

А. Ю. МАНЖЕЛІЙ, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, Україна, м. Київ, КПІ ім. Ігоря Сікорського

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ГІБРИДНИЙ НАКОПИЧУВАЧ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТИПУ «АКУМУЛЯТОРНА БАТАРЕЯ — СУПЕРКОНДЕНСАТОР» ДЛЯ МІКРОМОБІЛЬНОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

Обґрунтовано важливість гібридизації системи живлення мікромобільного електротранспорту з урахуванням жорстких обмежень щодо кінцевих розмірів та ваги накопичувача на прикладі електровелосипеда. Наведено огляд основних типів топологій для гібридизації та проаналізовано переваги й недоліки кожного з них. Описано можливості використання суперконденсаторів як вторинного джерела гібридної системи. Запропоновано шляхи подолання недоліків використання стандартних акумуляторів через їх поєднання із вторинним джерелом. Проведено розрахунки, які підтверджують доцільність використання гібридної системи для поліпшення експлуатаційних умов акумуляторної батареї. На прикладі електровелосипеда представлено алгоритм роботи системи накопичення для можливих режимів його роботи.

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

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 екологічні електрокари, що потроху витісняють стандартні машини, не мають гнучкості у русі, яка б дозволила уникати цих заторів. Тому вибір людей все частіше припадає на компактний персональний транспорт, зокрема електросамокати або електровелосипеди, екологічність та безшумність яких оцінила вже не одна тисяча містян.

Мікромобільний електротранспорт дедалі більше заповнює вулиці великих міст, поступово “очищаючи” транспортний потік від екологічно “шкідливих” автомобілів. Більшість міських адміністрацій європейських міст активно розвивають велосипедну інфраструктуру, що підштовхує обирати саме цей вид транспорту. Загалом же вибір типу пересування, звичайно, залежить від вимог користувача. Але сучасні методи електрифікації персонального транспорту на сьогодні не є ідеальними. До того ж доволі часто пересування відбувається пагорбами та схилами, що створює певні несприятливі умови для експлуатації батареї, які знижують загальну тривалість її життєвого циклу.

Метою цього дослідження є поліпшення умов експлуатації акумуляторної батареї шляхом гібридизації системи живлення та збільшення терміну її служби.

Постановка проблеми

Гібридизацію системи живлення мікромобільного електротранспорту будемо розглядати на прикладі електровелосипеда. При виборі електровелосипеда або власній електрифікації звичайного велосипеда важливу роль відіграють бажані технічні характеристики. Залежно від потреб користувача може надаватися перевага або більшій швидкості, або більшій тривалості поїздки на одному заряді акумулятора. Але усіх власників електровелосипедів об’єднує загальна вимога — здатність системи живлення забезпечувати стабільну роботу двигуна у різноманітних ситуаціях. До того ж має бути мінімізований вплив усіх навантажень на систему живлення, щоб максимізувати тривалість життєвого циклу батареї. Тому при виборі електровелосипедів значну увагу приділяють основному джерелу живлення.

У більшості сучасних акумуляторів використовують літій-іонні комірки, які мають найвищі характеристики за питомою енергією та потужністю серед інших стандартних джерел енергії (**рис. 1**). Але хімічна природа накопичення енергії у літій-іонних акумуляторах зумовлює часткову деградацію в ході експлуатації. Вони здатні витримувати близько 3000 циклів заряд-розряд [1], після чого комірка втрачає приблизно 20% від номінальної ємності, що робить її непридатною для експлуатації за попередніх умов.

