

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Департамент освіти і науки Дніпропетровської облдержадміністрації
Дніпропетровське територіальне відділення МАН України

Відділення: технічні науки
Секція: технологічні процеси та
перспективні технології

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРСПЕКТИВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ
В МІСЬКОМУ ЕЛЕКТРИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ
ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

Роботу виконав:
Волнянський Михайло Ігорович,
учень 11-Б класу
КЗ «Спеціалізована школа
з поглибленим вивченням
іноземних мов I ступеня – гімназія
№11 м. Дніпродзержинська»
Науковий керівник:
Карпичев Євген Адольфович,
керівник гуртка
КЗ “Дитячий екологічний центр
м. Дніпродзержинська”,
кандидат хімічних наук

ТЕЗИ

Назва роботи: Дослідження перспектив енергозбереження в міському електричному транспорті при впровадженні суперконденсаторів

Автор: Волнянський Михайло Ігорович

Відділення: технічні науки Дніпропетровського відділення МАНУМ України

Базовий заклад: КЗ «Дитячий екологічний центр м. Дніпродзержинська»

Школа: КЗ «Спеціалізована школа з поглибленим вивченням іноземних мов I ступеня – гімназія №11 м. Дніпродзержинська», 11 клас

Населений пункт: м. Дніпродзержинськ Дніпропетровської області

Науковий керівник: Карпічев Євген Адольфович, керівник гуртка КЗ «Дитячий екологічний центр м. Дніпродзержинська», кандидат хімічних наук

З точки зору сталого розвитку проблема енергозбереження стає однією з найактуальніших проблем постіндустріального суспільства, у тому числі модернізацію існуючого рухомого складу міського транспорту з використанням сучасних підходів до енергозбереження і з урахуванням мінімальних витрат. Суперконденсатори (іоністори) є електрохімічними конденсаторами з надзвичайно високою платністю зберігання енергії, що дозволяє пропонувати їх у якості невід'ємних компонентів енергозберігаючих систем.

Основна мета роботи полягала в оцінюванні можливостей застосування суперконденсаторних батарей в рекуперативних режимах трамваїв старих моделей на прикладі трамвая Татра Т6В5.

У роботі досліджені можливості створення недорогих суперконденсаторів з комерційно доступних матеріалів та/або виготовлення суперконденсаторних блоків для використання у міському електротранспорті на основі товарів українського виробництва або наявних на українському ринку, а проведені попередні розрахунки показників енергозбереження на прикладі відрізка трамвайного маршруту №2 у м. Дніпродзержинську на схилі з великим кутом нахилу.

Отримані дані можуть використовуватись для розробки або удосконалення систем енергозбереження при модернізації існуючого рухомого складу.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ПРИНЦИПИ ДІЇ І ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ.....	8
1.1. Проблема енергозбереження у сучасному суспільстві з точки зору сталого розвитку.....	8
1.2. Суперконденсатори як системи накопичення і збереження енергії.....	10
1.3. Суперконденсаторні системи накопичення енергії в транспорті..	13
РОЗДІЛ 2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА.....	17
2.1. Методика виготовлення суперконденсаторів з активованого вугілля	17
2.2. Електрохімічні методи дослідження суперконденсаторів.....	17
2.3. Методика розрахунку ефективності впровадження на електричному транспорті.....	18
РОЗДІЛ 3. СИСТЕМА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ ТРАМВАЇВ ТИПУ ТАТРА Т6В5.....	19
ВИСНОВКИ.....	26
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	27
ДОДАТКИ.....	30

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії

ПВДФ – полівініліденфторид

ЦВА – циклічна вольтамперометрія

EDLC – конденсатор з подвійним електричним шаром (*англ.* - electrical double-layer capacitors)

ВСТУП

З точки зору сталого розвитку проблема енергозбереження стає однією з найактуальніших проблем сучасного суспільства. Це особливо помітно на фоні виснаження обмежених нафтових ресурсів і природного газу, низьких коефіцієнтів корисної дії (ККД) існуючих двигунів внутрішнього згоряння та електроприводів, а також загострення екологічної ситуації у великих індустріальних містах. Зміни клімату і обмеженість копалин паливних ресурсів підштовхують суспільство до необхідності переходу на стійкі поновлювані джерела енергії. Як результат, ми спостерігаємо збільшення виробництва відновлювальної енергії сонця і вітру, а також розвиток електричних транспортних засобів або гібридних електромобілів з низьким рівнем викидів парникових газів. Рейковий міський транспорт (зокрема трамвай та метро) залишається одним з найперспективніших через свою високу ефективність на низький рівень викидів. В великих та середніх індустріальних містах України парк трамваїв складається переважно з доволі старих вагонів, що викликане насамперед економічними причинами (вартість сучасного низькопольного трамвая складає від одного мільйона євро). В той же час, стійкість механічних деталей забезпечує, при належній технічній підтримці, експлуатаційний ресурс в 30-50 років. Це дозволяє ставити питання про модернізацію існуючого рухомого складу з використанням сучасних підходів до енергозбереження і з урахуванням мінімальних витрат.

Актуальність теми. Однією з найважливіших особливостей електроприводу є можливість простої організації рекуперативних режимів, в яких при гальмуванні кінетична енергія транспортного засобу перетворюється в електричну і повертається в накопичувач для подальшого використання. Однак існуючу різноманітність накопичувачів (акумуляторів) не дозволяє вирішити повною мірою завдання при використанні одного з видів накопичувачів. Акумуляторні батареї, здатні прийняти потужність в рекуперативних режимах, занадто дорогі для широкого використання. Іоністори, або суперконденсатори (конденсатори з

подвійним електричним шаром - electrical double-layer capacitors, EDLC) – це полярні електрохімічні прилади, які здатні запасати і згодом вивільняти електричну енергію за допомогою внутрішнього перерозподілу іонів електроліту. Суперконденсатори активно вдосконалюються і на відміну від літій-йонних батарей, мають велику перевагу - вони забезпечують миттєву подачу енергії і велику кількість циклів заряд-розряд. Вони відіграють важливу роль у доповненні або заміні батарей в області зберігання енергії, наприклад, в якості джерел безперебійного живлення (резервні запаси, що використовуються для захисту від збоїв живлення) і вирівнювання напруги. Таким чином, доступність і подача накопиченого заряду завжди буде швидше у випадку суперконденсаторів (завдяки великій поверхні для зберігання енергії), ніж акумуляторів (зберігання в об'ємі), незважаючи на більший запас збереженої останніми енергії.

Мета і завдання дослідження. Мета роботи полягає в оцінюванні можливостей застосування суперконденсаторних батарей в рекуперативних режимах трамваїв поширених старих моделей на прикладі трамвая Татра Т6В5.

Для досягнення мети необхідно було розв'язати наступні *завдання*:

- з'ясувати можливість створення недорогих суперконденсаторів з комерційно доступних матеріалів та/або виготовлення суперконденсаторних блоків для використання у міському громадському електротранспорті на основі суперконденсаторів українського виробництва або наявних на українському ринку
- провести розрахунки показників енергозбереження на прикладі відрізка трамвайного маршруту №2 у м. Дніпродзержинську, який проходить по схилу з великим градусом нахилу

Об'єкти дослідження – зразки для електрохімічних досліджень на основі активованого вугілля; технічна документація трамваю Татра Т6В5.

Предмет дослідження – аналіз можливості приготування суперконденсаторів з недорогих комерційних продуктів, доступних будь-де; аналіз та розрахунки енергозбереження на прикладі міського трамваю застарілої моделі при його модернізації з використанням суперконденсаторів.

Методи дослідження – стандартні методи приготування експериментальних

зразків для електрохімічних досліджень, розрахунки на основі технічної документації. Пошук і аналіз літературних даних проведено з використанням баз даних Google Scholar та ISI Web of Science (тимчасова ліцензія CNRS).

Новизна отриманих даних. Показано, що за рахунок рекуперації гальмівних режимів економія енергоресурсів може скласти 10-24% при стандартних міських циклах, що дозволяє не тільки економити електроенергію, а також використовувати, у разі модернізації, трамваї на ділянках, де контактна сіть відсутня або не може бути відновлена з певних причин.

Практична значимість. Отримані дані можуть використовуватись для розробки або удосконалення систем енергозбереження при модернізації існуючого рухомого складу міського транспорту з використанням сучасних підходів до енергозбереження та з урахуванням мінімальних витрат.

Особистий внесок автора. Пошук та аналіз літературних даних, експеримент, обробку результатів, розрахунки та формулювання висновків виконано особисто автором роботи, постановку завдань та обговорення результатів здійснено спільно з науковим керівником за участю кандидата фіз.-мат. наук, доц. Олійника В. О. та заст. директора ДТК ДДТУ Бутенка В. М.

