

Секція «Електронні пристрої та системи»

ГІБРИДНИЙ НАКОПИЧУВАЧ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
ДЛЯ МІКРОМОБІЛЬНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Шифр роботи: ELECTRIC VEHICLE

АНОТАЦІЯ

Стисло розглянуто необхідність електрифікації транспорту, зокрема збільшення використання мікромобільного електротранспорту в міських умовах на прикладі електровелосипеду. Враховуючи немонотонний процес споживання електроенергії під час використання, обґрунтовано необхідність покращити систему живлення транспорту шляхом її гібридизації. Розглянуто топології, що використовуються для гібридизації та визначено переваги і недоліки кожної з них – обрано доцільну топологію для живлення мікромобільного транспорту. Представлено розрахункове обґрунтування доцільності використання гібридної системи для покращення експлуатаційних умов акумуляторної батареї. Виконано опис алгоритму роботи системи накопичення для можливих режимів роботи електровелосипеду. Для обраного перетворювача виконано симуляцію для підтвердження можливості його роботи у номінальному режимі в усьому робочому діапазоні коефіцієнту заповнення імпульсів керування.

Ключові слова: мікромобільний електротранспорт, електровелосипед, гібридизація, гібридна система, топологія перетворювача, суперконденсатор, акумуляторна батарея.

ЗМІСТ

ВСТУП	3
1 ОГЛЯД ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ	5
2 ТОПОЛОГІЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ	8
3 ПОКРАЩЕННЯ РЕСУРСУ БАТАРЕЇ ГІБРИДНОГО НАКОПИЧУВАЧА	11
4 ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ГІБРИДНОГО НАКОПИЧУВАЧА..	15
4.1 Алгоритм роботи гібридного накопичувача	15
4.2 Аналітичний розрахунок передавальної характеристики допоміжного перетворювача	18
4.3 Перевірка працездатності перетворювача Чука	23
ВИСНОВКИ	30
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	31

ВСТУП

Машини з двигунами внутрішнього згоряння кожного дня заповнюють головні магістралі міст, утворюючи затори, які вносять дискомфорт в наше повсякденне життя. Тренд на екологічність та компактність вже відіграє свою роль у зміні вподобань городян при виборі транспорту для пересування містом. На сьогодні все більшої популярності набуває електротранспорт, але його впровадження у міський трафік потребує додаткової відбудови інфраструктури та введення нових норм щодо врегулювання виробництва такого транспорту. Куди більш оптимальним вибором для повсякденного використання містом є мікро-мобільний транспорт, а саме електровелосипеди. В силу його екологічності, безшумності та зручності у використанні, прогнозується лише поширення такого виду транспорту з часом. Втім, сучасні методи електрифікації персонального транспорту на сьогодні не є ідеальними. В більшості сучасних акумуляторів використовують літій-іонні комірки, які мають найвищі характеристики за питомою енергією та потужністю серед інших стандартних джерел енергії. Непостійність циклу розряду батареї під час використання та хімічна природа накопичення енергії літій-іонних акумуляторів зумовлює часткову деградацію в ході експлуатації.

Гібридизація системи, тобто комбінування двох або більше систем накопичення енергії, дозволить згладити процес розрядження літій-іонних акумуляторів у моменти пульсацій за умови, що середній струм перевищуватиме максимальний номінальний струм основного джерела — акумулятора. Вторинне джерело повинно мати високу питому потужність при малій питомій енергії – це необхідно для компенсації необхідного об'єму енергії впродовж короткого проміжку часу. Такими характеристиками володіють суперконденсатори, що і будуть виступати в ролі допоміжного високопотужного джерела. Втім, для утворення такої системи необхідно розробити спосіб поєднання обох типів накопичувачів щоб синхронізувати їх роботу та розподіл енергії між накопичувачами під час використання.

Метою дослідження є подовження експлуатаційного ресурсу акумуляторної батареї шляхом покращення її експлуатаційних умов за рахунок гібридизації системи живлення; розрахунок параметрів допоміжного перетворювача для забезпечення працездатності системи з гібридним накопичувачем енергії.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у визначенні умов працездатності при додаванні до стандартизованої системи живлення мікромобільного електротранспорту додаткового накопичувача енергії із допоміжним перетворювачем. За рахунок такого нововведення можемо отримати кращі експлуатаційні умови роботи накопичувача, тим самим подовжуючи його загальну тривалість життя та робочого циклу.

1 ОГЛЯД ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТІ

Кожна система накопичення енергії має свої обмеження, котрі звужують діапазон використання тих чи інших типів накопичувачів, оскільки ідеальні системи потребують одночасно і великої кількості енергії і потужності. Однак, стандартні накопичувачі енергії обмежені або максимальною потужністю, або максимальною енергією накопичення. Намагання сконструювати батарею, що буде і одночасно достатньо ємнісною та потужною – це складне завдання. При стандартному компонуванні елементів в результаті вона буде більш об'ємною, важкою та, звичайно ж, набагато дорожчою. Тому, в деяких випадках необхідно сконструювати систему, котра комбінує дві або більше системи накопичення з метою утворити гібридну систему. Для прикладу, батарея має малу питому потужність, але високу питому енергію, відносно малу тривалість циклів заряд-розряд, малу величину саморозряду та меншу вартість. З іншого боку, існують суперконденсатори, котрі мають малу питому енергію, але високу питому потужність, швидкий заряд, довшу тривалість експлуатації, більший саморозряд та коштують більше. Комбінація цих двох систем зможе нівелювати недоліки один одного, щоб утворити систему, котра поєднує лише переваги обох накопичувачів окремо.

Загальні переваги імплементації гібридних накопичувачів енергії [1]:

- мінімізує початкові витрати на побудову загальної системи накопичення (через розподілення потужності та енергії, вторинна система має покривати лише частину потужності від необхідної);
- збільшує загальну ефективність системи;
- мінімізує динамічне навантаження на основну систему накопичення та оптимізує роботу установки, продовжуючи її загальний експлуатаційний термін.

У транспортному секторі за допомогою гібридних накопичувачів інженери намагаються розробити систему, котра не буде страждати від умовного

виснаження акумулятора. Пікові навантаження, що виходять за межі номінального режиму в ході неоднорідності руху транспорту відбирають значну частину енергії від батареї та ще прискорює її деградацію в силу її електрохімічної природи. Це означає, що загальна тривалість циклу розряду та, відповідно, термін життя батареї зменшиться. Як альтернативу для живлення мотору, можливо застосувати гібридні накопичувачі енергії – у випадку електровелосипедів доцільним буде поєднання суперконденсатора та літій-іонного акумулятора, враховуючи розглянуті переваги та недоліки кожного джерела.

Така система, відповідно, матиме два джерела енергії, одне з яких використовується як основне, маючи високу питому енергію, інше має високу питому потужність, тим самим нівелюючи вплив різких коливань споживаної потужності на літій-іонні комірки. Загальний алгоритм роботи даного накопичувача є досить простим: основне джерело має певний номінальний струм, який відомо з технічних характеристик самого акумулятора. У випадку перевищення цього значення система керування забезпечує різницю між номінальним струмом та споживаним саме за рахунок вторинного джерела. Оскільки такі пікові споживання є короткотривалими, відносно усєї поїздки, то вимога високої питомої енергії до вторинного джерела відсутня.

Як уже було зазначено, вторинне джерело може не мати високої питомої енергії, але натомість зобов'язане мати високу питому потужність. Для розглянутого застосування найбільш оптимальним буде використати суперконденсаторний блок, зважаючи на їх розміри, вагу, та питому потужність. Порівняння з іншими типами накопичувачів наведено на рис. 1.1, з нього видно, що саме суперконденсатори володіють найбільшою питомою потужністю – синя область рисунку. Це поєднання дозволяє отримати еквівалентний накопичувач енергії з високою загальною ємністю та піковою вихідною потужністю.

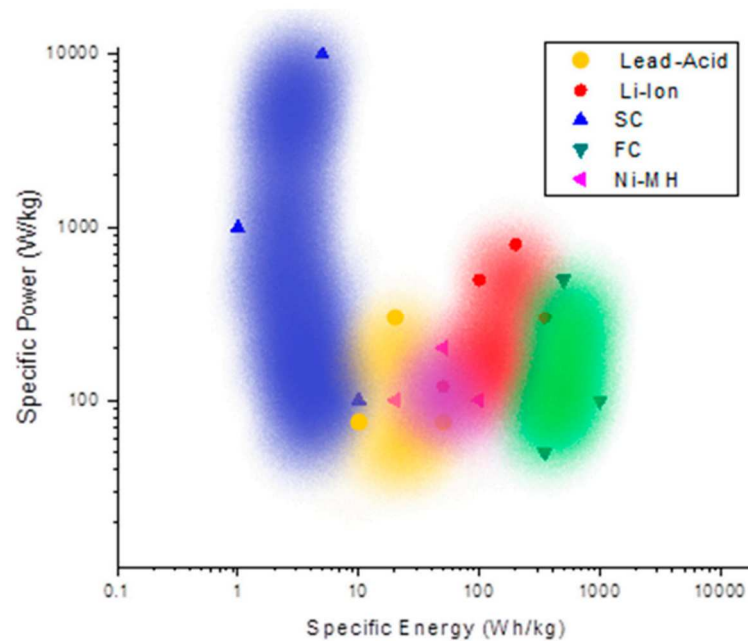


Рис. 1.1 Питома потужність та питома енергія різних типів накопичувачів [2]

Батареї, які застосовуються в системах живлення зазвичай мають електрохімічну природу. Тому такі пристрої матимуть більший внутрішній опір, аніж у суперконденсаторів, оскільки він накопичує енергію за допомогою статичного зарядку, що й зумовлює високу питому потужність. Така природа зберігання енергії у суперконденсаторі і зумовило його популярність для гібридизації, оскільки питома потужність може коливатися у межах 3000-5000 Вт/кг [3]. Як було вище зазначено, поєднання акумулятора та суперконденсаторів можуть повністю задовольняти вимоги потужності та енергії. Варто зауважити, що при перевищенні номінального режиму роботи стандартних акумуляторів, частина енергії розсіюється на комірці акумулятора у вигляді тепла, тим самим знижуючи ККД до рівня, близько 70-85% [4]. В той же час суперконденсатор при пікових навантаженнях здатний забезпечити 95% енергії від накопиченої, при цьому лише 5% розсіюється у вигляді тепла на внутрішньому опорі. Більше того, недоліком батареї є тривалий час заряджання, в середньому більше години, що зумовлено інерційністю хімічних процесів всередині комірки. Натомість повне заряджання суперконденсаторів може відбуватися за лічені хвилини [3].

