, техніки та технологій. В [11, 7, 12 – 15], проведені порівняльні розрахунки різних систем тягового електропостачання, запропоновані способи підсилення СТЕ постійного струму побудовані на основі сучасних досягнень, повною мірою висвітлені їх переваги та недоліки, наведені результати досвіду експлуатації.

Потрібно відзначити, що на залізницях України підсилення СТЕ 3,0 кВ зводиться до переводу ділянок на паралельну схему живлення, збільшення перетину контактної мережі, заміни 6-ти пульсних випрямних агрегатів на 12-ти пульсні та підвищення напруги холостого ходу тягових підстанцій. Але навіть при комплексному застосуванні цих способів система електропостачання 3,0 кВ залишається недостатньо ефективною і економічною та не в змозі забезпечити відповідну якість напруги в тяговій мережі. Справа в тому, що при централізованому живленні потужність зосереджена на тягових підстанціях не використовується повною мірою. В середньому їх добове завантаження при забезпеченні графіку інтенсивного руху потягів не перевищує 20-25 %, при цьому втрати енергії в тяговій мережі при пікових навантаженнях збільшуються і досягають 10-15 % від спожитої енергії. Аналіз результатів розрахунків [16] дозволяє зробити наступні висновки: по-перше, жодна з застосовуваних схем живлення не забезпечує нормованого рівня напруги в тяговій мережі при здійсненні швидкісного руху електрорухомим складом потужністю 10 МВт за номінальної напруги на шинах тягових підстанцій (3300 В); по-друге, підвищення напруги на шинах тягових підстанцій до 3800 В дозволить реалізувати швидкісний рух на ділянках постійного струму тільки при вузловій та паралельній схемах живлення, при цьому, фактично, буде неможливим здійснення рекуперації. Необхідно приймати до уваги також той факт, що на шинах тягових підстанцій

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

України, в основному, підтримується напруга на рівні 3500-3600 В [11], що обмежує регулювальні можливості при впровадженні швидкісного руху.

В той же час регулювання напруги на шинах тягових підстанцій не вирішує існуючу проблему повною мірою, через збільшення втрат потужності на міжпідстанційній зоні та відповідних експлуатаційних витрат [17, 5, 7]. Тому для покращення режимів напруги в тяговій мережі та техніко-економічних показників існуючих ділянок електричних залізниць постійного струму застосовується низка технічних та організаційних заходів:

- використання пунктів паралельного з'єднання;
- збільшення перерізу проводів контактної мережі;
- будівництво додаткових тягових підстанцій;
- застосування блоків розподіленого живлення;
- повна заміна шестипульсних випрямлячів на дванадцятипульсні;
- розробка і випуск випрямлячів з оптимальною шкалою номінальних потужностей;

- розширення сфери рекуперативного гальмування і експлуатаційне освоєння дванадцятипульсних випрямно-інверторних перетворювачів;

- освоєння ефективних схем згладжуючих фільтрів тягових підстанцій постійного струму;

- встановлення на фідерній зоні вольтододаткових пристроїв ВДП з регулюванням напруги;

- збільшення потужності тягових підстанцій і зменшення відстані міжпідстанційних зон;

- підсилення системи зовнішнього електропостачання і обмеження відхилення рівня напруги на вводах тягових підстанцій.

Ефект від застосування окремих заходів різний і, як правило, є недостатнім. Для підсилення тягового електропостачання конкретної лінії з метою досягнення необхідних показників якості напруги для швидкісних поїздів потрібно здійснювати комплекс заходів з обмеження діапазону зміни напруги на струмоприймачах ЕРС.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

Тому в [5] і [12] автори пропонують на сьогодні найбільш перспективну систему підсилення, яка побудована на основі керованої системи тягового електропостачання, розробленої професором Аржанніковим Б. О. Така система отримала назву «Буферна система тягового електропостачання (БСТЕ)» і поєднує безконтактне автоматичне регулювання напруги (БАРН) на шинах ТП і «буфери» – додаткові одноагрегатні тягові підстанції, споруджені в середині МПЗ. Але, хоча запропонована система і забезпечує пакетний пропуск важковагових поїздів з мінімальною напругою на струмоприймачі 2700 В та зменшує питомі втрати електроенергії на 0,44 ... 3,71 %, в той же час вона зменшує можливість застосування рекуперації на 0,79 ... 11,52 %. Тому в умовах підвищення енергоефективності залізниць, використання буферної системи тягового електропостачання (БСТЕ) на напрямках з активним використанням енергії рекуперації не буде раціональним. Доцільність використання вказаної БСТЕ необхідно оцінювати за умовами забезпечення пропуску швидкісних та важковагових поїздів, техніко-економічних умов та умов забезпечення введення рекуперативного режиму на ділянці. Також слід відзначити, що впровадження додаткових пунктів живлення призводить до збільшення споживання потужності з системи зовнішнього електропостачання. Тим паче, спорудження додаткових буферних підстанцій з живленням від ліній електропередач високої напруги обходиться досить дорого, особливо якщо їх приєднання до енергосистеми складне і тягне за собою зміну схеми зовнішнього енергопостачання з перебудовою деяких проміжних тягових підстанцій в опорні з усіма пов'язаними з цим додатковими витратами.

3.2 Забезпечення належного режиму напруги на струмоприймачах з використанням накопичувачів

Забезпечення належного режиму напруги на струмоприймачах ЕРС при швидкісному русі, підвищення енергоефективності та зниження енергоємності залізничної галузі згідно з [18] можливе за рахунок впровадження систем електричної тяги з використанням накопичувачів (ESS – energy storage system)

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призначених для запасання енергії рекуперації та компенсації піків струму і втрат напруги при поверненні її в контактну мережу [19].

Така система не є новою і експлуатується з 1988 р [20]. Але поява нікель метал-гідридних (Ni-MH) батарей та двошарових конденсаторів створили основу для побудови високоефективних батарейних підстанцій (ABS – auxiliary battery substation), які широко використовуються для підвищення якості напруги та енергоефективності електрифікованого рейкового транспорту США та Японії. Дослідницька діяльність в області накопичувачів для залізничних систем спрямована в основному на метро та легкорейкові мережі [21 – 23]. Але в [24] представлено дослідження роботи ділянки постійного струму 3,0 кВ довжиною 15,8 км з консольним живленням контактної мережі та застосуванням ABS. В порівнянні з базовим розрахунком (без застосування ABS) при проходженні ділянкою поїзда ETR 1000 з встановленою швидкістю 125 км/год включення батарейної підстанції потужністю 2 та 4 МВт зменшило втрати напруги на 15 та 20,16 % і втрати потужності на 3,75 та 4,89 % відповідно. Недоліком такої системи є можливість її ефективного застосування лише в мережах рейкового транспорту з активним використанням режиму рекуперації.

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 [25, 26], у тому числі і з застосуванням змінного струму підвищеної частоти з напівхвильовим налаштуванням для живлення пунктів підсилення тягової мережі [27].

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

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 може привести до зниження встановленої потужності усіх агрегатів тягових підстанцій [28 – 32].

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		37

4 РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОХІМІЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

4.1 Типи електрохімічних накопичувачів

На сьогоднішній день в пристроях СТЕ пропонуються до використання різні типи накопичувачів [33 – 37], але доцільність застосування того чи іншого типу накопичувача до цього часу не обґрунтована в повній мірі. Для застосування в системі розподіленого живлення, накопичувач енергії повинен функціонувати в умовах різкої зміни навантаження та компенсувати коливання напруги при мінімальному часі відновлення. Як показує аналіз доступних джерел [38], на сьогоднішній день найбільш перспективним напрямком є застосування батарейних систем накопичення електричної енергії (БСНЕ), дозволяючих зменшити коливання споживаної потужності і рознести в часі фази накопичення та віддачі електроенергії. Імпульсний характер струму, що споживається ЕРС може бути скомпенсований батарейною системою до отримання бажаного режиму напруги. Крім того, застосування електрохімічних накопичувачів енергії дозволяє вирішити цілий ряд завдань: поліпшити якість електричної енергії і знизити витрати на виробництво електроенергії, згладити профіль завантаження генеруючих потужностей, збільшити ресурс електромережевого устаткування, знижуючи пікове навантаження на підстанції, дозволяє інтегрувати в існуючу систему електропостачання сонячні і вітрові генератори електричної енергії, збільшити надійність енергосистем в цілому [39].

Незважаючи на наявність великої кількості типів електрохімічних накопичувачів електричної енергії, вибір конкретного типу акумулятора для енергетичних задач обмежується певними вимогами [39]. При виборі конкретного типу накопичувача необхідно враховувати як технічні, так і економічні характеристики. До технічних характеристик можна віднести: ККД, кількість зарядно-розрядних циклів, час заряду, здатність до перевантажень (можливість віддачі імпульсних струмів), частотні характеристики (здатність швидко віддавати енергію). До факторів, що впливають на економічні показники, варто віднести загальну вартість батареї, її час життя. На залізниці БСНЕ може бути розміщено як на

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

ТП так і, бажано, між ними на ПП. Оскільки застосування БСНЕ на залізниці забезпечує якість електричної енергії, визначальними факторами є переважувальна здатність, частотні характеристики і час заряду.