РОЗДІЛ 1

ПРИНЦИПИ ДІЇ І ГАЛУЗІ ВИКОРИСТАННЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

Сталий розвиток – це загальна концепція стосовно необхідності встановлення балансу між задоволенням сучасних потреб людства і захистом інтересів майбутніх поколінь, включаючи їх потребу в безпечному і здоровому довкіллі. Людством у кінці минулого тисячоліття була обрана нова парадигма розвитку - парадигма сталого розвитку [1]. На сьогодні альтернативи сталому розвитку не існує. Очевидність нераціональності концепції розвитку у напрямку необмеженого економічного зростання, як і неминучості її катастрофічного завершення не викликає сумнівів. Отже, майбутній розвиток людства визначається як такий, у якому будуть збалансованими соціальний і економічний розвиток відповідно до можливостей екосфери.

1.1. Проблеми енергозбереження у сучасному суспільстві з точки зору сталого розвитку

Постіндустріальне суспільство – нова стадія суспільного розвитку, яка, на переконання західних учених, вже сьогодні приходить на зміну індустріальному суспільству, а ідейно впливає з теорії індустріального суспільства американського економіста В. Ростоу та французького соціолога Р.Арона [2]. Науковий потенціал визначає могутність держави, на противагу попередній стадії, де таку могутність визначав промисловий потенціал. Трьома основними структурними елементами, за постіндустріального суспільства, є університети, наукові інститути та дослідницькі організації. На базі цих структур формуються соціальні відносини, а влада зосереджується, у тому числі, в руках учених.

Прикладами поступової трансформації сучасного техногенного ландшафту виступають так звані «міста майбутнього», будівництво яких проводиться в різних куточках світу. Одне з них, Масдар в ОАЕ - місто без машин і без хмарочосів. Масдар вже сьогодні будується з нуля в центрі пустелі недалеко від Абу-Дабі. Головною особливістю міста стане його повна незалежність від

традиційних джерел енергії. Замість нафти, газу і вугілля Масдар буде отримувати енергію від сонця, вітру і геотермальних джерел. Таким чином, він стане першим містом з нульовими викидами вуглецю. У цьому місті майбутнього особливе місце буде приділено швидкісного громадському транспорту, велетенські навіси - «соняшники» будуть вкривати вулиці від денної спеки, а накопичена ними енергія буде використовуватися лише в нічний час [3], як показано на Рис. 1.1.



Рис.1.1 Інтер'єр міста Масдар та екологічно дружній транспорт міста, як заплановано проектом будівництва [3].

Сучасне суспільство має багато проблем, що потребують вирішення. Однією з цих проблем є проблема енергозбереження. Запровадження енерго- і ресурсозберігаючих технологій є життєво необхідним. Воно є продуктивним у тривалій перспективі і подовжують використання ресурсів, що є обмеженими, а також пом'якшують вплив на оточуюче середовище [4].

Розвиток світової економіки і підвищення рівня життя базуються на стрімкому збільшенні споживання енергії. Зіставлення цих залежностей у часі показує, що на одиницю приросту внутрішнього валового продукту та показника рівня життя доводиться все більше споживаної енергії, що в умовах кінцівки запасів енергоресурсів ставить перед світовою економікою нетривіальні завдання пошуку нових джерел енергії та розробки нових енергозберігаючих технологій.

1.2. Суперконденсатори як системи накопичення і збереження енергії

Відомий ще один спосіб забезпечення приросту енергоресурсів - утилізація спожитої енергії. Це вельми значний потенціал приросту енергоресурсів, який в загальному вигляді становить значення рівне $[(1 - \text{ККД}) * (\text{спожита енергія})]$. На жаль, в даний час не існує надійних і економічно обґрунтованих методів утилізації теплової енергії і тому продукція металургійних та інших енергоємних виробництв, охолоджувані технічні пристрої продовжують нагрівати атмосферу. Однак для утилізації кінетичної енергії рухомих технічних пристроїв в режимі гальмування існує унікальне інженерне рішення у вигляді суперконденсатора - накопичувача аномальної кількості енергії, що дозволяє протягом декількох десятих часток секунд підхопити гальмівну енергію рухомого об'єкту з масою від мопеда до великовантажного залізничного складу. Таким чином, суперконденсатор є єдиним технічним пристроєм, що дозволяє рекуперувати енергію гальмування, що дає можливість утилізувати до 25% спожитої енергії. Перспективною технологією у галузі енергозбереження є суперконденсатори.

Суперконденсатор - конденсатор з органічним або неорганічним електролітом, «обкладками» в якому служить подвійний електричний шар на межі розділу електрода і електроліта [5-7]. У зв'язку з тим, що товщина подвійного електричного шару (тобто відстань між «обкладками» конденсатора) дуже мала, запасена іоністором енергія вища в порівнянні зі звичайними конденсаторами того ж розміру. До того ж, використання подвійного електричного шару замість звичайного діелектрика дозволяє набагато збільшити площу поверхні електрода (наприклад, шляхом використання пористих матеріалів, таких, як активоване вугілля або спінені метали). Питома ємність іоністора сягає десятків $\text{Ф}/\text{см}^3$ при номінальній напрузі 2-4 вольтів. Максимальна ємність звичайних конденсаторів складає сотні мікрофарад, а максимальна ємність суперконденсаторів досягає тисяч фарад, тобто на шість порядків більше.

З появою іоністорів стало можливим використовувати конденсатори в ланцюгах і як джерело струму. Такі елементи мають декілька переваг над

звичайними хімічними джерелами струму — гальванічним елементами та акумуляторами:

- Високі швидкості заряду й розряду.
- Простота зарядного пристрою
- Мала деградація навіть після сотень тисяч циклів заряду / розряду.
- Мала вага в порівнянні з електролітичними конденсаторами подібної ємності
- Низька токсичність матеріалів.
- Висока ефективність (ККД більше 95%).
- Неполлярні (хоча на іоністорах і зазначені «+» і «-», це робиться для позначення полярності залишкової напруги після його заряду на заводі-виробнику).

Електрохімічні конденсатори, накопичують заряд на подвійному електричному шарі або суперконденсатори відрізняються від звичайних конденсаторів рівнем електричної ємності. Явище виникнення електричних шарів в матеріалах з різним типом провідності при їх взаємному контакті має фундаментальний характер, сприяючи встановленню рівноважного стану в системі, що складається з матеріалів з йонною і електронною провідністю шляхом переносу заряду в міжмолекулярному просторі. Електричні шари являють собою області локалізації зарядів, що знаходяться на відстані 1 - 5 Å та допускають навантаження зовнішніми джерелами зарядів, однак, лімітоване напругою декомпозиції електроліту (матеріалу з йонною провідністю). Оскільки такі шари утворюються при контакті твердої речовини з рідиною, очевидно, що в якості твердої речовини можна використовувати високодисперсні матеріали. У цьому випадку можна отримати дуже високі значення площі поверхні контакту, а значить і площі поверхні подвійного електричного шару.

Таким чином, суперконденсатори володіють наступними характеристиками [8]:

- щільність електричної ємності до 260Ф/г;
- щільність електричної енергії до 50 Дж/см³;
- внутрішній опір до 0,0001 Ом;

- час заряду і розряду в діапазоні $5,0 \div 0,025$ сек.;
- малий струм витoku - і можливість зберігання заряду протягом сотень годин.

Такі характеристики виділили суперконденсатори в особливу групу пристроїв зберігання енергії, що займає нішу між звичайними конденсаторами і акумуляторними батареями, що ілюструє діаграма Рагона [9], як показано на рис.1.2.