2 ТОПОЛОГІЯ ГІБРИДНОЇ СИСТЕМИ

Поєднання двох або більше накопичувачів забезпечує більшу гнучкість системи, кращу динамічну характеристику, вищу ефективність та тривалість експлуатації всієї системи. Акумулятор та суперконденсатор можуть бути під'єднані до системи живлення напряму або через силові перетворювачі. Пряме підключення має найпростішу архітектуру системи, малу вартість та невелику гнучкість, що ускладнює регулювання. Натомість впровадження одного чи декількох перетворювачів забезпечує розділення керування обох накопичувачів, що забезпечує більшу гнучкість, але в той же час її розробка займає більше часу та коштів.

Загалом топології з'єднання двох джерел енергії можуть бути класифіковані як:

- пасивна;
- напівактивна, котра в свою чергу має три варіанти реалізації;
- повністю активна, варіації якої повністю унаслідуються напівактивною топологією.

Вибір тої чи іншої топології повністю залежить від вимог до системи та бажаного степеню керування розподіленням споживаної енергії між накопичувачами [5].

Пасивна топологія – найпростіший шлях поєднання накопичувачів енергії з, відповідно, високою питомою енергією та потужністю. Навантаження під'єднано напряму до системи живлення без проміжних силових перетворювачів, котрі здатні регулювати розподіленням енергії. Недоліком такої системи є необхідність узгодження рівнів напруги основного та вторинного джерел, що у разі високої напруги потребує використання досить об'ємного вторинного джерела. Зумовлено це тим, що одна комірка суперконденсатора розрахована зазвичай на напругу 2,7—3,0 В. Крім того, пасивна топологія не дозволяє регулювати споживану енергію кожного з джерел [6].

Напівактивна топологія є компромісом між вартістю та гнучкістю керування всієї системи, оскільки вона потребує один перетворювач постійної напруги [7]. Це дозволяє більш раціонально використовувати ресурс джерела, до якого під'єднано перетворювач, що дозволяє зменшити кінцеву вагу та розміри накопичувача у порівнянні з пасивною топологією. В залежності від розташування перетворювача у системі, можливо виділити три типи напівактивної топології:

- паралельна напівактивна;
- напівактивна система з керованим допоміжним джерелом;
- напівактивна система з керованим основним джерелом;

Кероване джерело у назві топології відповідає місцю встановлення перетворювача (рис. 2.1). Паралельна топологія має перетворювач на виході системи накопичення, тому така топологія є наслідуванням від пасивної. Паралельна топологія та з керованим основним джерелом потребують узгодження рівня напруги: у першому випадку вторинне джерело має узгоджуватися з основним, у другому — з напругою на навантаженні. Для електровелосипедів використовують мотори розраховані на напругу 36—72 В, тому топології, в яких мають узгоджуватися рівні напруги, тобто паралельна та з керованим основним джерелом, потребують використання об'ємного вторинного джерела. Тому такі варіанти не є доцільними для застосування у велосипедах. Натомість можливим є використання напівактивної системи з керованим допоміжним джерелом, що узгоджує рівні напруги незалежно від номінальної напруги допоміжного джерела. Цей варіант є доцільним для використання, оскільки дійсно є компромісним варіантом між складністю проектування, його вартістю та результуючими вихідними параметрами кінцевого пристрою. У такій конфігурації допоміжне джерело зможе виконувати основну функцію — відбирати надмірне навантаження навіть за відносно невеликих розмірів. Зважаючи на усі переваги напівактивної топології в плані складності та вартості розробки, надалі розглядатимемо саме таку конфігурацію. Додаткові переваги такої конфігурації розглянуто у роботі [8].

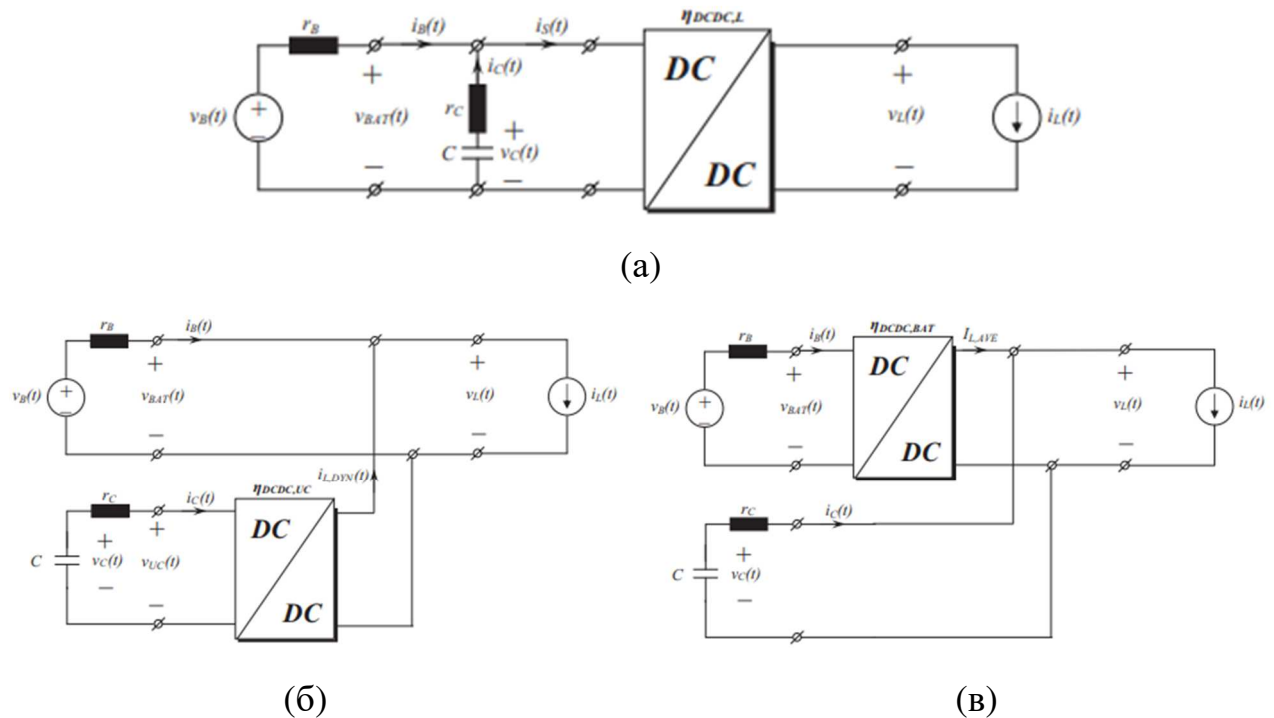


Рис. 2.1 Напівактивні топології: - паралельна напівактивна (а); - система з керованим суперконденсатором (б); - система з керованим акумулятором (в) [7]

На рис. 2.4 використані наступні позначення: r_b – внутрішній опір основного накопичувача, r_c – внутрішній опір допоміжного джерела, $V_b(t)$ – поточна напруга основного накопичувача, $V_c(t)$ – поточна напруга допоміжного джерела, $V_L(t)$ – поточна напруга на навантаженні, $I_L(t)$ – поточний струм навантаження, блок DC / DC – перетворювач постійної напруги.

Усі варіації активних топологій наслідують напівактивні конфігурації за відмінністю, що до системи додано один перетворювач для утворення повністю контрольованої системи. Загалом вони характеризуються найбільшою гнучкістю системи, відносно невеликими розмірами, а також найскладнішою архітектурою та високою вартістю, враховуючи ціну розробки. Додатковий перетворювач призначений для усунення недоліків керування у напівактивній системі. Втім, наявність двох перетворювачів знижує загальний коефіцієнт корисної дії та збільшує вартість розробки такого пристрою, так як системи керування обох перетворювачів мають бути синхронізованими.

