

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ

Електротехніка та енергоефективність

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

другий (магістрський) рівень

(рівень вищої освіти)

на тему Підвищення енергоефективності міського
електротранспорту

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1419

спеціальності 141 Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(код і назва спеціальності)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

освітньої програми 141.00.11 Електроенергетика,

електротехніка та електромеханіка

(назва освітньої програми)

О.І. Боденчук

(ініціали та прізвище)

Керівник проф., доц., д.т.н. Артемчук В.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Директор ТОВ „Делта“ Колос А.В.

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя

2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут _____
Кафедра електротехніки та енергоефективності
Рівень вищої освіти другий (магістрський) рівень
Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма 141.00.11 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

« 09 » 12 2020 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

Боденчук Олександр Ілліч

(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Підвищення енергоефективності міського електротранспорту

керівник роботи Артемчук Віктор Васильович, д.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 14 » вересня 20 року № 1306-с

2 Строк подання студентом роботи 01 грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до роботи питома потужність суперконденсаторів 4300 Вт/кг; енергетична ефективність літійових батарей 85-95 %; середній тариф за 1 кВт·год. електроенергії – 2,45 грн/кВт год.; число циклів заряду-розряду – понад 100 тисяч

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Аналіз використання накопичувачів енергії на міському транспорті; методи оцінки енергоємності накопичувачів енергії; дослідження зарядно-розрядних режимів роботи накопичувачів енергії; удосконалення способів експлуатації накопичувачів енергії для міського електротранспорту

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Порівняння характеристик різних типів накопичувачів енергії; структурна схема взаємодії енергетичних інфраструктури міського електротранспорту та

електрифікованої залізниці; конфігурація дворівневої силової схеми гібридного ЕРС; силова схема гібридного ЕРС з літій-іонною акумуляторною батареєю

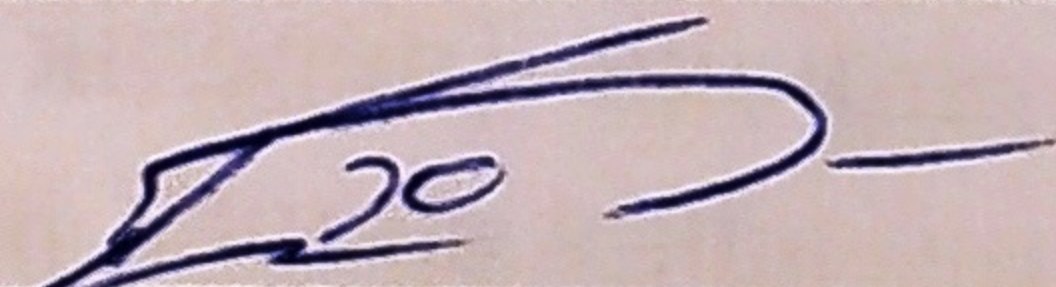
6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Артемчук В.В., професор		
Розділ 2	Артемчук В.В., професор		
Розділ 3	Артемчук В.В., професор		
Розділ 4	Артемчук В.В., професор		
Розділ 5	Артемчук В.В., професор		

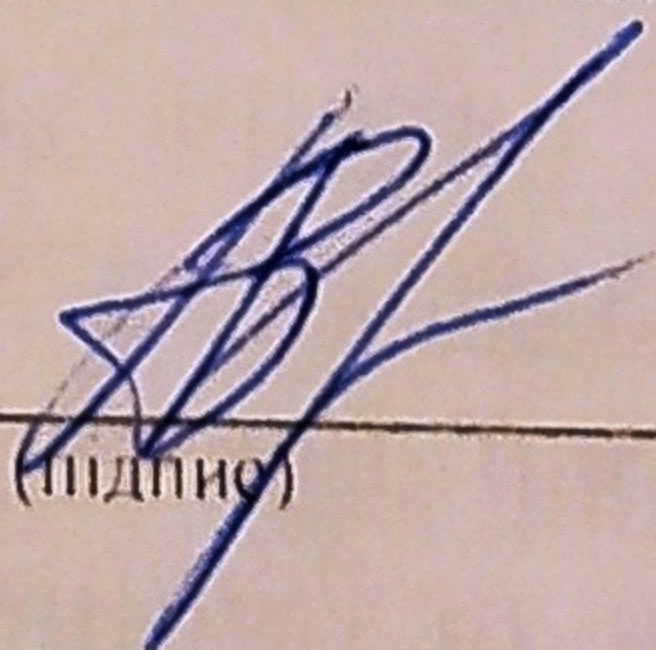
7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз використання накопичувачів енергії на міському транспорті		
2	Методи оцінки енергоємності бортових накопичувачів енергії для міського електротранспорту		
3	Дослідження зарядно-розрядних режимів роботи накопичувачів енергії на міському електротранспорті		
4	Удосконалення способів експлуатації накопичувачів енергії для міського електротранспорту		
5	Охорона праці та техногенна безпека		

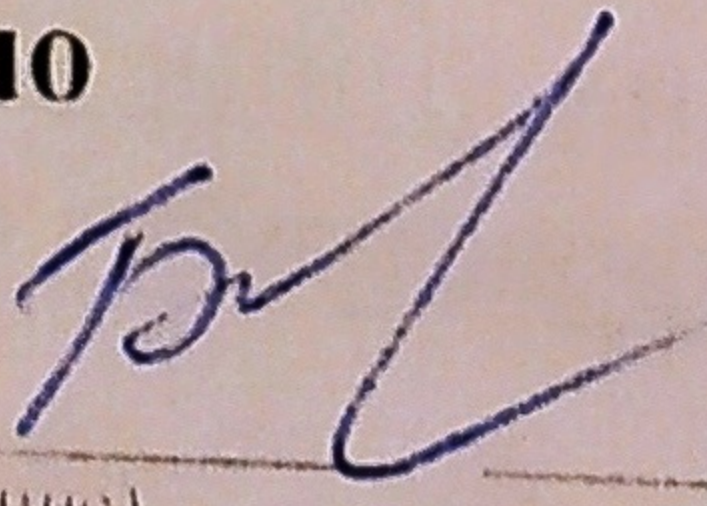
Студент 
(підпис)

О.І. Боденчук
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) 
(підпис)

В.В. Артемчук
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер 
(підпис)

С.В. Башлій
(ініціали та прізвище)

ЗМІСТ

Вступ	5
1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА МІСЬКОМУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ	7
1.1 Сучасний стан розвитку накопичувачів енергії і їх використання на транспорті	7
1.2 Використання сучасних ємнісних накопичувачів енергії	17
1.3 Використання накопичувачів енергії на основі акумуляторних батарей і комбінованих накопичувачів енергії	21
2 МЕТОДИ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЄМНОСТІ БОРТОВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	24
2.1 Характеристика електроспоживання міського електротранспорту і метод оцінки енергоємності бортового накопичувача енергії	24
2.2 Вплив місця установки накопичувача на енергетичні показники міського електротранспорту	29
2.3 Методика оцінки енергоємності бортового накопичувача енергії для вирівнювання графіка електроспоживання міського електротранспорту	35
2.4 Оцінка енергоємності бортового накопичувача енергії для акумуляції енергії зупинкового гальмування	38
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАРЯДНО-РОЗРЯДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА МІСЬКОМУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ	41
3.1 Ефективність енергообмінних процесів при використанні накопичувачів в системах електричного транспорту	41
3.2 Вплив енергообмінних режимів на ресурс накопичувачів енергії	50
3.3 Паралельна робота накопичувачів	57
4 УДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	61
Висновки	67
Список літератури	68
Додаток А	72

ВСТУП

Актуальність теми. Енергетична стратегія України на період до 2035 року передбачає зниження енергоємності всіх галузей вітчизняної промисловості. Транспортна система країни займає четверте місце серед споживачів енергоресурсів, де більше 85 % витрат енергії припадає на здійснення перевізного процесу. У собівартості перевезень транспорту з електричною тягою енерговитрати сьогодні оцінюються на рівні 21...23 % і в наслідок подорожчання енергоносіїв мають стійку тенденцію до зростання. Зниження або стримування цього показника вимагає постійного розвитку і вдосконалення енергозберігаючих технологій відповідно до нових можливостей сучасних технічних засобів та методів управління ними. При інтеграції України у європейський простір це є важливим елементом у реалізації програми ЄС «Пакет дій щодо боротьби зі зміною клімату та використання відновлюваної енергії», що ставить завдання перед європейськими країнами до 2020 р. знизити шкідливі викиди в атмосферу на 21 % порівняно з 1990 р.

Внаслідок глобальних екологічних та енергетичних проблем людства енергоємність функціонування транспортної системи залишається важливим предметом наукових досліджень, що потребує постійного аналізу та оцінки можливостей використання результатів технологічного прогресу. Перспективним напрямком зниження енергоємності, підвищення екологічності та енергетичних показників систем електрифікованого транспорту є використання силових накопичувачів енергії. Їх використання дозволяє знижувати коливання тягового навантаження, підвищити ефективність використання енергії рекуперації, знизити втрати енергії і встановлену потужність системи тягового електропостачання, а також забезпечувати автономний хід транспортного засобу на неелектрифікованих

ділянках або при тимчасових перебоях електропостачання.

З розвитком техніки та технологій, а також через глобальні екологічні та паливні проблеми автовиробники також почали вишукувати альтернативні види палива для автомобілів. Так 1997 року з'явився перший у світі масовий гібридний автомобіль Toyota Prius, для приводу якого застосовується двигун внутрішнього згорання сумісно з електродвигуном. Приблизно через 13 років з'явився електромобіль Tesla, здатний проїхати на одному заряді до 300 км. Саме поява автомобіля Tesla започаткувала еру автономного електричного транспорту. Після цього більшість автовиробників зі світовим ім'ям налагодили випуск електрокарів, працюючих від акумуляторних батарей. На сьогодні нараховується більше 3 млн. електромобілів та їх кількість неперервно зростає.

Лідером серед країн світу за темпами переходу на електромобілі є Норвегія, серед зареєстрованих 2,6 млн. авто близько 100 тис. припадає на електромобілі. В Україні експлуатується близько 4 тис. електромобілей. В Росії та Польщі зареєстровано по 700 електрокарів [1]. Поява автономного електричного транспорту завдячує розвитку технологій виготовлення пристроїв накопичення і зберігання енергії та перетворювальній техніці.

Метою роботи є аналіз способів підвищення енергетичної ефективності міського електротранспорту шляхом вибору раціональних параметрів накопичувачів енергії та ефективних режимів їх роботи.

Задачі дослідження:

- 1) Провести аналіз використання накопичувачів на сучасному міському електротранспорті та методів вибору їх параметрів.
- 2) Дослідити енергоефективність зарядно-розрядних процесів накопичувачів енергії міського електротранспорту в залежності від їх параметрів.

3) Вдосконалити спосіб заряду накопичувачів енергії для електробусів та тролейбусів з автономним ходом.

Наукова новизна. Досліджено ресурсозберігаючий та енергоефективний спосіб заряду бортових накопичувачів енергії міського електротранспорту при спільному використанні суперконденсаторів і акумуляторної батареї.

Практична значимість. Отримані співвідношення для розрахунку параметрів ефективного режиму заряду накопичувачів міського електротранспорту дозволяють підвищувати ресурс роботи накопичувачів.

1 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА МІСЬКОМУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ

1.1 Сучасний стан розвитку накопичувачів енергії і їх використання на транспорті

Одним з відомих напрямків зниження енергоємності та підвищення енергетичних показників систем електрифікованого транспорту є використання силових накопичувачів енергії [1, 2]. Через наявність в режимах електроспоживання коливань, що викликані інерційністю руху та можливістю рекуперативного гальмування, застосування накопичувачів енергії (НЕ) дозволяє згладжувати ці коливання, підвищувати ефективність використання рекуперації, знизити втрати енергії та встановлену потужність системи тягового електропостачання.

До використання енергоємних пристроїв вдаються також і автовиробники в результаті пошуку альтернативних видів палива для автомобілів. Цьому сприяє розвиток технологій виготовлення пристроїв накопичення і зберігання електроенергії та перетворювальної техніки. Через зростаючу кількість фактів використання енергоємних пристроїв виникає задача налагодження їх ефективної взаємодії з енергетичною інфраструктурою електрифікованого транспорту для зниження енергоємності перевізного процесу.

Система електротяги схильна до динамічних навантажень, тому перетворювач енергії повинен бути в змозі забезпечити необхідну енергію в будь-який час. Якщо доступний тільки один резервуар енергії (накопичувач), оптимальна робота стає проблематичною. Для того, щоб забезпечити вимоги покриття енергетичних піків, енергетичні резервуари часто робили з надлишковими параметрами (ємність, розміри), що призводило до неоптимальної їх роботи в звичайних режимах.

Накопичувачі енергії характеризуються двома основними параметрами:

щільність енергії і щільність потужності. В ідеалі, енергетичний резервуар повинен володіти повною мірою обома параметрами. Типовий енергетичний резервуар, такий як акумуляторна батарея, володіє високою щільністю енергії, але обмеженою щільністю потужності, в той час як нові компоненти, такі як суперконденсатори, пропонують невисоку щільність енергії, але надвисоку щільність потужності.

На даний час існує позитивний досвід експлуатації НЕ на метрополітенах і міському електротранспорті. На тягових підстанціях переважно використовуються інерційні механічні НЕ, як найбільш узгоджені з електромеханічними характеристиками транспортних навантажень. Комплекс з 2-5 енергоблоків дозволяє акумулювати енергію потужністю 1,5...2,5 МВт, що дозволяє забезпечувати пуск та розгін двох електропоїздів до швидкості 60 км/год [2]. Використання суперконденсаторних та надпровідних індуктивних НЕ в тягових мережах на даний час знаходиться на стадії експериментальної експлуатації.

Значення основних параметрів, що визначають властивості головних типів накопичувачів енергії, наведені в таблиці 1.1 [2-6].

Таблиця 1.1 – Енергетичні та розрядні показники різних типів НЕ

Тип НЕ		Питома енергія, Дж/г	Час виводу енергії, с
Зі статичною активною зоною	Хімічний	$10^2 \dots 10^5$	$1 \dots 10^5$
	Індуктивний	$1 \dots 10$	$10^{-3} \dots 10$
	Ємнісний	$0,1 \dots 0,5$	$10^{-6} \dots 0,1$
Зі динамічною активною зоною	Механічний	$10 \dots 10^3$	$1 \dots 10^3$
	Електромеханічний	$1 \dots 10$	$0,10 \dots 10$
	Електродинамічний	$0,05 \dots 1$	$10^{-3} \dots 0,1$

На рисунку 1.1 показано питомі характеристики деяких обраних типів НЕ, причому для порівняння ефективності їх застосування наведені питомі енергії

(відношення накопиченої енергії до маси накопичувача) та питомі потужності (відношення потужності заряду/розряду до маси накопичувача).

У таблиці 1.2 представлено основні характеристики суперконденсаторів разом з основними типами батарей. Відмінності характеристик полягають в питомій енергії і потужності, ефективності, життєвому циклі і вартості. Отже, доцільно створити комбінацію суперконденсаторів і батарей, що володіє потенційно високою щільністю енергії і потужності, також як і великим терміном служби.

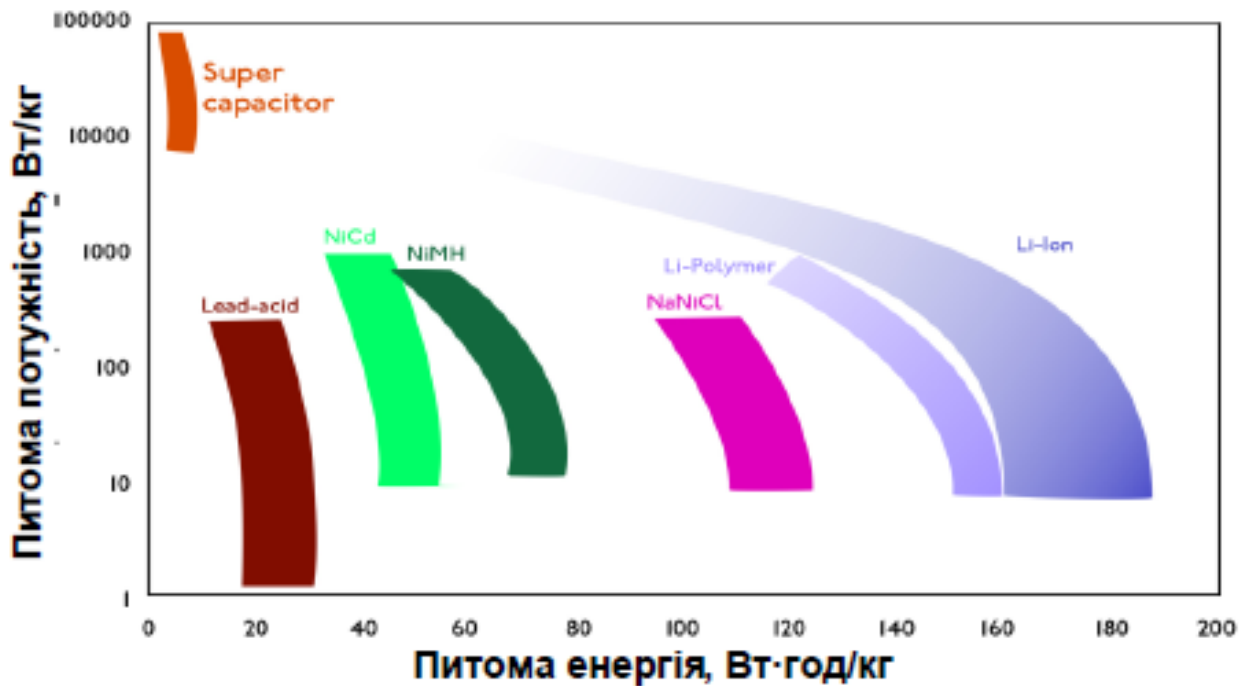


Рисунок 1.1 – Порівняння характеристик різних типів НЕ

Застосування накопичувачів енергії дозволяє розширити універсальність тягового рухомого складу, тобто можливість його експлуатувати в різних умовах, а саме на електрифікованих і неелектрифікованих ділянках, на відкритих ділянках шляху і в тунелях.

Таблиця 1.2 – Основні характеристики суперконденсаторів і акумуляторів

Параметр	Од. вимір	Суперконденсатор	Батарея, заснована на:			
			Свинець	Нікель	Натрій	Літій
Напруга комірки	В	2.7	2	1.2	2-2.5	3.5
Питома енергія	Вт*год /кг	4.3	30-35	50-80	90-130	80-200
Питома потужність	Вт/кг	4300	70-130	175-700	100-160	140-1000
Енергетична ефективність	%	92	70-85	60-85	80-90	85-95
Життєвий цикл	500 000	600-1000	1500-2000	600-1000	>1000	Життєвий цикл
Вартість	€/кВт*год	6000-12000	100-150	300-500	150-400	100-200
	€/кВт	9-17	12-15	52-54	248-281	44-52
Робоча температура	°С	-40...+65	0...+45	0...+50	+300...+350	-40...+60

На сьогодні високими темпами розвивається електромобілебудування як персонального так і громадського електротранспорту (рисунок 1.2). Так на 11-й щорічній найбільшій міжнародній виставці транспортної техніки і технологій InnoTrans 2017 (м. Берлін) було продемонстровано унікальний експонат – зчленований електробус моделі E433 Vitovt Max Electro (рис. 1.3, г) виробництва "Бел- коммунмаш". Свою техніку також представила польська компанія Solaris Bus & Coach S.A., голландська VDL Bus & Coach bv і німецько-турецька Sileo GmbH.



а) б) в) г)

Рисунок 1.3 – Сучасні електробуси різних виробників:

- а) польський Urbino 12 electric, компанія Solaris Bus & Coach S.A.;
- б) голландський VDL Citea SLF-120 Electric, компанія VDL Bus & Coach bv;
- в) німецько-турецький E-Bus S18, компанія Sileo GmbH;
- г) білоруський Vitovt Max Electro, компанія Белкоммунмаш

Електробус Urbino 12 electric, визнаний як «Автобус 2017 року» в Європі, оснащується порталним мостом ZF AVE130 з двома вбудованими електромоторами (номінальна потужність кожного – 60 кВт, пікова – 125 кВт) і літій-тітанатними акумуляторами [7], з трьома способами заряду: через мережу, через встановлений на даху пантограф під час зупинок на маршруті або за допомогою індукційної системи.

Електробус Citea SLF-120 Electric виробництва VDL Bus&Coach bv має схожу концепцію: оснащується літій-іонними акумуляторами [7], які можна заряджати через мережу між змінami, а також час від часу через пантограф під час роботи. Оптимальний варіант передбачає пробіг не менше 200 км на одній зарядці.

Компанія Sileo представила зчленований 18-метровий електробус E-Bus S18, який оснащений батареєю з 474 літій-залізо-фосфатних акумуляторів з ємністю 300 кВт·год, що достатньо для покриття на одній зарядці 250-кілометрової дистанції. Електроприводом є чотири електродвигуни потужністю 120 кВт кожен, що дозволяють розвивати швидкість до 75 км/год.

Білоруський Vitovt Max Electro, на відміну від інших електробусів, оснащений передовою системою накопичувачів електроенергії на базі суперконденсаторів (іоністорів), що дозволяє забезпечити рух по маршруту з швидкою підзарядкою на кінцевих зупиночних пунктах за допомогою спеціальних зарядних станцій [7]. Підзарядка проходить в автоматичному режимі через напівпантограф. При розряді накопичувачів не більше 30 % підзарядка триває приблизно 5...7 хвилин. За цей час електробус повинен встигнути накопичити енергію, достатню для проходження з повним навантаженням як мінімум 12-кілометрової дистанції. Суперконденсатори для електробусів "Белкоммунмаш" будуть випускатися спільно з китайською корпорацією "Сіньджу" (Xinzhu) в китайсько-білоруському індустріальному парку "Великий Камінь" (Смолевицький район). Суперконденсатори мають досить високі показники надійності і довговічності: число циклів заряду-розряду – понад 100 тисяч, ресурс – близько 10

років [7].