На підставі проведеного аналізу можливості застосування різних типів акумуляторних накопичувачів у складі БСНЕ (табл. 4.1), перевагу слід віддати LiFePO₄ батареям: вони мають найкращі енергетичні характеристики при задовільних частотних характеристиках. Однак, їх використання накладає серйозні вимоги до системи керування батареєю (СКБ). Для забезпечення нормальної роботи акумуляторної батареї, в процесі її експлуатації потрібно постійно відслідковувати рівень заряду кожного з елементів батареї, запобігаючи його виходу за допустимі межі. Крім того, необхідно вирівнювати значення напруги кожного з послідовно включених елементів між собою (балансувати рівень заряду).

Таблиця 4.1 – Характеристики найбільш поширених типів АКБ

Тип батареї	Lead-acid	NiCad	NiMH	LiCoO ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
Номинальна напруга, В	2	1,2	1,2	3,7	3,7	3,3
Відносна вартість	1	2	2,4	4	6	>10
Безпечність використання	Висока	Висока	Висока	Низька	Середня	Висока
Екологічність використання	Низька	Низька	Висока	Висока	Висока	Висока
Ефект пам'яті	-	+	+	-	-	-
Енергоефективність	60%	75%	70%	90%	90%	95%
Час життя (год.)	400	500	500	>500	>500	>2000
Час зарядження, год	12	1.5	4	2-4	2-4	<2
Саморозрядження, % / міс.	20	30	35	10	10	8

4.2 Розрахунок електрохімічного накопичувача енергії

На рис. 4.1 а, представлена структурна схема БСНЕ до складу якої входить накопичувач, узгоджуючий DC/DC перетворювач та контролер заряду. DC/DC перетворювач заряджає або розряджає накопичувач, використовуючи

стратегію керування, відповідно до напруги в контактній мережі та заряду накопичувача (SoC). На рис. 4.1 б показана еквівалентна схема батарейних модулів, що складається з чотирьох елементів [40].

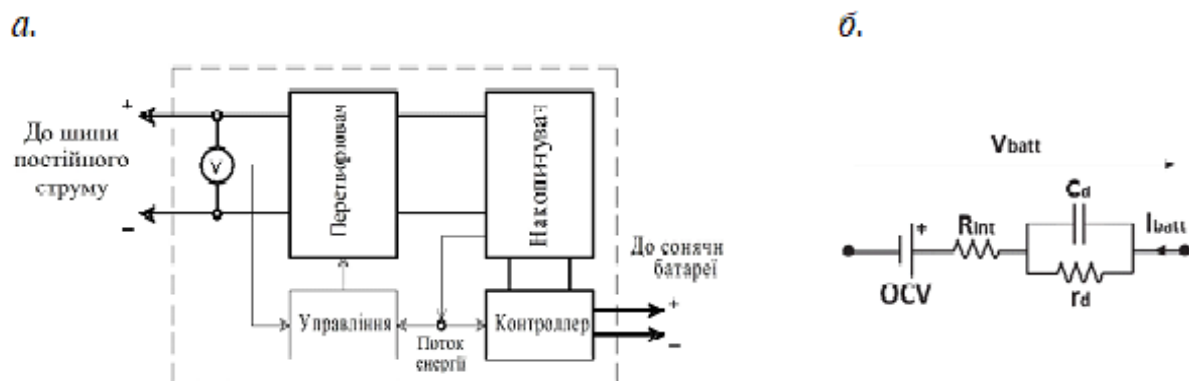


Рисунок. 4.1 - Батарейна система накопичення енергії:
а – структурна схема; б – еквівалентна схема заміщення

Ідеальне джерело напруги являє собою напругу холостого ходу (OCV), на яку впливає рівень заряду накопичувача (SoC); послідовний резистор R_{BH} являє собою внутрішній опір накопичувача, в той час як паралельна RC ланка (r_d і C_d) описує передачу заряду та ємність відповідно.

Електричну модель накопичувача можна описати виразами 4.1 – 4.4, де перший вираз представляє закон Кірхгофа для схеми заміщення (рис. 4.1 б), другий – поліном n -го ступеня відношення між напругою холостого ходу та рівнем заряду накопичувача. Третє рівняння моделює закон зміни рівня заряду, відповідно до величини зарядного струму, і четвертий вираз – диференціальне рівняння, що описує роботу паралельної RC ланки.

$$U_n(t + dt) = OCV(t) - R_{BH} I_H(t) - u_d(t + dt); \quad (4.1)$$

$$OCV(SoC) = a_n SoC^n + a_{n-1} SoC^{n-1} + \dots + a_0; \quad (4.2)$$

$$SoC(t+dt) = SoC + \frac{U_H(t+dt)I_H(t)dt}{3600 \cdot C_H}; \quad (4.3)$$

$$u_d(t+dt) + r_d C_d \left(\frac{u_d(t+dt) - u_d(t)}{dt} \right) = \begin{cases} r_d I_H(t) \\ 0 \end{cases}, \quad (4.4)$$

де u_d – напруга паралельної RC ланки;

dt – крок дискретизації за часом;

$a_n \dots a_0$ – коефіцієнти інтерполяції;

C_H – ємність накопичувача.

Ємності БСНЕ для кожного ПП визначаються в залежності від величини струму підсилюючого струму напрутязі всього часу проходження ЕРС. Знехтувавши величиною енергії рекуперації (припустивши що до БСНЕ не надходила енергія, а лише споживалася напрутязі всього інтервалу руху), для дискретних вимірів струму споживання, ємність накопичувача визначається [41]:

$$C_H = \int_0^T \sum_0^{n-1} |i_n| dt, \quad (4.5)$$

де C – ємність БСНЕ, А·год;

n – порядковий номер дискретного виміру;

i – миттєве значення струму споживання БСНЕ, А.

На основі струмів підсилення (рис. 4.2), отриманих в результаті проведених розрахунків у пункті 3.4, визначено ємності накопичувачів (табл. 4.2).

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

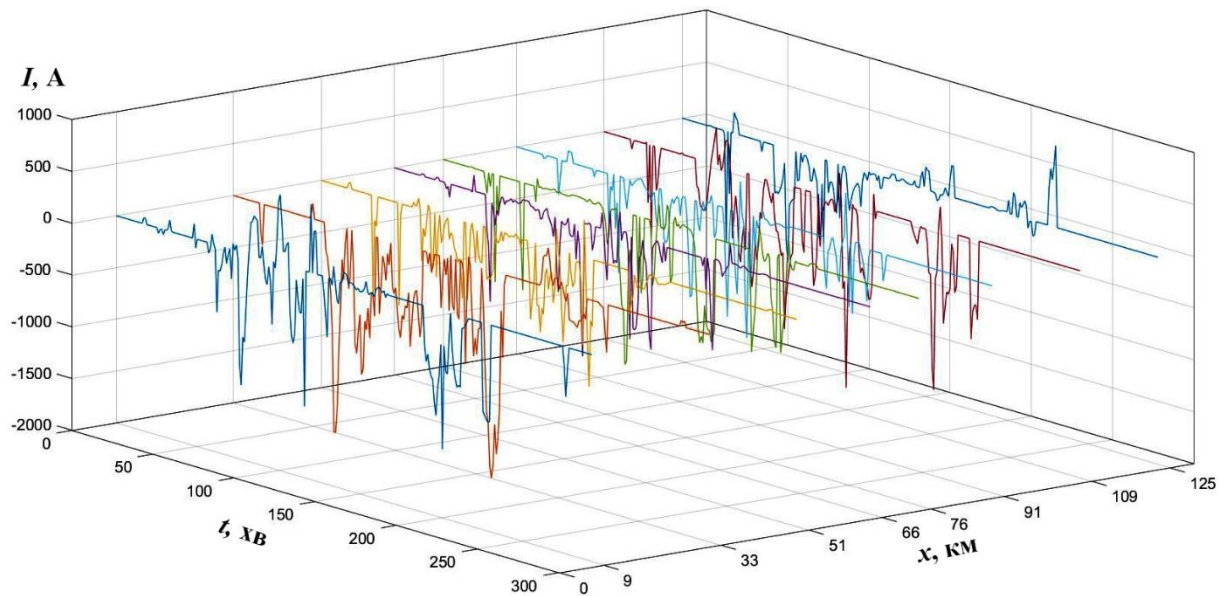


Рисунок 4.2 - Струми підсилюючих пунктів

Таблиця 4.2 – Ємності накопичувачів підсилюючих пунктів

№ ПП	ПП1	ПП2	ПП3	ПП4	ПП5	ПП6	ПП7	ПП8
Ємність, А·год	705	1210	565	390	630	455	990	425

Внутрішній опір акумуляторної батареї R_{BH} нелінійний і залежить від струму навантаження i_a опору електроліту R_{el} , а також від опору електродів R_e [42]:

$$R_{BH}(i_a, \tau_e, C) = R_{el}(\tau_e, C) + R_e(C) + bE(i_a, \tau_e, C)I_a^{-1}. \quad (4.6)$$

Опір електроліту R_{el} обернено пропорційний його температурі τ_e . Залежність R_{el} від ступеня заряду нелінійна, причому вона зменшується, коли накопичена в акумуляторі енергія збільшується. Опір електродів обернено пропорційний активній поверхні електрода, і таким чином обернено пропорційний миттєвій енергоємності C акумулятора. Останній член у формулі (4.12) визначає

опір поляризації, а величина, що входить в його склад b – коефіцієнт, що позначає відносну зміну ЕРС поляризації на затискачах гальванічного елемента, пов'язаний з протіканням струму i_a в співвідношенні до ЕРС E для номінальної енергоемності.