3 ПОКРАЩЕННЯ РЕСУРСУ БАТАРЕЇ ГІБРИДНОГО НАКОПИЧУВАЧА

Для наочності покращення використання ресурсу стандартного акумулятора проведемо розрахунок діапазону робочих напруг акумулятора при використанні гібридної системи та стандартної. Розглянемо як місце пересування місто Київ, причому шлях пересування приймемо з нахилом у 10%. При пересуванні на велосипеді важливо враховувати швидкість вітру, оскільки таке явище впливає на споживану мотором потужність. Середнє значення вітру, згідно з українським гідрометеорологічним центром [9] становить $2,21 м/с$. Для створення піку споживання мотором, вважатимемо, що вітер є зустрічним, велосипедист при підйомі на пагорб не допомагає за допомогою педалей, тобто потужність педалювання – $0 Вт$. Маса користувача – $75 кг$, початкова швидкість велосипеда – $40 км/год$.

Використовуючи онлайн сервіс симуляції для дослідження параметрів заданих електровелосипедів, отримуємо маршрут, що зображено на рис. 3.1. Важливо зауважити, що симуляція проходить з урахуванням використання стандартного літій-іонного акумулятора. Під час підйому можна спостерігати спад швидкості велосипедиста. На цій ділянці виберемо точку найбільшого споживання мотором для подальших розрахунків.

Згідно з вище описаним алгоритмом роботи, необхідно задатися піковим струмом постачання акумулятором. Проаналізувавши стандартні акумулятори, приймемо, що $I_{bat_{max}} = 25 A$ [10]. Внутрішній опір обраного акумулятора, згідно з документацією, становить $R_{esr} = 0,14 Ом$. Додатково, з рис. 3.1 вихідна потужність батареї становить $P_{load} = 1555 Вт$. При розрахунку важливо враховувати номінальну напругу, на яку розраховано двигун. Для цього приймемо двигун з прямим приводом компанії Volta Bikes $48-60V, 600 Вт$ [11]. Отже, номінальну напругу можна прийняти наступною: $V_{nom_{bat}} = 48 V$.

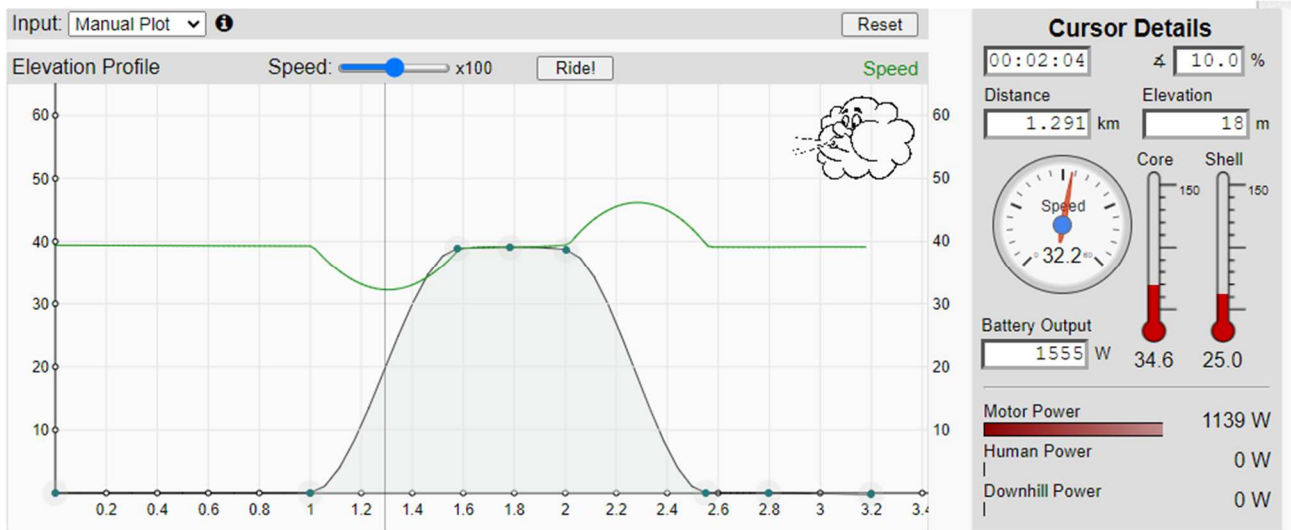


Рис. 3.1 Умовний маршрут велосипедиста [12]

Задавшись необхідними величинами, розрахуємо діапазон робочих напруг акумулятора за відсутності гібридної системи. Початково необхідно визначити вихідний струм акумулятора:

$$I_{dem} = \frac{P_{load}}{V_{nom_{bat}}} = \frac{1555}{48} \approx 32,40A. \quad (3.1)$$

Порівнявши пікове значення струму, та споживане, можливо одразу зробити висновок, що акумулятор працюватиме у режимі, що шкодить літій-іонним коміркам, нагріваючи їх, та зменшуючи тривалість використання. За такого режиму роботи падіння напруги на внутрішньому опорі основного джерела дорівнюватиме наступному:

$$V_{esr_{bat}} = I_{dem} * R_{esr} = 32,4 * 0,14 \approx 4,54V. \quad (3.2)$$

Повертаючись до обраного акумулятора, зазначимо, що в якості захисту від виснаження встановлено систему контролю батареї (BMS – battery management system), котра автоматично відмикає акумулятор від силової шини за умови напруги, нижчої за мінімальний поріг. Для обраного акумулятора напруга відсічки становить $39V \pm 1V$. Втім, між двигуном та акумулятором встановлено контролер, який має власний захист, з метою збереження ресурсу

батареї. У обраного контролера напруга відсічки становить $42B \pm 0,5B$ [13]. Тому, діапазон робочих напруг акумулятора за ідеальних умов становить $42 - 54,6(B)$, без урахування коливань напруг відсічки систем захисту.

Розраховане падіння напруги на внутрішньому опорі впливає на нижню межу діапазону робочих напруг, оскільки при її проходженні, акумулятор перестає постачати енергію. Тоді, скоректований діапазон напруг для стандартного рішення буде наступним:

$$(V_{\min} + V_{esr_{bat}}) - V_{\max} - > (42 + 4,54) - 54,6 - > 46,54 - 54,6(B). \quad (3.3)$$

На основі цього діапазону можна зробити висновок, що значна частина запасеної енергії акумулятора не використовується. При цьому, сама батарея працює у піковому режимі, що значно шкодить її тривалості життя. З метою використання більшого ресурсу батареї та зменшення шкоди на неї, гібридуємо систему та розрахуємо діапазон робочих напруг для такої конфігурації.

Використовуючи гібридний накопичувач, врахуємо, що надмірний струм відбирається вторинним джерелом, у нашому випадку суперконденсаторним блоком. Тобто, вихідний струм основного джерела дорівнюватиме своєму піковому значенню, аби не переходити у режим перенавантаження - $I_{bat_{\max}} = 25A$. За такого струму, падіння на внутрішньому резисторі матиме наступну величину:

$$V_{esr_{bat}} = I_{bat_{\max}} * R_{esr} = 25 * 0,14 \approx 3,5B. \quad (3.4)$$

Додаючи отриману величину до ідеального діапазону отримаємо діапазон робочих напруг основного джерела для гібридного накопичувача.

$$(V_{\min} + V_{esr_{bat}}) - V_{\max} - > (42 + 3,5) - 54,6 - > 45,5 - 54,6(B). \quad (3.5)$$

Очевидно, що нижня межа робочої напруги наблизилася до ідеального стану, що свідчить про збільшення використання ресурсу основного джерела. Додатково зауважимо, що батарея не переходить межу пікового струму, тобто не перебуває у стані перенавантаження, що також позитивно впливає на стан акумулятору.

При розробці вторинного джерела, враховуючи побудову універсальної системи керування, на мікроконтролері, можливо програмно задати межу споживання струму акумулятором для ввімкнення допоміжного джерела у коло. Якщо дозволяють можливості вторинного джерела, то цілком ймовірно запрограмувати максимальне значення струму з запасом, наприклад $I_{bat_{max}} = 20A$. Це дозволить розвантажити основне джерело, але варто враховувати, що у такому режимі вторинне джерело буде здатне забезпечувати різницю струму менший проміжок часу. Але, оскільки воно є високопотужним джерелом, то це можливо реалізувати.

Необхідно зауважити, що можливо оптимізувати використання ресурсу основного джерела, виходячи з деякого компромісного рішення, що поєднуватиме вимоги задовільної ємності вторинного джерела, вагу кінцевого гібридного накопичувача та займаний ним об'єм.

Наявний у конструкції будь-якого електротранспорту контролер управління мотором, що регулюється самим користувачем та впливає на споживання розглядатимемо як чорну скриню, при чому параметри візьмемо пристрою, що є доступним на ринку – [13]. Надалі, при розрахунках, використовуватимемо саме ці значення.

4 ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ГІБРИДНОГО НАКОПИЧУВАЧА

4.1 Алгоритм роботи гібридного накопичувача

Як було вже зазначено, оптимальна топологія для мікромобільного транспорту – напівактивна топологія, що містить лише один перетворювач. Втім, для виконання ним необхідних функцій, для нього має бути розроблений алгоритм керування, що враховує усі можливі стани роботи під час використання. На рис. 4.1 представлено узагальнено три варіанти розвитку подій під час руху. Вибір певного алгоритму повністю визначається струмом споживання, який може бути як додатнім – прискорення або рух з постійною швидкістю, так і від’ємним – здатність мотору до рекуперації – повернення частини енергії під час руху за допомогою педалювання. Нульовий струм споживання під час руху можливий лише у періоди переходу до режиму рекуперації та навпаки. Втім, він цілком реальний під час зупинки.