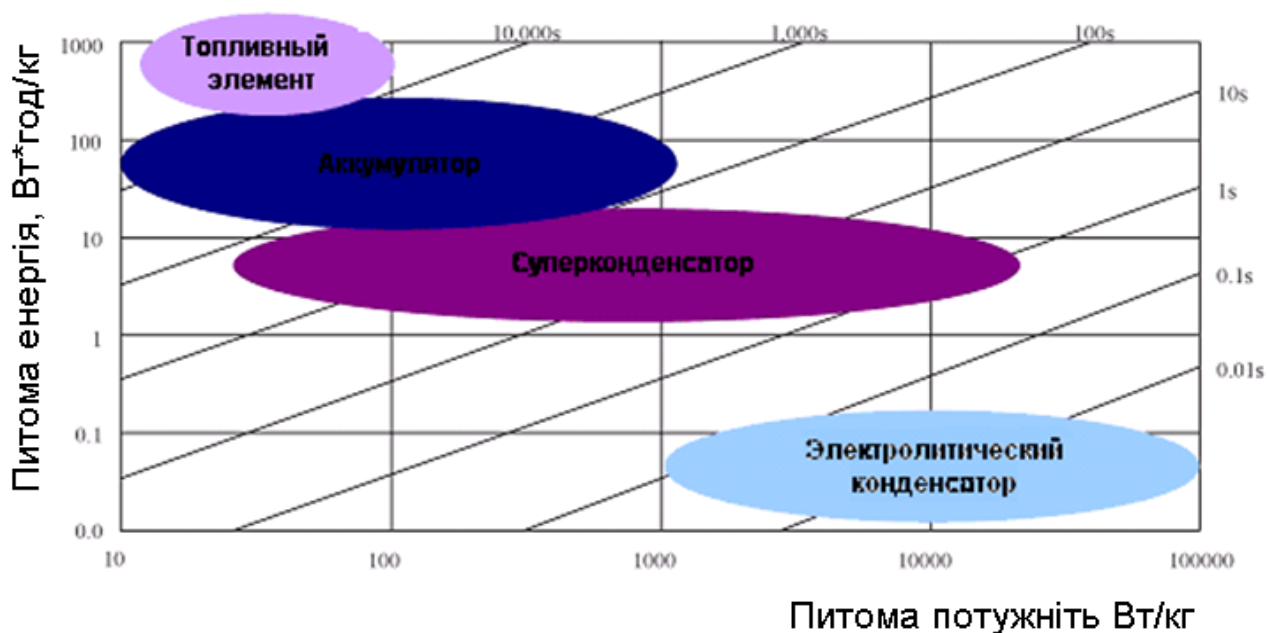


Рис.1.2 Діаграма Рагона для пристроїв генерації та накопичення енергії

На шляху реалізації ідеї використання подвійного електричного шару в якості технічного пристрою - суперконденсатора - виникла вельми складна проблема струмознімання з обох електричних шарів. Якщо струмознімач з одного з контактуючих матеріалів - активованого вугілля - організувати порівняно просто використанням металевих струмознімачів, що мають близьку до вугілля електропровідність, то струмознімач з електричного шару, що утворюється в рідині, зробити проблематично, оскільки практично неможливо підібрати матеріал, що володіє такою ж провідністю, що і рідина. Різноплярність обкладинок в системі з двох суперконденсаторів утворюється за рахунок іонопровідного сепаратора.

1.3. Суперконденсаторні системи накопичення енергії в транспорті

В наш час суперконденсатори, конденсатори величезною електричної ємності і з малими струмами власної витoku, розглядаються як кандидати на заміну традиційним акумуляторним батареям в безлічі різних областей, починаючи від мініатюрної електроніки і закінчуючи електричними автомобілями [10-12]. У більшості випадків для виготовлення електродів суперконденсаторів використовують активоване вугілля, матеріал, що володіє величезним значенням ефективної площі поверхні. Єдиним недоліком активованого вугілля є те, що цей матеріал твердий і крихкий, що не допускає його використання при створенні гнучких суперконденсаторів.

Акумуляторні батареї забезпечують роботу пристроїв протягом усього дня завдяки високій щільності енергії (висока щільність енергії) - але коли вони розряджаються, то підзарядка займає кілька годин. Для швидкої подачі енергії і швидкої підзарядки використовуються електрохімічні конденсатори, що володіють високою питомою потужністю (висока щільність потужності), відомі як суперконденсатори. Вони зазвичай застосовуються в системах безперебійного електропостачання, і найбільш ефективні в таких областях, де потрібне імпульсивне виділення енергії за максимально короткий відрізок часу (гібридні автомобілі, електроніка, джерела імпульсної потужності для розгону електромобілів і рекуперації енергії при гальмуванні, а також вони використовуються в комбінації з вітрогенераторами, сонячними батареями). Одним з подібних застосувань є рекуперативне гальмування, використовується для відновлення потужності в автомобілях і електричних транзитних транспортних засобах, які могли б втратити енергію гальмування у вигляді тепла. Тим не менш, суперконденсатори мають низьку щільність енергії. Хоча й акумуляторні батареї, і суперконденсатори засновані на електрохімічних процесах, проте їх відносну енергію (відносна енергія) і питому потужність (щільність потужності) визначають різні електрохімічні механізми. Протягом останніх 5 - 7 років ми стали свідками того, що дослідження в області зберігання енергії значно розширилися, і вони спрямовані на розробку

матеріалів, які могли б поєднувати високу щільність енергії акумуляторних батарей з тривалим життєвим циклом і високою швидкістю зарядки суперконденсаторів. Однак розмивання цих двох електрохімічних підходів може призвести до плутанини і необґрунтованим твердженнями, якщо особливу увагу не приділяється фундаментальним характеристикам продуктивності. В літій-йонних (Li^+) батареях вставки Li^+ , які забезпечують окислювально-відновні реакції в масових електродних матеріалах, піддаються дифузному контролю, що відбувається повільно. Суперконденсаторні пристрої зберігають заряд шляхом адсорбції іонів електроліту на поверхню електродних матеріалів, як показано на рис. 1.3.

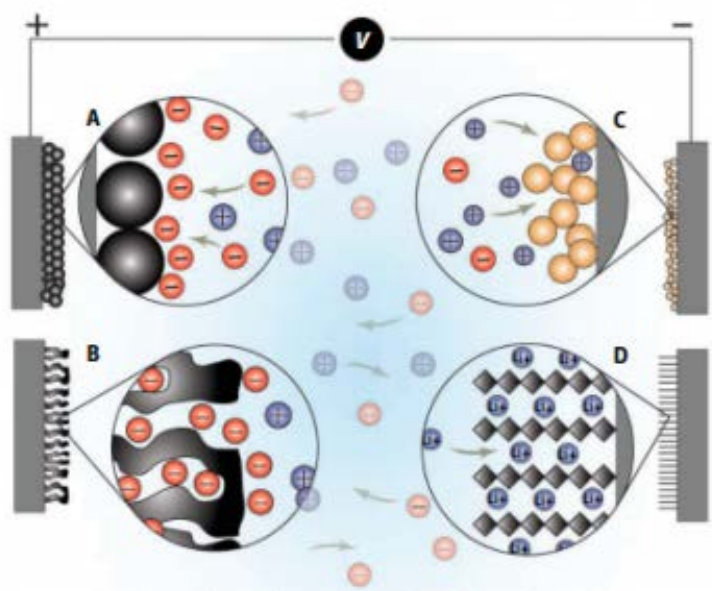


Рис.1.3 Порівняння акумуляторних батарей і суперконденсаторів [10]

Тим не менш, заряд обмежується поверхнею, так що щільність енергії електрохімічних конденсаторів з подвійним електричним шаром менше, ніж в акумуляторних батареях. На Рис. 1.3 зображені різні механізми ємнісного зберігання енергії. Так, ємність подвійного шару утворюється на електродах, які включають вуглецеві частинки (A) або пористий вуглець (B). Подвійний шар, який показаний на цьому малюнку, виникає під час адсорбції негативних іонів з електроліту на позитивно заряджений електрод. Так звані псевдоємнісні механізми включають окислювально-відновлювальну псевдоємність, як це має

місце у водному рубідій оксиді (С) та псевдо ємність при інтеркаляції , як показано для проникнення йонів Li^+ у матеріал, що приймає.

Таблиця 1.1

**Порівняння деяких важливих технічних характеристик
електрохімічного суперконденсатора та літій-іонного акумулятора**

Характеристика	Літій-іонний акумулятор	Електрохімічний суперконденсатор
Час зарядки	~3-5 хвилин	~1 секунда
Час розрядки	~3-5 хвилин	~1 секунда
Кількість циклів	<5,000	>500,000
Енергія (Вт·год/кг)	70-100	5
Сила (кВт/кг)	0.5 -1	5-10
Ефективність циклів (%)	<50 або >90	<75 або >95
Вартість/Вт·год	\$1-2/Вт*год	\$10-20/Вт*год
Вартість/кВт	\$75-150/кВт	\$25-50/кВт

Таким чином, технічна реалізація суперконденсатора являє собою елементарну комірку (елементарний суперконденсатор), що складається з двох послідовно з'єднаних суперконденсаторів, причому з'єднання відбувається по електричних верствам в електроліті, а заряд знімається з електричних шарів у вуглецевому пористому матеріалі. Послідовне з'єднання суперконденсаторів реалізується шляхом використання загального електроліту, розділеного сепаратором, фактично є ємністю для електроліту. Саме тому допустима робоча напруга елементарного суперконденсатора дорівнює напрузі розкладання електроліту, а не подвійному робочій напрузі подвійного електричного шару, що відповідало б послідовному з'єднанню двох суперконденсаторів [10]. В якості високо-дисперсного матеріалу в суперконденсаторах безальтернативно використовується активоване вугілля з розмірами частинок 1-50 мкм, розмірами активних пір 0,7-16 нм і питомою поверхнею до 2500 м²/г Крім цих унікальних

властивостей активоване вугілля ще й дуже дешевий, що практично позбавляє його будь-яких конкурентів. В якості електроліту в промислово вироблених суперконденсаторах використовують водні розчини лугу з напругою розкладання 1,23 В і достатньо токсичні органічні електроліти на основі ацетонітрилу з напругою розкладання до 2,7 В. Також відомо про розробку і дослідну експлуатацію суперконденсаторів з нетоксичним органічним електролітом на основі іонної рідини з напругою розкладання 3,5 В [8].

Елементарний суперконденсатор складається з двох електродів, розділених просоченим електролітом сепаратором і двох струмових колекторів, як показано на рис. 1.4.