Для будь-якої температури τ з діапазону робочих температур акумулятора його номінальну ємність можна визначити як:

$$C_{\tau} = \frac{C_{\tau n}}{1 + a |(\tau_{en} - \tau_e)|}, \quad (4.7)$$

де a – температурний коефіцієнт ємності, [43];

$C_{\tau n}$ – номінальна ємність накопичувача при температурі τ_{en} і завантаженні номінальним струмом. Звідси:

$$\begin{aligned} \frac{C_{\tau}}{C_{\tau n}} &= \frac{1}{1 + a |(\tau_{en} - \tau_e)|} = c_{\tau}(\tau) \\ \text{для } |(\tau_{en} - \tau_e)| &= \infty \quad c_{\tau} = 0, \\ \text{для } \tau_{en} &= \tau_e \quad c_{\tau} = 1. \end{aligned} \quad (4.8)$$

Коефіцієнт $c_{\tau}(\tau)$ можна визначити як температурний показник зміни номінальної потужності. Корисна ємність акумулятора залежить від температури, а також від струму навантаження і від часу протікання струму. Її можна визначити за формулою:

$$C_{\tau}(i_a, t, \tau_e) = C_{\tau}(t) - K_w[i_a(t), t]; \quad (4.9)$$

або

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$C_{\tau}(i_a, t, \tau_e) = C_{\tau}(t, i_a) - \int_0^t i_a(t) dt, \quad (4.10)$$

де $K_w[i_a(t), t]$ – нелінійна функція, яка визначає дійсний заряд, на який зменшилась ємність акумулятора під час його розряду;

$\int_0^t i_a(t) dt$ – корисний заряд, відібраний з акумулятора за час t ;

$C_{\tau}(t, i_a)$ – ємність акумулятора представлена як функція температури і струму навантаження.

Залежність, що визначає зміну ємності акумулятора як функцію навантаження, або так зване рівняння загасання ємності акумулятора, характеризує відома формула Пойкерта [42, 43]:

$$K_w = i_a^{n(\tau)} t, \quad (4.11)$$

де K_w – розрядна ємність акумулятора;

t – час розряду акумулятора;

$n(\tau)$ – постійна, що залежить від типу акумулятора (для свинцевого $n = 1,27 - 1,34$; для лужного акумулятора $n = 1,1$).

Дійсний рівень заряду акумулятора на основі наведених формул можна записати як:

$$k = \frac{C_u}{C_{\tau n}} = \frac{c_{\tau} \eta_A(i_a, \tau_e) C_{\tau n} - \int_0^t i_a(t) dt}{C_{\tau n}}, \quad (4.12)$$

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

де $\eta_A(i_a, \tau_e) = \left(\frac{i_a(t)}{I_n} \right)^{-\beta(\tau_e)}$ – коефіцієнт корисності накопиченої енергії, для

$i_a \leq I_n$ може приймати значення більше 1;

β – коефіцієнт, який визначається на основі рівняння (4.13).

Для номінально зарядженого акумулятора $k = 1$ і тому:

$$k = c_\tau(\tau_e) \eta_A(i_a, \tau_e) - \frac{1}{C_{\tau n}} \int_0^t i_a(t) dt. \quad (4.13)$$

Використовуючи (4.12), ми отримуємо формулу, що визначає внутрішній опір акумулятора, як функцію ступеня його заряду:

$$R_{\text{вн}}(i_a, t, \tau_e) = \frac{l}{k} + b \frac{E(k)}{i_a(t)}, \quad (4.14)$$

де l – коефіцієнт, значення якого можна визначити за формулою:

$$l = E |\Delta U_w - b| k(\tau_e, I_n) I_n^{-1}, \quad b \approx 0,03; \quad \Delta U_w \approx 0,02, \quad (4.15)$$

де $E(k)$ – миттєве значення ЕРС поляризації, яке залежить від ступеня заряду акумулятора.

Вище наведені формули дають можливість аналітично визначити параметри, які необхідні для імітаційного моделювання електрохімічного накопичувача енергії.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

5 РОЗМІЩЕННЯ, ВИБІР НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ТА МОДЕЛЮВАННЯ

5.1 Розміщення накопичувача електричної енергії

Нині полігон залізниць постійного струму складає близько половини електрифікованих ліній і саме на цих ділянках завдання підвищення ефективності енергії рекуперації стоїть особливо гостро. Обумовлено це, в першу чергу, необхідністю створення умов для прийому енергії рекуперації шляхом відповідній організації руху потягів або шляхом розміщення спеціальних приймачів енергії рекуперації. Організація руху потягів дозволяє максимально повно використати енергію рекуперації шляхом такого взаємного розміщення потягів, при якому прийом енергії рекуперації потягу, що знаходиться в режимі рекуперативного гальмування, забезпечується поїздами, що знаходяться на міжпідстанційній зоні або суміжних зонах в режимі тяги [44].

Розрахунки показують, що для кожної ділянки залізниці і заданих розмірів руху існує деяка безліч оптимальних нормативних графіків руху, що дозволяють забезпечити мінімальний рівень споживання електричної енергії на тягу потягів по тягових підстанціях ділянки залізниці. Слід зазначити, що можливості зміни розкладу дотримання потягів обмежені, що пояснюється впливом ряду чинників, наприклад розмірами руху на ділянці або кількістю шляхів станції відправлення.

Вказані і подібні обмежень у цілому ряді випадків не дозволяють забезпечити прийом енергії рекуперації в повному об'ємі. Виходячи з цього, доцільно розглянути розміщення спеціальних приймачів рекуперації в системі тягового електропостачання. Відомі випадки підвищення напруги в контактній мережі вище 4000 В на ділянках з експлуатацією електровозів серій ВЛ10 і ВЛ11 [45], при що водять до спрацьовування захисту від підвищеної напруги на електрорухомому складі і зупинці потягу. Застосування приймачів енергії рекуперації в системі тягового електропостачання дозволяє забезпечити зміну напруги в контактній мережі в допустимих діапазонах.

Вказані проблеми можуть бути вирішені шляхом розміщення в системі тягового електропостачання (СТЕ) спеціальних приймачів енергії рекуперації

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46

(інвертори або поглинаючі пристрої) [46, 47]. Поява різних типів промислових накопичувачів електроенергії (НЕЕ), що випускаються, а також розширення номінального ряду їх місткості дозволяє розглянути використання НЕЕ як приймач енергії рекуперації в системі тягового електропостачання або на електрорухомому складі. Якщо розміщення інверторів в системі тягового електропостачання пов'язане з тяговими підстанціями, то НЕЕ можливо розміщувати на об'єктах, безпосередньо не пов'язаних із зовнішньою системою електропостачання, наприклад, на постах секціонування. Це дозволяє у ряді випадків наблизити приймач енергії до місць з найбільшою частотою використання рекуперативного гальмування або об'ємам рекуперації.

5.2 Вибір накопичувача електричної енергії

Нині відомі декілька типів НЕЕ - електрохімічні, суперконденсатори і кінетичні [48], застосування яких може розглядатися в СТЕ [49-56]. Найбільш доцільним нині представляється використання в СТЕ НЕЕ двох типів - ємнісного (суперконденсатор) і електрохімічного (акумуляторна батарея), в силу ряду характеристик [57], чи створеного на їх основі гібридного накопичувача енергії. Застосування накопичувачів енергії пройшло апробацію на тягових підстанціях метрополітену [58, 59] і показало досить високу енергетичну ефективність. У ой же час слід враховувати, що застосування НЕЕ на тягових підстанціях містить ряд недоліків, до яких можна віднести відсутність ефектів розвантаження живлячих ліній тягової підстанції[60].

Вказаних недоліків позбавлений випадок розміщення НЕЕ на електрорухомому складі, але він зв'язаний зі значними інвестиціями в модернізації електрорухомого складу. Одним з переважних варіантів розміщення НЕЕ є пост секціонування, що знаходиться в межах ординат рекуперативного гальмування, сприяючий розвантаженню живлячих ліній тягових підстанцій, зниженню втрат напруги і потужності в тяговій мережі, зменшенню нагріву дротів тягової мережі. Як показують розрахунки, в порівнянні з варіантом розміщення НЕЕ на ТП,

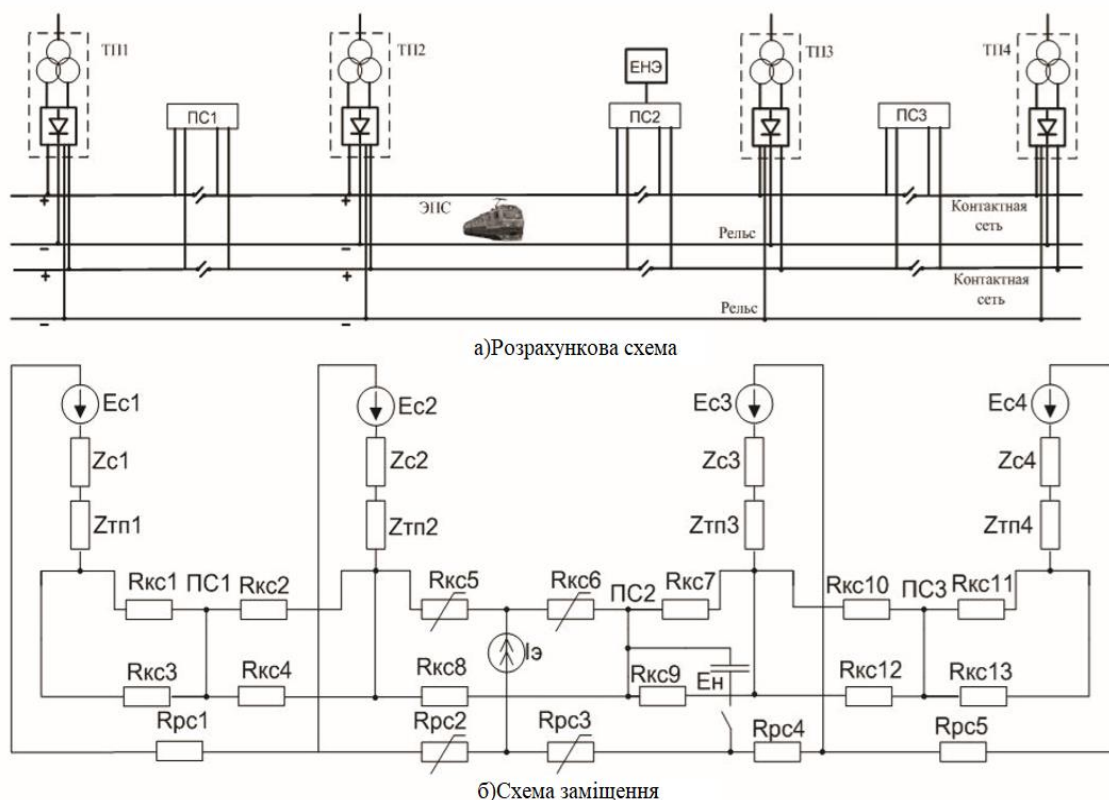
					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