Автоматизовану систему керування перетворювачем найкраще всього будувати на мікроконтролері, оскільки це надає універсальності системі та можливість досить швидко змінювати реакцію на зміну вхідних параметрів. Тому надалі, при описі конкретизованих алгоритмів опиратимемося на використанні саме мікропроцесорної системи.

Вхідними параметрами для усіх випадків є мінімальна та максимальна напруга вторинного джерела $V_{\min_{SC}}$, $V_{\max_{SC}}$, від яких залежить, чи дозволено взагалі вмикати допоміжне джерело. Також важливим параметром для стабільної роботи основного джерела – максимально допустимий струм, перевищення якого недопустиме для збереження його ресурсу - $I_{\max_{bat}}$ - встановлюється програмно у мікропроцесорну систему. Наступний параметр, котрий також задається програмно до мікроконтролера, є напруга відсічки батареї - $V_{\min_{bat}}$. Він необхідний для розуміння загального стану системи накопичення, хоча може бути виключений з алгоритму, враховуючи систему захисту від глибокого розряду BMS.

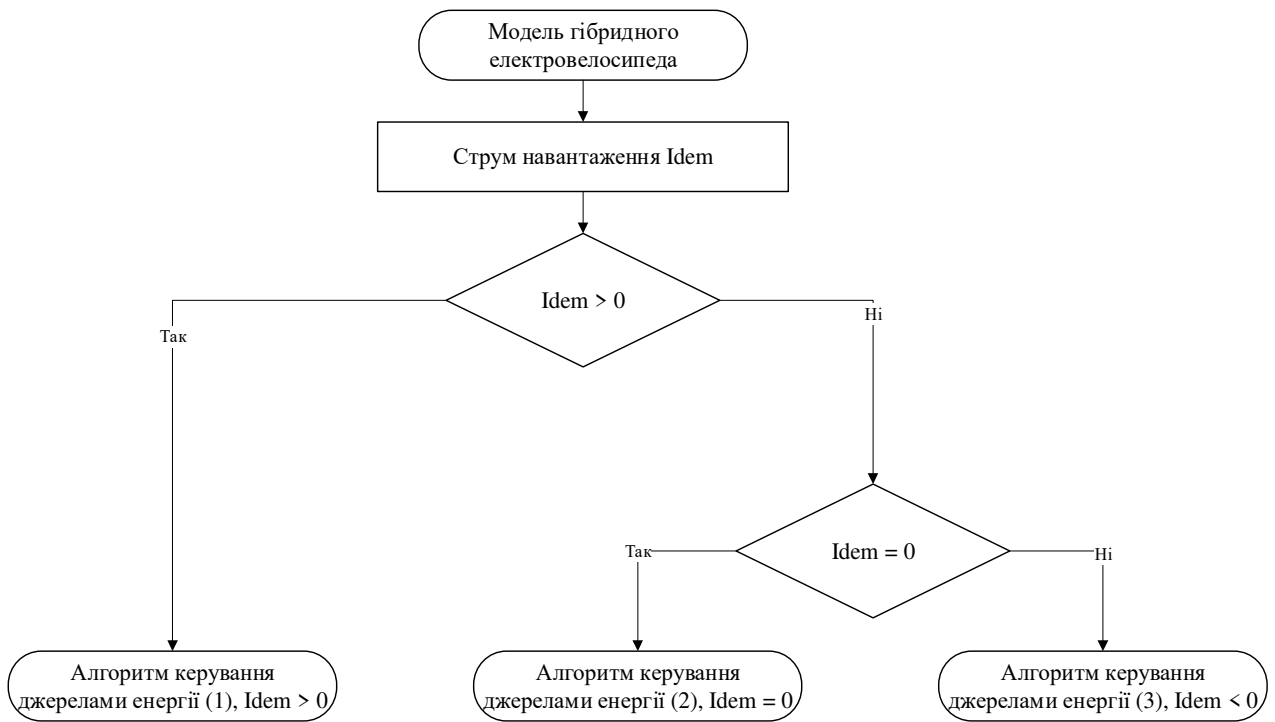


Рис. 4.1 Загальний алгоритм роботи

З кіл зворотного зв'язку отримуватимемо миттєві значення напруг на джерелах – V_{bat}, V_{SC} . Параметр I_{bat} необхідний для виміру струму з батареї, який надходить для підзарядки вторинного джерела під час руху.

Рис. 4.2 зображує алгоритм під'єднання вторинного джерела у випадку руху велосипеда або його розгону, при $I_{dem} > 0$. У загальному алгоритм побудовано таким чином, аби мати змогу підтримувати вторинне джерело у зарядженому стані під час стандартного руху, та у піки навантаження підключати це джерело до силової шини, аби забезпечити різницю максимального струму батареї та споживаного струму.

Наступний алгоритм під'єднання вторинного джерела можливий за нульового струму навантаження – під час зупинки (рис. 4.3). У такому випадку гібридна, як і в попередньому, намагатиметься поновити стан максимальної зарядженості допоміжного джерела за рахунок основного. Але в цьому випадку немає додаткової умови, щоб віддавати частину енергії до навантаження, тому процес заряджання зможе протікати швидше, аніж під час руху.