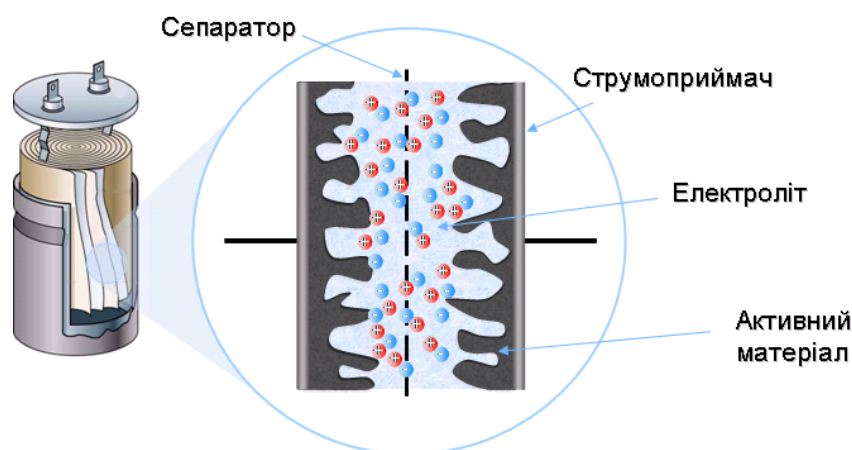


Рис.1.4. Принцип будови комерційного суперконденсатора

Просочений електролітом електрод складається з шару пластифікованого активованого вугілля на підкладці з матеріалу, аналогічного матеріалу сепаратора. Товщина шару активованого вугілля з питомою поверхнею 1200 м^2 варіюється в межах 0,1 - 5,0 мм. Розміри частинок активованого вугілля знаходяться в межах 1 - 50 мкм, розміри активних пір - 0,7-10 нм. Струмознімач - металева фольга товщиною до 50 мкм.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1. Методика виготовлення суперконденсаторів з активованого вугілля

Для виготовлення зразків використовували стандартну процедуру [7, 8], як показано у Додатку А. Активоване вугілля виробництва Валартин Фарма, КОН (Сінбіас) та спирт етиловий - усі вироблені в Україні - використовували без очищення. Біндер (полівініліденфторид 5% виробництво Aldrich) був наданий Інститутом хімії поверхні НАНУ. Вартість зразка, за виключенням біндера, складає 50 грн.

2.2 Електрохімічні методи дослідження суперконденсаторів

Основним методом дослідження є циклічна вольтамперометрія, яка характеризує залежність струму від лінійної зміни потенціалу. Потенціостат, який використовують для дослідження суперконденсаторів, представлено на рис. 2.1.



Рис. 2.1 Мультиканальний потенціостат Bio-Logic VMP3

Як показано на Рис. 2.2, суперконденсатори можна відрізнити від батарей з допомогою і потенціостатичні і гальваностатичного методів. Різні методи досягнення ємності подвійного шару характеризуються класичними прямокутними циклічними вольтамперограмм (зліва) і лінійним часу-залежним зміною потенціалу при постійному струмі.

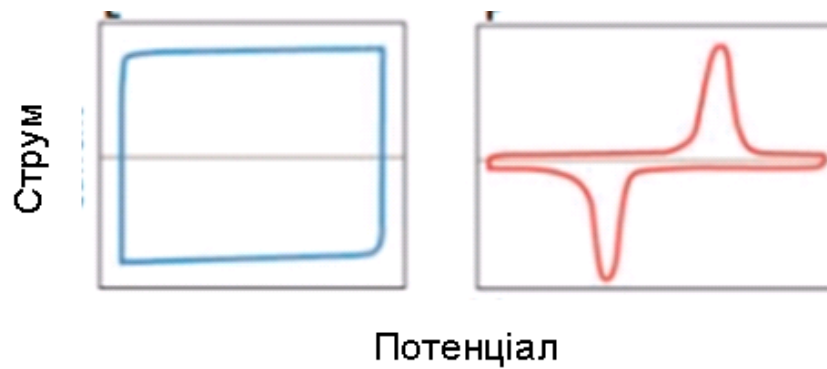


Рис. 2.2 Типові вольтамперометричні дані для суперконденсатора та акумуляторної батареї.

В акумуляторних батареях, циклічні вольтамперограмм характеризуються фарадеевського окислювально-відновними піками (праворуч), часто з досить великою різницею напруг (більше 0,1 до 0,2 В) між окисненням і відновленням, в результаті фазових переходів (F).

2.3 Методика оцінки ефективності впровадження на електричному транспорті

Розрахунки теоретичних величин енергозбереження при рекуперації проводили, виходячи з технічних характеристик рухомого складу, рельєфу місцевості та за формулою, доступною будь-де [13, 19] :

$$A_{\text{рек}} = 10^{-5} m (1,073(1 + y)(V_{\text{п}}^2 - V_{\text{к}}^2) - \frac{w_0 \pm i_{\text{ср}}}{102(1 + y)\alpha}) \eta_{\text{рек}}$$

де m – маса поїзда, кН; $(1 + y)$ – коефіцієнт інерції обертючих мас поїзда; $V_{\text{п}}$ – початкова швидкість, м/с; $V_{\text{к}}$ – кінцева швидкість, м/с; α – уповільнення трамвая під час гальмування, м/с²; w_0 – основний питомий опір руху трамвая на ділянці гальмування, Н/кН; $i_{\text{ср}}$ – середній ухил ділянки гальмування, ‰; $\eta_{\text{рек}}$ – ККД ЕРС в режимі рекуперації.

РОЗДІЛ 3

СИСТЕМА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ
ДЛЯ ТРАМВАЇВ ТИПУ ТАТРА Т6В5

В наш час суперконденсатори знаходять широке використання у гібридних автомобілях та сучасних моделях швидкісних трамваїв, зокрема, через необхідність для останніх долати ділянки щільної забудови європейських міст, де існує заборона монтажу контактної сіті [10, 12]. Принцип використання батареї суперконденсаторів для рекуперації енергії гальмування наведено на Рис. 3.1

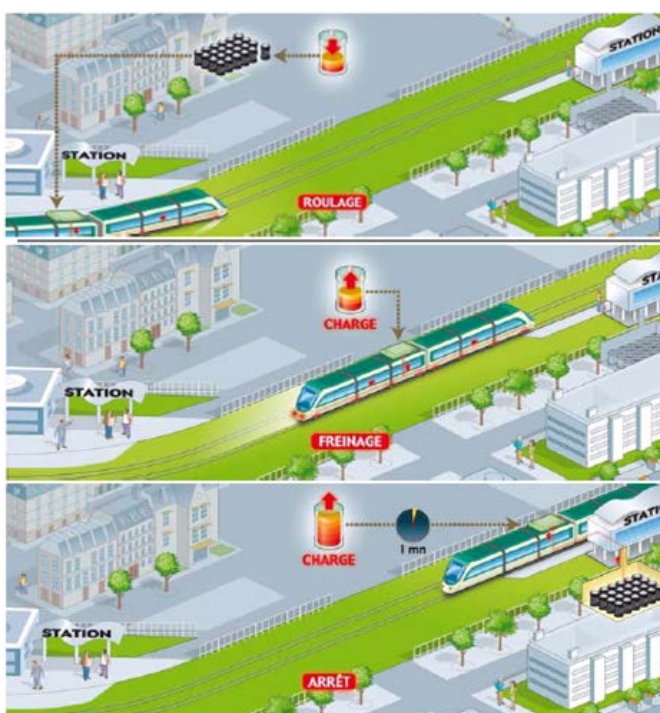


Рис. 3.1. Три фази рекуперативного гальмування в сучасних міських швидкісних трамваях типу Alstom Citadis.

В той же час, недоступність для багатьох місцевих бюджетів нашої країни сучасного рухомого складу і відсутність належної для цього інфраструктури ставить питання про модернізацію наявних вагонів старих моделей з використанням сучасних технологій. В цій роботі ми розглянули трамвай Т6В5SU - чехословацький високопольний чотирьохвісний трамвайний вагон з електрообладнанням імпульсного регулювання, що випускався серійно підприємством АТ «ЧКД Прага» з 1983 по 1998 рік, а вагони після дозборки

поставлялися до 2007 року. Всього випущено близько 1150 вагонів цього типу, у колишньому СРСР він також відомий під торговою маркою Т-3М. Велика кількість вагонів цього типу експлуатується в Росії, Україні, Узбекистані по теперішній час. Дніпропетровський завод «Південмаш» в 1994-1996 роках побудував 38 вагонів цього типу по придбаній у чехів ліцензії, а також переробив 75 вагонів на базі цієї моделі, яка була названа К-1.