розміщення накопичувачів на посту секціонування (ПС) по ряду енергетичних параметрів є ефективнішим [61, 62].

Рішення поставленої задачі на основі критерія мінімуму витрати електроенергії по тяговим підстанціям дозволяє отримати варіант виконання нормативного графіку руху потягів, а також розміщення приймачів енергії рекуперації в системі тягового електропостачання на основі планованих розмірів руху і наявних обмежень з боку інфраструктури. При рішенні задачі приймемо такий нормативний графік руху потягів, який забезпечує сприятливі умови для застосування рекуперації, але не дозволяє реалізувати абсолютний рівень рекуперації. Реалізація абсолютного рівня рекуперації в даному випадку здійснюватиметься з допомогою накопичувача енергії так, щоб забезпечити зниження рівня електроспоживання по тягових підстанціях.

5.3 Розміщення накопичувачів електричної енергії на посту секціонування та його моделювання

Розглянемо завдання оцінки ефективності розміщення НЕЕ на посту секціонування однієї із зон міжпідстанційної ділянки залізної дороги. Для вирішення завдання проаналізуємо роботу однієї з ділянок залізниці постійного струму, що складається з трьох міжпідстанційних зон, на яких реалізований вузловий паралельний режим живлення. Розрахункова схема ділянки (рис. 5.1, а) містить чотири тягові підстанції (ТП1-ТП4), три пости секціонування (ПС1-ПС3) і одиниця електрорухомого складу. До шин поста секціонування ПС2 підключений накопичувач електроенергії ємнісного типу (ЕНЕ) [63]. Схема заміщення для розрахункової ділянки представлена на рис. 5.1, б.



а) - розрахункова схема; б) - Схема заміщення

Рисунок 5.1 - Розрахункова схема ділянки

На витрату електроенергії на тягу робить вплив безліч чинників, таких як: швидкість руху, маса потягу, профіль шляху, температура навколишнього повітря та ін. [64, 65]. Для рішення даного завдання приймемо, що указані чинники не схильні до змін і в цьому аспекті рішення задачі не враховуються. З метою оцінки ефективності застосування ЕНЕ на посту секціонування виконаємо імітаційне моделювання руху потягів по розглядуваній ділянці. Визначимо параметри схеми заміщення, прийнявши наступні характеристики даної ділянки. Тип контактної підвіски по обох шляхах ділянки - М 95+2МФ 100 з посилюючим дротом 2А 185; рейкова мережа складається з рейок Р65 з міжпутними з'єднувачами. Кожна підстанція обладнана двома 12 ти пульсовими перетворюючими агрегатами, що працюють паралельно, двома знижувальними трансформаторами типу ТДН 16000/110 і двома перетворюючими трансформаторами типу ТРДП 16000/10ЖУ1.

Схема випрямного перетворювача - дванадцятипульсова, послідовного типу. На виході перетворювача встановлений аперіодичний згладжуючий фільтр. Визначення основних параметрів роботи для даної ділянки залізниці ґрунтується на проведенні тягових розрахунків потягу [66] і виконанні на їх основі електричних розрахунків. Найбільш точні результати дозволяють отримати методи, що враховують параметри тягового навантаження і взаємне розташування потягів на міжпідстанційних зонах [67-69].

Оцінку ефективності застосування ЕНЕ на посту секціонування ПС2 виконаємо за критерієм скорочення сумарної витрати електричної енергії по тягових підстанціях з урахуванням витримки обов'язкових вимог до системи тягового електропостачання і пропуску потягів (мінімальному і максимальному рівням напруги в контактній мережі, перевантаженні трансформаторів і випрямних перетворювачів підстанцій, нагріву дротів тягової мережі). Енергетичні параметри системи тягового електропостачання оцінимо по середньому рівню напруги в контактній мережі і тяговому навантаженню підстанцій.

Приймемо ряд допущень для визначення параметрів даної схеми заміщення (див. рис. 5.1, б) :

1) Система напруги зовнішнього електропостачання є симетричною і синусоїдальною, миттєві значення напруги на вході тягових підстанцій визначаються по виразу (5.1) :

$$U_{a,b,c} = U_m \sin(\omega t + a_{a,b,c}), \quad (5.1)$$

де U_m - амплітудне значення напруги;

$a_{a,b,c}$ - фаза напруги а, b, с відповідно.

2) Параметри знижувальних і перетворювальних трансформаторів, а також випрямляючих перетворювачів на тягових підстанціях є ідентичними і визначаються по виразу (5.2) :

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z_{ТПі} = Z_{ІТ} + Z_{ІрТ} + Z_{ВІ}, \quad (5.2)$$

де $Z_{ТПі}$ - вхідний опір і-ї підстанції, Ом;

$Z_{ІТ}$ - опір знижувального трансформатора, Ом;

$Z_{ІрТ}$ - опір пре освітніх трансформаторів; $Z_{ВІ}$ - опір випрямлячів, Ом.

3) Система зовнішнього електропостачання має нескінченну потужність виходячи з умов (5.3) :

$$S_{к.з.} \rightarrow \infty, Z_{с1,2,3,4} = 0, \quad (5.3)$$

де $S_{к.з.}$ - потужність короткого замикання системи зовнішнього електропостачання, кВт;

$Z_{с1, 2,3,4}$ - опір системи зовнішнього електропостачання, Ом.

4) Пости секціонування ПС1-ПС3 розміщені на середині міжпідстанційних зон, при цьому опори елементів контактної мережі визначаються за виразом (5.4) :

$$R_{км} = \frac{L_{МПЗ}}{2} \cdot r_{0к.м}, \quad (5.4)$$

де $L_{МПЗ}$ - довжина міжпідстанційної зони, км;

$r_{0к.м}$ - опір 1 км контактної мережі, Ом.

5) При русі електровоза від ТП2 до ПС2 опору контактною і рейковою мереж від ТП2 до електровоза і від електровоза до ПС2 змінюються лінійно і для заданих параметрів тягової мережі визначаються за виразом (5.5) :

$$R_{км5,6;рс2,3} = 0,000374 \cdot t, \quad (5.5)$$

де t - час, що пройшов з початку моделювання, с.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

6) Швидкість електровоза при русі по ділянці міжпідстанційної зони приймається постійною (5.6) :

$$V_e = const . \quad (5.6)$$

7) Струм електровоза змінюється відповідно до проведених тягових розрахунків або отриманих в ході вимірів даних і є функцією часу (5.7) :

$$I_e = f(t) . \quad (5.7)$$

8) Напруга на накопичувачі енергії на посту секціонування змінюється залежно від часу заряду/розряду і напруги в контактній мережі і є функцією декількох змінних (5.8) :

$$E_n = f(U_{км}, t, I_{рек}) , \quad (5.8)$$

де $U_{км}$ - напруга в контактній мережі в місці підключення поста секціонування, В;

t - час заряду/розряду накопичувача енергії, з;

$I_{рек}$ - величина струму рекуперативного гальмування, А.

Отримання параметрів тягового навантаження віз можна двома способами - шляхом проведення тягових розрахунків або шляхом отримання цих вимірів на електрорухомому складі. Для оцінки ефективності застосування ЕНЭ скористаємося другим способом - результатами вимірів електричних параметрів руху потягу з електровозом серії 2ЭС10 по ділянці залізниці з параметрами (профіль шляху, параметри системи тягового електропостачання та ін.), ідентичними тим, які прийняті для схеми заміщення (рис. 5.2).