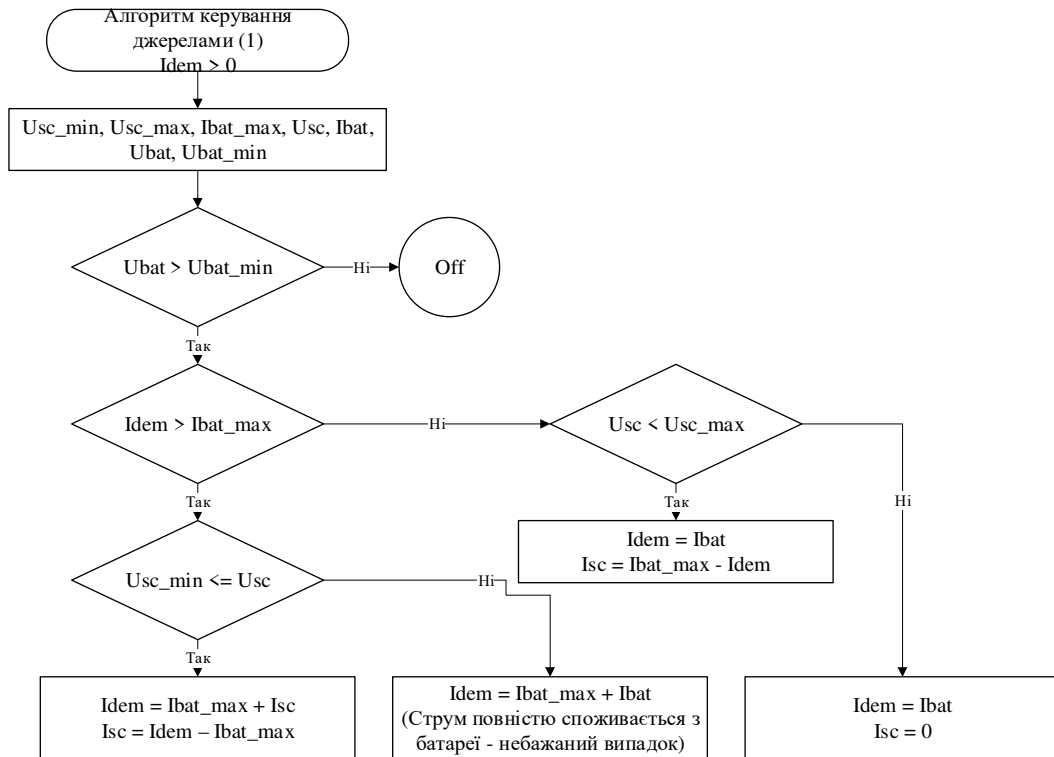


Рис. 4.2 Алгоритм при додатному струмі навантаження

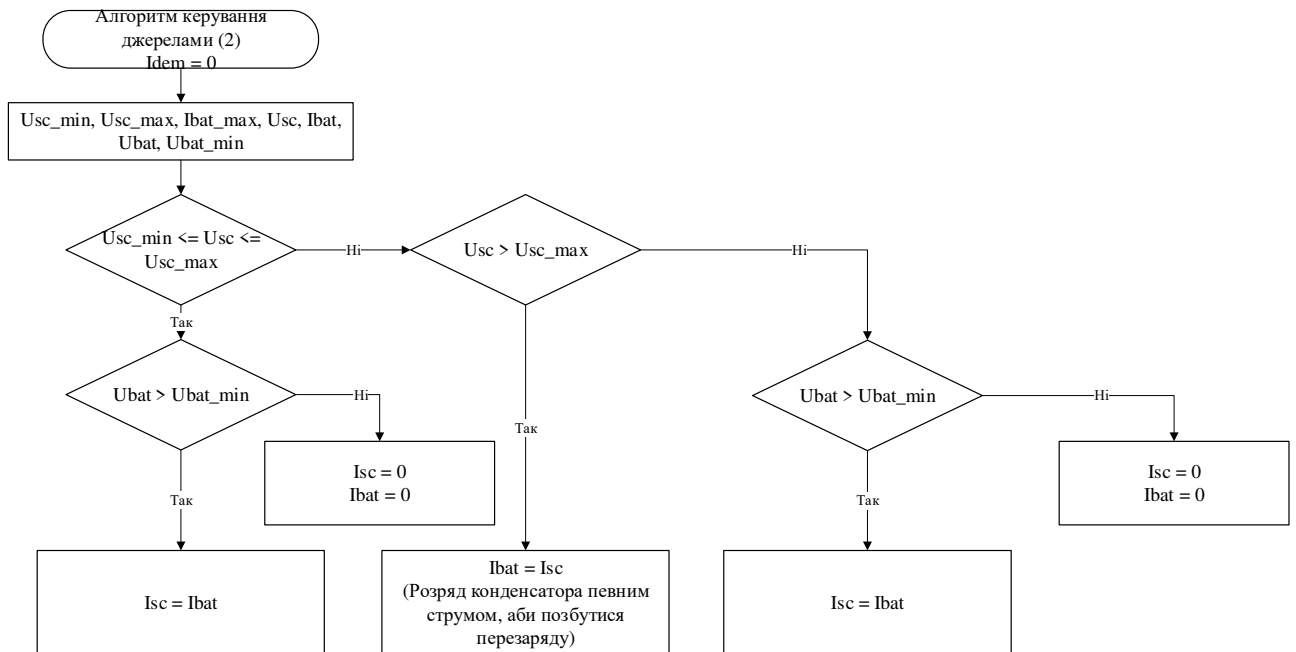


Рис. 4.3 Алгоритм роботи за відсутності струму навантаження

Останній можливий випадок під час користування електровелосипедом – режим рекуперації мотором – повернення частини енергії під час педалювання. Під час такого руху, повернута енергія в першу чергу використовується для заряджання вторинного джерела, оскільки воно не володіє високою ємністю (рис 4.4).

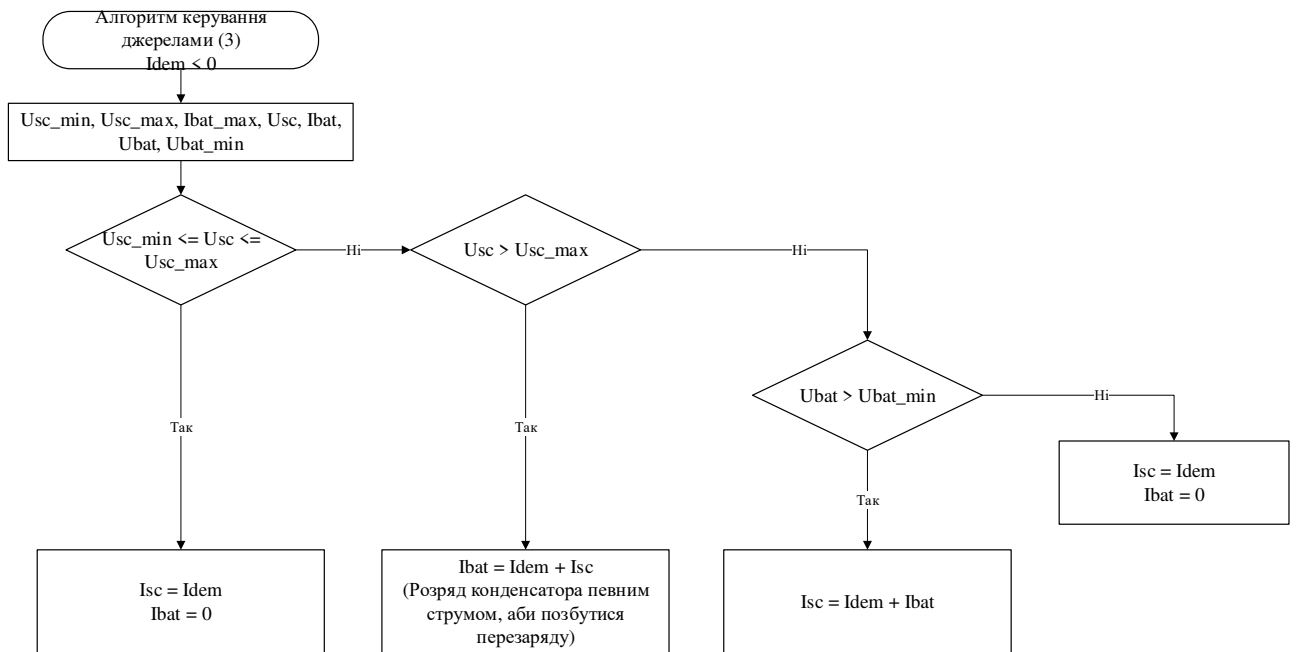


Рис. 4.4 Алгоритм роботи при від'ємному струмі навантаження

4.2 Аналітичний розрахунок передавальної характеристики допоміжного перетворювача

У якості допоміжного перетворювача, який би забезпечував регулювання вихідної напруги у широкому діапазоні, причому як підвищуючи так і понижуючи напругу, було обрано перетворювач Чука [14], який відповідає зазначеним вимогам. (рис. 4.5). Необхідно його реалізувати у двонаправленому форматі для можливості рекуперації енергії.

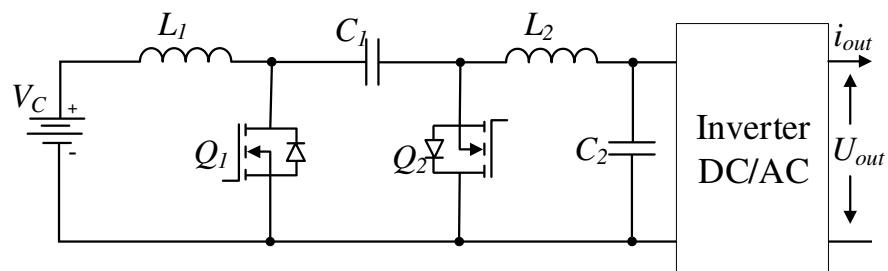


Рис. 4.5 Перетворювач Чука

Розглянемо практичний випадок, використовуючи наявні на ринку елементи. Номінальні параметри обраних елементів відображені у табл. 4.1. Мінімальна та максимальна вхідна напруга вторинного джерела зумовлена обраним суперконденсаторним блоком [15]. Прийнемо, що робочий діапазон складатиме 50% від ємності суперконденсаторів. Оскільки напруга лінійно пропорційна запасеній енергії, то $U_{\min} = 0.5 * U_{\max}$. Вихідні параметри напруги мають відповідати діапазону напруг обраного основного джерела, додатково враховуючи розраховане падіння напруги при максимальному навантаженні [10]. Вихідний струм перетворювача обмежимо максимальною відміткою у 10А.

Таблиця 4.1

Передавальні параметри перетворювача Чука

	Мінімальна напруга, В	Максимальна напруга, В	Піковий середній струм, А
Вхідні параметри	8	16	30
Вихідні параметри	45,5	51,1	10

Імітаційна модель з урахуванням усіх паразитних опорів елементів та джерела наведена на рис. 4.6.

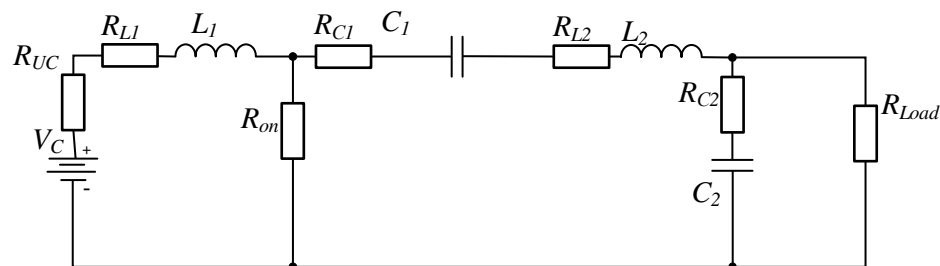


Рис. 4.6 Схема заміщення перетворювача Чука

Розрахунок проводитимемо для усталеного режиму, тому як навантаження можемо представити опір з наступним значенням.

$$R_{load} = \frac{V_{nom_{bat}}}{I_{out\ max_{SC}}} = \frac{48}{10} = 4,8\ \Omega. \quad (4.1)$$

Отримане значення навантаження може змінюватися в залежності від ступеня заряду батареї, та, відповідно, від струму споживання навантаженням.

Передавальну характеристику перетворювача отримаємо використовуючи метод усередненого стану [16]. Прийmemo деякі фундаментальні та передавальні змінні, відносно яких буде проводитися розрахунок. Для цього задаємо матрицю x – міститиме фундаментальні змінні та y і – міститиме передавальні.

$$x = \begin{pmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_{c1} \\ v_{c2} \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} i \\ v \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

де, i_1, i_2 – струми крізь відповідні котушки, причому обидва у напрямку до конденсатора C_1 , i – вхідний струм, v_{c1}, v_{c2} - напруги на відповідних конденсаторах, v – вихідна напруга з перетворювача, інвертована відносно входу. Тоді загальна система для розрахунку буде наступною.