Місто Дніпродзержинськ є типовим середнім за кількістю мешканців (254 тис. станом на 2001 рік) індустріально розвиненим містом з застарілою транспортною інфраструктурою. У місті нараховуються 4 трамвайні маршрути загальною довжиною 78,9 км (Додаток Б), парк вагонів налічує 51 одиницю (Додаток В), станом на 2014 рік лише один вагон типу К-1, в той же час 30 вагонів (дані 2010 року) типу Tatra T6B5 та Tatra T3SU, на базі якого будувалися Т6В5

Трамвайний маршрут №2 проходить уздовж проспекту Леніна у напрямку ДМК дистанція довжиною 2,65 км з великим нахилом, який сягає 30° на початковій ділянці і біля 10° на кінцевій ділянці дистанції, як показано на Рис. 3.2. Нами вибрано цю ділянку для оцінювання перспектив рекуперації енергії гальмування при оснащенні рухомого складу блоками суперконденсаторних батарей.

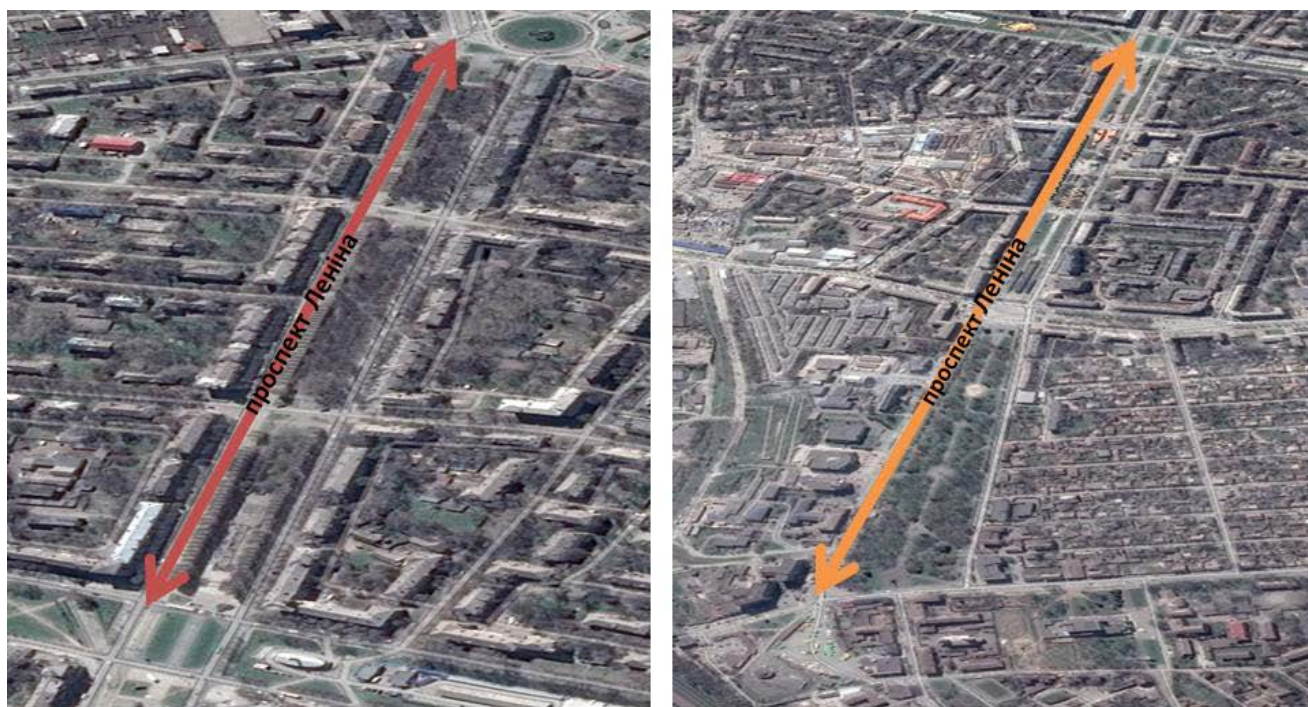


Рис. 3.1 Зображення ділянки спуску маршруту трамвая №2 (згідно Google Maps)

Схематично дві ділянки спуску з різним кутом нахилу можна відобразити, як показано на Рис. 3.3.

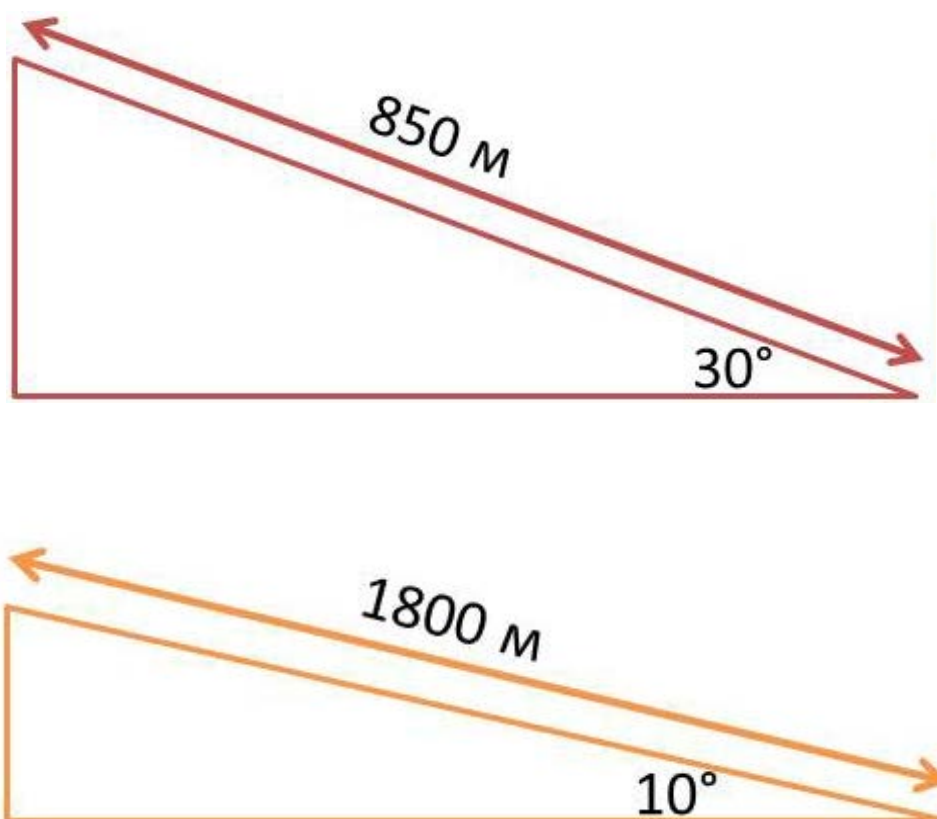


Рис. 3.4. Схематичне зображення початкової (зверху) та кінцевої (знизу) ділянок спуску.

При пуску і гальмуванні сила інерції прикладається в центрі ваги і направлена вздовж екіпажа. При гальмуванні сила інерції спрямована вперед за рухом, а при пуску (розгоні) – проти руху. Сили інерції викликають додаткові горизонтальні і вертикальні навантаження (Рис. 3.5), що впливають на ходові частини.

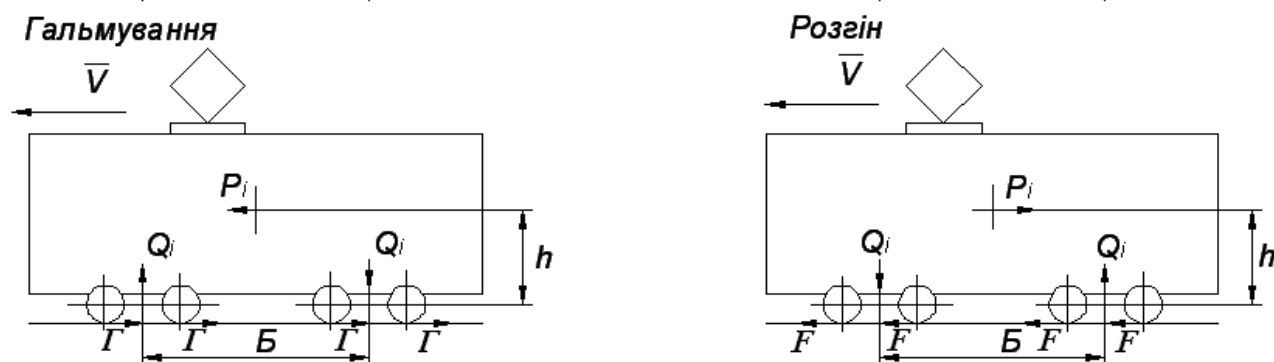


Рис. 3.5 Додаткові навантаження трамвая при гальмуванні

Через великий кут нахилу на спуску правила безпеки виключають зупинки, тому ця ділянка є найбільш перспективною для рекуперації енергії гальмування. З урахуванням різних режимів руху (початкова швидкість, пасажиропотік тощо) величини рекуперованої енергії на початковій ділянці можна представити, як подано у табл. 3.1

Таблиця 3.1

Енергія, рекуперована на початковій ділянці спуску

(кут нахилу 30°, довжина ділянки 850 м) з урахуванням різних режимів руху

Початкова швидкість		Кінцева швидкість		Маса, кг	Рекуперативна енергія, кВт·год
м/с	км/год	м/с	км/год		
18,06	65	4,17	15	18 900*	40,3
18,06	65	4,17	15	23 900**	50,9
12,5	45	1,39	5	18 900*	13,8
12,5	45	1,39	5	23 900**	17,4

* - маса порожнього вагону

** - маса вагону з пасажирами

Величини рекуперованої енергії на кінцевій ділянці представлені у табл. 3.2.