Також, відомий анонсований проект Hedgehog Applications використання в Голандії енергозберігаючої системи електроживлення зарядних станцій електробусів і електромобілів від акумуляторних батарей високої енергоємності (рисунок 1.4), встановлених на залізничних станціях, що одержують живлення від електричного гальмування електропоїздів [8].

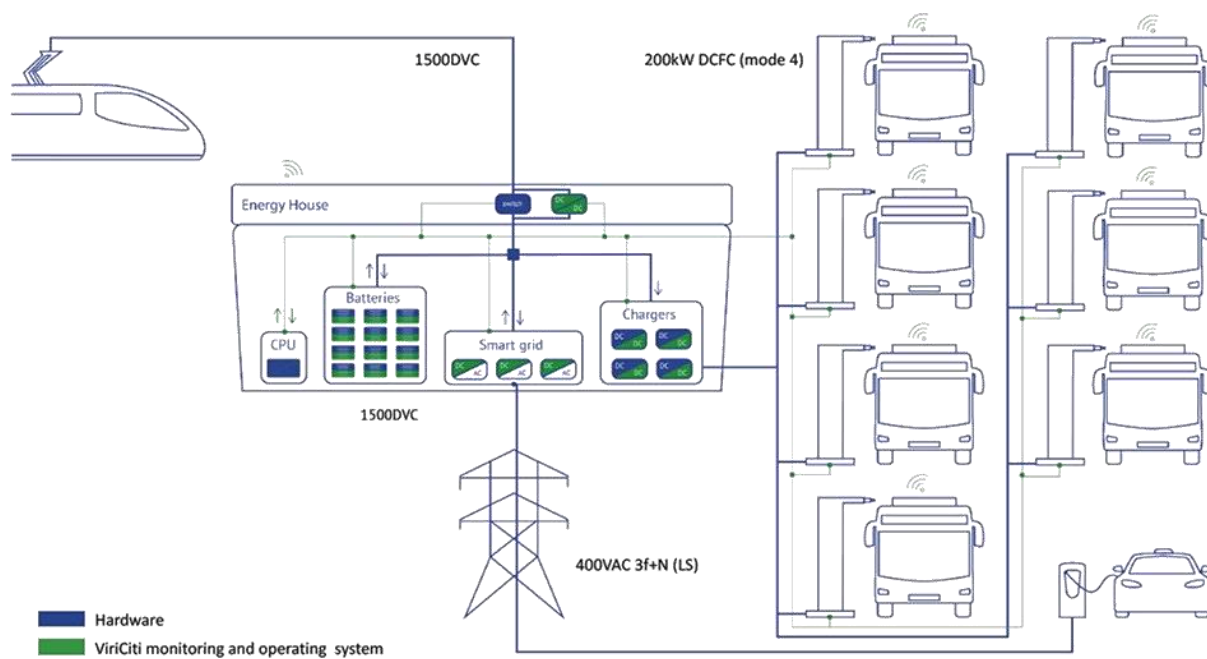


Рисунок 1.4 – Структурна схема взаємодії енергетичних інфраструктури міського електротранспорту та електрифікованої залізниці (Hedgehog Applications)

При цьому забезпечується гарантована рекуперація поїздів незалежно від наявності тягових навантажень на лінії. Кількість енергії, яка може бути отримана таким чином відповідає потребам автобусних компаній невеликих міст.

Для забезпечення автономного ходу електрифікованих транспортних засобів на комбінованому маршруті руху, що має ділянки, які не обладнані контактною мережею в [9] представлена розроблена бортова система накопичення (ESS) на базі суперконденсаторів, розмір якої відповідає вимогам по потужності і швидкості, навіть в самих несприятливих умовах. Масагабаритні показники і енергоємність вбудованого накопичувача безпосередньо залежить від необхідної швидкості руху

і довжини найбільшої ділянки не обладнаної контактною мережею. При цьому найгірший сценарій проходження неелектрифікованої ділянки буде при накладанні споживання максимальної потужності на власні потреби. Транспортний засіб із конденсаторною системою ESS повністю заряджається під час зупинок на станціях, щоб забезпечити необхідне прискорення при зрушенні і рух на ділянках де немає контактної мережі. Спрощена конфігурація випадку проходження по електрифікованих і неелектрифікованих ділянках ЕРС з ESS показана на рисунку 1.5.



Рисунок 1.5 – Спрощена конфігурація випадку проходження по електрифікованих і неелектрифікованих ділянках ЕРС з ESS накопичувачем

Алгоритм управління енергоспоживанням від контактної мережі і бортових накопичувачів енергії наступний:

1) на існуючих електрифікованих лініях енергія, що необхідна для прискорення гібридного ЕРС, споживається з контактної мережі і з суперконденсатора, тому чим вище заряд накопичувача енергії, тим вище потужність, яку ESS може поставити для прискорення гібридного ЕРС;

2) при наближенні гібридного ЕРС до станції, заряд суперконденсаторів бортових ESS має бути досить низькими, щоб бути готовими до максимального прийому енергії рекуперативного гальмування під час гальмування. Енергія гальмування головним чином залежить від маси поїзда, коефіцієнта гальмування і швидкості безпосередньо перед початком гальмування. Якщо заряд суперконденсаторів бортової системи зберігання недостатньо низький, частина

енергії гальмування буде використана для повної зарядки, а інша частина енергії гальмування повинна буде розсіюватися у вигляді тепла на гальмівних резисторах, що знижує ефективність управління енергією гальмування;

3) на високій швидкості заряд суперконденсаторного накопичувача енергії повинен прагнути до мінімального значення так як в процесі гальмування необхідно зберегти максимальну кількість кінетичної енергії.

На рисунку 1.6 показана конфігурація дворівневої силової схеми гібридного ЕРС з суперконденсаторним накопичувачем енергії [9].

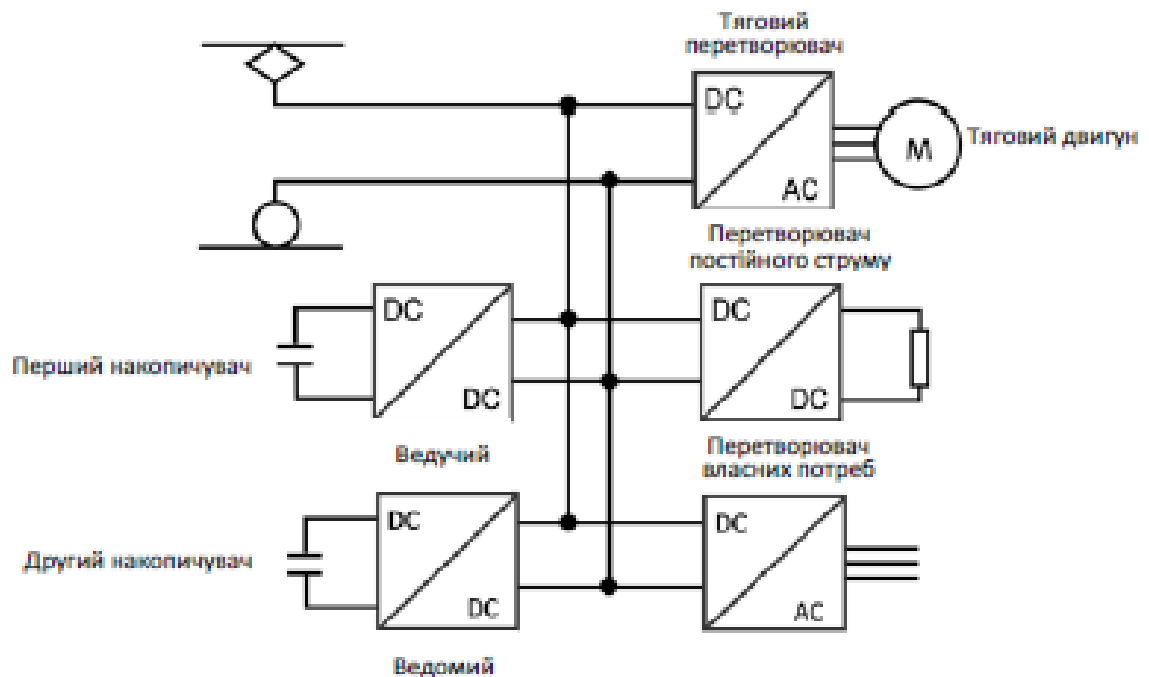


Рисунок 1.6 – Конфігурація дворівневої силової схеми гібридного ЕРС з суперконденсаторним накопичувачем енергії

Як видно з рис. 1.6, в силовій схемі є два вбудованих ESS на суперконденсаторах, один з яких є ведучим, а інший – відомим, кожен з яких має пов'язаний з ним DC-DC-перетворювач. На зупинках обидві системи зберігання заряджаються одночасно, уникаючи будь-яких відхилень напруги на суперконденсаторах ESS. При прискоренні гібридного ЕРС обидва ESS з'єднані з

контактною мережею і одночасно розряджаються, через перетворювачі постійного струму, на ланку постійного струму. Коли ЕРС починає гальмування, DC-DC перетворювачі змінюють режим на управління зарядом обох систем накопичення так, щоб напруга ланки постійного струму була вище напруги контактної мережі, але нижче максимально встановленого значення. При русі гібридного ЕРС по неелектрифікованій ділянці, бортові ESS повинні забезпечувати всі потреби ЕРС в енергії при прискоренні і гальмуванні. В цьому режимі ведучий DC-DC працює в режимі управління напругою, розряджаючи ESS1, щоб підтримувати напругу ланки постійного струму на заданому рівні. Одночасно ведений DC-DC управляє потужністю розряду ESS2, щоб підтримувати напруги обох ESS на одному рівні.

Якщо під час незапланованої зупинки заряд ESS зменшується нижче певного значення, блок кондиціонування повітря, який є найбільш енергоємною одиницею нетягового навантаження, відключається.

Для забезпечення достатньої потужності під час прискорення електровоза з суперконденсаторним накопичувачем, величина максимального SOC встановлюється на рівні 80 %, а для прийому рекуперативної енергії під час гальмування заряд може опускатися до 50%.

На рисунку 1.7 показана спрощена силова схема гібридного ЕРС з літій-іонною акумуляторною батареєю [10]. На електрифікованих ділянках заряд акумуляторної батареї підтримується на величині 45-55%, це дає можливість управляти високими значеннями потужності як під час прискорення, так і при гальмуванні. Перед початком руху по неелектрифікованій ділянці залізниці акумуляторна система зберігання повністю заряджається від контактної мережі. При русі по неелектрифікованій ділянці заряд батареї може зменшитися до 30%, щоб максимально використовувати енергію акумуляторного накопичувача.

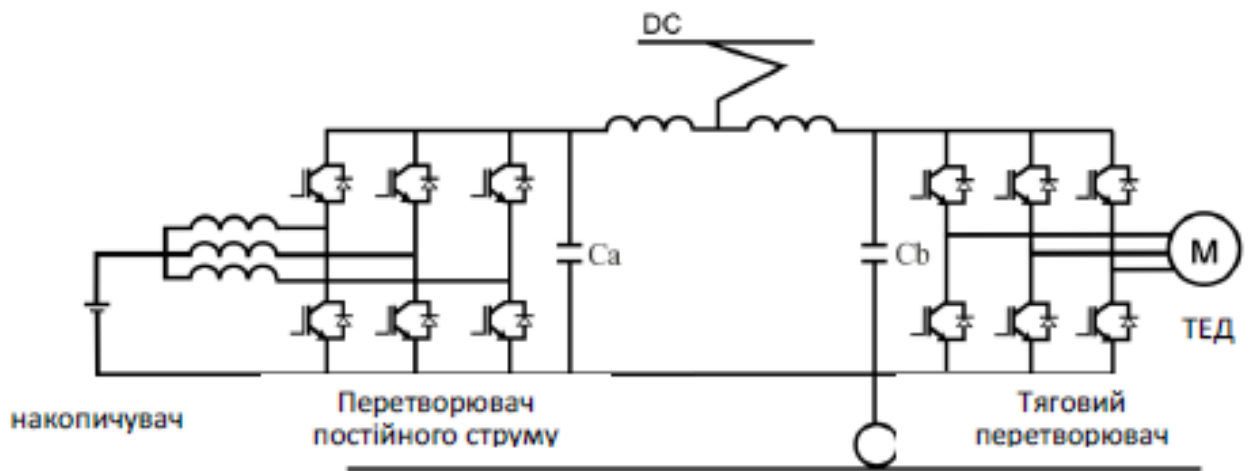


Рисунок 1.7 – Силова схема гібридного ЕРС з літій-іонною акумуляторною батареєю

У деяких розробках гібридного ЕРС використовується комбінація з двох вбудованих ESS, одна з яких складається з суперконденсаторів, а друга – з літій-іонних акумуляторних батарей. Алгоритми управління енергією, що реалізовані в цій гібридній топології, поділяють потужність і енергію між ESS в залежності від характеру тягового навантаження.

На рисунку 1.8 показана спрощена схема ЕРС з двома вбудованими ESS, одна з яких виконана з використанням суперконденсаторів, а інша з використанням літій-іонних акумуляторних батарей [11]. Енергія, необхідна для найдовшого пробігу без живлення від контактної мережі, визначає необхідну ємність системи зберігання, а максимальні очікувані потужності при розгоні і гальмуванні визначають ємність системи зберігання на суперконденсаторах.

В роботі [12] представлена стаціонарна система накопичення енергії з використанням потужних і літій-іонних акумуляторних батарей з малим внутрішнім опором і двонаправленими перетворювачами постійного струму, що дозволяють стабілізувати напругу контактної мережі і зберігати енергію гальмування. Струм, заряду і розряду системи зберігання залежить від напруги контактної мережі. Накопичувач відключається, коли напруга в контактній мережі

близька до номінальної. На рисунку 1.9 показано літій-іонний накопичувач в стаціонарному виконанні.

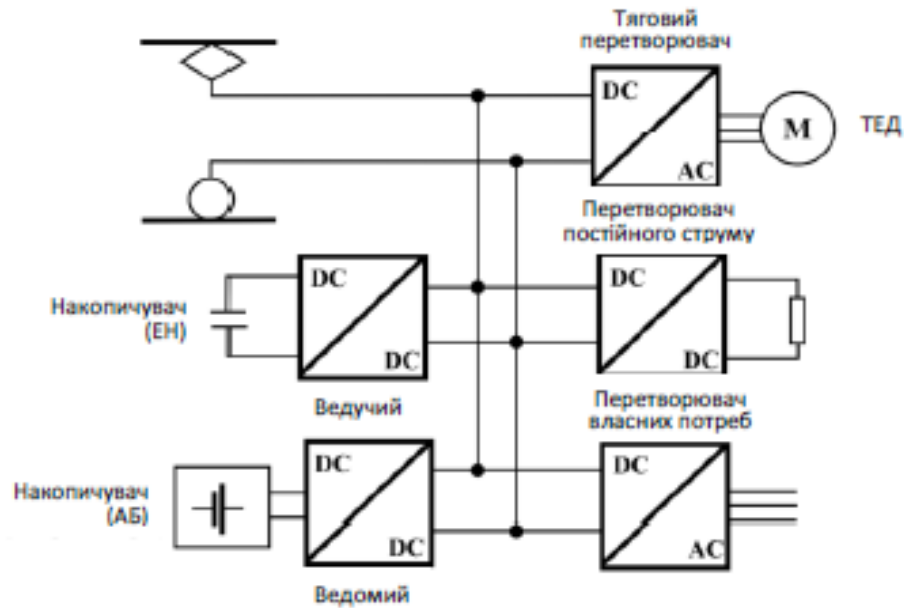


Рисунок 1.8 – Схема ЕРС з двома вбудованими ESS

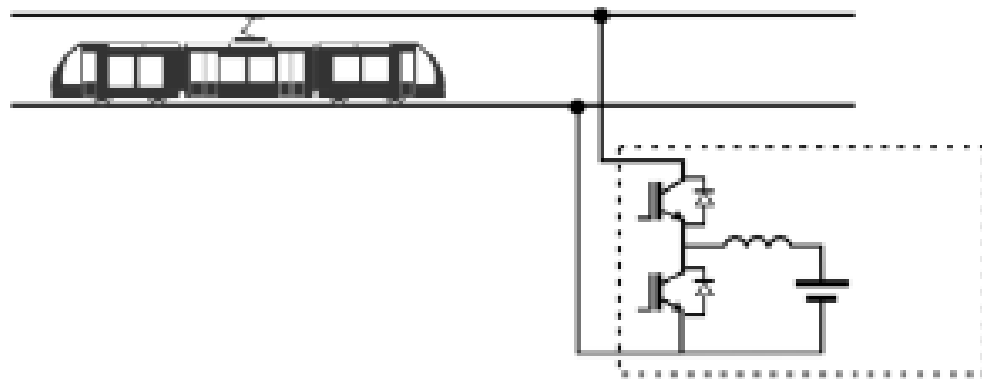


Рисунок 1.9 – Літій-іонний стаціонарний накопичувач

Система акумулювання енергії живить контактну мережу через перетворювач постійного струму коли напруга в лінії дорівнює або менше порогового значення U_{min} . Це може статися якщо кілька поїздів одночасно почнуть рух. При цьому максимальна величина розрядного струму ESS обмежена відповідно до рекомендації виробника. Якщо напруга контактної мережі

збільшується вище порогової величини U_{max} , ESS починає заряджатися з максимальним струмом. Після кожного циклу заряду або розряду система управління регулює заряд накопичувача до 50 %. Замість одного ESS, розміщеного на електричній підстанції, існує можливість підключення декількох ESS уздовж лінії в різних точках, при цьому загальна економія енергії буде зростати зі збільшенням кількості ESS.

Таким чином, виконаний аналітичний огляд дозволяє підсумувати, що зараз в якості накопичувачів на транспорті можуть використовуватись різні типи акумуляторних елементів, вибір яких повинен забезпечувати покриття як короткочасних, так і тривалих періодів електроспоживання та рекуперації. При цьому, для стаціонарного розташування, як правило, використовуються механічні або хімічні вторинні джерела електроенергії, а при бортовому розташуванні необхідна комбінація хімічних і суперконденсаторних елементів. В якості бортових накопичувачів в перспективі можна розглядати і самі електромобілі при їх перевезенні у вагонах автомобілевозах пасажирських поїздів [13, 14].

1.2 Використання сучасних ємнісних накопичувачів енергії

Суперконденсатори володіють унікальною комбінацією важливих характеристик. У порівнянні з акумуляторною батареєю до переваг суперконденсатора відносяться на порядок більша питома потужність, тривалі терміни зберігання, можливість експлуатації при низьких температурах, відсутність токсичних і небезпечних компонентів, велике число циклів перезарядження без втрати ємності (<10 млн.), можливість розряду суперконденсатора при будь-якому рівні накопиченого заряду, можливість переривання заряду і розряду при будь-якому рівні заряду [3].

Основною характеристикою конденсатора є його ємність, під якою розуміють відношення заряду конденсатора до різниці потенціалів між його обкладинками

$$C = \frac{Q}{U} \quad (1.1)$$

Ємність конденсатора залежить від його геометрії, розмірів і форми обкладок, від величини зазору між ними і властивостями середовища, що заповнює простір між обкладинками. Ємність конденсатора, що складається з двох плоских паралельних металевих пластин (обкладок), розташованих на відстані d , площею S , і розділених діелектриком без урахування спотворення електричного поля на краях пластин визначається виразом:

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d} \quad (1.2)$$

де ε – відносна діелектрична проникність середовища;

$\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – електрична постійна.

У реальних конденсаторах використовуються діелектрики різного типу. Ємність конденсатора зростає при збільшенні відносини S/d . Для збільшення S і зменшення d активну частину конденсаторів виконують у вигляді рулону тонких шарів фольги або плівок з металевим напиленням, що виконують роль обкладок, розділених шаром діелектрика. Чим більше поляризація діелектрика, тим більше величина $\varepsilon\varepsilon_0$ і тим більше ємність конденсатора при тому ж співвідношенні S/d . Запасена конденсатором енергія пропорційна квадрату напруги і ємності:

$$W_c = \frac{CU^2}{2} \quad (1.3)$$

Основні зарядно-розрядні процеси в ємнісних накопичувачах (ЄН) характеризуються такими параметрами [3]:

- 1) енергією, що передається в навантаження (у розрядний контур)

$$W_p = 0,5 C(U_p^2 - U_{c0}^2), \quad (1.4)$$

де U_p, U_{c0} – напруги на конденсаторі перед розрядом і залишкова напруга на ньому в кінці розряду;

2) напругою на затискачах ємнісного накопичувача

$$U_{ен} = \frac{1}{C} \int_0^{t_3} i_3 dt + U_{c0}, \quad (1.5)$$

де i_3 – струм заряду;

t_3 – час заряду;

U_{c0} – початкова напруга на затискачах ЄН.

3) енергією, що запасається при заряді

$$W_3 = \frac{C}{2} (U_c^2 - U_{c0}^2), \quad (1.6)$$

де U_c, U_{c0} – кінцеве і початкове напруження ЄН відповідно.

4) ККД заряду

$$\eta_3 = \frac{W_3}{W_3 + \Delta W_3}, \quad (1.7)$$

де W_3 – енергія, що запасається в ЄН при заряді;

ΔW_3 – втрати енергії в зарядному контурі.

5) ККД розряду

$$\eta_3 = \frac{W_H}{W_p} = \frac{W_H}{W_H + \Delta W_p}, \quad (1.8)$$

де W_H – енергія, що споживається навантаженням при розряді ЄН;

W_p – енергія, запасена в ЄП перед розрядом;

ΔW_p – втрати енергії в розрядному контурі.