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + bv_{SC} \\ y = cx \end{cases}, \quad (4.3)$$

де, \dot{x} – зміна вищезазначених величин протягом періоду роботи перетворювача, $A_{4 \times 4}$ – матриця коефіцієнтів, яка пов'язує усі фундаментальні величини протягом періоду роботи, $b_{4 \times 1}$ – матриця коефіцієнтів, котра пов'язує вхідну напругу джерела v_{SC} з фундаментальними величинами, $c_{2 \times 4}$ - матриця коефіцієнтів, які пов'язують фундаментальні та передавальні величини. Друге рівняння пов'язує значення «всередині» перетворювача з передавальними. Кожна матриця коефіцієнтів складається з двох відповідних частин, коли транзистор замкнений та розімкнений. Тому для початку отримаємо набір складових матриць для увімкненого стану транзистора (рис. 4.7).

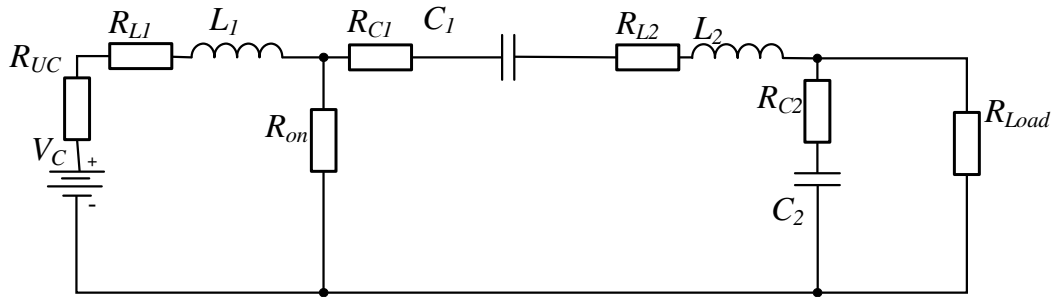


Рис. 4.7 Стан замкнутого транзистора

Використовуючи базові закони Ома та Кірхгофа отримаємо матриці для стану D^*T_s , де D – коефіцієнт заповнення сигналу ШІМ, T_s – період перемикання. Відобразимо отримані складові матриць з позначенням «1».

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_{uc} + R_{L1} + R_{on}}{L_1} & -\frac{R_{on}}{L_1} & 0 & 0 \\ -\frac{R_{on}}{L_2} & -\frac{R_{L2} + R_{C1} + R_{on} + R_{load} \parallel R_{C2}}{L_2} & \frac{1}{L_2} & -\frac{R_{load}}{L_2(R + R_{C2})} \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R}{C_2(R + R_{C2})} & 0 & -\frac{1}{C_2(R + R_{C2})} \end{bmatrix}, \quad (4.4)$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.5)$$

$$c_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{load} \parallel R_{C2} & 0 & \frac{R_{load}}{R_{C2} + R_{load}} \end{bmatrix}. \quad (4.6)$$

Отримавши матриці при замкнутому стані транзистора необхідно провести такі ж самі розрахунки для розімкнутого стану, коли діод D_2 перебуває у стані провідності (рис. 4.8).

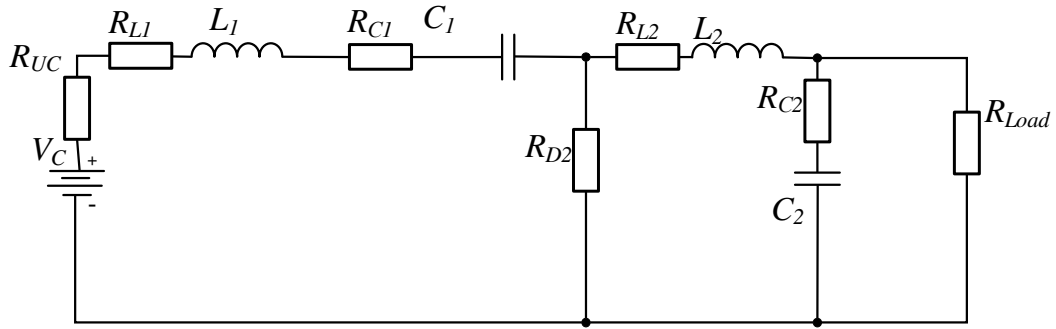


Рис. 4.8 Схема перетворювача при розімкнутому транзисторі

За такої схеми, можемо розрахувати матриці коефіцієнтів з позначкою «2» для проміжку D^*T_s , де $D' = 1 - D$. Використовуючи закони Ома та Кірхгофа отримуємо наступні матриці.

$$A_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_{uc} + R_{L1} + R_d + R_{C1}}{L_1} & -\frac{R_d}{L_1} & -\frac{1}{L_1} & 0 \\ -\frac{R_d}{L_2} & -\frac{R_{L2} + R_d + R_{load} \parallel R_{C2}}{L_2} & 0 & -\frac{R_{load}}{L_2(R + R_{C2})} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{R}{C_2(R + R_{C2})} & 0 & -\frac{1}{C_2(R + R_{C2})} \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

$$b_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

$$c_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{load} \parallel R_{C2} & 0 & \frac{R_{load}}{R_{C2} + R_{load}} \end{bmatrix}. \quad (4.9)$$

Отримали розраховані частини матриць для обох станів транзистора, тобто для повного періоду перетворювача. Аби перейти для подальшого розрахунку необхідно утворити загальні матриці, які описують повний період перемикання транзистора. Розрахувати їх можна просумувавши частини відповідних проміжків.

$$\begin{aligned}
A &= D * A_1 + D' * A_2 \\
\{ b &= D * b_1 + D' * b_2 , \\
c &= D * c_1 + D' * c_2
\end{aligned}
\tag{4.10}$$

$$A = \begin{bmatrix}
-\frac{R_{uc} + R_{L1} + DR_{on} + D'(R_{C1} + R_d)}{L1} & -\frac{DR_{on} + D'R_d}{L1} & -\frac{D'}{L1} & 0 \\
\frac{DR_{on} + D'R_d}{L2} & -\frac{R_{L2} + D(R_{C1} + R_{on}) + D'R_d + R_{load} \parallel R_{C2}}{L2} & \frac{D}{L2} & -\frac{R_{load}}{L2(R + R_{C2})} \\
\frac{D'}{C1} & 0 & 0 & 0 \\
0 & \frac{R}{C2(R + R_{C2})} & 0 & -\frac{1}{C2(R + R_{C2})}
\end{bmatrix},
\tag{4.11}$$

$$b = \begin{bmatrix}
\frac{1}{L1} \\
0 \\
0 \\
0
\end{bmatrix},
\tag{4.12}$$

$$c = \begin{bmatrix}
1 & 0 & 0 & 0 \\
0 & R_{load} \parallel R_{C2} & 0 & \frac{R_{load}}{R_{C2} + R_{load}}
\end{bmatrix}.
\tag{4.13}$$

Для знаходження передавальної характеристики проводимо аналіз за постійним струмом, тому капіталізуємо усі позначення величин, які могли б змінюватися. Причому, зміна фундаментальних змінних в усталеному режимі дорівнює нулю. Тоді система (4.3) набуває нового вигляду.

$$\begin{cases}
0 = AX + bV_{SC} \\
Y = cX
\end{cases}.
\tag{4.14}$$

Рішенням системи (4.14) буде наступне рівняння.

$$X = -A^{-1}bV_{SC},
\tag{4.15}$$

де, A^{-1} – обернена матриця до матриці коефіцієнтів. Розв'язок (4.15) проведено у програмному середовищі Wolfram Mathematica, котре здатне працювати із символічними величинами. Відобразимо результат розрахунку нижче.

$$X = \left(\frac{\frac{D^2 V_{SC}}{D^3 R_d + D^2 D'(R_{C1} + R_d + 2R_{on}) + D'^2(R_{load} + R_{L2} + D(R_{C1} + 2R_d + R_{on})) + D^2(R_{L1} + DR_{on} + R_{SC})}}{DD'V_{SC}} \right) \cdot \left(\frac{D^3 R_d + D^2 D'(R_{C1} + R_d + 2R_{on}) + D'^2(R_{load} + R_{L2} + D(R_{C1} + 2R_d + R_{on})) + D^2(R_{L1} + DR_{on} + R_{SC})}{(D'^2 R_d + D^2 R_{on} + D'(R_{load} + R_{L2} + D(R_{C1} + R_d + R_{on})))V_{SC}} \right) \cdot \frac{DD'V_{SC}}{D^3 R_d + D^2 D'(R_{C1} + R_d + 2R_{on}) + D'^2(R_{load} + R_{L2} + D(R_{C1} + 2R_d + R_{on})) + D^2(R_{L1} + DR_{on} + R_{SC})} \quad (4.16)$$

Після отримання виразів для фундаментальних змінних можемо отримати вирази для передавальних.

$$Y = cX, \quad (4.17)$$

$$I = \frac{\frac{D^2 V_{SC}}{D^3 R_d + D^2 D'(R_{C1} + R_d + 2R_{on}) + D'^2(R_{load} + R_{L2} + D(R_{C1} + 2R_d + R_{on})) + D^2(R_{L1} + DR_{on} + R_{SC})}}{DD'R_{load}V_{SC}} \cdot \frac{DD'R_{load}V_{SC}}{D^3 R_d + D^2 D'(R_{C1} + R_d + 2R_{on}) + D'^2(R_{load} + R_{L2} + D(R_{C1} + 2R_d + R_{on})) + D^2(R_{L1} + DR_{on} + R_{SC})} \quad (4.18)$$

В результаті розрахунку отримали дві функції, які пов'язують вихідну напругу перетворювача із вхідними параметрами: струмом з суперконденсаторного блоку та вхідною напругою. Загалом, застосувавши закон Ома нескладно отримати залежності вихідного струму від вхідних параметрів, причому опір навантаження відомий.