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

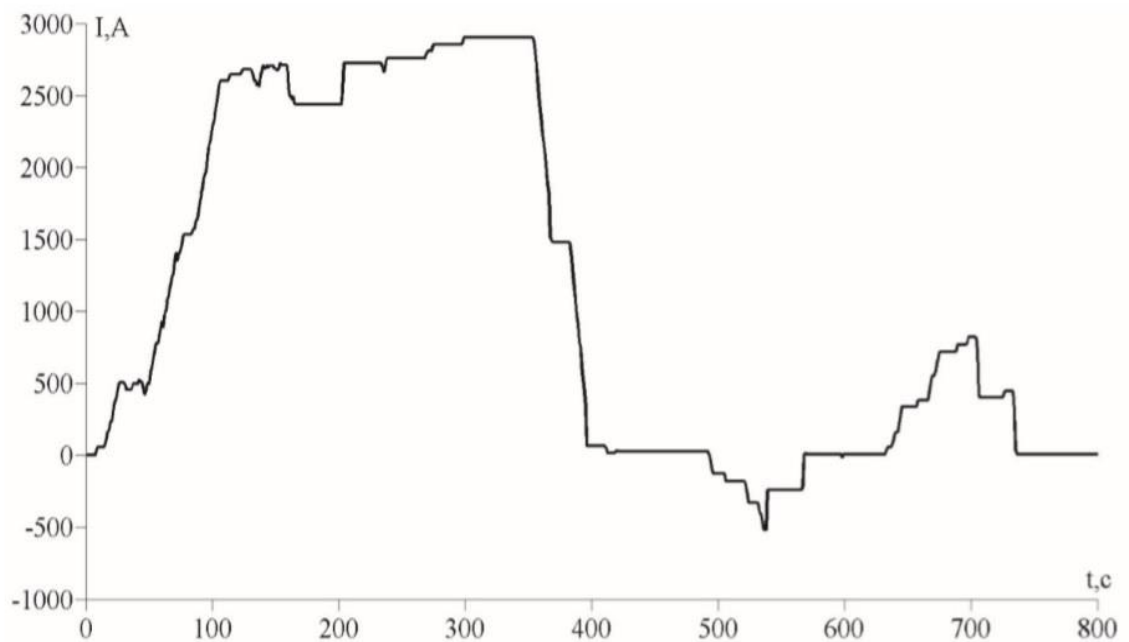


Рисунок 5.2 - Графік зміни тягового навантаження при проходженні потяга

Для заданих параметрів схеми заміщення і тягового навантаження виконаємо імітаційне моделювання за допомогою програмного комплексу MatLab, що дозволяє проводити дослідження режимів роботи системи тягового електропостачання [70]. Імітаційна модель для оцінки ефективності застосування НЕЕ на посту секціонування, реалізована в MatLab, представлена на рис. 5.3.

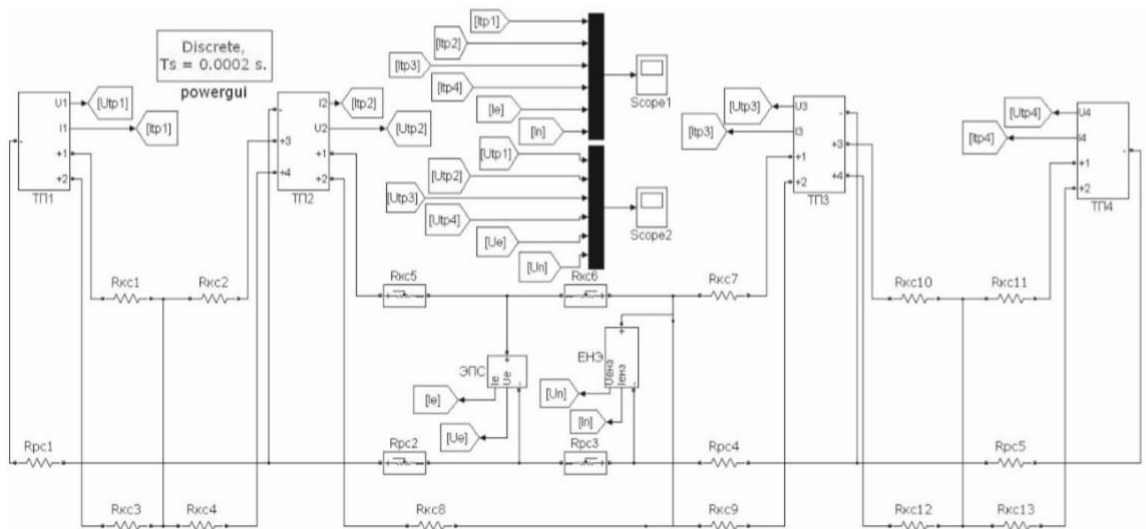


Рисунок 5.3 - Імітаційна модель системи тягового електропостачання

Вона складається з чотирьох блоків - тягових підстанцій (ТП 1-4), включає тягову мережу, представлену опорами контактної (Rкc1 - 13) і рейковою (Rрc1 - 5) мереж. Опори контактної мережі Rкc5 - 6 і опори рейкової мережі Rрc2 - 3 міжпідстанційні зони представлені блоками змінних резисторів. Електровоз і ЕНЕ на ПС представлені блоками ЕРС і ЕНЕ.

У блок ЕРС входить кероване джерело струму, що дозволяє регулювати тягове навантаження відповідно до отриманих експериментальних даних системи реєстрації параметрів руху електровоза 2ЭС10 (див. рис. 5.2), а також облаштування захисту від підвищеної напруги, яка перериває процес рекуперативного гальмування досягши напруги на струмоприймачі вище 4000 В. Струми $I_{tr1, - 4}$ і напруга $U_{tr1 - 4}$, вимірювані на усіх тягових підстанціях, електровоз (I_e, U_e) і ЕНЕ (I_n, U_n), реєструється блок Score 1 і Score 2. У зв'язку зі значним об'ємом обчислень для збільшення швидкості розрахунків була проведена дискретизація моделі. Дискретизація виконана методом Тастина (інтеграція методом трапецій з фіксованим кроком). Величина кроку дискретизації складає 0,2 мс.

Схема заміщення тягової підстанції даної ділянки залізниці в Matlab представлена на рис. 5.4 і включає три джерела змінної напруги (фази А, В, С), що імітують трифазну зовнішню мережу.

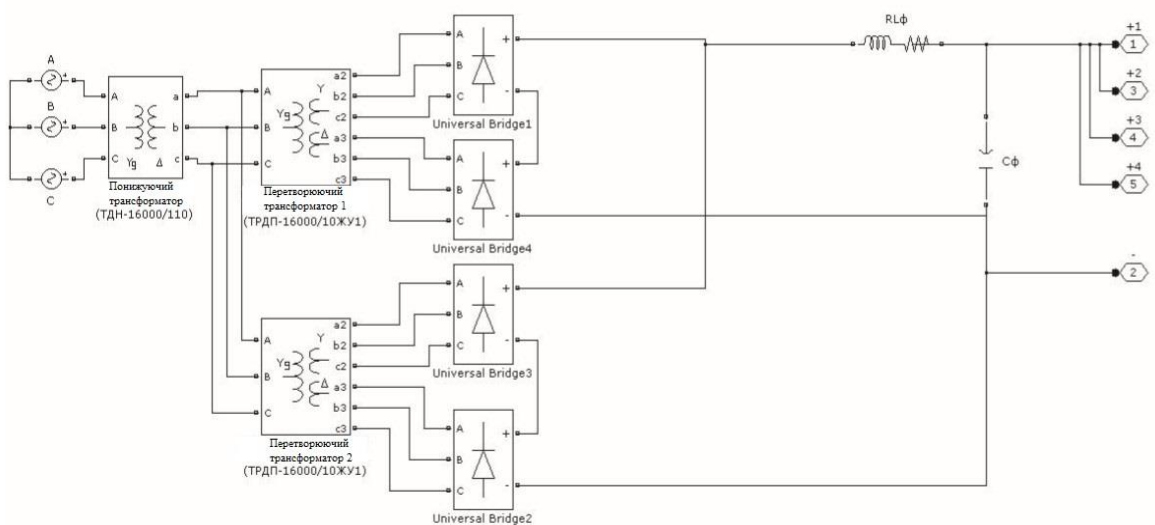


Рисунок 5.4 - Схема заміщення тягової підстанції в MatLab

Для моделювання понижуючих і перетворювальних трансформаторів використовувалися блоки Three Phase Transformer (Two Windings) і Three Phase Transformer (Three Windings) відповідно. Для приведення параметрів схеми заміщення, знижувального трансформатора і двох перетворюючих, до базових величин використовувалася методика, що дозволяє робити ці розрахунки за паспортними даними [71]. Моделювання 12 ти пульсових випрямлячів виконувалося на основі 6 ти пульсових блоків Universal Bridge.

Варіанти підключення ЕНЕ до шин поста секціонування і параметри тягового навантаження визначають схему підключення і схему заряда-розряда накопичувача енергії. Для оцінки ефективності застосування ЕНЕ в системі тягового електропостачання розглянемо схему підключення ЕНЕ за допомогою зустрічно включених IGBT транзисторів [63]. Схема заміщення представлена моделі в MatLab набере вигляду, приведенного на рис. 5.5.

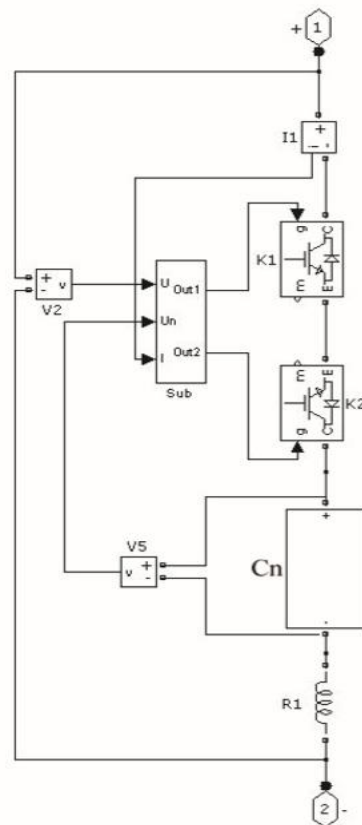


Рисунок 5.5 - Схема підключення накопичувачів електричної енергії в MatLab

Схема складається з блоків IGBT/Diode K1 і K2, моделюючих IGBT транзистори і призначених для управління режимами роботи ЕНЕ. Накопичувач моделюється блоком Cn, що складається з конденсаторів, що дозволяють змінювати сумарну ємність.