В енергетичних установках ЄН, як правило, з'єднуються послідовно-паралельно в батареї. Внутрішній опір ЄН зі зміною ступеня розрідженості практично не змінюється, тому напруга на затискачах батареї ЄН може бути представлено рівнянням [3]:

$$U_{\text{ЄН}} = E_{\text{ЄН}} - I_{\text{ЄН}} R_{\text{ЄН}}, \quad (1.9)$$

де $E_{\text{ЄН}}$ – електрорушійна сила ЄН;

$U_{\text{ЄН}}$ – напруга ЄН;

$I_{\text{ЄН}}$ – струм батареї ЄН;

$R_{\text{ЄН}} = R_{\text{Є}} m / n_{\text{Є}}$ – опір батареї ЄН;

m – кількість послідовно включених ЄН в батареї;

$n_{\text{Є}}$ – кількість паралельно включених ЄН в батареї;

$R_{\text{Є}}$ – внутрішній опір елемента батареї ЄН.

Середнє еквівалентний внутрішній опір ЄН можна оцінити за величиною втрат енергії у зарядно-розрядному циклі [3]:

$$\Delta w = I_3^2 R_{\text{єн}} t_3 + I_3^2 R_{\text{єн}} t_p, \quad (1.10)$$

де Δw – втрати енергії в ЄН при зарядно-розрядному процесі;

t_3, t_p – зарядний і розрядний час відповідно.

Проблема використання суперконденсатора в якості джерела електричної енергії при пуску електричного рухомого складу полягає в тому, що по мірі розгону транспортного засобу напруга на тягових двигунах повинна підвищуватися пропорційно швидкості руху, в той час, як напруга на конденсаторі в міру його розряду зменшується. При гальмуванні напруга, що виробляється тяговими двигунами в генераторному режимі, знижується пропорційно зменшенню швидкості, а напруга на накопичувальному конденсаторі збільшується пропорційно струму заряду (гальмування) і часу гальмування.

Стан заряду накопичувача визначається співвідношенням, що в іноземній літературі прийнято позначати як *SOC* (state of charge) [15]:

$$SOC = \frac{1}{Q_T} \left(Q_0 - \int_0^t i_c dt \right) 100\%. \quad (1.11)$$

Напруга на тяговому двигуні змінюється в режимах тяги і гальмування відповідно до виразу [16, 17]

$$U_{ТД} = c\Phi v \pm IR \quad (1.12)$$

I – струм якоря тягового двигуна;

R – опір обмоток тягового двигуна;

c – постійна;

Φ – магнітний потік.

Напруга на накопичувачі в режимах тяги і гальмування змінюється відповідно до виразу

$$U_H = U_{\text{поч}} \mp \frac{1}{C} \int_0^{t_{\text{разр}}} i_{\text{разр}}(t) dt, \quad (1.13)$$

де $U_{\text{поч}}$ – початкова напруга ємнісного накопичувача.

Без пристроїв узгодження заряд і розряд накопичувача може здійснюватися тільки до моменту часу t_1 (рисунок 1.10), при цьому ємність накопичувача не буде використовуватися в повному обсязі.



Рисунок 1.10 – Діаграма швидкості ЕРС і напруг на ємнісному накопичувачі з узгоджувачим пристроєм і без нього при пуску і гальмуванні

Повне використання встановленої потужності накопичувача можливе на основі ефективних алгоритмів роботи пристрою узгодження часових залежностей напруги на тягових двигунах і зарядно-розрядних струмів суперконденсатора, що можна здійснити за допомогою сучасних мікроконтролерів.

1.3 Використання накопичувачів енергії на основі акумуляторних батарей і комбінованих накопичувачів енергії

Для рухомого складу, що виконує місцеві і регіональні пасажирські перевезення, а також маневрово-вивізну роботу на магістральних коліях і коліях промислових підприємств, характерна циклічність роботи. Вона виражається в чергуванні типових режимів роботи: розгін, вибіг, гальмування, зупинка. Суттєвого скорочення витрат енергоресурсів на тягу можна домогтися при ефективному перетворенні кінетичної енергії рухомого складу в енергію (електричної або механічної форми), що запасається в бортовому накопичувачі енергії [5, 6].

Характеристиками, які найбільшою мірою відповідають умовам роботи накопичувачів енергії на зазначеному типі рухомого складу, мають системи

зберігання енергії на основі акумуляторних батарей (в іноземній літературі для позначення таких систем прийнята аббревіатура BESS) і системи на основі суперконденсаторів великої ємності (UESS). Перші відрізняються великою питомою енергією що запасається (іноді застосовують еквівалентний термін щільність енергії, Вт·год / кг), а другі – високою питомою потужністю (щільністю потужності, Вт / кг). Характерні значення цих показників наведені на рисунку 1.11.

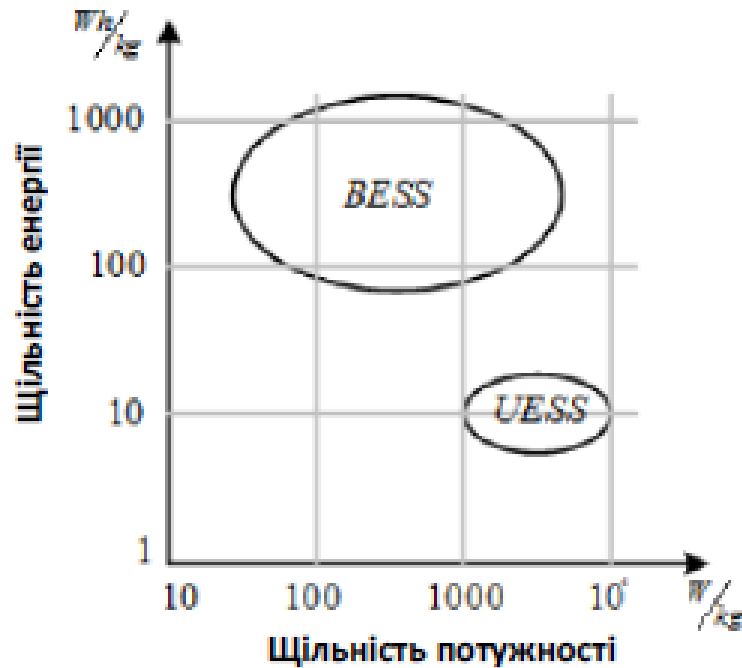


Рисунок 1.11 – Типові значення щільності потужності і щільності енергії для акумуляторної (BESS) і конденсаторної (UESS) систем зберігання енергії

Зазначені значення питомих показників визначають кращі режими роботи обох систем зберігання енергії. Конденсаторну систему UESS, здатну віддавати накопичену енергію за відносно короткий час, тобто розвивати велику потужність, вигідніше використовувати в режимах розгону і гальмування, а батарейну систему BESS, для якої характерний, відносно повільний, розряд вигідніше застосовувати для реалізації сталого тягового режиму. У більшості випадків дві розглянуті системи зберігання енергії можуть (і повинні) успішно доповнювати один одного. Комбіновані системи зберігання енергії, які об'єднують в собі батарейну і

конденсаторну системи, отримали назву гібридних систем зберігання енергії (HESS) [8-13, 15].

У гібридних системах зберігання енергії важливим є питання про оптимізацію використання запасеної енергії. Рівень заряду акумуляторної батареї для забезпечення встановленого терміну її служби SOC в експлуатації не повинен бути нижче 20...60%. З цієї причини в кінці розгону транспортного засобу параметр SOC не повинен бути нижче мінімального рівня, а при вибігу, гальмуванні і стоянці повинен здійснюватися підзаряд акумуляторної батареї (рисунок 1.12).

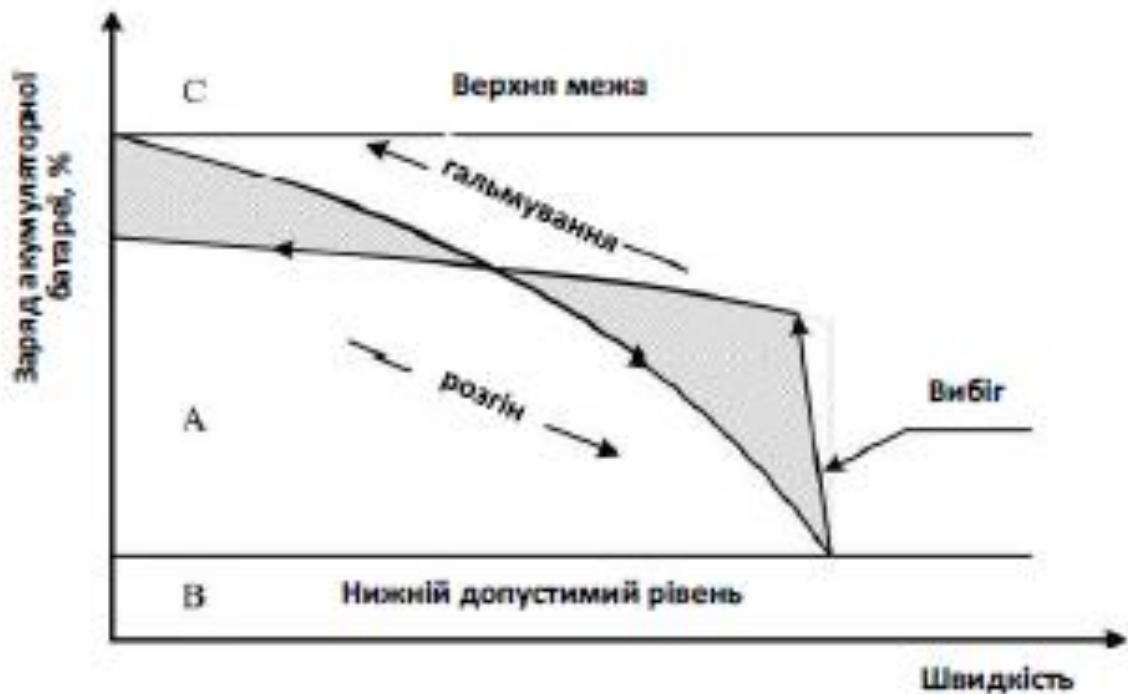


Рисунок 1.12 – Управління параметром *SOC* акумуляторної батареї

Для контролю стану і функціонування обладнання гібридного тягового приводу система управління повинна мати інформацію про поточні значення фактичної швидкості руху, напруги основного джерела живлення і акумуляторної батареї, струму в тяговому інверторі, параметрів режиму зарядки (розрядки) акумуляторної батареї і температури її елементів [15].

Перетворювач акумуляторної батареї здійснює зарядку або розрядку

аккумуляторної батареї, отримуючи сигнали від тягового інвертора і пристроїв управління. Контрольні дії щодо аккумуляторної батареї полягають в підтримці постійної напруги на шині, що з'єднує перетворювач аккумуляторної батареї, інвертор і пристрій управління. Якщо напруга на шині перевищує задане значення, перетворювач аккумуляторної батареї переводить батарею в режим зарядки, якщо ця напруга нижче встановленого рівня – в режим розрядки.

Гібридний тяговий привід має широку область застосування для модернізованих і нових локомотивів. Він здатний оптимально узгоджуватися з різними класами потужності тягового рухомого складу [9].

2 МЕТОДИ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЄМНОСТІ БОРТОВИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

2.1 Характеристика електроспоживання міського електротранспорту і метод оцінки енергоємності бортового накопичувача енергії

Графік споживання потужності (рисунок 2.1) транспортних засобів, як правило, суттєво відрізняються від споживачів стаціонарної електроенергетики.

Електроспоживання міського електротранспорту характеризується значною нерівномірністю і циклічністю в часі. Через короткі відстані між зупинками практично відсутні усталені режими електроспоживання, рекуперація при цьому переважно застосовується з метою зупинного гальмування. Графіки потужності при цьому мають вигляд (рисунок 2.2).

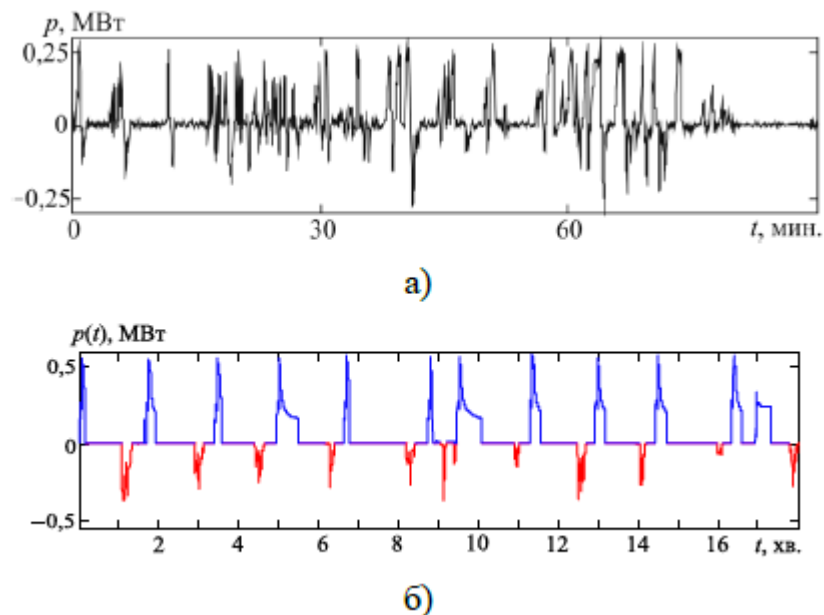


Рисунок 2.1 – Часові діаграми тягового електроспоживання та рекуперації в різних видах руху транспортних засобів: трамвай ТЗД (а), електропоїзд метрополітену 81-717(714).5М (б)

На рисунку 2.2 наведено часову діаграму електроспоживання тролейбуса з рекуперацією енергії в залежності від швидкісного руху.

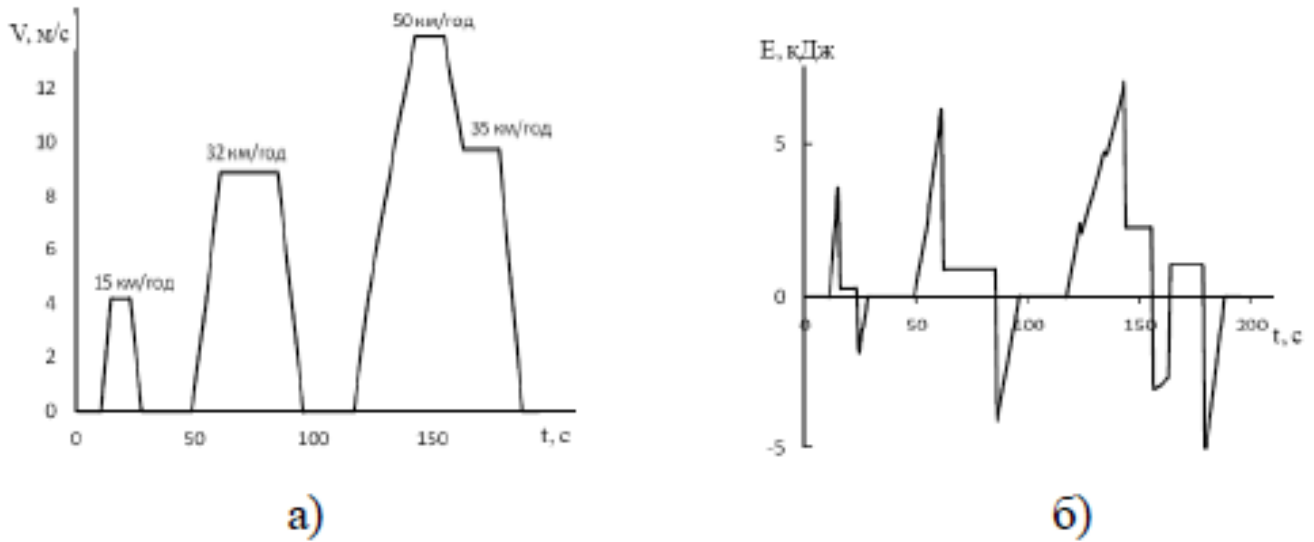


Рисунок 2.2 – Електроспоживання тролейбуса з рекуперацією енергії в залежності від режиму руху:

а) швидкість руху; б) енергія споживання/гальмування

Нерівномірний циклічний графік навантаження можна охарактеризувати наступними показниками [2]:

1. Максимальна і мінімальна потужність, споживана від джерела

$$(P_{max}, P_{min})$$

2. Діапазон зміни споживаної потужності

$$\Delta P = P_{max} - P_{min}.$$

3. Коефіцієнт мінімуму

$$\beta = \frac{P_{min}}{P_{max}}.$$

4. Середня потужність, яка споживається від джерела за цикл

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p dt,$$

5. Коефіцієнт форми кривої потужності за цикл

$$k_f = \frac{P_d}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2 dt}}{\frac{1}{T} \int_0^T p dt}.$$

Якщо в системі немає НЕ, то потужність джерел енергії доводиться розраховувати по максимуму навантаження P_{max} , значить значну частку часу циклу потужність джерел не реалізується повністю, інакше кажучи, доводиться мати істотно завищену потужність джерела енергії.

Застосування НЕ дозволяє запасати енергію в інтервали спадів споживання і віддавати її в інтервали піків споживання. В результаті досягається можливість використовувати основні джерела енергії меншою встановленою потужністю, згладжуючи за допомогою НЕ нерівномірність завантаження основних джерел. Застосування НЕ в енергосистемі може переслідувати і ще одну мету – зниження втрат потужності при її передачі від джерела до споживача.

Якщо головною метою використання НЕ є згладжування нерівномірності навантаження основного джерела енергії, то для оцінки енергоемності НЕ зручніше користуватися граничними оцінками графіка навантаження (P_{max}). Якщо головне завдання НЕ полягає в зниженні втрат потужності в енергосистемі, то зручніше виявляється використання показника k_f , оскільки для втрат

потужності справедливо співвідношення [18]:

$$\Delta p \sim k_f^2.$$

Бортові енергосистеми транспортних засобів дуже компактні і не мають протяжних ліній передачі електричної енергії від джерел до споживачів. У той же час споживання енергії від джерела характеризується різко вираженою нерівномірністю. З цих причин для оцінки енергоємності бортового НЕ зручніше користуватися граничними оцінками графіка споживання потужності.

Найбільший ефект від установки НЕ досягається тоді, коли вдається забезпечити умову

$$P_{max} = P_{cp}.$$

У цьому ідеальному випадку

$$W_{зап} = W_{від},$$

де $W_{зап}$ – сумарна енергія, що запасається НЕ за період циклічності;

$W_{від}$ – сумарна енергія, що віддається НЕ за період циклічності.

У деяких найпростіших випадках нерівномірного графіка споживання потужності (рисунок 2.1) енергоємність НЕ визначається досить простим співвідношенням:

$$W_{HE} = \int_0^{t_3} (p - P_{cp}) dt.$$

У більшості практичних випадків графіки навантаження мають більш складний вид і часто визначаються випадковими чинниками. Зокрема, тягова

одиниця ЕРС з бортовим НЕ може експлуатуватися в різних умовах (вид руху, профіль колії, змінна оперативна обстановка та ін.), в залежності від чого може змінюється величина потоків енергії і циклічність споживання енергії (рисунок 2.3). Для прикладу на рисунок у 2.3 представлені два різні графіка споживання потужності з однаковим середнім значенням, характерні для руху з великими швидкостями і малим числом зупинок (крива 1) і для руху з меншими швидкостями і великим числом зупинок (крива 2). Очевидно, що в першому випадку розрахункова енергоємність НЕ виявиться істотно більше.

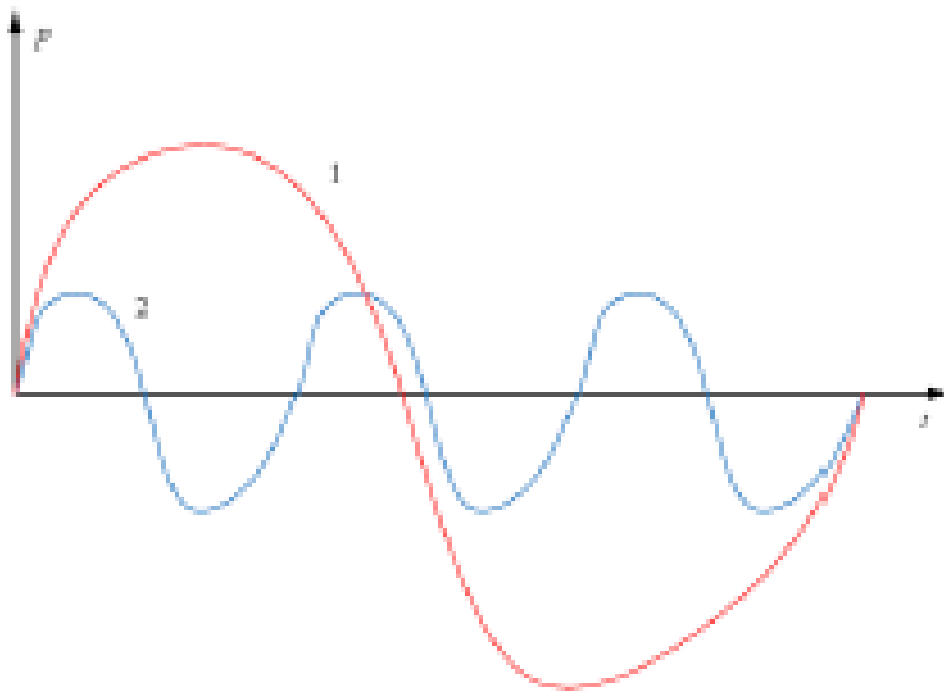


Рисунок 2.3 – Варіанти графіків зміни потужності

Можна виділити кілька варіантів вирішення проблеми оцінки енергоємності бортового НЕ:

1. Оцінка енергоємності бортового НЕ для кожної одиниці ЕРС індивідуально, виходячи з конкретних умов експлуатації або призначення даної одиниці.
2. Оцінка енергоємності бортового НЕ, виходячи з міркувань уніфікації з

метою задоволення статистичної більшості типових умов експлуатації даного виду рухомого складу.