Можемо побудувати отриману передавальну характеристику. Для цього необхідно прийняти орієнтовні паразитичні опори елементів. Для побудови оціночної передавальної характеристики приймемо наступні значення (Всі опори вказані в Омах).

$$R_{on} = 0.005, R_d = 0.001, R_{c1} = 0.005, R_{c2} = 0.001, R_{L1} = 0.0005, R_{L2} = 0.0005, \quad (4.19)$$

$$R_{uc} = 0.011, R = 4.8, V_{uc} = 16B.$$

Після підстановки прийнятих значень до передавальної характеристики отримаємо графік, зображений на рис. 4.9.

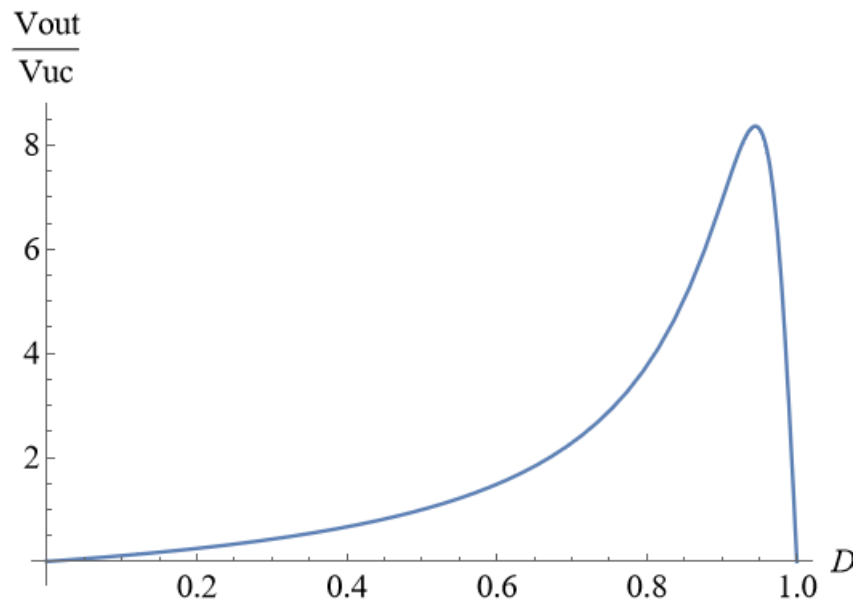


Рис. 4.9 Передавальна характеристика перетворювача

4.3 Перевірка працездатності перетворювача Чука

Для підтвердження можливості перетворювача Чука забезпечувати номінальний режим роботи у всьому робочому діапазоні напруг акумулятора було створено модель у середовищі Simulink. Проведемо декілька симуляцій змінюючи коефіцієнт перетворення. Це необхідно для перевірки роботи при усіх можливих станах батареї, від повністю зарядженої до розрядженої. З табл. 4.1 відомі межі використання основного та допоміжного джерел, тому створимо дві ситуації, коли допоміжне джерело на межі розрядження – $8V$, при цьому перетворювач має забезпечити увесь діапазон вихідних напруг - $45.5V - 51.1V$. Також, перевіримо здатність забезпечувати весь діапазон вихідних напруг у повністю зарядженому стані - $16V$. Перевірка у всьому діапазоні можлива за рахунок використання замкненого кола зворотного зв'язку. В якості навантаження використовуватимемо резистор номіналом 4.8Ω . На рис. 4.10 зображена сама схема перетворювача Чука із необхідними вимірювальними елементами. Вхідна та вихідна потужності (P_{in} , P_{out}) розраховуються на основі діючих значень струму та напруги, що можна бачити з рис. 4.10.

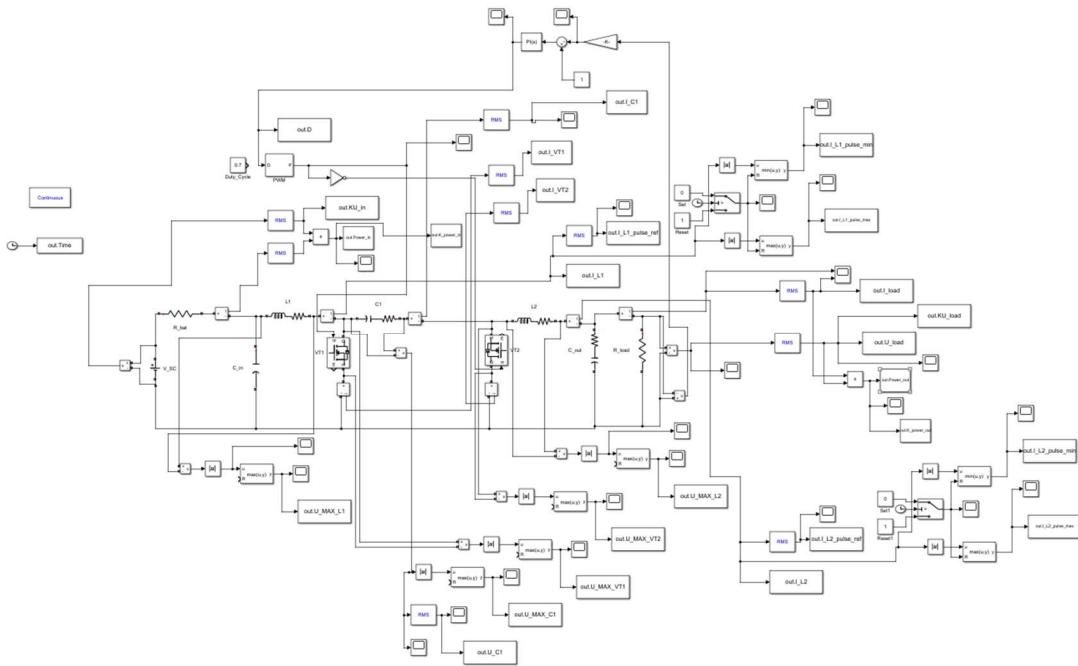


Рис. 4.10 Симуляційна модель перетворювача Чука

Для побудови моделі визначили номінали реактивних компонентів перетворювача Чука: $L_1 = 1.2 \text{ мГн}$, $L_2 = 8.2 \text{ мГн}$, $C_{in} = 4.7 \text{ нФ}$, $C_1 = 22 \text{ мкФ}$, $C_{out} = 470 \text{ мкФ}$. В якості номіналів паразитичних опорів використано значення, що вказані у (4.19).

Коефіцієнт корисної дії (ККД) перетворювача – це співвідношення вихідної потужності до вхідної, що відображається у відсотках:

$$\eta = (P_{out} / P_{in}) * 100\% \quad (4.20)$$

Для нівелювання коливань вихідної напруги \bar{U} , взято останні 500 значень потужностей і розраховано середнє арифметичне значення ККД:

$$\eta = (e (P_{out} / P_{in}) / 500) * 100\% \quad (4.21)$$

Вираз (4.21) можна спростити до наступного вигляду:

$$\eta = (e (P_{out} / P_{in}) / 5)\% \quad (4.22)$$

Зведемо отримані результати симуляції до таблиць 4.2 та 4.3 для різних вхідних напруг. Коефіцієнт перетворення розраховувався лише для кінцевого значення напруги, того його значення може дещо коливатися від істинного значення у межах вихідних коливань напруги. З табл. 4.2 видно, що стабільний режим досягається у всьому діапазоні, також помітно, що ККД зменшується зі зростом коефіцієнту перетворення.

Таблиця 4.2

Результати симуляції при $V_{uc} = 8V$

Вхідна напруга, В	Коефіцієнт заповнення	Вихідна напруга, В	Коефіцієнт перетворення	Коефіцієнт корисної дії, %
8	0.870	45.500	5.686	85.034
8	0.871	45.780	5.721	84.831
8	0.872	46.060	5.756	84.625
8	0.873	46.340	5.791	84.417
8	0.874	46.620	5.826	84.206
8	0.875	46.900	5.861	83.993
8	0.876	47.180	5.896	83.777
8	0.877	47.460	5.931	83.559
8	0.877	47.740	5.966	83.340
8	0.878	48.020	6.001	83.117
8	0.879	48.300	6.036	82.891
8	0.880	48.580	6.071	82.663
8	0.881	48.860	6.106	82.432
8	0.882	49.140	6.142	82.198
8	0.883	49.420	6.177	81.961
8	0.884	49.700	6.212	81.722
8	0.885	49.980	6.247	81.479
8	0.885	50.260	6.282	81.234
8	0.886	50.540	6.317	80.983

У табл. 4.3 відобразимо результати симуляції при вхідній напрузі 16 В .