Управління режимами роботи ЕНЕ обґрунтовано на вимірах рівня напруги на шинях поста секціонування і накопичувачі. Управління режимами роботи реалізується так, щоб забезпечити перехід в режим заряду ЕНЕ при підвищенні номінального рівня напруги (при рекуперативному гальмуванні) і перехід в режим розряду при падінні рівня напруги на шинях поста секціонування до мінімального значення. Результати вимірів використовуються в системі управління пристроєм по заданому алгоритму. У основу алгоритму роботи (рис. 5.6) даної схеми покладені виміри струму і напруги за допомогою датчиків струму і напруги в контактній мережі в точці приєднання ПС, а також на ємнісному накопичувачі.

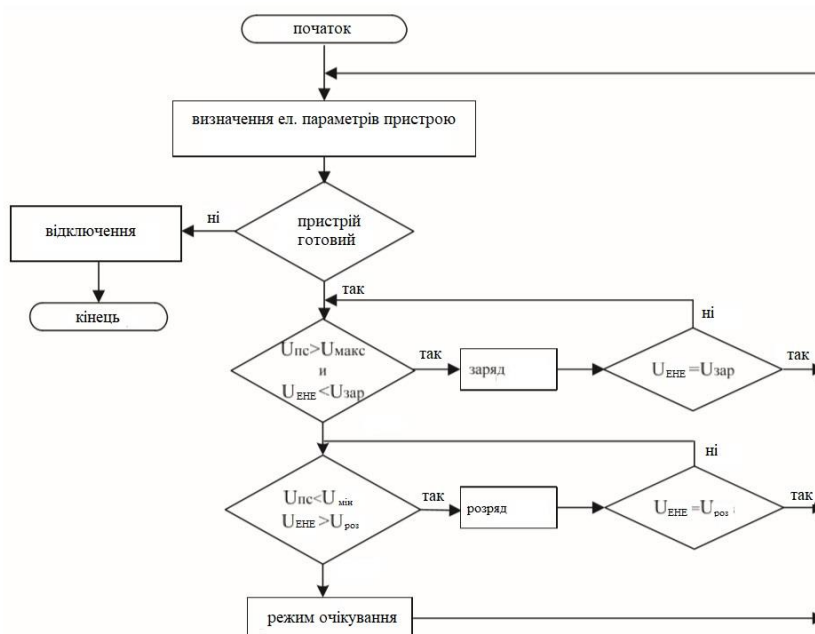


Рисунок 5.6 - Алгоритм роботи НЕЕ на посту секціонування

На основі вимірів вказаних величин здійснюється перемикання транзисторних ключів для реалізації процесу заряду, розряду або переходу в режим очікування.

Робота ЕНЕ на посту секціонування здійснюється таким чином. У початковий момент часу визначається готовність пристрою до роботи, потім - рівень напруги на шинах ПС. При підвищенні напруги на шинах поста секціонування $U_{пс}$ до рівня $U_{макс}$, рекуперативного гальмування потягу, що відповідає режиму, і напрузі на накопичувачі $U_{ЕНЕ}$ нижче максимально можливого рівня $U_{зар}$, пристрою, що відповідає повному заряду, ЕНЕ переходить в режим заряду. При пониженні напруги на шинах поста секціонування $U_{пс}$ до рівня $U_{мін}$ і напрузі на накопичувачі $U_{ЕНЕ}$ вище за рівень $U_{роз}$, що забезпечує розряд, ЕНЕ переходить в режим розряду в контактну мережу. За відсутності умов для переходу ЕНЕ в режим розряду або заряду накопичувач на посту секціонування знаходиться в режимі очікування. Алгоритм роботи передбачає припинення роботи ЕНЕ в аварійних режимах.

Перспективи розвитку систем тягового електропостачання, що позначилися, у напрямі "smart grid" дозволяють розглянути побудову алгоритму роботи накопичувача електроенергії на посту секціонування з урахуванням рівнів напруги і тягових навантажень на шинах тягових підстанцій. В цьому випадку використання накопичувачів дозволить регулювати напругу не лише на посту секціонування, але і на тягових підстанціях. Імітаційна модель дозволяє отримати результати для режимів розряду і заряду ЕНЕ, коли електрорухомий склад знаходиться в режимах тяги і рекуперативного гальмування відповідно. У моделі враховані вимоги до захисту електрорухомого складу, відповідно до яких забезпечується перехід з режиму рекуперації в режим гальмування при збільшенні напруги на струмоприймачі до 4000 В.

Графіки зміни напруги, струму на ТП2 і ЕРС при розряді ЕНЕ, а також при його подальшому заряді представлені на рис. 5.7.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

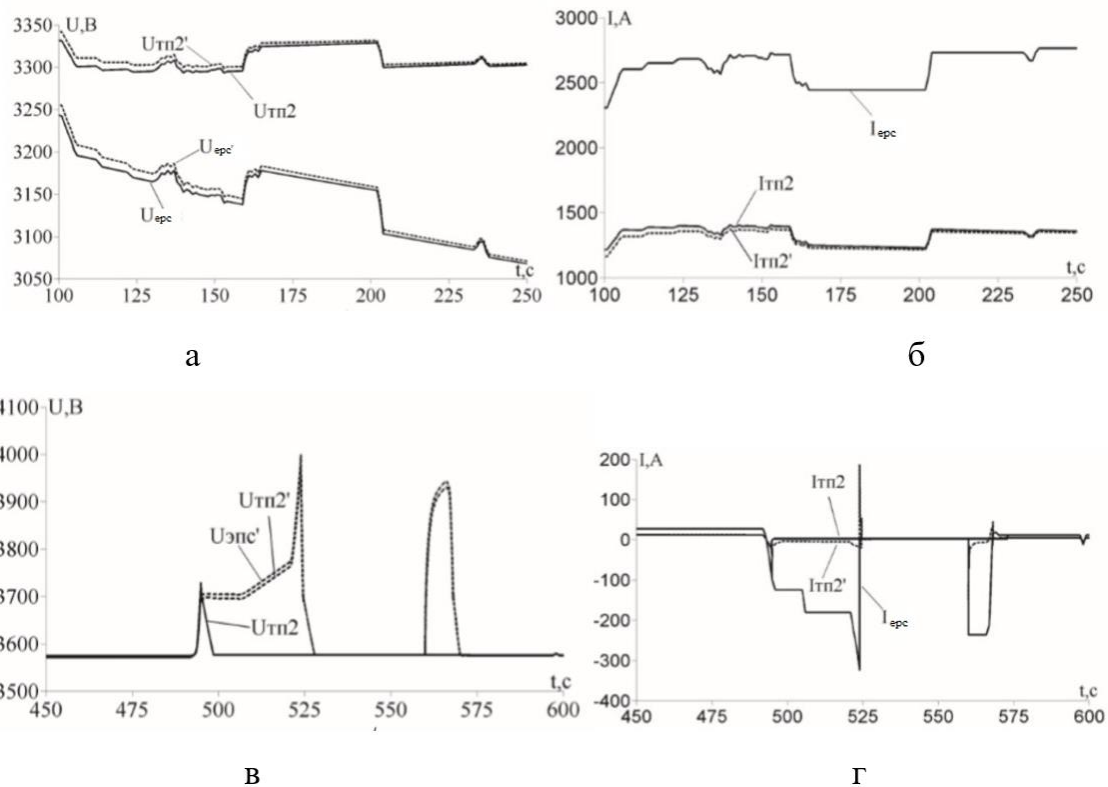


Рисунок 5.7 - Графіки зміни напруги і струму на тяговій підстанції ТП2 і електрорухомому складі при розряді(а,б) і при послідовному заряді НЕЕ(в,г)

З рисунка видно, що під час переходу електрорухомого складу з режиму тяги в режим рекуперативного гальмування починає підвищуватися напруга на шинах тягової підстанції U_{TP2}' (на відміну від рівня U_{TP2} , спостережуваного при відключеному ЕНЕ на посту секціонування) і на струмоприймачі електровоза U_{epc}' (на відміну від рівня U_{epc} , спостережуваного при відключеному ЕНЕ на посту секціонування). Аналогічним чином змінюються струми приєднань тягової підстанції ТП2 і електрорухомого складу. Досягнувши напруги на струмоприймачі рівня 4000 В або повному заряді ЕНЕ відбувається припинення процесу заряду.

Графіки зміни напруги і струму на ЕНЕ, встановленому на посту секціонування ПС2, представлені на рис. 5.8.