Оцінка енергоємності бортового НЕ, виходячи з цільових передумов його використання на ЕРС. Перший варіант дозволяє домогтися найбільшої «приспосованості» НЕ до конкретних завдань і умов роботи тягової одиниці, тобто домогтися найвищої ефективності використання НЕ. Однак є недоліки: вартість бортового НЕ, адаптованого під конкретні умови роботи окремої одиниці ЕРС, буде порівняно високою; при такому підході звужується область ефективної експлуатації даної одиниці ЕРС, тому що експлуатація її в інших умовах виявиться менш ефективною. Недоліки першого варіанту можуть бути певною мірою зменшені, якщо НЕ виконується у вигляді модульної конструкції і дозволяє нарощувати або зменшувати енергоємність, підключаючи (відключаючи) додаткові модулі НЕ залежно від змінених конкретних умов роботи одиниці ЕРС.

Другий підхід заснований на виділенні типових режимів роботи ЕРС, їх статистичне обстеження та розрахунку енергоємності бортового НЕ, виходячи з найбільш ймовірних умов роботи даного виду ЕРС.

Тяговий рухомий склад можна розділити за типовими видами роботи на наступні групи:

- 1) маневрово-вивізний рух – характеризується значною часткою простоїв;
- 2) приміський та міський рух – характеризується великою кількістю зупинок і переважанням пуско-гальмівних режимів роботи двигунів, завдяки чому середня потужність, що розвивається близька до номінальної; в цьому режимі роботи працюють також електропоїзди метрополітенів;
- 3) магістральний рух (вантажний і пасажирський) – характеризується малою кількістю зупинок, істотною часткою часу руху з усталеним енергоспоживанням і переважанням регульовальних гальмувань (зупиночних гальмувань мало).

У разі рівнинного профілю колії потужність ЕРС, що розвивається в сталому режимі істотно менше номінальної. На горбистому профілі потужність, що

розвивається, більше, характерне чергування режимів тяги і регулювального гальмування при русі по спусках. На гірських профілях шляху потужність, що розвивається близька до номінальної, але рух характеризується рідким чергуванням режимів тяги і гальмування (до перевалу – зтяжна важка тяга, після перевалу – зтяжне регулювальне гальмування).

Третій підхід заснований на визначенні енергоємності бортового НЕ на основі завдань, які він повинен виконувати на ЕРС. Завдання НЕ на ЕРС можуть бути наступні:

- вирівнювання графіка споживання потужності від основного джерела енергії (контактною мережі) з метою зниження нерівномірності енергоспоживання, підвищення ефективності роботи основного джерела енергії і зменшення його максимальної потужності. Таке завдання ставлять для тягового ЕРС гірничо-рудних підприємств;
- акумулювання енергії при зупиночному електричному гальмуванні рухомого складу для використання її при розгоні в наступному циклі руху. Цю функціональну задачу доцільно визначати для НЕ рухомого складу, який працює переважно в пуско-гальмівних режимах при частих зупинках (електропоїзди приміського руху і метрополітенів, міський електротранспорт);
- акумулювання надлишкової енергії рекуперації ЕРС в разі дисбалансу між генеруванням і споживанням енергії рекуперації. Таке завдання для НЕ формулюють для магістральних електровозів.
- акумулювання енергії для вирішення допоміжних завдань, наприклад, енергозабезпечення власних потреб або енергозабезпечення основного (тягового) електрообладнання в специфічних умовах, наприклад, при виникненні боксування колісних пар [50].

2.2 Вплив місця установки накопичувача на енергетичні показники міського електротранспорту

Розглянемо задачу визначення оптимального місця розташування НЕ в системі електричної тяги на прикладі метрополітену, методика розв'язання якої наведена в [4]. Спрощена структурна схема системи тягового електропостачання метрополітену зображена на рисунку 2.4.

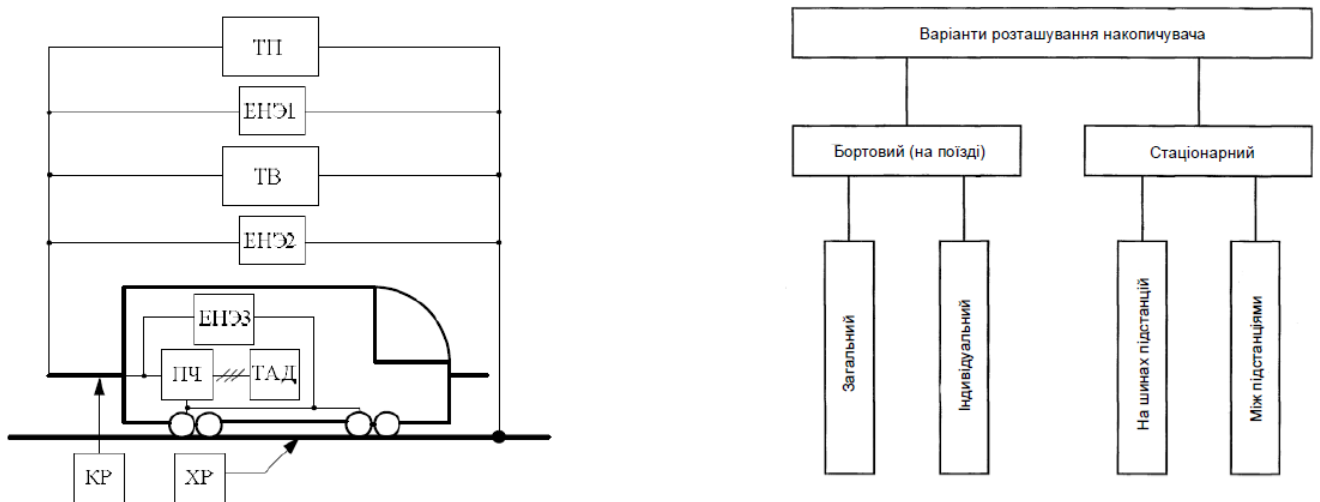


Рисунок 2.4 – Варіанти розташування НЕ в СТЕ [67]

На рисунку 2.4 позначені наступні елементи: ТП – тягова підстанція, ТВ – тяговий випрямляч; ПЧ – перетворювач частоти; ТАД – тяговий асинхронний двигун, КР – контактна рейка, ХР – ходова рейка, ЕНЧ 1, 2, і 3 – ємнісні накопичувачі розташовані у відповідних місцях. На даній схемі розглядаються наступні варіанти розташування ємнісного НЕ:

- шини ТП;
- ділянка тягової мережі між ТП (ПСК або ППЗ);
- ЕРС метро.

В [4] виконано порівняльний аналіз ефективності застосування ЄНЕ в залежності від місця їх установки в СТЕ метрополітену. При розміщенні ЄНЕ на шинах ТП останні стають приймачами енергії рекуперації, що накопичується в НЕ, а потім повертається назад у тягову мережу. У результаті знижується електроспоживання СТЕ з первинної живильної мережі, згладжуються піки навантаження ТП. Додатково зменшуються втрати в первинній мережі понижуючого і перетворювального трансформаторів. Також, при даному розміщенні НЕ можна згладжувати хвилинні, часові та добові графіки енергоспоживання. Енергоємність НЕ при цьому повинна бути досить великою, оскільки вона зосереджена в одному місці. Економічний ефект при цьому складається за рахунок економії:

- при згладжуванні піків струму;
- повернутої в тягову мережу рекуперації енергії;
- на більш дешевих тарифах при зменшенні величини встановленої потужності понижувальних і перетворювальних трансформаторів;
- при зменшенні капітальних витрат через установки менш потужних перетворювальних агрегатів, трансформаторів і ліній електропередачі.

При розміщенні на зупиночних пунктах загальна кількість і загальна встановлена потужність НЕ збільшуються, накопичення та повернення енергії рекуперації поїздів здійснюється поблизу зупиночних пунктів, практично минаючи тягову мережу, завдяки чому додатково економиться енергія втрат в тяговій мережі. Головна функція при даному розміщенні НЕ – це прийом надлишкової енергії рекуперації.

При розміщенні НЕ безпосередньо на тяговому ЕРС прийом рекуперації енергії відбувається безпосередньо у споживача, що з точки зору енергообміну є позитивним моментом, оскільки втрати в тяговій мережі зводяться до мінімуму. Використання НЕ розташованого безпосередньо на ЕРС дозволяє найбільш повно вирішити проблему з прийомом енергії рекуперації. При роботі НЕ на рухомому

складі частина пускового струму буде споживатися з самого поїзда, що дозволяє значно знизити втрати в тяговій мережі. Крім цього, з'являється можливість аварійного виведення вагонів метрополітену з тунелю при повному чи частковому знятті напруги на шинах ТП, а також при виникненні аварійних режимів в контактній мережі.

Для оцінки процесів енергообміну в СТЕ метрополітену виконаємо теоретичні дослідження, аналізуючи різні місця установки НЕ. При цьому в [4] задавалися наступними умовами і вихідними величинами:

1. напруга в тягову мережу подається від ТП;
2. ККД ТП $\eta_{ТП} = 0,95$;
3. ККД тягової мережі $\eta_{ТМ} = 0,93$;
4. ККД СНЕ $\eta_{НЕ} = 0,98$.

В тяговій мережі присутній споживач енергії з асинхронним електроприводом і можливістю рекуперації енергії гальмування з параметрами:

1. Маса поїзда метрополітену при максимальному завантаженні $m = 264$ т;
2. Швидкість початку гальмування $v = 60$ км/год;
3. ККД редуктора $\eta_{ред} = 0,98$;
4. ККД тягового асинхронного двигуна $\eta_{ТД} = 0,94$;
5. ККД тягового перетворювача $\eta_{ТД} = 0,96$;
6. Середнє значення гальмівного зусилля $F_{ф} = 265$ кН;
7. Середнє значення потужності на ободах коліс при гальмуванні $P_{ф} = 2555$ кВт;
8. Коефіцієнт інерції обертових мас поїзда $\gamma = 1,1$.

На підставі наведених умов в [4] виконано розрахунок можливої кількості корисно використаної енергії рекуперації в різних місцях установки НЕ.

Кількість енергії, яке може повернути п'ятивагонний поїзд метрополітену при рекуперативному гальмуванні, обчислимо за виразом [4, 15, 16]:

$$W_{\text{рек}} = \int_v^0 \frac{\gamma m v}{3600} dv = \frac{\gamma m v^2}{2 \cdot 3600} = 11,2 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

Враховуючи ККД тягового обладнання, розрахуємо кількість енергії і потужність, яку може віддати поїзд в НЕ при гальмуванні:

- при установці НЕ на ТП

$$W_1 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}} \eta_{\text{ТТР}},$$

$$P_1 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}} \eta_{\text{ТТР}},$$

- при установці НЕ на перегонах між тяговими підстанціями

$$W_2 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}},$$

$$P_2 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}} \eta_{\text{ТМ}},$$

- при установці НЕ безпосередньо на тяговому рухомому складі

$$W_3 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}},$$

$$P_3 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}} \eta_{\text{ТАД}} \eta_{\text{ТР}}.$$

Слід зазначити, що при зміні профілю шляху в розрахунку необхідно додатково враховувати втрати тягової мережі, оскільки гальмування поїзда може відбуватися не тільки поблизу станції.

Кількість енергії і потужність, які можуть використовуватися іншим споживачем з урахуванням передачі і зберігання рекуперативної енергії у НЕ визначаються за виразами:

- при установці НЕ на ТП

$$W_4 = W_{\text{рек}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТАД}}^2 \eta_{\text{ТР}}^2 \eta_{\text{ТМ}}^2 \eta_{\text{ТТР}}^2 \eta_{\text{НЕ}},$$

$$P_4 = P_{\text{ср}} \eta_{\text{ред}}^2 \eta_{\text{ТАД}}^2 \eta_{\text{ТР}}^2 \eta_{\text{ТМ}}^2 \eta_{\text{ТТР}}^2 \eta_{\text{НЕ}},$$

- при установці НЕ на перегонах між ТП

$$W_5 = W_{рек} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{ТМ}^2 \eta_{НЕ} ,$$

$$P_5 = P_{cp} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{ТМ}^2 \eta_{НЕ} ,$$

- при установці НЕ безпосередньо на тяговому рухомому складі

$$W_6 = W_{рек} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{НЕ} ,$$

$$P_6 = P_{cp} \eta_{ред}^2 \eta_{ТАД}^2 \eta_{ТР}^2 \eta_{НЕ} .$$

В таблиці 2.1 наведені результати розрахунків кількості енергії та потужності, яку може повернути п'ятивагонний поїзд в тягову мережу при гальмуванні з урахуванням різного місця установки НЕ [4].

Таблиця 2.1 – Порівняльний аналіз кількості енергії та потужності при рекуперативному гальмуванні

Місце встановлення НЕ	Кількість енергії, яке може повернути поїзд в НЕ, кВт·год	Потужність, кВт
НЕ1 (ТП)	8,93	2038
НЕ2 (ТВ)	9,4	2145
НЕ3 (ЕРС)	10,11	2307

Ефективність використання поїздом рекуперативної електроенергії визначаємо за виразами:

- при установці НЕ на ТП

$$\eta_4 = \frac{W_4}{W_{рек}} = \frac{P_4}{P_{cp}} ,$$

при установці НЕ на перегонах між ТП (зупиночних пунктах)

$$\eta_5 = \frac{W_5}{W_{рек}} = \frac{P_5}{P_{cp}} ,$$

- при установці НЕ безпосередньо на тяговому рухомому складі

$$\eta_6 = \frac{W_6}{W_{PEK}} = \frac{P_6}{P_{CP}}.$$

Результати порівняння кількості енергії та ефективності використання НЕ з урахуванням місця їх установки наведені в таблиці 2.2 [4].

Таблиця 2.2 – Порівняльний аналіз кількості енергії, потужності та ефективності з урахуванням передачі і зберігання рекуперативної енергії

Місце встановлення НЕ	Кількість енергії, що може використовуватися іншим споживачем, кВт·год	Потужність, кВт	Ефективність, %
ТП	6,98	1592	62,3
ТВ	7,94	1765	70,9
ЕРС	8,96	2044	80

Слід зазначити, що наведені розрахунки отримані при наявності одного споживача на ТП. В реальних умовах експлуатації при наявності декількох потягів метрополітену на перегоні, що працюють у режимі гальмування, ефективність прийому електроенергії НЕ при їх розміщенні на шинах ТП або на перегонах між ТП може значно знижуватися. Процес енергообміну може бути обмежений або навіть перерваний через накладення рекуперативних струмів і перевищення рівня напруги в тяговій мережі (975 В). При розміщенні НЕ на борту поїзда ефективність процесу енергообміну не буде залежати від кількості споживачів в тяговій мережі, оскільки циркуляція потужності буде відбуватися безпосередньо на рухомому складі.

Слід також зазначити, що аналіз місця установки НЕ проводився без урахування масогабаритних показників та їх впливу на динаміку розгону поїзда, що в даному випадку може взагалі виключати можливість такого розташування.

2.3 Методика оцінки енергоємності бортового накопичувача енергії для вирівнювання графіка електроспоживання міського електротранспорту

В основі вибору енергоємності накопичувача енергії лежить ідея про те, що електрифікований транспортний засіб (ЕРС) з НЕ повинен виконувати ту ж задану роботу, що і прототип (ЕРС без НЕ), але при цьому споживання від первинного джерела електроенергії матиме меншу номінальну потужність та істотно більш рівномірну (постійну), за рахунок того, що нерівномірність тягового електроспоживання буде згладжена зарядно-розрядних циклами НЕ.

Якщо для інтервалу часу $[0, T]$ відома середньостатистична крива споживання потужності від контактної мережі ЕРС-прототипу $P_{п}(t)$, тоді на інтервалі циклічності розраховується середня потужність споживана з контактної мережі

$$P_{г.ср} = \frac{1}{T} \int_0^T p_{г}(t) dt, \quad (2.1)$$

що приймається рівною потужності джерела живлення локомотива з НЕ. Зниження енергії НЕ на етапі розряду $(t_1 - t_0)$

$$\Delta W_{п}^{нз} = W_T - P_{г.ср}(t_1 - t_0), \quad (2.2)$$

де W_T – енергія, що витрачається на тягу.

Приріст енергії НЕ на етапі заряду (електричне гальмування тягових двигунів)

$$\Delta W_{з}^{нз} = W_B + P_{г.ср}(t_1 - t_0), \quad (2.3)$$

де W_B – енергія, що генерується тяговими двигунами.

Далі визначаються максимальні значення збільшення і зменшення енергії НЕ на розглянутому інтервалі часу $[0, T]$:

$$\max(\Delta W_p^{HE}), \max(\Delta W_3^{HE})$$

Вибираючи найбільше з цих значень, знаходять шукану енергоємність НЕ:

$$W^{HE} = \max[\max(\Delta W_p^{HE}); \max(\Delta W_3^{HE})] + W_H, \quad (2.4)$$

де W_H – невикористований запас енергії НЕ.

Максимальну потужність, яку повинен забезпечити НЕ при розряді можна знайти за виразом:

$$P_{p.max}^{HE} = \max(P_{г.т}) - P_{г.сп}, \quad (2.5)$$

де $P_{г.т}$ – потужність, споживана з контактної мережі локомотивом без НЕ (локомотива-прототипу).

Максимальна потужність НЕ при заряді:

$$P_{з.max}^{HE} = \max |P_{д.т}| + P_{г.сп}, \quad (2.6)$$

де $P_{д.т}$ – потужність, що розвивається тяговими двигунами при електричному гальмуванні.

Крім цього, в [20] запропоновано спосіб визначення початкового запасу енергії в НЕ, необхідного для реалізації заданого режиму роботи. Його знаходять задаючись кінцевим значенням енергії НЕ $W_{кін}$ (наприклад, $W_{кін} = 0$), виконується обчислення площ, обмежених кривою $p_M(t)$ – потужності, що розвивається двигунами на тягу, і $P_{г.сп}$. Обчислення ведеться від кінця розрахункового інтервалу часу до його початку, при цьому дотримується правило:

1. Якщо на інтервалі $[t_i; t_{i+1}] p_M(t) > P_{г.сп}$, тоді

$$\Delta W_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} [p_M(t) - P_{г.ср}] dt < 0,$$

що відповідає відбору енергії від НЕ (розряду);

3. якщо на інтервалі $[t_i; t_{i+1}]$ $p_M(t) < P_{г.ср}$, тоді

$$\Delta W_i = \int_{t_i}^{t_{i+1}} [p_M(t) - P_{г.ср}] dt > 0,$$

що відповідає накопиченню енергії в НЕ (заряду).

Таким чином, можна знайти енергію, накопичену в НЕ в кожен момент часу, а початкове значення енергії НЕ визначається шляхом підсумовування:

$$W_{НЕ.нач} = W_{кон} + \sum_{i=1}^N \Delta W_i$$

Вважається, що енергія $W_{НЕ.нач}$ забезпечується шляхом попереднього заряду НЕ перед початком роботи. Якщо отримане значення $W_{НЕ.нач}$ виявиться меншим від мінімального рівня невикористаної енергії НЕ W_H , то потрібне коригування $W_{НЕ.нач}$, таким чином, щоб $W_{НЕ.нач} \geq W_H$. Для забезпечення середньостатистичного режиму роботи локомотива з НЕ при $P_{г} = P_{г.ср} = const$ енергоємність НЕ $W_{не} = 100...120$ МДж забезпечить максимальне тягове електроспоживання від контактної мережі на рівні 400 кВт [21].

Наприклад, для конкретного графіка споживання потужності $p(t)$ ЕРС за один цикл роботи, що включає інтервали руху під струмом в режимі тяги і інтервал вибігу для інтервалів часу $[t_1, t_2]$, на яких $p(t) - P_{ср} < 0$ знаходять

$$W_N = \int_{t_1}^{t_2} |p(t) - P_{cp}| dt \rightarrow max$$

і визначають максимальну енергоємність НЕ як

$$W_{HE}^{max} = W_N.$$

Далі, вважаючи що перед початком циклу НЕ повністю заряджений, тобто

$$W_{HE} = W_{HE}^{max},$$

будують залежність поточного значення енергії в НЕ за час циклу і визначають всі можливі мінімуми енергії, що залишається в НЕ.

Максимальне зниження енергії в НЕ:

$$\Delta W_{HE,max} = \max\{(W_{HE}^{н.ц} - W_{min}^G); (W_{HE}^{max} - W_{min}^L)\},$$

де $W_{HE}^{н.ц}$ – енергія в НЕ на початку циклу;

W_{min}^G, W_{min}^L – глобальний і локальний мінімуми енергії в НЕ.

Обсяг невикористаної енергії розраховується відповідно до [3]

$$W_{MO} = \frac{1}{2} \left(\frac{P^2}{P_{наиб}} \right) T_{HE},$$

де $P, P_{наиб}$ – потужність, необхідна для вирівнювання графіка споживання навантаження і найбільша потужність НЕ відповідно;

T_{HE} – постійна часу введення / виведення енергії НЕ.

Рівень робочої енергоємності НЕ визначається сумою

$$W_{HE}^{раб} = \Delta W_{HE,max} + W_{MO}.$$

2.4 Оцінка енергоємності бортового накопичувача енергії для акумулювання енергії зупинного гальмування

Характерний графік руху транспортного засобу в цьому випадку – численні зупинки, значну частку часу між якими займає розгін і гальмування. До цього типу руху, крім приміського моторвагонного рухомого складу (МВРС), можна віднести електропоїзди метрополітенів і міський електротранспорт.

Типова крива потужності, що споживається МВРС між двома зупинками наведено на рисунку 2.5.