Таблиця 4.3

Результати симуляції при $V_{uc} = 16V$

Вхідна напруга, В	Коефіцієнт заповнення	Вихідна напруга, В	Коефіцієнт перетворення	Коефіцієнт корисної дії, %
16	0.747	45.500	2.838	96.086
16	0.748	45.780	2.856	96.044
16	0.750	46.060	2.873	96.002
16	0.751	46.340	2.891	95.960
16	0.752	46.620	2.908	95.917
16	0.753	46.900	2.926	95.874
16	0.754	47.180	2.943	95.831
16	0.756	47.460	2.961	95.787
16	0.757	47.740	2.978	95.743
16	0.758	48.020	2.996	95.699
16	0.759	48.300	3.013	95.655
16	0.760	48.580	3.031	95.610
16	0.761	48.860	3.048	95.565
16	0.762	49.140	3.066	95.519
16	0.764	49.420	3.083	95.474
16	0.765	49.700	3.101	95.428
16	0.766	49.980	3.118	95.382
16	0.767	50.260	3.136	95.288
16	0.768	50.540	3.153	95.244

При повністю зарядженому допоміжному джерелі очікується, що режим роботи є стабільним і зі збільшеним ККД, відносно попередньої симуляції, що і підтверджується згідно табл. 4.3. Порівнюючи результати симуляцій з рис. 4.9, а саме розглядаючи коефіцієнт перетворення та коефіцієнт заповнення, можемо сказати, що перетворювач дійсно відповідає розрахованій передавальній характеристиці, що й дозволить йому працювати у всьому діапазоні вхідних та вихідних напруг стабільно, протягом усього часу використання.

Додатково проведемо симуляції щоб отримати залежність ККД від вхідної напруги. Для цього приймемо вихідну напругу як сталу величину, причому найбільш можливу - $51.1В$. Результати симуляції відображено у табл. 4.4.

Таблиця 4.4

Результати симуляції при $V_{out} = 51.1В$

Вхідна напруга, В	Коефіцієнт заповнення	Вихідна напруга, В	Коефіцієнт перетворення	Коефіцієнт корисної дії, %
6.900	0.912	51.100	7.406	71.093
8.000	0.888	51.100	6.387	80.475
9.000	0.870	51.100	5.676	85.089
10.000	0.853	51.100	5.108	88.091
11.000	0.837	51.100	4.642	90.192
12.000	0.823	51.100	4.254	91.735
13.000	0.809	51.100	3.926	92.908
14.000	0.795	51.100	3.645	93.823
15.000	0.782	51.100	3.402	94.557
16.000	0.770	51.100	3.189	95.145
20.000	0.725	51.100	2.550	96.749
30.000	0.633	51.100	1.699	98.306
40.000	0.563	51.100	1.275	98.863
50.000	0.507	51.100	1.020	99.148

З табл. 4.4 відобразимо залежність ККД перетворювача від вхідної напруги – рис. 4.11.

За рахунок проведених симуляцій підтвердили аналітичні розрахунки передавальної характеристики та можливість перетворювача Чука при визначених параметрах підтримувати стабільну роботу в парі із допоміжним джерелом енергії в усій області допустимих значень вхідної та вихідної напруг.

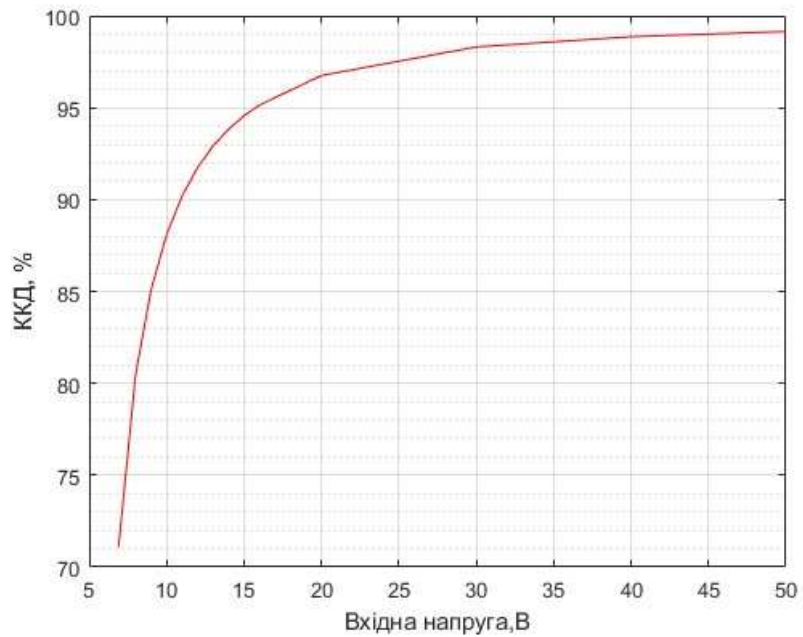


Рис. 4.11 Залежність ККД перетворювача від вхідної напруги

Окремого дослідження потребує визначення необхідних компонентів для фізичного пристрою, оскільки з рис. 4.10 видно, що встановлено додаткові блоки для вимірювання величин всередині самого перетворювача, втім вони не відображені у цій роботі. Певні компоненти мають досить відчутне перевантаження в ході роботи, зокрема під час перехідного процесу.

ВИСНОВКИ

Протягом роботи як вирішення проблеми застосування літій-іонних батарей та з метою подовження життєвого циклу акумулятора запропоновано рішення у вигляді гібридизації системи живлення на основі використання суперконденсаторів в якості допоміжного джерела. Математично обґрунтовано, що таке рішення розвантажує основне джерело, відбираючи у пікові моменти споживання надмірний струм, тим самим забезпечуючи більший діапазон робочих напруг порівняно з використанням лише стандартного джерела живлення.

Для забезпечення оптимальних параметрів ваги та розміру накопичувача було обрано найбільш задовільну топологію виконання – напівактивна система з керованим вторинним джерелом. Така топологія має єдиний перетворювач, що виступає в ролі синхронізуючого компонента між двома накопичувальними системами. В якості цього допоміжного перетворювача між суперконденсаторним блоком та силовою шиною запропоновано використовувати перетворювач Чука із замкненим колом зворотного зв'язку. Система керування є автоматизованою і виконана на мікроконтролері, що забезпечить універсальність вторинного джерела, що виражається у відносно швидкій зміні алгоритму керування в залежності від вимог.

Проведено дослідження на комп'ютерній моделі перетворювача, щоб підтвердити працездатність перетворювача за різних умов роботи. Визначили ККД перетворювача у різноманітних випадках, побудували його залежність від вхідної напруги. Як подальше дослідження, необхідно провести аналіз рівня навантаження на кожен внутрішній компонент перетворювача з метою підбору фізичних елементів для реалізації фізичної моделі, оскільки у роботі не досліджувався період перехідного періоду перетворювача – найбільш стресовий режим для внутрішніх компонентів.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Thanikati Sudhakar Babu, Krishnakumar R. Vasudevan, Vigna K. Ramachandaramurthy, Suleiman Bala Sani, Sansubari Chemud, Rosli Mat Lajim. A comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects. *IEEE Access*, volume 8, 11 August 2020, pp. 148702-148721.
2. Machedon-Pisu M, Borza PN. Are Personal Electric Vehicles Sustainable? A Hybrid E-Bike Case Study. *Sustainability*. 2020; 12(1):32. Режим доступу – <https://doi.org/10.3390/su12010032>
3. Qiao Zhang, Weiwen Deng, Sumin Zhang, Jian Wu. A Rule Based Energy Management System of Experimental Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles. Research Article, *Journal of Control Science and Engineering*, volume 2016, 17 pages. Режим доступу: <http://doi.org/10.1155/2016/6828269>
4. G. Gautham Prasad. Supercapacitor technology and its applications: a review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, 561 012105. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>
5. Thanikati Sudhakar Babu, Krishnakumar R. Vasudevan, Vigna K. Ramachandaramurthy, Suleiman Bala Sani, Sansubari Chemud, Rosli Mat Lajim. A comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects. *IEEE Access*, volume 8, 11 August 2020, pp. 148702-148721. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015919>
6. M. Forouzesh, Y. P. Siwakoti, S. A. Gorji, F. Blaabjerg and B. Lehman, "Step-Up DC–DC Converters: A Comprehensive Review of Voltage-Boosting Techniques, Topologies, and Applications," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9143-9178, Dec. 2017. Режим доступу – <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>

7. Alon Kuperman, Ilan Aharon. Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier, vol. 15(2), pp 981-992, February 2011. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>

8. So Kai man. An Improved battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System management Strategy for Electric Vehicles. A Thesis Submitted for the Degree of Doctor of Philosophy Department of Mechanical Engineering National University of Singapore. 2017.

9. Кліматичні дані по м. Київ за період з 1899 року [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/

10. Акумулятор для електровелосипеду 48V, 11,6Ah (Panasonic) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://electro-bike.com.ua/akkumulyatory/akkumulyator-dlya-elektrovelosipeda-48v-11-6ah-panasonik>

11. Переднє мотор колесо Вольта 48-60V 600W(1250W) [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=898

12. Grin Technologies. Trip Simulator [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bit.ly/3Q3uhhs>

13. Контролер Вольта 48V 800W [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=803

14. Molla S. Hossain Lipu, Mohammad Faisal, Shaheer Ansari, Mahammad A. Hannan, Tahia F. Karim, Afida Ayob, Aini Hussain, Md. Szal Miah, Mohamad Hanif Md. Saad. Review of Electric Vehicle Converter Configurations, Control Schemes and Optimizations: Challenges and Suggestions. *Electronics* 2021, 10(4), 477. Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.3390/electronics10040477>

15. Maxwell Technologies. 16 Volt Small Module [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/16v-small-modules/>

16. W. M. Polivka, P. R. K. Chetty, R. D. Middlebrook. State-Space Average Modelling of Converters with Parasitics and Storage-Time Modulation. 1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference, 16-20 June 1980.