Таблиця 3.2

Енергія, рекуперована на кінцевій ділянці спуску

(кут нахилу 10°, довжина ділянки 1800 м) з урахуванням різних режимів руху

Початкова швидкість		Кінцева швидкість		Маса, кг	Рекуперативна енергія, кВт·год
м/с	км/год	м/с	км/год		
18,06	65	4,17	15	18 900*	41,2
18,06	65	4,17	15	23 900**	52,1
12,5	45	1,39	5	18 900*	15,5
12,5	45	1,39	5	23 900**	19,6

* - маса порожнього вагону

** - маса вагону з пасажирами

Виходячи з наявних у літературі принципових схем збереження енергії на електротранспорті, можна запропонувати схему підключення суперконденсаторної батареї, як подано на Рис. 3.6.

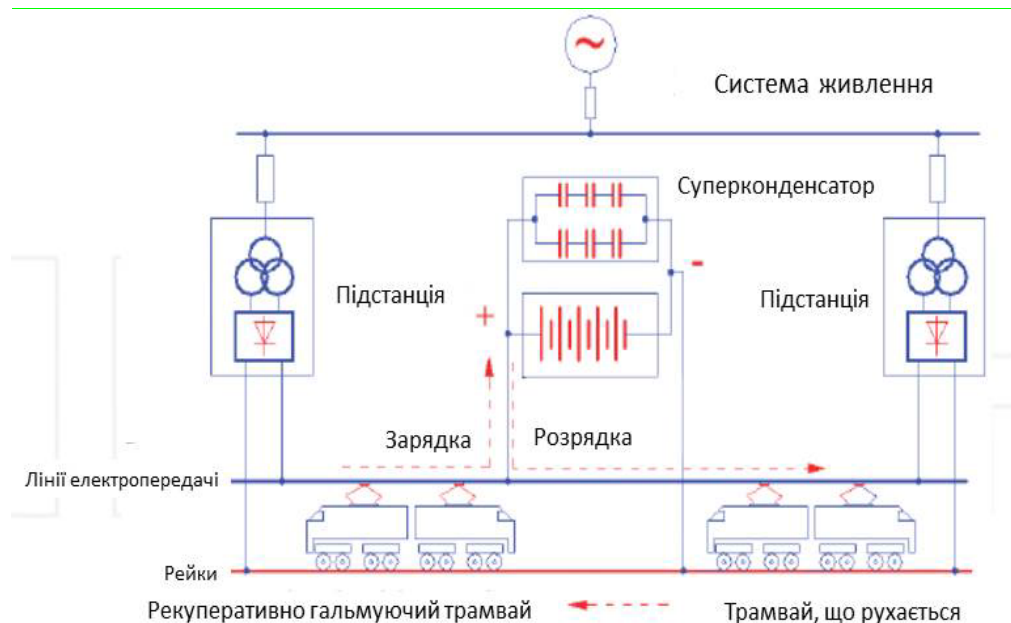


Рис 3.6 Функціональна схема електроприводу з суперконденсаторною батареєю.

Згідно наведених вище розрахунків, можна зробити попередній висновок, що існує залежність використання енергії рекуперації від інтенсивності руху на перегоні (при більшій інтенсивності руху ймовірність використання енергії більше), а найбільша ефективність використання енергії відбувається на затяжних ухилах, коли джерело енергії рухається в режимі гальмування на спуску (початкова ділянка спуску).

Економія електроенергії при застосуванні рекуперативного гальмування може скласти 10-24%, але не можна виключати і економії до 30% на окремих перегонах.

В останні кілька років виник стійкий інтерес до використання сучасних технологій модернізації застарілого рухомого складу, як , наприклад у випадку моделі Т-3 у Ризі [13, 14], де запропоновано підключення суперконденсаторної батареї до вже існуючої електричної схеми, як показано на Рис. 3.7.

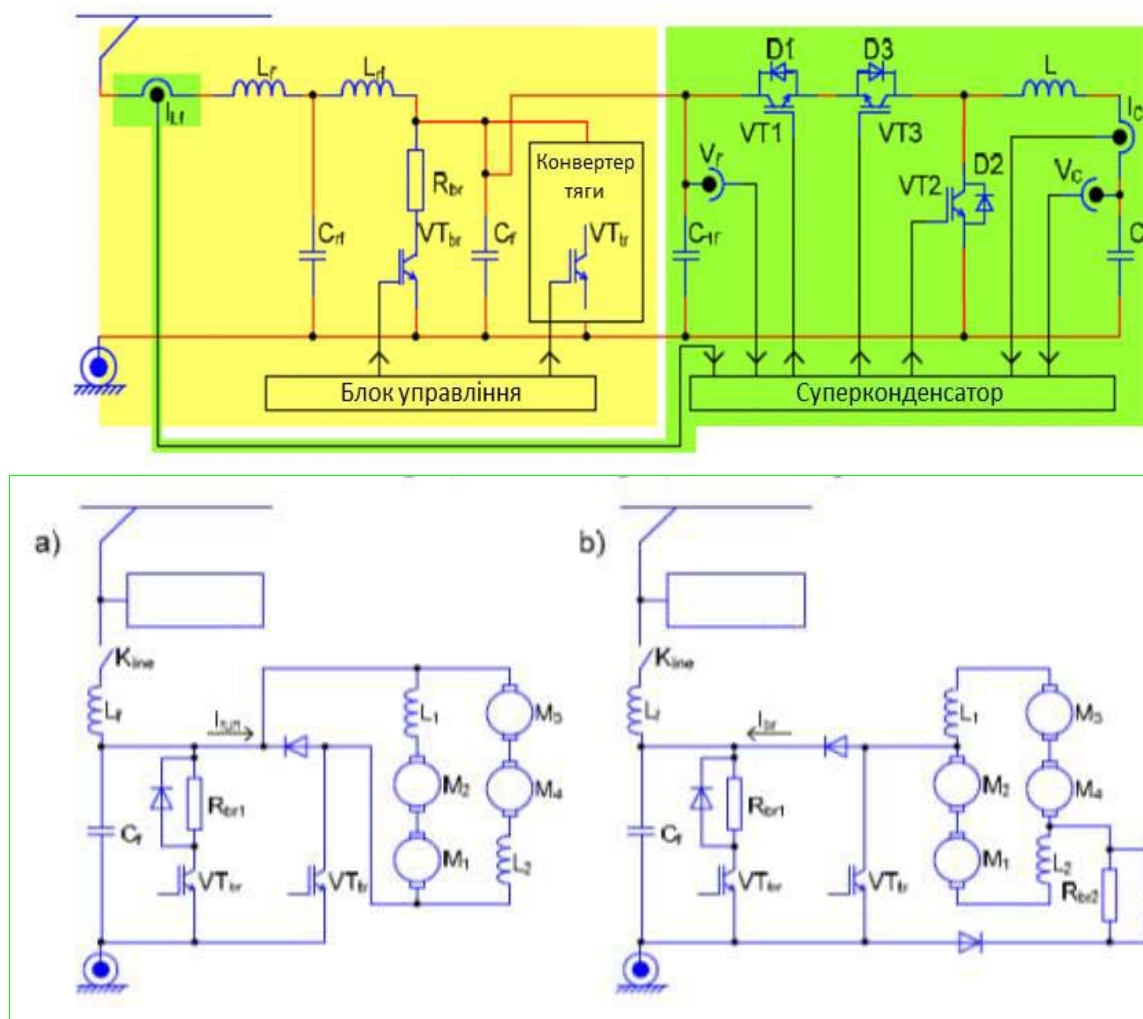


Рис. 3.7 Схема приєднання суперконденсатора до існуючої електричної схеми трамвая моделі Татра Т-3 (зверху) та схема тягового приводу трамвая під час руху (зліва внизу) та під час гальмування (праворуч внизу).

При розробці ефективної схеми використання суперконденсаторів у випадку трамваїв типу Т6В5 виглядає корисним використання останніх вітчизняних розробок для гібридних автовок. Так, наприклад, у статті [19] пропонується роботу перетворювача в режимі рекуперативного гальмування здійснювати за принципом підвищувального імпульсного регулятора напруги, в якому в якості накопичувача електромагнітної енергії використовується індуктивність якійного ланцюга двигуна, а навантаженням виступає суперконденсаторна батарея. Згідно цієї статті, розрахунки для лабораторного зразка на базі автомобіля Ланос показали, що суперконденсаторна батарея ,

здатна накопичити 235 кДж має вагу 15 кг, що становить не більше 5% від загальної ваги тягової акумуляторної батареї. Такий СКБ достатньо, щоб електромобіль масою 1500 кг (що відповідає спорядженій масі електромобіля на базі Lanos) міг спуститися з постійною швидкістю з висоти 30м або загальмувати зі швидкості 85 км / год до повної зупинки.