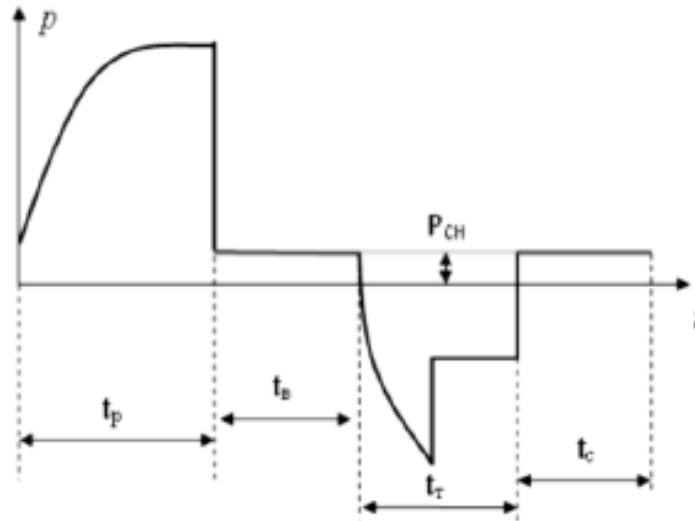


Рисунок 2.5 – Типова крива потужності електропоїзда на перегоні:

t_p – час розгону, t_b – час вибігу, t_r – час електричного гальмування,

t_c – час зупинки, $P_{сн}$ – потужність власних потреб

Числові характеристики кривої потужності в кожному конкретному випадку будуть дуже різні і залежать від довжини перегону, профілю колії, завантаження рухомого складу, оперативної обстановки. У цьому випадку також доцільно визначати енергоємність НЕ, виходячи з найбільш ймовірних значень параметрів, отриманих шляхом статистичної обробки численних вимірів.

Наприклад, в [18] наводяться наступні результати статистичного обстеження для приміських поїздів залізничного вузла великого міста: тривалість тягового режиму – (30...100) с, тривалість відключеного стану двигунів (робота на вибігу і стоянки) – (40...110) с, тривалість гальмування – (30...60) с. Середня відстань між зупинками становить 4,1 км.

В [19, 23-26] наведено статистику для міського електротранспорту: довжина перегону (350...650) м, час перебування в дорозі між зупинками (38...47) с, відносний час руху в режимі тяги – 0,37, відносний час вибігу і стоянок – 0,51, відносний час електричного гальмування – 0,12.

Основне завдання НЕ при цьому типі руху – запасання енергії, що генерується тяговими двигунами при електричному гальмуванні, зберігання протягом відносно короткого часу і віддача енергії при розгоні.

Розрахунок енергоємності НЕ проводять, виходячи з балансу енергії, якщо відома середньостатистична крива потужності двигунів $p(t)$.

Енергія, що запасається НЕ при електричному гальмуванні з урахуванням втрат при перетворенні дорівнює

$$W_3 = \eta \int_{t_p+t_B}^{t_p+t_B+t_T} (p(t) - P_{CH}) dt$$

де η – ККД контуру перетворення енергії від двигуна до НЕ.

Визначення енергоємності бортового НЕ по цій формулі необхідно проводити для інтервалу t_T , на якому може бути запасена максимальна енергія гальмування.

В [19] запропоновано оцінювати енергоємність бортового буферного НЕ для рухомого складу міського електротранспорту, виходячи з кінетичної енергії швидкості початку гальмування з урахуванням втрат енергії при її перетворенні з кінетичної в електричну

$$W_{HE} = M V^2 \eta_{п}(V),$$

де M – маса ЕРС;

v – швидкість початку гальмування;

$\eta_n(v)$ – результуючий ККД перетворення енергії в залежності від швидкості.

За цими оцінками енергоємність бортового НЕ тролейбуса для акумулювання енергії електричного гальмування при швидкостях початку гальмування 40...60 км/год повинна становити $W_{HE} = 1...1,5$ МДж [23]. З урахуванням більш високих швидкостей енергоємність бортового НЕ ЕРС міського електротранспорту повинна становити $W_{HE} = 1,5...2,5$ МДж. Енергоємність бортового НЕ для приміського електропоїзда (10-вагонне формування) та електропоїзду метрополітену, що оцінюється за викладеною методикою, дорівнює $W_{HE} = 50...80$ МДж при потужності $P_{HE} = 2...3$ МВт.

Функцію акумулювання надлишкової енергії рекуперативного гальмування доцільно ставити бортовому НЕ магістральних електровозів, що реалізують режим рекуперативного гальмування. Специфіка режиму рекуперації енергії ЕРС полягає в тому, що цей режим може бути реалізований тільки в тому випадку, якщо для енергії рекуперації в тяговій мережі є споживач (електровоз в режимі тяги). В іншому випадку рекуперація енергії підвищує напругу контактної мережі і призводить до необхідності припинення режиму рекуперативного гальмування.

На ділянках зі значними розмірами руху велика частина енергії рекуперацій з високою ймовірністю може споживатися електровозами, що працюють в режимі тяги, а необхідність акумулювання енергії в бортовому НЕ виникає лише для надлишкової енергії рекуперативного гальмування.

Методика оцінки енергоємності бортового НЕ для цілей акумулювання надлишкової енергії рекуперації не може бути визначена в явному вигляді, тому що величина надлишкової енергії визначається безліччю факторів, як детермінованих, так і випадкових: серією та характеристиками експлуатованих

електровозів, профілем колії дільниці, характеристиками тягової мережі, графіком руху поїздів, взаємним розташуванням і поєднанням режимів роботи електровозів, що працюють в режимах тяги і рекуперативного гальмування, масою поїздів та ін.

За оцінками [19] енергоємність бортового НЕ для акумулювання надлишкової енергії рекуперації може досягати $W_{\text{HE}} = 1000$ МДж при потужності, що розвивається $P_{\text{HE}} = 5...10$ МВт.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАРЯДНО-РОЗРЯДНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ НА МІСЬКОМУ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ

3.1 Ефективність енергообмінних процесів при використанні накопичувачів в системах електричного транспорту

Для дослідження можливостей накопичення енергії рекуперації необхідно розробити модель енергообмінних процесів в тягових мережах при використанні накопичувачів енергії та аналітично описати енергообмінні режими, що дозволить надалі обирати раціональні закони керування параметрами режиму заряду- розряду, а саме швидкістю і глибиною режиму.

В якості моделі накопичувача була прийнята відома схема заміщення ємнісної суперконденсаторної батареї з ємністю C , як найбільш універсального типу накопичувача, схема заміщення якої враховує опір витoku R_b конденсатора і його активний опір R (рисунок 3.1).

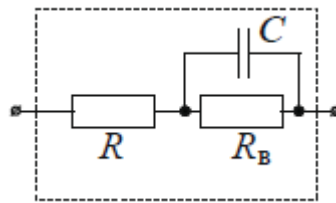


Рисунок 3.1 – Схема заміщення ємнісного накопичувача

Процес заряду даного накопичувача від постійної напруги описується відомими рівняннями зарядного струму накопичувача та напруги на його ємності, що дорівнюють

$$i_{\text{зар}}(t) = \frac{U}{R + R_b} + \frac{UR_b}{R(R + R_b)} e^{-\frac{t}{\tau}},$$
$$u_{C \text{ зар}}(t) = \frac{UR_b}{R + R_b} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right),$$

де U – постійна зарядна напруга,

$$\tau = \frac{RR_{\text{в}}C}{R + R_{\text{в}}} \quad \text{– постійна часу кола.}$$

При розрахунку напруги на ємнісному елементі накопичувача при його заряді під дією неперіодичної напруги $U(t)$ (від нестабілізованого джерела живлення – рекуперуючого транспортного засобу) найбільш зручно скористатися інтегралом Дюамеля, який при кусочно-неперервній функції $U(t)$ (або з розривами першого роду) має вигляд

$$u_{C \text{ зап}}(t) = \sum_{n=1}^m \Delta U_n(t_n) h_V(t - t_n) + \sum_{n=1}^m \int_{t_n}^{t_{n+1}} \frac{dU_n(t)}{dt} h_V(t - \tau) d\tau + \int_{t_m}^t \frac{dU_m(t)}{dt} h_V(t - \tau) d\tau, \quad (3.1)$$

де $h_V(t) = \frac{R_{\text{в}}}{R + R_{\text{в}}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$ – перехідна функція по напрузі для даного кола;

$\Delta U_n(t_n) = U_{n+1} - U_n$ – стрибок напруги в момент t_n .

Якщо розглядати функцію $U(t)$ як кусочно-постійну (рисунок 3.2, лінія 1), то похідні під інтегралом дорівнюють нулю і вираз (3.1) складається лише з суми добутків стрибків напруги на перехідну функцію, зсунуту на час стрибка

$$u_{C \text{ зап}}(t) = \sum_{n=1}^m \Delta U_n(t_n) h_V(t - t_n). \quad (3.2)$$

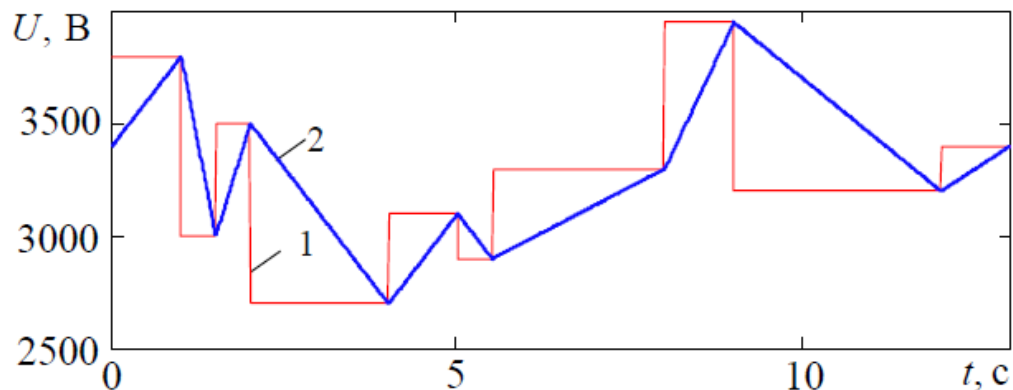


Рисунок 3.2 – Варіанти наближення функції прикладеної напруги:

1 – кусочно-постійна, 2 – лінійна

Якщо $U(t)$ розглядається як неперервна (рисунок 3.2, лінія 2), то в (3.1) не враховується складова (3.2).

Після спрощення (3.1) отримуємо кусочно-неперервну функцію $u_{C \text{ зар}}(t)$, яка справедлива для окремих інтервалів часу. Вираз напруги на ємності в залежності від поточного значення прикладеної напруги на інтервалі часу $t_n \leq t < t_{n+1}$ має вигляд

$$u_{C \text{ зар}}(t) = \frac{R_b}{R + R_b} \sum_{n=1}^m (U_{n+1} - U_n) \left(1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right),$$

Для кусочно-неперервної функції цей вираз дещо ускладнюється, але є більш точним

$$u_{C \text{ зар}}(t) = \frac{R_b}{R + R_b} \sum_{n=1}^m \frac{U_{n+1} - U_n}{t_{n+1} - t_n} \left((t_{n+1} - t_n) - \tau \left(e^{-\frac{t-t_{n+1}}{\tau}} - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right) \right).$$

Вид перехідної напруги на ємнісному елементі НЕ в залежності від представлення вхідної напруги показано на рисунку 3.3.

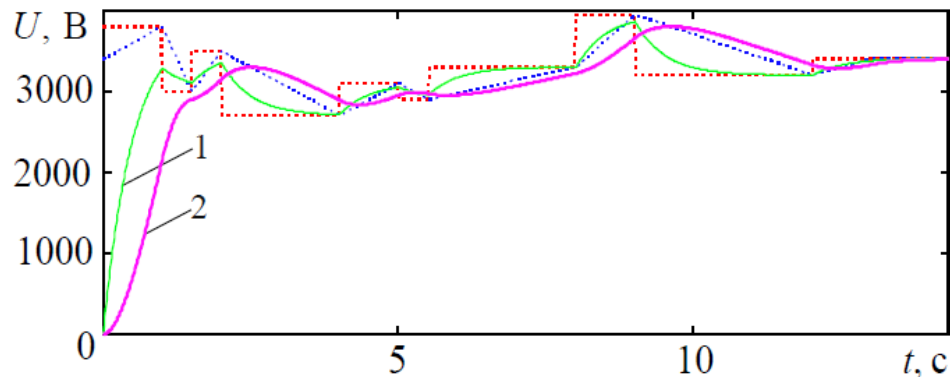


Рисунок 3.3 – Залежність $u_{C \text{ зар}}(t)$ при кусочно-постійній (крива 1) та кусочно-лінійній (крива 2) апроксимаціях прикладеної напруги

Зарядний струм накопичувача може бути визначено як

$$i_{\text{зар}}(t) = C \frac{d}{dt} u_{C \text{ зар}}(t) + \frac{u_{C \text{ зар}}(t)}{R_s},$$

графік якого представлено для відповідної залежності $u_{C \text{ зар}}(t)$ на рисунку 3.4.

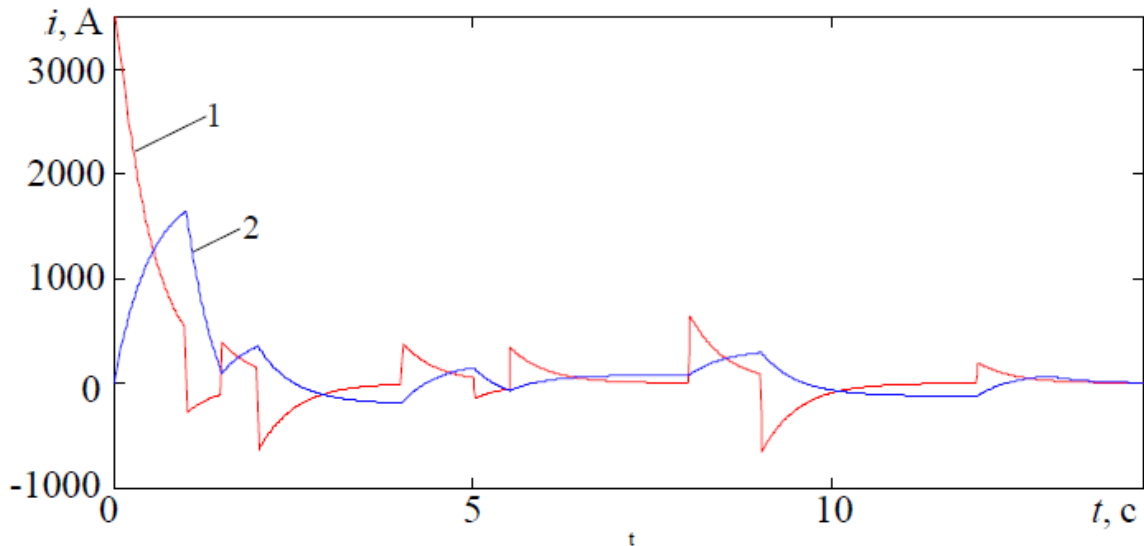


Рисунок 3.4 – Зарядний струм накопичувача при кусочно-постійній (крива 1) та при кусочно-лінійній (крива 2) апроксимаціях прикладеної напруги

Рівняння (3.3) і (3.4) є рекурсивними, тобто вирази для визначення $u_{C \text{ зар}}(t)$ на наступних інтервалах часу повторюють всі попередні доданки суми. Враховуючи дану властивість вираз для $u_{C \text{ зар}}(t)$ на наступному інтервалі часу може отримуватись на основі попереднього значення, для чого використовуються початкові умови на основі законів комутації. Це дозволяє спростити отримання залежності $u_{C \text{ зар}}(t)$ використовуючи циклічні розрахунки. При цьому вираз напруги для інтервалу часу $t_n \leq t < t_{n+1}$ при відповідній формі представлення вхідної дії приймає вигляд

$$u_{C \text{ зар}}(t) = u_{C \text{ зар}}(t_n) + (U_{n+1} - u_{C \text{ зар}}(t_n)) \left(1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right), \quad (3.5)$$

або

$$u_{C_{\text{зар}}}(t) = u_{C_{\text{зар}}}(t_n) + \left(\frac{U_{n+1} - u_{C_{\text{зар}}}(t_n)}{t_{n+1} - t_n} \right) \left((t - t_n) - \tau \left(1 - e^{-\frac{t-t_n}{\tau}} \right) \right), \quad (3.6)$$

де значення $u_{C_{\text{зар}}}(t_n)$ береться з попереднього аналітичного виразу, отриманого для інтервалу $t_{n-1} \leq t < t_n$.

Оскільки прикладена до накопичувача напруга задається дискретним законом, що містить багато значень, то визначення напруги на накопичувачі за рекурсивними виразами (3.3)-(3.6) є громіздким, тому є можливим лише у вигляді циклічних розрахунків за допомогою використання ЕОМ. В середовищі MathCad даний циклічний розрахунок для випадку прикладеної напруги з 4964 точок при використанні виразу (3.6) має вигляд, що представлено на рисунку 3.5.

Розрахунок за виразами (3.3) і (3.4), а також (3.5) і (3.6) для параметрів реальних законів зміни вхідної напруги $U(t)$ дають ідентичні результати напруги на ємності накопичувача $u_{C_{\text{зар}}}(t)$.

```

r_UH :=
| t ← 0
| i ← 1
| resi,1 ← t
| resi,2 ←  $\frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{Uk2(t + dt)}{dt} \cdot \left[ t - \tau \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \right]$ 
| i ← i + 1
| t ← t + dt
| while t < 4964
|   | resi,1 ← t
|   | resi,2 ← resi-1,2 +  $(Uk2(t) - res_{i-1,2}) \cdot \left( 1 - e^{-\frac{dt}{\tau}} \right) + \frac{Uk2(t + dt) - Uk2(t)}{dt} \cdot \left[ dt - \tau \cdot \left( 1 - e^{-\frac{dt}{\tau}} \right) \right]$ 
|   | i ← i + 1
|   | t ← t + dt
| res

```

Рисунок 3.5 – Скріншот блоку циклічного розрахунку напруги за рекурсивним виразом (3.6) із середовища MathCad

Якщо безпосередньо приєднати накопичувач до тягової мережі або силового кола ЕРС, у точці приєднання після повного заряду накопичувач буде виконувати функцію стабілізатора напруги. На рисунку 3.6 представлена реалізація напруги на затискачах накопичувача приєданого до силового кола електропоїзда ЕПЛ2Т, отримана на основі виразу (3.6). Безпосереднє підключення накопичувача не дозволяє повністю використовувати його встановлену потужність, оскільки заряд/розряд реалізується у вузькій області прикладеної напруги, яка визначається конкретним рівнем напруги холостого ходу на шинах тягових підстанцій. В цілому безпосереднє приєднання володіє низькою ефективністю, тому підключення реалізується за допомогою перетворювачів енергії (зарядно-розрядних пристроїв), що управляють енергообмінними режимами накопичувачів в широкому діапазоні.

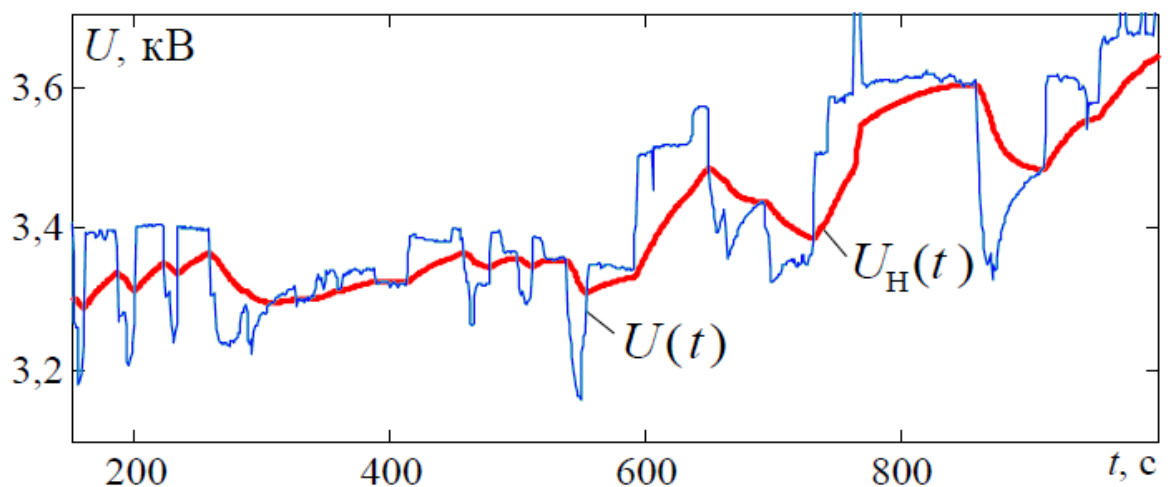


Рисунок 3.6 – Напруга на струмоприймачі електропоїзда ЕПЛ2Т (крива 1), напруга на накопичувачі (крива 2)

З метою підвищення коефіцієнта завантаження накопичувачів, ефективності їх буферної і демпфуючої функцій в тягових мережах може бути використано, так званий, режим примусового управління енергообміном накопичувачів. Його реалізація здійснюється за допомогою тих же керованих перетворювачів, що дозволяє забезпечувати задані швидкості і діапазони заряду/розряду накопичувачів.

Залежність відданої енергії НЕ в процесі його розряду на задане навантаження від залишкової напруги на його затискачах U_3 представлена на рисунку 3.7 та визначається виразом

$$E(U_3) = \int_0^{t(U_3)} p(t) dt = \int_0^{t(U_3)} u(t)i(t) dt = \int_0^{\frac{U}{RC} \ln U_3} U e^{-\frac{t}{RC}} I e^{-\frac{t}{RC}} dt, \quad (3.7)$$

де R, C – еквівалентний активний опір контуру розряду і ємність НЕ. Верхня межа інтегралу $t(U_3)$ визначає час розряду НЕ до значення напруги U_3 . З рис. 3.7 видно, що, наприклад, при розряді НЕ до напруги 50 % від номінального значення, його залишковий запас енергії складає 25 %.