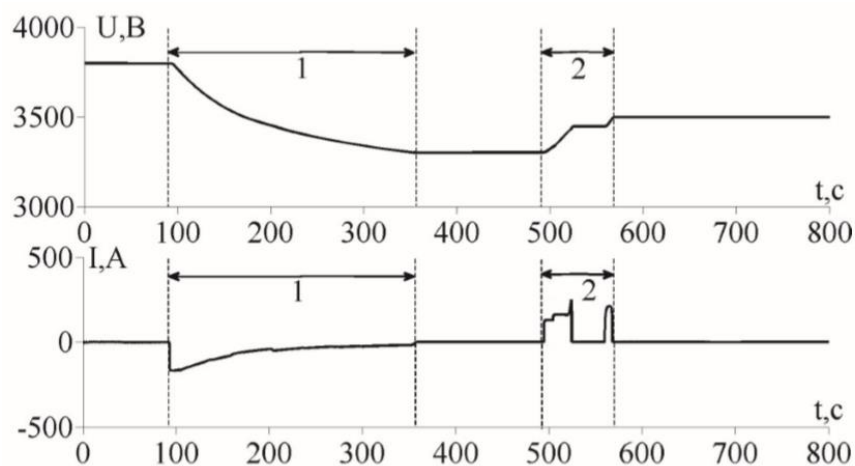


Рисунок 5.8 - Графіки зміни напруги і струму на НЕЕ при його розряді і подальшому заряді

Зона 1, в якій відбувається падіння напруги на струмоприймачі ЕРС з 3750 до 3250 В, відповідає режиму розряду ЕНЕ на посту секціонування ПС2. При переході в режим рекуперативного гальмування відбувається збільшення напруги на шинах поста секціонування ПС2 і ЕНЕ переходить в режим заряду (зона 2). У зоні 2 спостерігається два цикли заряду ЕНЕ, що пояснюється обмеженою місткістю накопичувача. Повторне застосування рекуперативного гальмування дозволяє відновити процес заряду ЕНЕ.

Результати імітаційного моделювання для розглянутої ділянки залізниці з накопичувачем енергії на посту секціонування ПС2 представлені в таблиці. Застосування НЕЕ на ПС дозволяє поліпшити основні енергетичні характеристики режиму роботи системи тягового електропостачання. Зокрема, встановлено, що середня напруга за даний інтервал часу на приєднаннях контактної мережі суміжних підстанції можна збільшити на 3 %, а середній рівень тягового навантаження понизити на 2 %. Пропонований варіант застосування ЕНЕ для даного випадку дозволяє скоротити втрати в контактній мережі на 0,85 % і сумарну витрату електроенергії на 1,71 %.

Слід зазначити, що дана імітаційна модель ділянки залізниці (див. рис. 5.3) для аналізу протяжних ділянок може бути розширена до меж підрозділу, залізниці або полігонів звернення потягів у вантажному і пасажирському русі. В цьому випадку схема заміщення має бути доповнена необхідною кількістю елементів системи тягового електропостачання, а також необхідною кількістю електрорухомого складу різного типу відповідно до заданих розмірів руху.

В ході імітаційного моделювання виявлений ряд недоліків схеми підключення накопичувача енергії на посту секціонування, до яких слід віднести неможливість як додаткового підзаряду накопичувача енергії малими струмами в моменти часу, коли навантаження в контактній мережі відсутнє або мале, так і зміни роботи накопичувача енергії залежно від рівня тягового навантаження. Ці і інші недоліки можуть бути усунені вдосконаленням схеми підключення накопичувача енергії до поста секціонування.

Таблиця 5.1 - Результати імітаційного моделювання

Назва	Витрата, кВт*г		Напруга на струмоприймачі, В		Струм, А		Зміна струму і напруги, %	
	Без НEE	З НEE	Усер без НEE	Усер з НEE	Ісер без НEE	Ісер з НEE	U	I
ТП1	208,02	205,70	3523,0	3532,2	270,7	267,6	0,26	-1,15
ТП2	406,50	402,33	3388,0	3476,7	548,4	542,3	2,62	-1,11
ТП3	154,76	149,53	3427,7	3546,4	199,4	192,6	3,46	-3,44
ТП4	77,34	74,61	3458,5	3566,1	98,5	95,0	3,11	-3,55
ЕРС	781,45	775,38	3377,5	3388,3	1117,0	1108,7	0,32	-0,74

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

Результати моделювання взаємодії електрорухомого складу і системи тягового електропостачання на прикладі однієї з експлуатаційних ділянок залізниці постійного струму показали, що застосування накопичувачів енергії на посту секціонування дозволяє скоротити рівень електроспоживання по тягових підстанціях за рахунок підвищення ефективності рекуперативного гальмування на величину 1,7 %. Одночасно з цим застосування накопичувачів дозволяє збільшити середній рівень напруги на струмоприймачі електрорухомого складу і понизити середній струм тягового навантаження на підстанції, що сприяє збільшенню пропускної і провізної спроможності ділянки залізниці.

Оцінка впливу енергоємності і режимів роботи накопичувачів електроенергії на енергетичну ефективність системи тягового електропостачання в умовах різних профілів шляху, швидкостей руху і мас потягів, а також в умовах побудови інтелектуальних систем тягового електропостачання вимагає проведення додаткових досліджень.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила технічної експлуатації залізниць України. "Офіційний вісник України" 1997
2. Марквардт К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.
3. Аржаников Б.А. Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография / Б. А. Аржанников, 2010 – 176 с.
4. Sokol, Y. The specificity of electrical energy storage unit application / Y. Sokol et al. // IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – 2017. – doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524
5. Є. М. Косарєв, «Регулювання напруги в контактній мережі електрифікованих залізниць постійного струму», Електрифікація транспорту, № 9, с. 37 – 43, 2015.
6. А. Н. Марикин, «Стабилизация напряжения на токоприемниках подвижного состава электрифицированных железных дорог постоянного тока», автореф. дис. д-ра техн. наук, 05.22.07, Петербургский государственный университет путей сообщения, Санкт-Петербург, Россия, 2008.
- 7 Р. И. Мирошниченко, «Сравнительная оценка способов усиления системы постоянного тока 3 кВ», Вестник Всесоюзного научно-исследовательского института ж. д. транспорта, №1, с. 1 – 12, 1973.
- 8 Б. А. Бесков, Б. Е. Геронимус, В. Н. Давыдов, М. Е. Крестьянов, Г. Г. Марквард, Г. А. Минин, Проектирование системы электроснабжения электрических железных дорог: учебное пособие, Москва, Трансжелдориздат, 1963.
- 9 В. А. Кисляков, «Сравнительная оценка технических показателей различных способов усиления электрифицированных линий постоянного тока» Сборник трудов МИИТа, № 604, с. 3 – 21, 1978.
- 10 М. И. Векслер, и др., Усиление устройств тягового электроснабжения, Москва, Транспорт, 1984.

					02.15.ЕС1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

11 В. Г. Сиченко, Ю. Л. Саєнко, Д. О. Босий, Якість електричної енергії у тягових мережах електрифікованих залізниць, Дніпро, Україна: ПФ Стандарт-Сервіс, 2015.

12 Б. А. Аржанников, И. О. Набойченко, «Совершенствование системы и устройств тягового электроснабжения», Евразия вести, № 9, с. 22 – 23, 2015.

13 Б. А. Аржанников, Система управляемого электроснабжения электрифицированных железных дорог постоянного тока: монография, Екатеринбург, Россия: УрГУПС, 2010.

14 М. Т. Шалимов, Г. П. Маслов, Г. С. Магай, Современное состояние и пути совершенствования систем электроснабжения электрических железных дорог, Омск, Россия, 2002.

15 А. В. Котельников, Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы, Москва, Россия: Интекст, 2002.

16 В. Г. Сиченко, Д. О. Босий, Є. М. Косарев, «Оптимізація керування режимом напруги в тяговій мережі постійного струму з підсилюючими пунктами», Вісник Вінницького політехнічного інституту, № 6, с. 95 – 103, 2015.

17 A. Shelag, Influence of voltage in 3 kV DC catenary on traction and energy parameters of the supplied vehicles, Radom, Poland: Spatium, 2013.

18 Транспорт (1980-2017): Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. Доступно: http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2005/tz/tz_rik/tz_u/ts_u.htm. Дата звернення: Жовт. 20, 2016.

19 IEEE Std 1887-2017, «Guide for Wayside Energy Storage Systems for DC Traction Applications», 2017.

20 Hitoshi Hayashiya & Shinya Kikuchi & Kazushi Matsuura & et al., «Possibility of energy saving by introducing energy conversion and energy storage technologies in traction power supply system». In: 15th European Conference «Power Electronics and Applications (EPE), 2013». Lille, France 2013.

21 Lee Hanmin, Kim Gildong, Lee Changmu, Joung Euijin, «Test of DC 1500 V Stationary Energy Storage System», International Journal of Railway, Vol. 5, No. 3, pp. 124 – 128, 2012.

22 Z. Li, S. Hoshina, N. Satake, M. Nogi, «DC/DC converter development for battery energy storage supporting railway DC feeder system» in 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, IEEE 2015, pp. 1655-1660.

23 T. Konishi, M. Tobita, «Fixed Energy Storage Technology Applied for DC Electrified Railway (Traction Power Substation)» in Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion, IEEE 2012, pp.1-6.

24 Vincenzo Galdi, Giuseppe Graber, Antonio Piccolo, Alfonso Capasso, Regina Lamedica, Alessandro Ruvio, «Energy management of Auxiliary Battery Substation supporting high-speed train on 3 kV DC systems» Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2015 International Conference on 22-25 Nov. 2015.

25 Ю. П. Гончаров, В. Г. Сыченко, Д. А. Босый, М. С. Пастушенко, Е. Н. Косарев, «Повышение эффективности функционирования тягового электроснабжения при применении возобновляемых источников электрической энергии», Problemy Kolejnictwa, czasopismo naukowe wydawane, № 162, с. 65 – 82, 2014.