Подальші дослідження щодо підвищення ефективності використання енергії рекуперації мають бути спрямовані на використання накопичувачів для збереження цієї енергії при відсутності споживача на лінії, на вибір раціонального місця розміщення даного накопичувача та оптимізацію режимів його роботи. Одним з перспективних напрямків реалізації накопичення енергії, окрім суттєвої економічної складової, є можливість використання існуючого рухомого складу на ділянках з відсутньою або пошкодженою контактної мережею, у тому числі для реалізації проекту трамвайного сполучення з житловим масивом на лівому березі р. Дніпро, замороженого через нестачу коштів на будівництво контактної мережі на мості через р. Дніпро.

ВИСНОВКИ

1. Наявність та комерційна доступність вихідних компонентів може скласти основу для виробництва дешевих суперконденсаторів з водним електролітом.
2. Розрахунки енергозбереження при використанні суперконденсаторів, проведених на прикладі ділянки трамвайного маршруту №2 у м. Дніпродзержинську, який проходить по схилу з великим кутом нахилу, доводять ефективність та потенційну привабливість впровадження енергозберігаючих технологій для модернізації існуючого рухомого складу міського транспорту
3. За рахунок рекуперації гальмівних режимів економія енергоресурсів може скласти 10-24% при стандартних міських циклах, що дозволяє економити електроенергію і використовувати трамваї на ділянках без контактної мережі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зеркалов Д. В. Проблеми екології сталого розвитку [Електронний ресурс]: Монографія. – К.: Основа, 2013. – 430 с. – Режим доступу: http://www.zerkalov.kiev.ua/sites/default/files/problemi_ekologiyi_stalogo_rizvitku._monografiya.pdf
2. Иноземцев В. Л. Современное постиндустриальное общество: природа, противоречия, перспективы [Текст]. — М.: Логос, 2000. — 304 с.
3. Lawton M. Renewable energy agency to call United Arab Emirates home [Електронний ресурс]: Deutsche Welle, 29 June 2009. - Режим доступу: <http://www.dw.de/renewable-energy-agency-to-call-united-arab-emirates-home/a-4442082>
4. Jacobson M. Z. Review of solutions to global warming, air pollution, and energy security [Text] / M.Z. Jacobson // Energy Environ. Sci. - 2009. – Vol. 2, № 2. – P. 148-155.
5. Conway B.E. Transition from supercapacitor to battery behavior in electrochemical energy-storage [Text] / B.E. Conway // J. Electrochem. Soc. - 1991. - Vol. 138, № 6. – P. 1539-1548.
6. Conway B.E. Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications [Text]. - Springer US, 1999 - 698 p.
7. Kotz R. Principles and applications of electrochemical capacitors [Text]/ R.Kotz, M. Carlen// Electrochimica Acta. – 2000. - Vol. 45, № 15-16. – P. 2483-2498.
8. Деньщиков К. Оптимизация взаимодействия наноструктурированных углеродных материалов и электролитов на основе ионных жидкостей для повышения электроэнергетических характеристик суперконденсаторов [Текст]/ К. Деньщиков// Международный форум по нанотехнологиям, Тезисы докладов, Т. 2. – Москва, 2008 - С. 472-473.
9. Ragone D.V. Review of Battery Systems for Electrically Powered Vehicles [Text] / D. Ragone // SAE Trans. – 1968. – Vol. 77. – P. 131 - 155

10. Simon P. Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin? [Text]/ P. Simon, Yu. Gogotsi, B. Dunn// Science. - 2014. – Vol. **343**. – P. 1210-1211
11. Development of a Green Supercapacitor Composed Entirely of Environmentally Friendly Materials [Text]/ B. Dyatkin, V. Presser, M. Heon [et al] // ChemSusChem. – 2013. - Vol. 6, № 12. P. 2269-2280.
12. Khaligh A. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art [Text] / A.Khaligh, Zh. Li // IEEE Trans. Vehic. Technol. - 2010. - Vol. 59, № 6. - P. 2806-2814.
13. Гончар А.С. К реализации рекуперативных режимов в электроприводе электромобиля с ионисторами [Текст]/ А.С. Гончар, А.В. Семиков // 3б. матер. конф. «Расчет энергоэффективности использования тягового электропривода без и с рекуперацией для легкового автомобиля». – Кременчук, 2013. – С. 25-26.
12. A study of urban electric bus with a fast charging energy storage system based on lithium battery and supercapacitors [Text] / L. Mapelli, D. Tarsitano, D. Annese et al // Proceedings 8th Int. Conf. Exhib. Ecolog. Vehic. Renew. Energ. (EVER2013), Monte Carlo, Monaco. - 2013. – P. 1-9.
13. Latkovskis L. Simulation of the Regenerative Energy Storage with Supercapacitors in Tatra T3A Type Trams [Text]°/ L.Latkovskis, V. Brazis// Proceedings UKSim 10th Int. Conf. Comp. Model. Simulaton, 01-03 Apr. 2008, Cambridge, UK , Ed. : AlDabass D., Orsoni A., Brentnall A., Abraham A., Zobel R. – IEEE Computer Soc., 2008. - P. 398-403.
14. Latkovskis L. Application of supercapacitors for storage of regenerative energy in T3A tramcars [Text] / L. Latkovskis, V. Brazis// Latv. J. Phys. Tech. Sci . – 2007. - №5 P. 23-33
15. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з курсу "Механічне обладнання рухомого складу". (для студентів 3,4 курсів денної і заочної форм навчання спеціальностей 7.092201 «Електричні системи і комплекси

- транспортних засобів», 7.092202 «Електричний транспорт», 7.092203 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод») /Укл. Скуріхін І.Л., Коваленко А.В. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 23 с.
16. Саблін О. І. Проблеми та перспективи ефективного використання рекуперації електроенергії в системі електротранспорту [Електронний ресурс] / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, В. В. Артемчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології . - 2013. - № 2. - С. 126-130. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/oeiet_2013_2_25.pdf.
18. Костін М. О. Вплив рекуперації та вибігу електрорухомого складу на його енергетичні показники [Електронний ресурс] / М. О. Костін, О. І. Саблін, А. В. Нікітенко // Електрифікація транспорту . - 2011. - № 2. - С. 44-46. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/eltr_2011_2_12.pdf
19. Саблін О. І. Проблеми та перспективи ефективного використання рекуперації електроенергії в системі електротранспорту [Електронний ресурс] / О. І. Саблін, В. Г. Кузнецов, В. В. Артемчук // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології . - 2013. - № 2. - С. 126-130. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/j-pdf/oeiet_2013_2_25.pdf
20. Ломака Р. О. Рекуперативні режими мехатронного модуля електромобіля з суперконденсаторною батареєю [Електронний ресурс] / Р. О. Ломака // ОВ “Призма Електрик”. - Режим доступу: <http://www.prisma-electric.com/rekuperativni-rezhimi-mexatronnogo-modulya-elektromobilya-z-superkondensatornoyu-batareyeyu/>

ІНТЕРНЕТ-РЕСУРСИ

www.izvestia.ru/news/572158

<http://rutracker.org/forum/>

<http://electrotransport.ru/ussr/>

<http://www.strassenbahnen-online.de/tatra/>

<http://gortransport.kharkov.ua/>

ДОДАТОК А

ПРИГОТУВАННЯ ЗРАЗКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Гомогенізація активованого вугілля з зв'язуючою речовиною (біндером) та приготування шару фіксованої товщини (

**А. Змішування:**

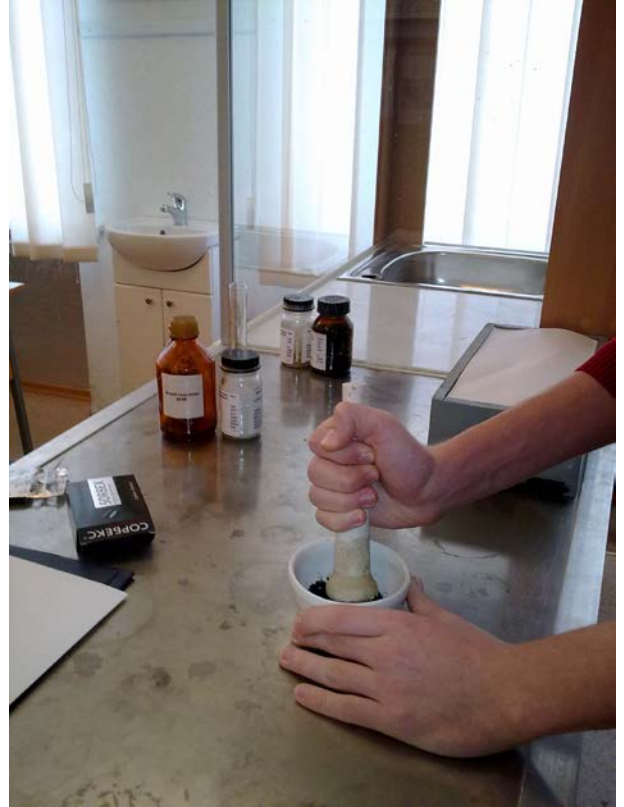
- Порошок активованого вугілля (95%)
- Біндер (змішувач) ПВДФ (полівініліденфторид, 5%)
- Етанол