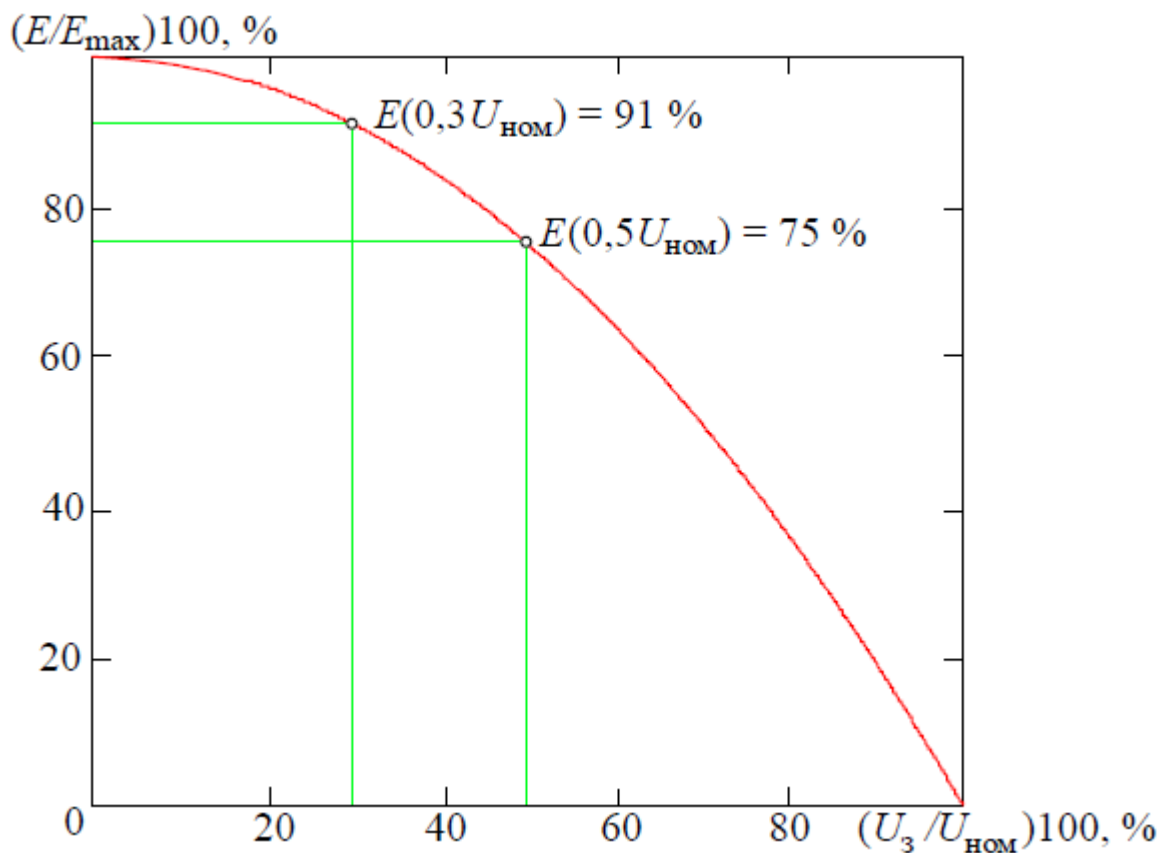


Рисунок 3.7 – Залежність відданої енергії накопичувачем від співвідношення залишкової та номінальної напруги

Для контролю поточного рівня заряду накопичувача використовується стандартний показник SoC (State of Charge)

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \frac{100}{U_{\text{ном}} C} \int_{t_0}^t i(t) dt, \quad (3.8)$$

де $\text{SoC}(t_0)$ – початковий заряд накопичувача, %;

$i(t)$ – струм накопичувача;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга на накопичувачі.

З урахуванням того, що $\frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(t) dt = u_c(t)$, то для ємнісного накопичувача залежність (3.8) зводиться до співвідношення його залишкової та номінальної напруги

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(t_0) + \frac{u_c(t)}{U_{\text{ном}}} 100. \quad (3.9)$$

Важливим фактором моделювання енергообмінних режимів в накопичувачах при рекуперації електроенергії є визначення адекватної моделі ЕРС як активного споживача електроенергії. Якщо в тяговому режимі струм ЕРС формується відповідно до електромеханічних характеристик, то в режимі рекуперації від визначається або режимом живлячої мережі, або попереднім рівнем заряду НЕ. При короткочасному гальмуванні ЕРС генеруються нетривалі імпульси електроенергії, що являє собою джерело нестабілізованої енергії. На відміну від моделей джерел, що розглядаються в класичній теорії кіл, побудова адекватної моделі ЕРС в режимі рекуперації для завдань дослідження ефективності розподілу та використання рекуперативної енергії вимагає врахування параметрів руху ЕРС (параметрів режиму гальмування).

Експлуатований ЕРС з колекторним приводом і класичною схемою рекуперації дозволяє реалізовувати рекуперативне гальмування з віддачою енергії

в мережу при швидкостях до 40 км/год [16, 17], що пов'язано з граничним регулюванням напруги ТЕД постійного струму в генераторному режимі (за рахунок зміни збудження електричних машин постійного струму). Область можливого використання рекуперації обмежена мінімальною швидкістю ЕРС, а саме

$$v_{\min} = \frac{U_{\text{км}} - \sum E_{\text{дв}}}{C_{\text{дв}} \Phi_{\text{дв max}}} \approx \frac{U_{\text{км}}}{C_{\text{дв}} \Phi_{\text{дв max}}}, \quad (3.10)$$

тобто обмежена по струму збудження $I_{\text{в max}} \equiv \Phi_{\text{дв max}}$.

Для забезпечення стійкої рекуперації сумарна е.р.с. двигунів $\sum E_{\text{дв}}$ повинна бути більше напруги в контактній мережі $U_{\text{км}}$, а зі зменшенням швидкості поїзда при гальмуванні величина $\sum E_{\text{дв}}$ також зменшується. Тому, для розширення зони швидкостей рекуперації і зниження v_{\min} необхідно з пониженням швидкості руху підтримувати співвідношення $U_{\text{км}} < \sum E_{\text{дв}}$. Це здійснює машиніст в першу чергу, збільшуючи число послідовно з'єднаних якорів двигунів, тобто, застосовуючи перехід з паралельного на послідовно-паралельне і послідовне з'єднання двигунів, при якому, в тому числі, збільшується жорсткість гальмівних характеристик.

На сучасному ЕРС з плавним регулюванням потужності при гальмуванні у діапазоні швидкостей $v_p < v < v_{\max}$ в режимі рекуперації система автоматики для забезпечення сталості гальмівного зусилля підтримує постійну потужність рекуперації (рисунок 3.8, б) [17]. При коливаннях напруги у контактній мережі в межах допустимих значень $U_{\text{км}}^{\min} \dots U_{\text{км}}^{\max}$ буде відбуватися коливання рекуперативного струму

$$I_{\text{рек}} = P_{\text{рек}} / U_{\text{км}} = I_{\text{рек}}(U_{\text{км}}),$$

тому в кожен момент часу струм рекуперації є функцією напруги на струмоприймачі ЕРС. В такому разі, строго кажучи, поїзне навантаження є нелінійним і повинно моделюватися також у вигляді джерела сталої потужності, або джерела струму, що керується напругою.

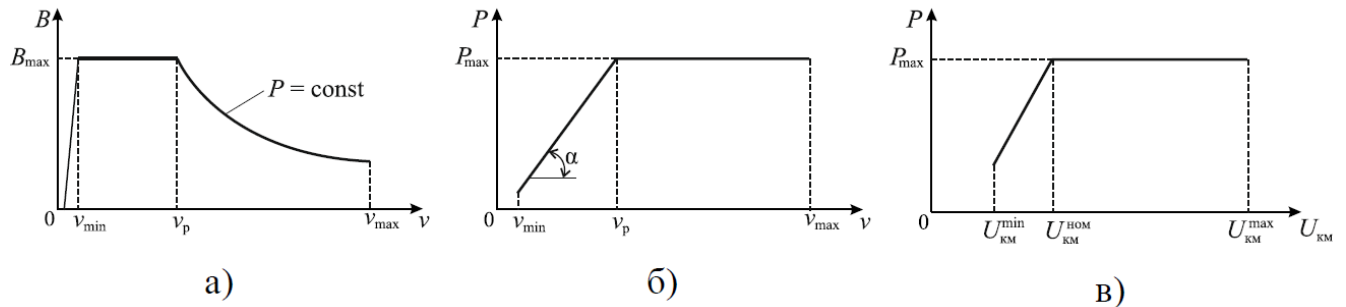


Рисунок 3.8 – Характеристики ЕРС з плавним регулюванням потужності в режимі рекуперації

Якщо ж діапазон коливань напруги на струмоприймачі є незначним, то ЕРС в режимі рекуперації з достатньою точністю можна вважати ідеальним джерелом струму. На ЕРС постійного струму з дискретним регулюванням потужності для стабілізації струму в режимі рекуперації використовується система протизбудження збудника сумісно із системою автоматичного управління рекуперативним гальмуванням, тому у діапазоні швидкостей $v_p < v < v_{max}$ ЕРС даного типу також можна розглядати у вигляді ідеального джерела струму.

При рекуперації енергії зі зниженням швидкості руху в діапазоні $v_{min} < v < v_p$ кінетична енергія поїзда, а отже і генерована потужність зменшуються пропорційно швидкості, а при $v < v_{min}$ рекуперація в мережу є неможливою, тому при даному режимі ЕРС представляє собою джерело струму, умовно кероване параметрами гальмування (швидкістю руху) та тягової мережі (напругою на струмоприймачі), що є специфічною особливістю рухомого джерела енергії. При зниженні напруги в контактній мережі рекуперативна потужність ЕРС за умовами струмового обмеження по нагріву обладнання також автоматично зменшується (рисунок 3.8, в).

В такому разі моделлю ЕРС в режимі рекуперації може виступати кероване напругою джерело струму, що аналітично записується як

$$I_{\text{рек}}(U_c) = \begin{cases} I_{\text{рек}}, & \text{при } U_c < U_c^{\text{max}}, \\ I_{\text{рек}} - I_{\text{надл}}, & \text{при } U_c = U_c^{\text{max}}, \\ 0, & \text{при } U_c > U_c^{\text{max}}, \end{cases}$$

де $I_{\text{надл}} = f(U_c)$ – надлишковий струм рекуперації, що визначається сумісним тяговим розрахунком і розрахунком миттєвої схеми СТЕ.

Якщо ЕРС обладнаний керованим накопичувачем енергії то струм рекуперації буде залежати від рівня заряду накопичувача при умові що живляча мережа не може прийняти вироблену енергію, тому модель джерела струму буди мати вигляд

$$I_{\text{рек}}(U_{\text{не}}) = \begin{cases} I_{\text{рек}}, & \text{при } U_{\text{не}} < U_{\text{не}}^{\text{max}}, \\ 0, & \text{при } U_{\text{не}} = U_{\text{не}}^{\text{max}}, \end{cases}$$

3.2 Вплив енергообмінних режимів на ресурс накопичувачів енергії

Застосування рекуперативного гальмування призводить до більш циклічної роботи накопичувачів енергії. Якщо не враховувати роботу системи рекуперації, то для транспортного засобу, можна досить легко провести розрахунок довговічності накопичувачів енергії, знаючи лише кількість циклів, на яку розраховані накопичувачі та задавшись даними щодо інтенсивності їх зарядки.

Система рекуперації енергії викликає значно більшу кількість циклів заряду-розряду, тому термін служби накопичувачів енергії при цьому зменшується. Як відомо, [27-31] глибина розряду батареї має безпосередній вплив на термін її служби, тому важливим є на етапі проектування та експериментального виробництва провести розрахунки довговічності акумуляторної батареї.

Циклічність та глибина заряду-розряду батарей від стаціонарних джерел

цілком залежить від запрограмованого режиму їх роботи та запасу ходу. Натомість необхідно розглянути дане питання для системи рекуперації енергії.

В роботі [32] проведено експериментальне дослідження режимів гальмування транспортного засобу. Результати отриманих даних наведено у таблиці 3.1 та 3.2.

Таблиця 3.1 – Розподіл гальмівних режимів транспортного засобу

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год								Всього випадків
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0	2	14	3	5	0	2	12	38
60	0	0	4	5	17	11	5	21	63
50	0	0	0	5	13	19	1	29	67
40	0	0	0	0	11	23	10	41	85
30	0	0	0	0	0	19	1	59	79
20	0	0	0	0	0	0	4	59	63
10	0	0	0	0	0	0	0	7	7
Всього випадків	0	2	18	13	46	72	23	228	402

Таблиця 3.2 – Ймовірності переходів транспортного засобу у гальмівні режими для різних початкових швидкостей гальмування

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год								Сума імовірностей подій
	70	60	50	40	30	20	10	0	
70	0,000	0,005	0,035	0,007	0,012	0,000	0,005	0,030	0,0945
60	0,000	0,000	0,010	0,012	0,042	0,027	0,012	0,052	0,1567
50	0,000	0,000	0,000	0,012	0,032	0,047	0,002	0,072	0,1667
40	0,000	0,000	0,000	0,000	0,027	0,057	0,025	0,102	0,2114
30	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,047	0,002	0,147	0,1965
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,147	0,1567
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,017	0,0174
Сума імовірностей подій	0,000	0,005	0,045	0,032	0,114	0,179	0,057	0,567	1,000

Сума усіх стовпців та рядків матриці дорівнює 1, оскільки події вважаються несумісними. За наведеними даними в [32] визначено глибину розряду системи накопичення енергії під час рекуперативного гальмування, для кожного діапазону зміни швидкості. В загальному формула для розрахунків матиме вигляд [30]:

$$\rho = A_n \cdot \frac{100}{E_n},$$

де ρ - глибина розряду, %;

A_n – кількість рекуперованої енергії, Дж;

E_n – максимальна кількість енергії системи накопичення, Дж.

На основі використання даного отримано розподіл глибини розряду системи накопичення, для досліджуваного діапазону швидкостей (таблиця 3.3).

Таблиця 3.3 – Розподіл глибини розряду системи накопичення (%)

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	0,47	0,93	1,40	1,86	2,33	2,79	3,26
60	0,00	0,41	0,82	1,23	1,65	2,06	2,47
50	0,00	0,00	0,35	0,70	1,05	1,41	1,76
40	0,00	0,00	0,00	0,29	0,57	0,86	1,15
30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,22	0,43	0,65
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,14	0,28
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0009 4

Як видно з наведеної таблиці 3.3, під час руху транспортного засобу на рівнинній місцевості у міському циклі глибина розряду накопичувачів енергії становить до 4 %. Однак при цьому необхідно враховувати, що під час рекуперативного гальмування виникають великі струми рекуперації, якими не

завжди можна проводити зарядку накопичувачів енергії. Тому як один з варіантів підвищення ресурсу роботи накопичувачів енергії є встановлення буферного суперконденсатора. Даний суперконденсатор забезпечить поглинання усїєї рекуперованої енергії та поступову її віддачу у акумуляторні батареї, при цьому за допомогою інверторів, можна забезпечити оптимальні струми зарядки.

Необхідна ємність суперконденсатора розраховується за залежністю [31]:

$$C = \frac{2 \cdot E}{U^2},$$

де C – ємність суперконденсатора, Ф;

E – кількість рекуперованої енергії, Дж;

U – напруга генератора, В.

Для енергетичних показників, наведених у таблиці 3.4, за останньою залежністю проведено розрахунок необхідної ємності суперконденсаторів, для забезпечення поглинання усїєї рекуперованої енергії. Результати розрахунків зведено у таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Необхідні ємності суперконденсаторів, Ф

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	87	175	262	349	436	524	611
60	0	77	154	232	309	386	463
50	0	0	66	132	198	264	330
40	0	0	0	54	107	161	215
30	0	0	0	0	41	81	122
20	0	0	0	0	0	26	52
10	0	0	0	0	0	0	0

Наведена таблиця дозволяє провести аналіз та вибір суперконденсаторів необхідної ємності, а також оптимізувати роботу енергетичної системи, з метою

зменшення кількості суперконденсаторів. Крім розрахунку необхідної ємності іоністора, з врахуванням режимів його роботи, потрібно враховувати час його розрядки, з тим, щоб забезпечити акумулювання усієї рекуперованої енергії під час наступного гальмування. Час розрядки суперконденсатора, з врахуванням режиму зарядки акумулятора визначається за залежністю:

$$t = \frac{CU_p}{I_p}$$

де U_p – напруга розрядки суперконденсатора, фактично це напруга акумулятора, В;

I_p – струм зарядки акумулятора, А.

Час розрядку суперконденсатора наведено у таблиці 3.5.

Для визначення працездатності суперконденсатора та перевірки розрахованої або вибраної ємності необхідно провести аналіз його роботи у міському їздовому циклі. Часові характеристики міського їздового циклу, згідно EN 1986 – 1:2001 наведено у таблиці 3.6.

Таблиця 3.5 – Час розряду суперконденсатора (с)

Початкова швидкість гальмування, км/год	Кінцева швидкість гальмування, км/год						
	60	50	40	30	20	10	0
70	70	140	209	279	349	419	489
60	0	62	123	185	247	309	370
50	0	0	53	105	158	211	264
40	0	0	0	43	86	129	172
30	0	0	0	0	32	65	97
20	0	0	0	0	0	21	41
10	0	0	0	0	0	0	0

Таблиця 3.6 – Часові характеристики міського їздового циклу, згідно EN 1986 – 1:2001

№ з/п	Вимоги EN 1986 – 1:2001				Накопичена енергія, кДж
	Режим руху	Швидкість руху або її зміна, км/год	Тривалість режиму, с	Час розрядки, с	
1	Зупинка	0	11	0	0
	Прискорення	0...15	4	0	0
2	Постійна швидкість	15	8	0	0
	Сповільнення	15...0	5	0	15
4	Зупинка	0	21	41	0
	Прискорення	0...15	6	0	0
6	Зміна швидкості, прискорення	15...32	6	0	0
	Постійна швидкість	32	24	0	0
8	Сповільнення	32...0	11	0	35
	Зупинка	0	21	97	0
10	Прискорення	0...15	6	0	0
	Зміна швидкості, прискорення	15...35	11	0	0
12	Зміна швидкості, прискорення	35...50	9	0	0
	Постійна швидкість	50	12	0	0
14	Сповільнення	50...35	8	0	38
	Постійна швидкість	35	15	105	0
16	Сповільнення	35...0	10	0	61
	Зупинка	0	7	172	0

Таблиця 3.7 – Сумарні часові характеристики міського їздового циклу, згідно EN 1986 – 1:2001

№ з/п	Режим руху	Тривалість режиму, с	Час розрядки, с	Накопичена енергія, кДж
1	Накопичення енергії суперконденсатором	4,7	0	15
2	Віддача енергії у тягову батарею	57	41	0
3	Накопичення енергії суперконденсатором	4,7	0	35
4	Віддача енергії у тягову батарею	59	97	0
5	Накопичення енергії суперконденсатором	2,7	0	38
6	Віддача енергії у тягову батарею	25	105	0
7	Накопичення енергії суперконденсатором	4,7	0	61
8	Віддача енергії у тягову батарею	10	172	0

Таким чином, як видно з таблиць 3.6 та 3.7, під час руху транспортного засобу з електричним приводом у міському циклі, можуть мати місце випадки, коли суперконденсатор не матиме можливості забезпечити акумулювання усієї рекуперованої енергії. З метою забезпечення безперебійної роботи системи, уникнення її перевантаження та для безпеки водія та пасажирів необхідним є встановлення гальмівного реостату, який би включався в роботу у випадках виходу з ладу системи накопичення енергії або системи управління електричним двигуном. Також гальмівний реостат забезпечить гасіння надлишкової енергії у випадку експлуатації транспортного засобу у нетипових для нього умовах, наприклад експлуатацію транспортного засобу з малим обсягом накопичувачів енергії у гірських умовах.

На сучасному етапі розвитку науки та техніки, враховуючи також вимоги нормативних документів щодо екології вибір накопичувачів енергії - це завжди компроміс між витратами на виробництво автомобіля та економічним і екологічним

ефектами, досягнутими в процесі його експлуатації.

Наведена методика розрахунку дозволяє провести розкладку енергетичних показників транспортного засобу, обладнаного електричним приводом у будь-якому швидкісному діапазоні та провести розрахунки системи накопичення енергії. Чинники, які дозволяють змінювати енергетичні показники та гальмівні властивості транспортного засобу:

- струмошвидкісні характеристики електричного двигуна, який працює в режимі генератора;
- напруга генератора та системи накопичення.
- принцип роботи та конструкція системи накопичення енергії.

Проводячи розрахунки системи накопичення енергії на етапі проектування транспортного засобу можна досягти оптимального ефекту від застосування рекуперації енергії за показниками: «вартість транспортного засобу – економічний та екологічний ефекти під час експлуатації».

Важливим також при виборі периметрів НЕ є прогноз терміну його служби у залежності від кількості циклів перезаряду. Термін служби суперконденсаторів може бути більше 10 років при нормальних умовах експлуатації, проте через прискорення постійних паразитних електрохімічних реакцій при збільшенні температури і напруги, ємність падає, в той час як внутрішній опір і саморозряд зростає, відповідно термін служби суперконденсаторів знижується.

Зазвичай, виробники суперконденсаторів в специфікаціях вказують вплив напруги і температури на термін служби суперконденсаторів. Зразкові результати розрахунків показують, що термін служби знижується до 2 разів при перевищенні номінальної напруги на 100 мВ. При перевищенні номінальної температури 25 °С термін служби може знижуватися на 1,7...2,5 рази на кожні 10 °С.

Ці приблизні розрахунки можуть бути описані як експоненціальна функція вигляду

$$T_L = T_{L,N} \cdot c_v^{(U_c - U_N)/100\text{mV}} \cdot c_q^{(Q - Q_N)/10\text{K}},$$

де $T_{L,N}$ – очікуваний життєвий цикл при номінальних умовах (номінальна напруга U_N і номінальна температура Q_N);

c_v і c_q – постійні, залежні від пристрою (технології і процеси виробництва);

U_c – напруга на ємності накопичувача (згідно рисунку 3.1);

Q – температура.