26 Ю. П. Гончаров и др., «Система преобразования энергии, генерируемой в полосе отчуждения железной дороги с помощью солнечных панелей», Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки, №. 30, т. 2, с. 98 – 108, 2015.

27 Ю. П. Гончаров и др., «Система распределения питания с промежуточным звеном повышенной частоты для электрифицированных железных дорог», Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, № 38, с. 82 – 89, 2011.

28 Т. А. Заруцкая, «Исследование эффективности применения сверхпроводникового индуктивного накопителя энергии на тяговой подстанции

					02.15.EC1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						64
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

постоянного тока». автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук, Специальность 05.22.07, Ростов-на-Дону, 2004.

29 В. Н. Пунынин, В. Л. Никитин, «Условия эффективного использования емкостного накопителя энергии в системах тягового электроснабжения железных дорог», Электричество, № 1, с. 52 – 58, 1993.

30 В. Н. Пунынин, М. В. Шевлюгин, «Разработка энергосберегающих систем тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока 3,3 кВ с использованием накопителей энергии. Часть II Имитационная модель системы тягового электроснабжения с накопителями энергии», Фундаментальные и поисковые научно-исследовательские работы в области железнодорожного транспорта, № 921, с. 14 – 22, 1999.

31 В. П. Феокистов, М. Павелчик, «Повышение тягово-энергетической эффективности транспортных систем при помощи накопителей энергии», Транспорт, № 12, с. 21 – 26, 1999.

32 И. Л. Васильев, М. Е. Павличенко, «Выбор накопителя энергии для систем альтернативной энергетики», Електротехніка і електромеханіка, № 4 (1), с. 14 – 16, 2016.

33 Ibrahim, H., Ilincă, A., Perron, J., Energy Storage systems – Characteristics and comparisons, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Elsevier, 2007.

34 Hase, S., Konishi, T., Okui, A., Nakamichi, Y., Nara, H., Uemura, T., «Fundamental Study on Energy Storage System for DC Electric Railway System», in Power Conversion Conference, PCC Osaka 2002, pp.1456 – 1459.

35 Morita, G., Hase, S., Konishi, T., Nakamichi, Y., Nara, H., Uemura, T., «Verification Tests of Electric DoubleLayer Capacitors for Static Energy Storage System in DC Electrified Railway» in International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM 2008, pp.1017 – 1022.

36 Ise, T., Kita, M., Taguchi, A., «A Hybrid Energy Storage with a SMES and Secondary Battery», IEEE Transaction on Applied Superconductivity, №. 2, pp. 1915 – 1918, 2005.

					02.15.EC1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

37 Suzuki, S., Baba, J., Shutoh, K., Masada, E., «Effective Application of Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES) to Load Leveling for High Speed Transportation System», IEEE Transaction on Applied Superconductivity, №. 2, pp. 713 – 716, 2004.

38 Battistelli L., Ciccarelli F., Lauria D., Proto D., «Optimal design of DC electrified railway stationary storage system», in International Conference «Clean Electrical Power 2009», Capri, Italy, 2009.

39 В. Г. Сиченко та ін., «Дослідження режимів напруги в системі тягового електропостачання постійного струму», Електрифікація транспорту, № 11, с. 61 – 70, 2016

40 Yao Low Wen, J.A. Aziz, «Modeling of Lithium Ion battery with nonlinear transfer resistance», in Applied Power Electronics Colloquium (IAPEC), IEEE, pp. 104 – 109, 2011.

41 В. В. Замаруєв, Б. О. Стисло, Є. М. Косарєв, «Покращення якості електричної енергії в системі електроживлення залізничного транспорту шляхом застосування накопичувачів електричної енергії» Вісник Національного технічного університету «ХПІ», № 27 (1249), с. 360 – 364, 2017.

42 A. Szumanowski, «Akumulacja energii w napedach wielozródlowych», in Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Warszawa, s. 108, 1983.

43 A. Szumanowski, Akumulacja energii w pojazdach. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 1983.

44 Сидорова Н.Н., Третинников О.В., Феоктистов В.П. Повышение эффективности рекуперативного торможения в электрической тяге // Наука и техника транспорта. –2015. – № 1. – С. 19–22.

45 Влияние рекуперативного торможения на систему тягового электроснабжения / В.Т. Черемисин, А.С. Вильгельм, В.А. Кващук, В.Л. Незевак // Локомотив. – 2013. – № 8. С. 5–8.

46 Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. – М.: Транспорт, 1999. – 464 с. 5.

					02.15.EC1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						66
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- 47 Соколов С.Д. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. – М.: Транспорт, 1979. – 264 с.
- 48 Астахов Ю.Н. Накопители энергии в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1989. – 159 с.
- 49 Шатохин А.П. Перспективные места установки накопителей электрической энергии // Эксплуатационная надежность локомотивного парка и повышение эффективности тяги поездов: матер. 2-й Всеросс. науч. практ. конф. с междунар. участием. – Омск, 2014. – С. 162–168.
- 50 Nezevak V.L., Cheremisin V.T., Shatohin A.P. Evaluation of the Energy Efficiency of Energy Storage for Electric Rolling Stock of Railways DC // International Journal of Advanced Railway. – 2013. – V. 1. – № 2. – P. 53–56.
- 51 Denton T. Automobile Electrical and Electronic Systems. – L.: Routledge, 2010. – 463 p.
- 52 Williams M. Rice University's James Tour Group creates single surface material for energy storage, electronics // Nature Communications. – 2012. – № 3. URL: <http://news.rice.edu/2012/11/27/jamesbond-a-graphenenanotube-hybrid> 2/#sthash.9S22r6jx.dpuf (дата обращения: 10.04.2015).
- 53 Yan G., Li J., Zhang Y., Gao F., Kang F. Electrochemical polymerization and energy storage for poly [Ni (salen)] as supercapacitor electrode material // Journal of Physical Chemistry. – 2014. – V. 118. – № 19. – P. 9911–9917.
- 54 Sevilla M., Mokaya R. Energy storage applications of activated carbons: supercapacitors and hydrogen storage // Energy & Environmental Science. – 2014. – V. 7. – № 4. – P. 1250–1280.
- 55 Hybrid energy storage system based on supercapacitors and LI-ION Batteries / A. Zhuk, K. Denshikov, V. Fortov, A. Sheindlin, W. Wilczynski // Journal of Applied Electrochemistry. – 2014. – V. 44. – № 4. – P. 543–550.

56 Zherlitsyn A.G., Kanaev G.G. A gigawatt generator with an inductive energy storage discharge // Instruments and Experimental Techniques. – 2013. – V. 56. – № 3. – P. 287–288.

57 Бут А.Д. Накопители энергии. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

58 Стационарная система аккумулирования энергии рекуперации электроподвижного состава метрополитена на базе емкостных накопителей энергии / Ю.А. Бродский, А.И. Подаруев, В.Н. Пупынин, М.В. Шевелюгин // Электротехника. – 2008. – № 7. – С. 38–41.

59 Бычкова М.П. Система накопителей электроэнергии для повышения энергоэффективности в метро // Энергосовет. – 2011. – № 3. URL: http://www.energosovet.ru/bul_stat.php?idd=185 (дата обращения: 15.04.2015).

60 Незевак В.Л., Вильгельм А.С. К вопросу о выборе накопителя на участках постоянного тока с применением рекуперативного торможения // Инновационные проекты и новые технологии в образовании, промышленности и на транспорте: матер. науч. практ. конф. – Омск, 2013. – С. 30–36.

61 Незевак В.Л., Никифоров М.М., Черемисин В.Т. Выбор мест установки накопителей электрической энергии на полигоне постоянного тока железнодорожного транспорта по критерию энергоэффективности // Наука и транспорт. Модернизация железнодорожного транспорта. – 2013. – № 2 (6). – С. 14–18.

62 Вильгельм А.С., Незевак В.Л., Шатохин А.П. Сравнительная эффективность вариантов использования энергии рекуперации на железных дорогах постоянного тока // Наука и образование транспорту: матер. VI Междунар. науч. практ. конф. – Самара, 2013. – С. 243–246.

63 Пост секционирования постоянного тока с емкостным накопителем энергии: пат. Рос. Федерация № 147814; завл. 02.04.2014; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32. – 2 с.

					02.15.EC1922.РД.2020–ПЗ	Арк.
						68
Змн.	Арк.	№ докум.	Подпис	Дата		

64 Сидорова Е.А. Разработка системы нормирования расхода электроэнергии на тягу поездов на основе исследования статистических закономерностей: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1991. – 198 с.

65 Давыдов А.И., Никифоров М.М. Общие принципы сравнительного анализа эффективности использования электроэнергии на тягу поездов по участкам железных дорог // Наука и образование транспорту. – 2013. – Т. 1. – № 1. – С. 237–240.

66 Правила тяговых расчетов для поездной работы / под ред. А.Н. Долганов. – М.: Транспорт, 1985. – 287 с.

67 Марквардт К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

68 Вильгельм А.С., Гутников В.И., Никифоров М.М. Апробация расчетной модели системы тягового электроснабжения железных дорог постоянного тока для оценки потенциала энергоэффективности рекуперативного торможения // Известия Транссиба. – 2014. – № 1 (17). – С. 50–57.

69 Комяков А.А., Вильгельм А.С., Незевак В.Л. Совершенствование метода расчета системы тягового электроснабжения переменного тока // Известия Транссиба. – 2014. – № 3 (19). – С. 54–65.

70 Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems, Simulink. – СПб.: ДМК Пресс, 2008. – 288 с.

71 Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование выпрямителей. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2009. – 169 с.