Б. Приготування вуглецевого шару

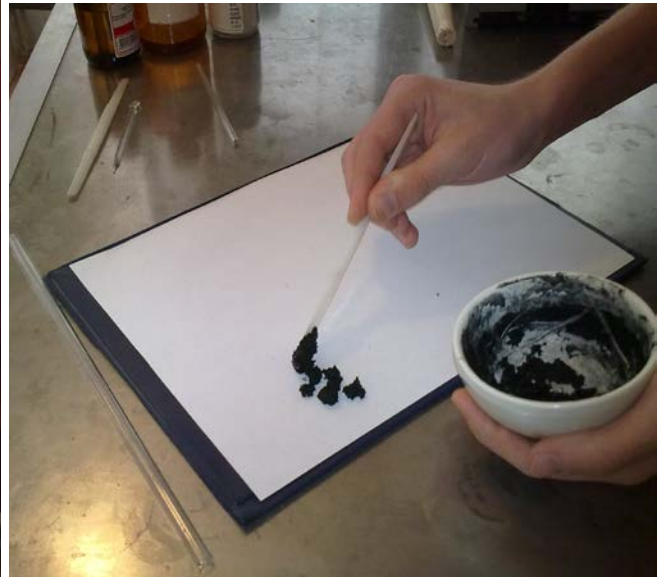
Розкотати пасту скляним циліндром до однорідної товщини та щільності ($\sim 15 \text{ мг/см}^2$)



a)



б)



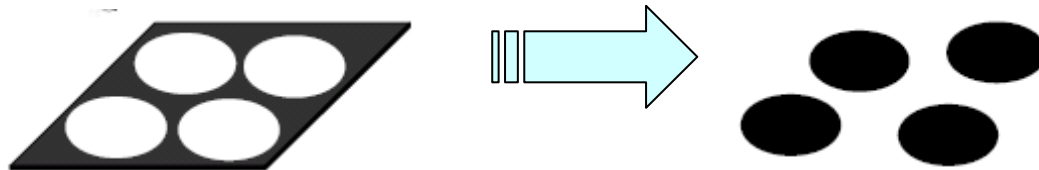


3. Просушування у печі 24 год. (у випадку органічного електроліту - у вакуумі для видалення залишків води при 120 °С)

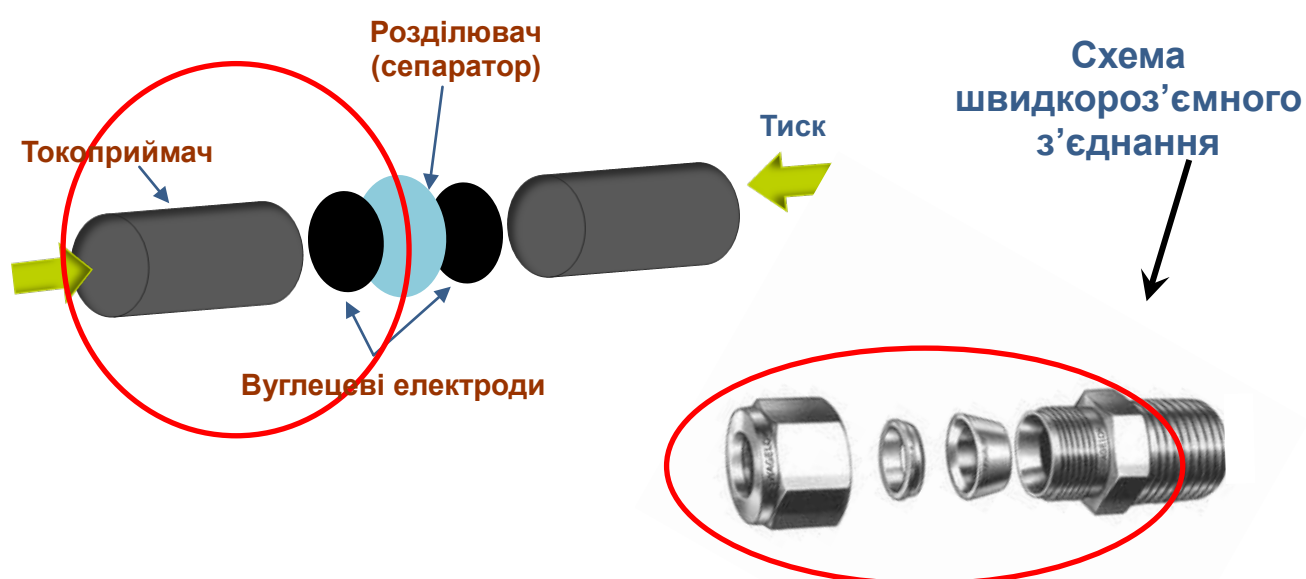
3. Виготовлення зразків визначеного розміру для приготування зразків (електродів) для електрохімічних досліджень.



Вирізання дисків для електродів за допомогою кернера, приблизний діаметр 11 мм



4. Комплектація 2-електродної комірки



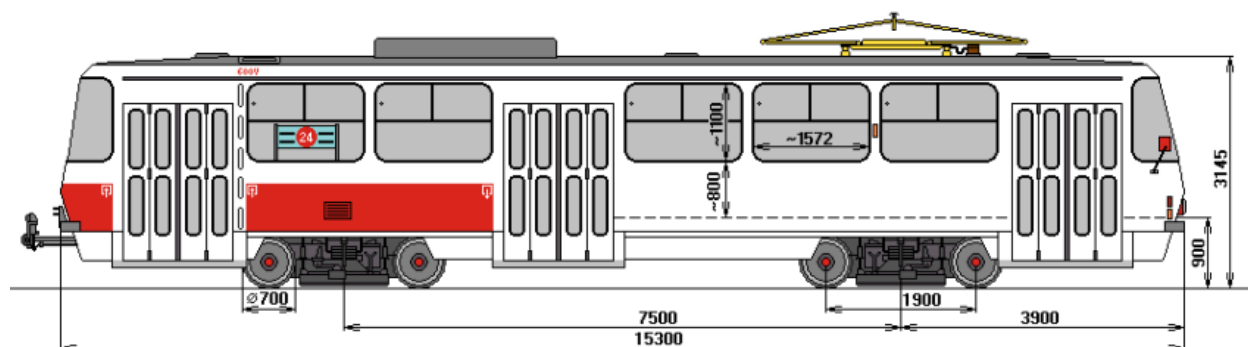
- Вуглецеві електроди: ~13 мг/од. – ~200-250 мкм (~ 15 мг/см²)
- Сепаратор: скловолокно Whatmann (Aldrich) (~1 мм)
- Швидкокороз'ємне з'єднання з сталі
- Тиск під пресом: 1 т

РУХОМИЙ СКЛАД ПАСАЖИРСЬКИХ ТРАМВАЙНИХ ВАГОНІВ
М. ДНІПРОДЗЕРЖИНСЬКА СТАНОМ НА 01.01.2010

http://urbantransport.kiev.ua/ua_106.html

Рік	Тип	Кільк.	Інвентарні номери																	
1981	Tatra T3SU	1					645													
1982	Tatra T3SU	2	651		653															
1983	Tatra T3SU	4				654	655		657										670	
1984	Tatra T3SU	2		662	663															
1985	Tatra T3SU	9	671	672		664	675	676	677	678										
1986	Tatra T3SU	3				683													680	
1987	Tatra T3SU	4	681	682			684		686	687	688									
1989	71-605	3						1015	1016											
1990	71-605	4	1021							1036										
1993	71-608K	7					104		106	107	108								110	
1996	71-608KM	1						115									119			
1996	Tatra T6B5	4	2001	2002	2003	2004														
1997	71-608KM	6		122	123	124	125	126	127											
2000	Tatra T6B5	1																		2000
71-608KM		7																		
Tatra T3SU		25																		
Tatra T6B5		5																		
Усього:		51																		

СХЕМА ТРАМВАЯ ТАТРА Т6В5 (Т3М)



Основні технічні характеристики

http://www.tatra-yug.com.ua/company/vagon/t_3m/

Длина вагона без сцепки	16400 мм
Длина кузова вагона	15300 мм
Ширина кузова вагона	2480мм
Высота кузова вагона	3145 мм
(новые колеса диаметром 700 мм)	
Расстояние между осями шкворней	7500 мм
База ходовой тележки	1900 мм
Диаметр новых колес	700 мм
Ширина колеи	1435 мм
	1524 мм
Номинальное напряжение	550 В
на контактном проводе	+170 В
	-150 В
Напряжение вспомогательных цепей	24 В
Мощность тяговых двигателей	4X45=180 кВт
Максимальная скорость	65 км/ч
Количество сидений	40
Количество мест для стоящих пассажиров (8 пасс,на м2)	128
Масса пустого вагона	18,4 т