Згідно розрахунків [31], де розглядається питання співвідношення струму витoku і процесів старіння, старіння конденсатора прискорюється в 1,5-2 рази (фактор c_v) при збільшенні максимальної напруги на 100 мВ і в 1,7-2,5 рази (фактор c_q) при збільшенні температури на 10 °С. Дані оцінки були зроблені для конденсатора з номінальною напругою 2,5 В. Однак, вони можуть бути застосовні і для нових суперконденсаторів з більш високою напругою.

3.3 Паралельна робота накопичувачів

Комбінація суперконденсатора і резервуара енергії з відносно низькою щільністю потужності (батареї) дозволяє поліпшити характеристики системи накопичення енергії. У системах, що використовують батарею або паливні елементи в якості накопичувача енергії, застосування суперконденсатора пристрої імпульсної потужності (supercapacitor peak power unit / PPU) може привести до значних поліпшень.

Як джерела електричної енергії, батареї були розроблені для застосувань з низькою щільністю потужності, тому умови роботи з піковими навантаженнями призводять до великим внутрішнім втрат і короткому терміну служби. Тому, суперконденсатор може бути використаний для того, щоб розвантажити батарею від пікових навантажень. Це дає можливість знизити параметри батареї (ємність, розміри) і оптимізувати її, виходячи зі звичайних режимів роботи. Як результат,

поліпшується управління енергією і збільшується термін служби батареї.

Суперконденсатор дає і додаткову перевагу, оскільки не тільки може служити джерелом імпульсної потужності, але також дуже швидко заряджатися. Енергія для заряду може бути взята з енергетичного резервуара або з централізованої системи живлення електротяги, що працює як генератор. Ця енергозберігаюча рекуперативна характеристика може бути використана багатьма способами, такими як регенерація енергії гальмування транспортних засобів, ліфтів тощо.

На рисунку 3.9 представлено ілюстрацію впливу суперконденсатора, паралельно підключеного до батареї, що показує, як суперконденсатор допомагає компенсувати імпульс навантаження.

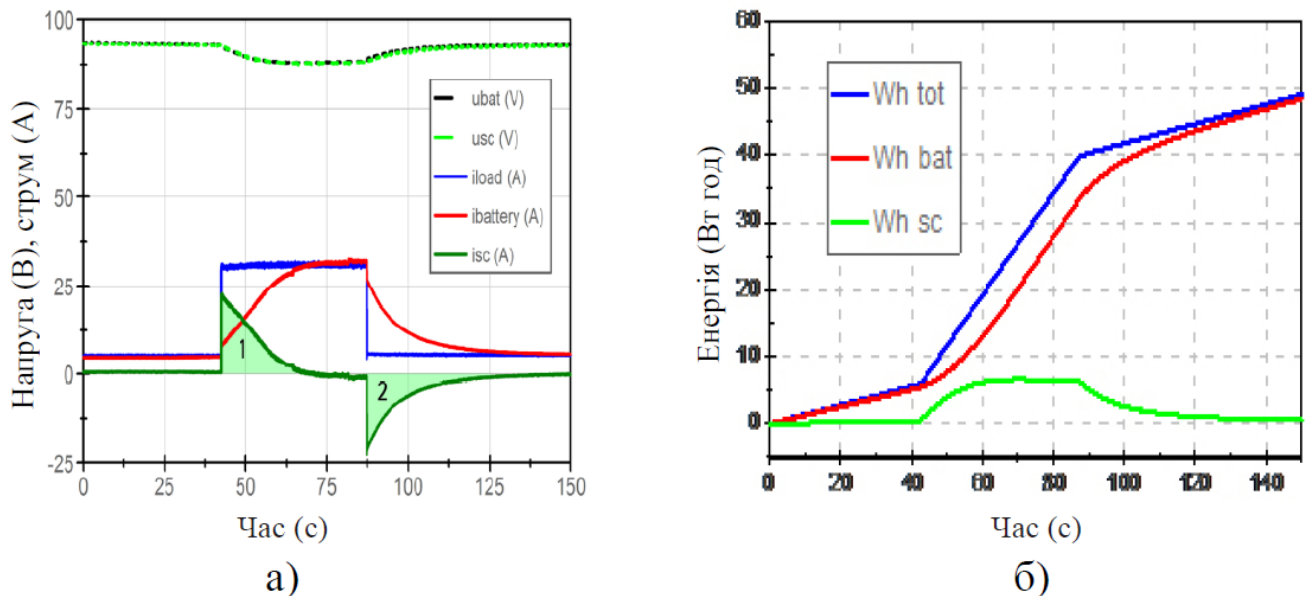


Рисунок 3.9 – Характеристики системи накопичення (а) та загальна передана енергія (б) без застосування DC/DC-перетворювача

Такий процес визначається в основному падінням напруги на батареях і суперконденсаторах. Оскільки лімітоване падіння напруги швидко стабілізується, використовувана енергія суперконденсаторів також обмежена, як в обсязі, так і в часі (рисунок 3.9, а, б). Струм суперконденсаторів падає до нуля, коли напруга на шині стабілізується і, як результат, батареї повинні забезпечувати повну

потужність.

Коли імпульс закінчується батареї стають не завантаженими і можуть «відпочити», напруга на шині піднімається знову (з урахуванням невеликого падіння напруги на подолання внутрішнього опору батарей). Як результат, батареї перезаряджають суперконденсатори. Енергія, надана суперконденсаторами на початку імпульсу, повертається в них назад після закінчення імпульсу (рисунок 3.9, а, зони 1 і 2).

При непрямому з'єднанні суперконденсаторів і батарей за допомогою DC/DC-перетворювача, останній дозволяє змінювати напругу на суперконденсаторному модулі незалежно від напруги на DC-шині батареї. Очевидно, варто уваги те, що суперконденсатори не тільки компенсують раптові зміни струму, але також можуть обмежити струм акумуляторної батареї на конкретний період часу (в залежності від ємності суперконденсаторів).

На рисунку 3.10 представлена ілюстрація того, що напруги на модулі суперконденсатора і батареях розрізняються.

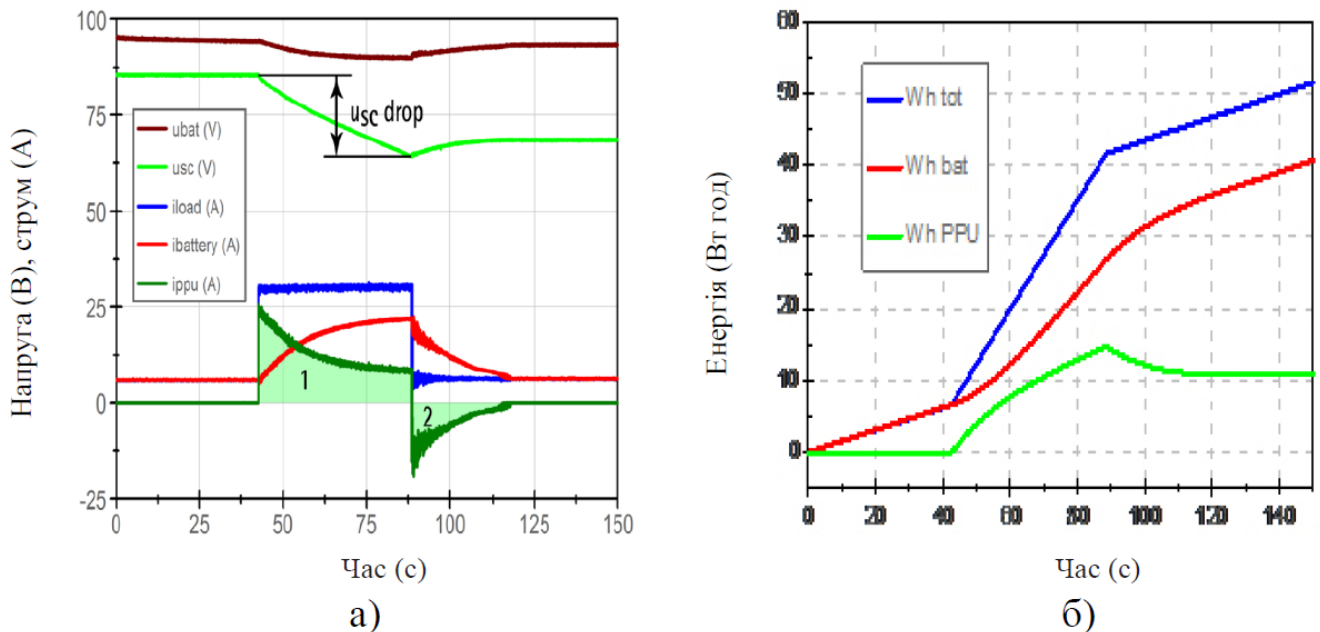


Рисунок 3.10 – Характеристики системи накопичення (а) та загальна передана енергія (б) із застосуванням DC/DC-перетворювача

Завдяки відсутності залежності і правильному співвідношенню, що підлягає обміну, енергія може регулюватися за допомогою DC/DC-перетворювача в PPU. На додаток рисунок 3.10 показує, як струм і потужність батареї обмежуються. Перетворювач дозволяє здійснювати динамічний обмін потужністю між обома системами, в той час як система без DC/DC-перетворювача і методологія контролю повністю залежать від малодинамічних батарей з характерною для них напругою. Підсумовуючи вище сказане необхідно зауважити, що рисунок 3.10 показує, як за допомогою PPU струм батареї не тільки згладжується, а й обмежується. Падіння напруги U_{sc} drop і загальна енергія, яка забезпечується PPU показує, що суперконденсатори в повному обсязі перезаряджаються після імпульсу. Перетворювач в комбінації з інтелектуальною системою контролю дозволяє заряджати і розряджати модуль суперконденсатора в найбільш підходящий момент (наприклад, заряд протягом процесу рекуперативного гальмування). У цьому полягає принципова відмінність системи з перетворювачем від звичайної системи без перетворювача.

Внутрішній опір суперконденсатора, як правило, набагато менше внутрішнього опору батареї. Це означає, що суперконденсатори набагато ефективніше батарей (особливо при великих струмах). Обмеження струму батарей і накопичення енергії рекуперації прямо в суперконденсатори може значно підвищити ефективність. Однак, при аналізі всієї системи в цілому необхідно враховувати ефективність DC/DC-перетворювача, а саме його ККД.

4 ВДОСКОНАЛЕННЯ СПОСОБІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Ресурсозберігаючий та енергоефективний спосіб заряду накопичувачів енергії для електробусів та тролейбусів з автономним ходом. В сучасних умовах перспективними напрямками підвищення ефективності електротранспорту є розробка і впровадження нових технологій в області електрорухомого складу і систем тягового електропостачання, що підвищують ефективність перетворення енергії у всіх елементах комплексу. При розробці цих напрямків необхідно враховувати і аналізувати не тільки окремі елементи комплексу, але і їх взаємні зв'язки. Одним з таких напрямків в нашій країні і за кордоном є розробка і впровадження в транспортні комплекси нових видів джерел енергії, що дозволяють підвищити ефективність використання енергії електрорухомим складом і здатних надавати неавтономним транспортним засобам нові властивості, такі як, автономний хід. Другим напрямком, що досліджує застосування накопичувачів енергії в транспортному комплексі, є область автономного електричного і гібридного транспорту.

На сьогоднішній день існує декілька способів заряджання акумуляторів, серед яких:

- заряд не стабілізованим струмом;
- заряд стабілізованим струмом;
- заряд стабілізованою напругою;
- заряд нікель-кадмієвих та нікель-метал-гідридних акумуляторів;
- двоступеневий зарядний пристрій за методом CC/CV.

Пропонується найбільш досконалий спосіб заряджання акумуляторів, який поєднав в собі усе найкраще від відомих способів. Даний спосіб заряджання підходить для будь-якого типу акумулятора (рисунок 4.1). Заряд акумуляторної батареї (АБ) відбувається в три етапи.

Перший етап зарядки називається етапом перезаряд. На цьому етапі

акумулятор заряджається струмом $0,1 \cdot C$ (де C – ємність батареї). Такий малий струм зарядки необхідний для підняття рівня напруги на акумуляторі до мінімально робочої.



Рисунок 4.1 – Структурна схема зарядного пристрою за методом CC/CV

Другий етап – заряд стабілізованим струмом (I). На другому етапі акумулятор заряджається постійним струмом, який приймають в діапазоні $0,5 - 1,0 \cdot C$. Це необхідно, щоб напруга на акумуляторі досягла свого максимального робочого значення.

Третій етап - заряд стабілізованою напругою (U). На третьому етапі акумулятор заряджається постійною напругою, а струм поступово зменшується по мірі набирання акумулятором повної ємності. Після досягнення значення величини струму рівного $0,05 \cdot C$, зарядний пристрій вимикається.

Моделювання зарядного пристрою проводилось в середовищі MATLAB Simulink. В якості базових параметрів були задані:

- тип акумулятора: свинцево - кислотний, літій - іонний, нікель - кадмієвий;
- номінальна напруга акумулятора: 550 В;
- номінальна ємність акумулятора: 200 А·год;

- струм заряду: 100 А, 200 А, 300 А, 400 А;
- напруга заряду: 640 В.

На рисунку нижче зображена модель зарядного пристрою (рисунок 4.2). Даний зарядний пристрій працює за методом постійний струм/постійна напруга (CC/CV).

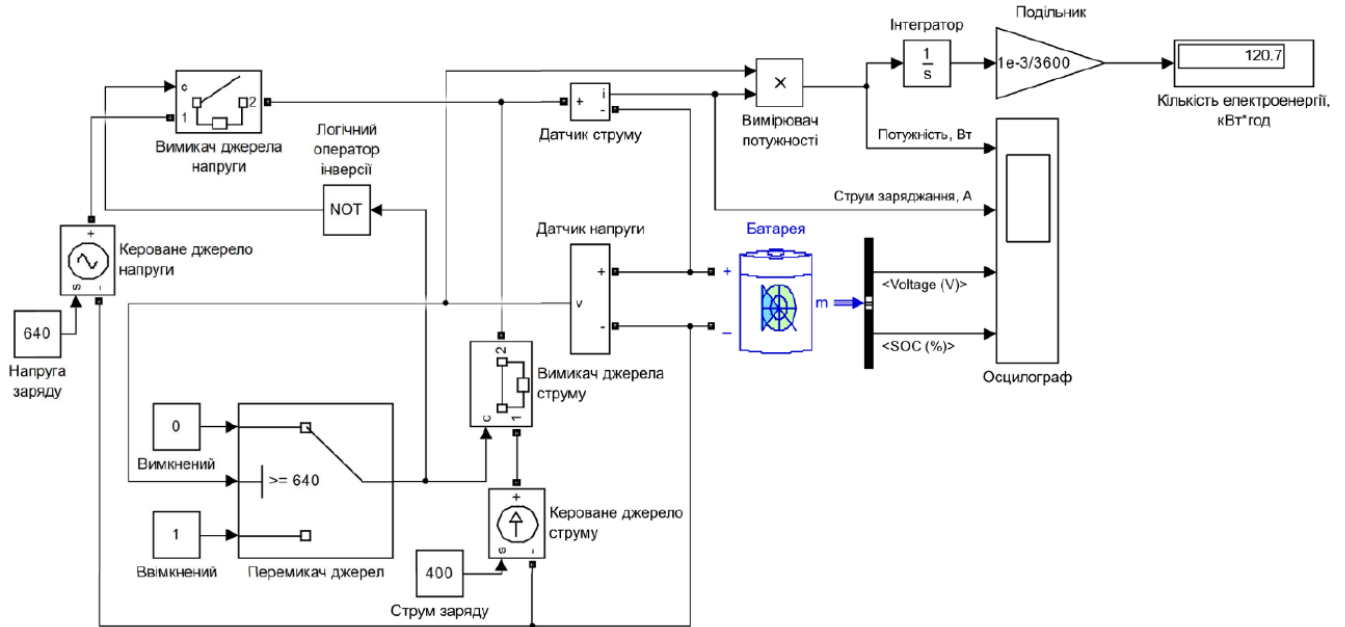


Рисунок 4.2 – Модель зарядного пристрою працюючого за принципом CC/CV

Час заряду визначається з осцилограми заряду батареї, розрахунки яких зведено до таблиці 4.1.

На основі результатів досліджень побудовані порівняльні гістограми залежності часу заряду від струму заряду (рисунок. 4.3) та використаної електроенергії від струму заряду (рисунок 4.4) для кожного типу акумулятора.

Таблиця 4.1 – Результати вимірів процесу заряджання

Тип акумулятора	Струм заряду, А	Час заряду, хв	Витрати електроенергії, кВт*год
Pb	100	128,5	116,84
	200	76,7	119,42
	300	62,6	121,26
	400	56,4	122,74
Li-Ion	100	125,0	117,08
	200	70,8	118,36
	300	43,9	119,58
	400	33,3	120,7
Ni-Cd	100	150,8	138,04
	200	100,0	139,08
	300	84,7	139,78
	400	76,4	140,3

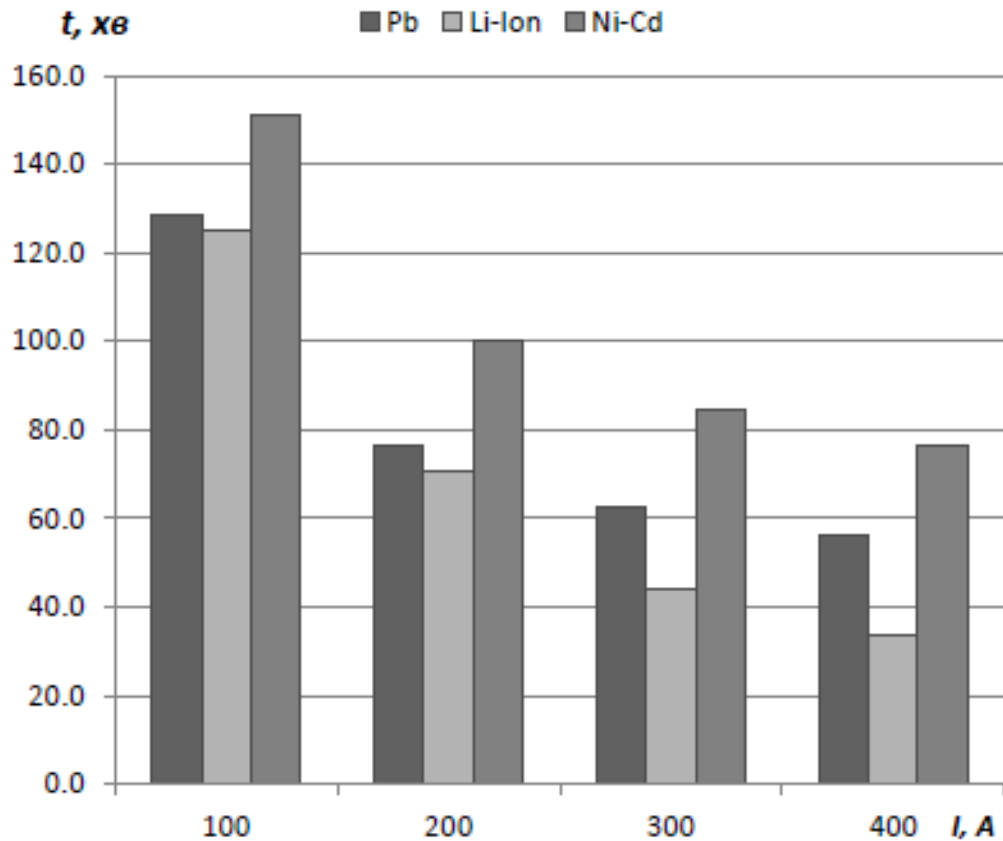


Рисунок 4.3 – Залежність часу заряду від струму заряду для кожного типу

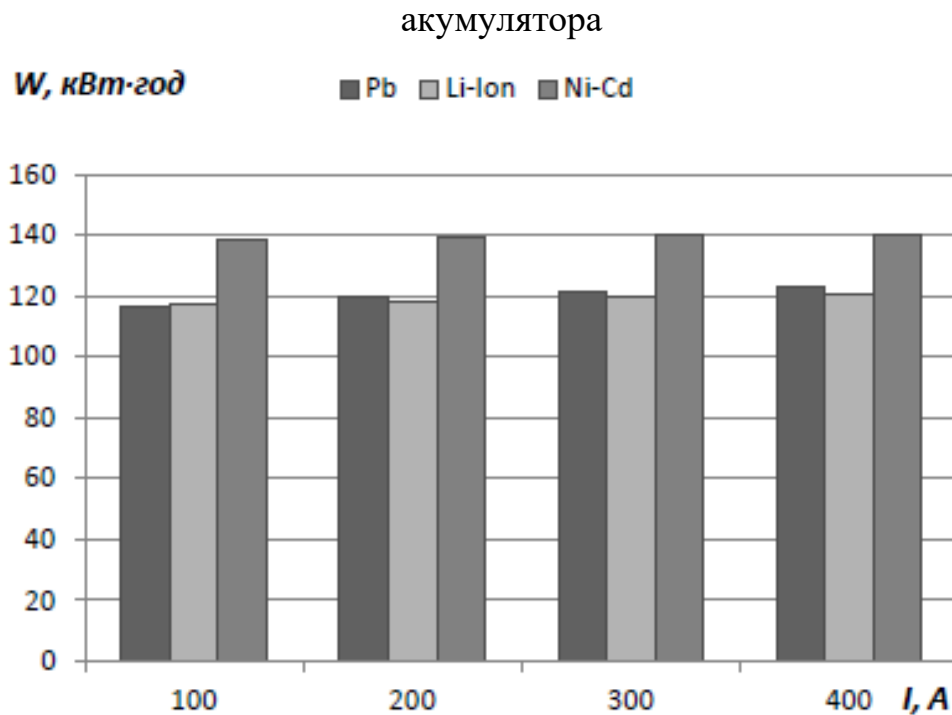


Рисунок 4.4 – Залежність кількості витраченої електроенергії від струму заряду для кожного типу акумулятора

Проаналізувавши гістограму залежності часу від струму, можна зробити наступні висновки. Найменший час заряджання має зарядний пристрій із струмом заряду рівним 400 А. Якщо ж говорити про тип акумулятора, який використовується в системі акумуляування енергії, то найбільш досконалим за параметром час заряду, є літєвий тип акумулятора.

Розглядаючи графік (рисунок 4.4), можна виділити двох фаворитів серед представлених, а саме: Pb та Li-Ion типи акумуляторів. Вони показують найменшу кількість витраченої електроенергії на заряд акумулятора до 100% і ця кількість в обох акумуляторах лежить в межах близько 60 кВт·год.

Отже, підсумовуючи усе вище сказане, можна обрати зарядний пристрій з такими параметрами:

- зарядний струм – 400 А;
- зарядна напруга – 640 В;

- потужність зарядного пристрою – 256 кВт.

Також доцільним буде обрати акумуляторну батарею з наступними характеристиками:

- тип – Li-Ion;

- номінальна напруга – 550 В;

- номінальна ємність – 200 А·год.

Аналізуючи дані досліджень можна сказати, що ефективність використання акумуляторів із зарядними пристроями в якості бортового обладнання не має за мету зменшення споживаної електроенергії в цілому.

Але беручи до уваги, що тролейбуси кожен момент часу знаходяться на різних відстанях від тягових підстанцій і споживають струм від контактної мережі, а як відомо втрати напруги тим більші, чим більший струм та відстань від тягової підстанції, тоді і проявляється ефект від використання бортового накопичувача, саме за рахунок зменшення втрат в контактній мережі за рахунок часткового живлення двигунів від акумуляторної батареї.

Окрім того використання бортових накопичувачів дозволяє повністю відмовитись від контактної мережі, але при цьому необхідно забезпечити джерела живлення на кінцевих зупинках тролейбусних маршрутів для підзарядки накопичувачів. Також можливий варіант поєднання електрифікованих ділянок з не електрифікованими, що дозволяє розробляти нові маршрути слідування в містах, що в свою чергу тягне за собою відмову від використання засобів пересування на базі двигунів внутрішнього згорання, що позитивно впливає на оточуюче середовище.

Економічне обґрунтування використання накопичувачів енергії для міського електротранспорту.

Собівартість це кількість витрат в грошовому вимірюванні, що доводяться на одиницю продукції (роботи). Цей показник є одним з основних для визначення ефективності виробництва. У локомотивному депо визначають планову і звітну

собівартість за формулою.

$$C = \frac{\sum E_B}{\sum M_{рем.}}, \quad (4.1)$$

де $\sum E_B$ – витрати на придбання обладнання;

$\sum M_{рем.}$ – річна програма впровадження обладнання.

Для розрахунку собівартості впровадження обладнання одного локомотиву потрібно визначити експлуатаційні витрати для виконання річної програми обслуговування.

План витрат можна представити як зміну витрат грошових коштів на виконання планових робіт по перевезенням пасажирів і по ремонту ЕРС. Основне завдання розрахунків витрат забезпечення безумовного виконання запланованих робіт з економною витратою матеріальних грошових і трудових ресурсів.

Експлуатаційні витрати за економічними ознаками групуються по елементах витрат:

- фонд оплати праці (ФОП);
- відрахування на соціальне страхування;
- паливо;
- електроенергія;
- матеріали;
- амортизація;
- інші витрати.

Загальна величина експлуатаційних витрат розраховується за формулою:

$$\sum E_B = E_{з.н} + E_{с.н} + E_m + E_{ел} + E_{ам}, \quad (4.2)$$

де $E_{з.н}$ – витрати на заробітну плату, грн.,

$E_{с.н}$ – витрати на соціальні потреби, грн.,

E_m – витрати на матеріали, грн.,

$E_{ам}$ - амортизація, грн.,

$E_{ел}$ – витрати на електроенергію, грн..

Витрати по цих групах встановлюються для депо планово-економічним відділом дороги на місяць. За способом включення витрат в собівартість продукції вони діляться на прямі і непрямі. Прямими називаються витрати, пов'язані з виконанням одного виду продукції. Всебічне вивчення структури витрат дозволяє точно визначити витрати по елементах і обґрунтовано планувати зниження витрат на одиницю виконуваної роботи. Найбільша питома вага у витратах підприємства має заробітна плата.

Планування витрат на паливо, електроенергію, матеріали і інші витрати може бути виконано декількома способами:

- за встановленим в плані обсягом робіт і нормами витрат на одиницю відповідного вимірника.
- по наявності устаткування і пристроїв і нормам витрат на кожну одиницю.
- по числу господарських підрозділів і нормам витрат на кожне з них за штатним розкладом. По величині і питомій вазі ці витрати не повинні перевищувати 8-10%.
- за чисельністю окремих груп працівників і нормами витрат на одного працівника. У цій групі витрат плануються витрати по охороні праці, спецодяг, відрядження, добові і деякі інші витрати.

Витрати електроенергії на виробничі потреби визначаються по величині споживаної енергії електросиловими установками, їх числу, часу роботи, норми витрати на одиницю ремонту і вартості 1 кВт·год електроенергії за діючими тарифами на розрахунковий період.

Витрати на матеріали плануються в ремонтному господарстві за програмою ремонтів і вартості одиниці ремонту певного вигляду і серії одиниці рухомого

складу.

У цю ж групу витрат включаються і витрати на спецодяг і спецвзуття, виходячи з кількості робочих, терміну носки і ціни.

Собівартість встановлення нового обладнання може бути визначена діленням витрат по кожній статті на величину виконаної роботи, а потім підсумована. Такий спосіб називається калькуляцією собівартості. Калькуляція собівартості може виконуватися у вигляді таблиць спеціальної форми.

Основною витратною статтею є вартість безпосередньо накопичувача енергії. Виходячі з проведеної роботи та з огляду на те, що пропонується обрати комбінований варіант – комбінацію суперконденсатора з літійовою батареєю, було проведено відповідні розрахунки відносно саме цих пристроїв. Розрахунки було зроблено для двох крайніх випадків, тобто для малопотужних (120 кВт) та потужних (500 кВт) електробусів. Якщо вартість обладнання малопотужних машин складає майже 160000 грн. (саме обладнання складає 128 тис. грн.), то для потужних вже 1100 тис. (обладнання 967500 грн.).

Таким чином, строк окупності при середньому пасажиропотоці складе більше, ніж 6 та 8 років відповідно. З цього можна зробити висновок, що без дотацій держави достатньо складно провести подібну заміну (або модернізацію) рухомого складу. Проте слід зауважити, що при економічних оцінках не було враховано екологічну складову, яка останнім часом набуває надважливого значення. А також слід зазначити, що термін окупності потенціально можна зменшити при умові використання альтернативних джерел живлення.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

При виконанні обслуговування міського електротранспорту та ремонтних робіт застосовують обладнання для механічної обробки металів, а саме різні верстати, зварювальні установки, різальні інструменти та ручний електричний інструмент.

Ремонт та обслуговування електронних блоків дозволяється виконувати у спеціально обладнаному приміщенні (цеху), де встановлені радіомонтажні столи з витяжною вентиляцією, екрани та стелажі. Приміщення повинно відповідати кліматичним умовам згідно ДСН 3.3.6.042-99 та обладнано місцевим освітлюванням, необхідним вимірювальним обладнанням. Обслуговуючий персонал повинен мати заземлюючі браслети. Паяльники застосовувати напругою живлення 36 В. Жало паяльника заземлювати.

Основне обладнання, що використовується при виконанні технічного обслуговування та ремонті:

- електрозварювальні апарати;
- різальні, фрезерувальні, шліфувальні, токарні верстати;
- кантувачі;
- домкрати;
- електроінструмент, пневмоінструмент;
- випробувальні стенди;
- високовольтні камери.

У цеху повинен бути необхідний комплект деталей і радіоелементів для обслуговування та ремонту електронних блоків. Радіоелементи використовувати, термін гідності яких не закінчився, але не більше 10 років від дати виготовлення. Деталі та електронні елементи перед встановленням в блоки повинні пройти вхідний контроль та вибракування елементів з невідповідними документації параметрами.

Ремонт та огляд блоків, які включають в себе мікросхеми та інші низьковольтні напівпровідникові елементи, виконувати з урахуванням небезпеки їх пошкодження статичною електрикою. Для зменшення її негативної дії на радіоелементи у цеху необхідно запобігати профілактичним заходам:

- використовувати одяг, який мало електризується (бавовняні халати), взуття на шкіряній підшві;

- підтримувати вологість у приміщенні у межах від 50 до 85 %;

- покривати поверхню столів та підлоги матеріалами, які мало електризуються або на робочих столах мати металеві листи розміром не менше 100x200 мм та надійно з'єднувати їх через обмежувальний резистор з опором 1 МОм до шини заземлення;

- надівати на руки робітникам спеціальні антистатичні браслети, які з'єднані через резистор опором 1 МОм з заземленням;

- знімати розряд статичної електрики з електронних блоків дотиком, через резистор опором 1 МОм, до заземлення;

- виконувати перевірку, ремонт та налагодження електричної апаратури у строгій відповідності до затвердженої ремонтної документації з використанням спеціальних стендів та обладнання.

Роботи, що виконуються на обладнанні при обслуговуванні та ремонті електропоїздів.

Технологія технічного обслуговування та поточного ремонту електричного рухомого складу вимагає використання різноманітного технологічного обладнання та виконання різнопланових ремонтних, відновлювальних робіт.

Наплавочні та зварювальні роботи проводять зварювальним апаратом з необхідним устаткуванням. Зварювальні роботи виконують відповідно до Інструктивних вказівок по зварювальних роботах при ремонті тепловозів, електровозів та моторвагонного рухомого складу.

Обладнання для механічної обробки металів, а саме різальні, фрезерувальні,

шліфувальні, токарні верстати, різальні інструменти використовують при виконанні відповідних робіт.

Домкрати використовуються для підйому кузовів та візків рухомого складу; для закріплення переміщення та обертання великогабаритних вузлів слугують кантувачі.

Випробувальні стенди використовуються для проведення перевірки різноманітних параметрів, характеристик та якості виконання ремонту

Високовольтні камери необхідні для проведення випробовування ізоляції електродвигунів та різних електричних апаратів під високою напругою.

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів, що виникають при виконанні технічного обслуговування електрорухомого складу.

Під час виконання ТО та ПР електропоїздів необхідно дотримуватись вимог з охорони праці відповідно до НПАОП 63.21-1.18-89 «Правила з охорони праці при технічному обслуговуванні та поточному ремонті тягового рухомого складу та вантажопідіймальних кранів на залізничному ходу» (ЦТ-4769) та пожежної безпеки згідно із Законом України «Про пожежну безпеку», НПАОП 5.1.11-5.02.83 «Інструкція щодо забезпечення пожежної безпеки на локомотивах, моторвагонному рухомому складі», НАПБ А.01.001-2004 Правила пожежної безпеки в Україні, НПАОП 0.00-1.21-98 «Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів», ЦТ-0037, ЦУО/0018, ЦУО-0021.

До роботи по ремонту ЕРС допускаються особи, що пройшли під час вступу на роботу попередній медичний огляд, професійне навчання, ввідний і первинний інструктажі на робочому місці, стажування, перевірку знань по охороні праці і що склали іспит на відповідний розряд і групу по електробезпеці.

В процесі роботи слюсарю по ремонту ЕРС (далі – слюсарю) повинен проходити повторні, не рідше за один раз на шість місяців, і позапланові інструктажі, а також періодичні медичні огляди.

Під час роботи на слюсаря можуть впливати наступні основні небезпечні і шкідливі виробничі чинники:

- рухомий склад, що рухається;
- транспортні засоби, що рухаються (електро- і автокари, навантажувачі тощо);
- предмети і інструмент, які падають з висоти;
- електричний струм;
- недостатня освітленість робочої зони в темний час доби;
- підвищена запиленість і загазованість повітря робочої зони;
- понижена або підвищена температура, підвищена вологість і рухомість повітря в робочій зоні;
- підвищений рівень шуму на робочому місці;
- підвищений рівень вібрації;
- фізичні перевантаження.

Конкретні небезпечні і шкідливі виробничі чинники встановлюються за результатами атестації умов праці.

До шкідливих факторів, які впливають на здоров'я людини відносяться:

- виробничий пил, який утворюється в результаті механічної обробки твердих тіл, завантажувально-вивантажувальних робіт, транспортування пиловидних матеріалів.

- забруднення повітря парами масляних і паливних аерозолів, особливо на пунктах екіпіровки, в цеху ТО-2 і в стійлових частинах депо, в відділеннях ремонту паливної апаратури і в інших приміщеннях. В механічних відділеннях, повітря забруднюється окисом вуглецю, аерозолем окислів заліза і змащувально-охолоджуючої рідини;

- інший, не менш шкідливий фактор – виробничі шуми. Вони впливають на нервову систему, а через неї на інші органи. Основними джерелами шумів є ділянки реостатних випробувань, обладнання надзвукового плазмового зміцнення

бандажів, технологічне обладнання, самі локомотиви згідно ДСН 3.3.6.037-99 «Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку»;

- значний вплив на здоров'я людини має виробниче випромінювання. Сильне випромінювання спостерігається на зварювальних ділянках, а також, при проведенні зварювальних робіт на рухомому складі;

- метеорологічні умови також сильно впливають на здоров'я і працездатність людини (ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень»). Лише при наявності теплового балансу між організмом і оточуючим середовищем, мікроклімат сприймається людиною як прийнятний.

Порушення теплообміну веде до перегріву або до переохолодження організму, що в свою чергу, може негативно вплинути на продуктивність праці.

Потрібно враховувати, що крім безпосереднього переохолодження працівників, що працюють на відкритому повітрі причинами порушення теплового балансу можуть бути рухомий склад, який заходить в приміщення, а також зони біля вхідних дверей при їх відчиненні.

Перераховані фактори негативно впливають на здоров'я працюючих. Наприклад, одночасно з забрудненням повітря в організм людини поступає велика кількість шкідливих речовин, частина з яких не видаляється з повітрям яке видихається. Гази і пари, що вдихаються з повітрям розчиняються в легеневій рідині. Поступово відбувається накопичення цих речовин і зростає їх несприятливий вплив на організм людини.

При експлуатації і ремонті електричного обладнання і сіток людина може опинитися в сфері дії електромагнітного поля або в безпосередньому дотику з провідниками, що знаходять під напругою відповідно до ДСанПіН 3.3.6.096-02 «Державні санітарні норми та правила при роботі з джерелами електромагнітних полів». В результаті проходження струму через людину може виникнути порушення його життєдіяльних функцій.

До організаційних заходів, що забезпечують безпеку роботи в

електроустановках, відносяться оформлення роботи, допуск до роботи, нагляд під час роботи, оформлення перерви в роботі, перевід на інше робоче місце.

Заходи безпеки при виконанні технічного обслуговування електрорухомого складу.

Вимоги електробезпеки:

Заземлення шаф і ящиків з електроустаткуванням необхідно підтримувати в справному стані і перевіряти при кожному технічному обслуговуванні і ремонті ЕРС. Особливу увагу слід звертати на заземлення кожухів електропечей і щитків вимірювальних приладів.

Слюсареві забороняється:

- застосовувати нестандартні реверсивні рукоятки контролера машиніста, ключі кнопкових вимикачів і інших блокуючих пристроїв, а також користуватися замінюючими їх пристосуваннями;

- відключати будь-який блокуючий пристрій, що забезпечує безпеку обслуговуючого персоналу, а також знімати при піднятому струмоприймачі знімні кришки підвагонних ящиків з електроустаткуванням і інші огорожі на ЕРС;

- підніматися на дах ЕРС під контактним дротом, що знаходиться під напругою;

- без майстра або бригадира підходити або проводити роботи на ЕРС, що знаходиться на деповських шляхах під контактним дротом.

Перед підйомом струмоприймача і пересуванням ремонтного ЕРС слюсар зобов'язаний вийти з кузова (вагону) ЕРС.

При технічному обслуговуванні і ремонті устаткування, вузлів і деталей безпосередньо на ЕРС користуються переносними світильниками на напругу не вище 36 В змінного струму. При роботах ЕРС допускається використання переносних світильників з лампами на напругу 50 В постійного струму від акумуляторної батареї або іншого джерела живлення.

Забороняється використання переносних світильників без запобіжних сіток, з пошкодженою вилкою і ізоляцією проводів.

Перед пересуванням ЕРС слюсар зобов'язаний припинити всі роботи по технічному обслуговуванню або ремонту і вийти з кузова (вагону, канави).

Забороняється обточування і шліфівка колекторів тягових двигунів при знятих кожухах зубчатої передачі.

При обточуванні, шліфовці і продорожці колекторів тягових двигунів слід користуватися захисними окулярами (маскою).

У всіх випадках підключення тягових двигунів під напругу до 400 В постійного струму місця приєднання живлячого кабелю до вивідних кінців тягового двигуна ізолюють.

Включення і виключення струму в цих випадках слід виконувати контактором з механічним, електропневматичним і електромагнітним приводом або рубильником з ізолюваною тягою, забезпеченим запобіжним щитком.

Забороняється знаходитися у високовольтній камері, якщо до розеток живлення від стороннього джерела під кузовом ЕРС підведена напруга вище 42 В змінного струму або вище 110 В постійного струмусекційного роз'єднувача в положення для живлення ЕРС відповідно до вказаної напруги.

Подачу напруги на кожен живлячий кабель або контактний дріт, від якого отримує живлення ЕРС, здійснюють через роз'єднувачі. Останні слід включати після підключення кабелю до розеток і відключати до від'єднання кабелю. Кабель при підключенні (відключенні) до розеток (від розеток) необхідно тримати за ізолювану рукоятку на його наконечнику.

Вимоги безпеки при використанні інструменту або інших пристосувань:

Під час роботи слюсар повинен бути одягнений в спецодяг і користуватися відповідними засобами індивідуального захисту (ЗІЗ) згідно НПАОП 0.00-4.01-08 «Положення про порядок забезпечення працівників спеціальним одягом, спеціальним взуттям та іншими засобами індивідуального захисту». При роботі в

оглядовій канаві під кузовом при необхідності використовувати захисну каску.

Слюсар зобов'язаний:

- містити в чистоті робоче місце, не допускати того, що його захаращується деталями, пристосуваннями і інструментом;
- зайві інструмент і пристосування після виконання роботи здати в інструментальну комору;
- обтиральний і інші матеріали, непридатні для подальшого використання, покласти в спеціальну тару і винести в призначені для цього місця;
- використовувати в роботі тільки справний інструмент;
- носити інструмент і вимірювальні прилади в спеціальних ящиках або сумках.

Вимоги безпеки в аварійних ситуаціях

Дії під час виникнення ситуацій, які можуть привести до небажаних наслідків.

Під час ремонту електровозів у депо можуть виникнути наступні аварійні ситуації:

- випадкова зупинка домкрата;
- припинення подачі електроенергії;
- несправності конвеєра;
- падіння піднятого на домкрати або встановленого на опори вагона;
- сходу рухомого складу з рейок;
- загоряння, яке може призвести до пожежі або вибуху.

У разі випадкової зупинки одного домкрата або у разі перерви в подачі електроенергії всі домкрати повинні бути негайно вимкнуті. Після усунення несправності домкрата необхідно переконатися у відсутності перекосу вагона на домкратах і тільки після цього продовжити підймання або опускання вагона.

У випадку припинення подачі електроенергії необхідно негайно відключити

електроінструмент від мережі.

Під час виявлення несправностей конвеєра, які загрожують безпеці людей, конвеєр повинен бути негайно зупинений.

У разі падіння піднятого на домкрати або встановленого на опори вагона чи сходу рухомого складу з рейок викликається відбудовний поїзд керівником робіт.

Порядок дій при аварійних ситуаціях.

Під час виникнення аварійної ситуації слюсар повинен припинити роботу, негайно повідомити про це керівника роботи (майстра, бригадира) і далі виконувати його вказівки по попередженню нещасних випадків або усуненню аварійної ситуації, яка виникла.

Працівники, які знаходяться поблизу, за сигналом тривоги, зобов'язані негайно прибути до місця випадку і прийняти участь в наданні потерпілому першої долікарняної допомоги або усунення аварійної ситуації, яка виникла.

Під час ліквідації аварійної ситуації необхідно діяти у відповідності з затвердженим в депо планом ліквідації аварій.

Під час виникнення пожежі необхідно повідомити пожежну охорону і керівника роботи та діяти відповідно до інструкції з пожежної безпеки.

Одними з причин, що можуть призвести до аварійної ситуації є раптове погіршення стану здоров'я, отруєння, травми.

ВИСНОВКИ

Сучасним напрямком підвищення енергетичної ефективності і функціональності тягового рухомого складу є розробка і створення гібридних силових енергетичних установок, до складу яких входить основне джерело енергії (контактна мережа) і допоміжні джерела – бортові накопичувачі енергії.

Виконано аналіз режимів електроспоживання міського електротранспорту. Для забезпечення гарантованої рекуперації і покриття пікового навантаження з тягової мережі для міського електротранспорту запропоновано комбінований накопичувач енергії на основі суперконденсатора і літій-іонної батареї.

Розглянуті методи вибору енергоємності бортового накопичувача. Найбільш доцільним є підхід, заснований на функціональному призначенні бортового комбінованого накопичувача. Виконано оцінку енергоємності бортових накопичувачів, призначених для вирівнювання графіка навантаження і зниження встановленої потужності первинного джерела енергії, для акумулювання енергії зупинкового гальмування тягового рухомого складу, а також для акумулювання надлишкової енергії рекуперації.

Виконано аналіз енергоефективності зарядно-розрядних процесів ємнісних бортових накопичувачів енергії і при їх спільній роботі з акумуляторною батареєю. Отримані залежності енергоефективності зарядно-розрядних процесів від тривалості імпульсів заряду і початкової напруги накопичувача.