Варто зазначити, що у випадку стандартної системи живлення електровелосипеда характеристика розряду акумулятора матиме вигляд, схожий на наведений **рис. 2**, що у загальному випадку негативно впливатиме на тривалість життя комірок. Живлення двигуна, який застосовується у велосипедах, має

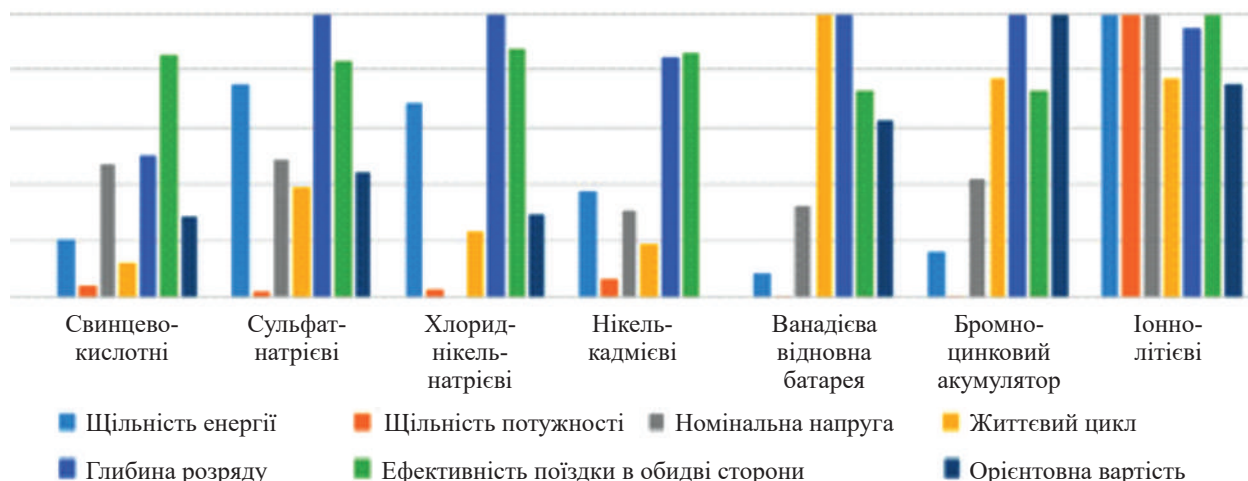


Рис. 1. Порівняння накопичувачів енергії за різними показниками [2]

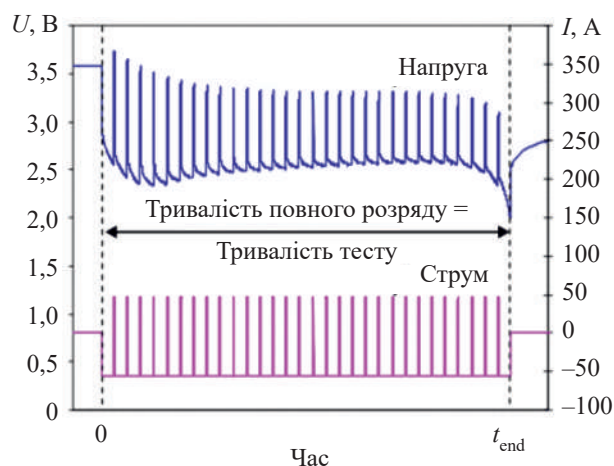


Рис. 2. Діаграми струму та напруги при розряданні літій-іонної комірки [4]

пульсуючий характер, як і зображено на рис. 2. Очевидно, що під час пульсацій живлення напруга на акумуляторі також буде пульсуючою, з певною величиною просадки. Причому при розряданні акумулятора в ході експлуатації виникає ситуація, коли функціонування не може відбуватися у допустимому діапазоні напруги через її просадку. В цьому випадку подачу енергії буде обмежувати плата контролю стану акумулятора (*battery management system, BMS*), яка автоматично відмикає акумулятор від силової шини, коли напруга стає нижчою за мінімальний поріг. У разі відсутності такої системи буде виникати внутрішній нагрів кожної комірки акумулятора, що призводить до незворотних хімічних реакцій, які зменшують загальну ємність комірки. Проведене у [3] дослідження показує, що при використанні літій-іонних батарей за звичайних умов (струм розряду 1С) загальна ємність зменшується приблизно на 30% за приблизно 300 циклів заряд-розряд. Таке падіння ємності демонструє, що навіть за номінальних умов експлуатації деградація комірки відбувається

відносно швидко через внутрішні хімічні реакції та збільшення внутрішнього опору комірки.

Гібридизація системи, тобто комбінування двох або більше систем накопичення енергії, дозволить зменшити просадку напруги 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 дозволить нівелювати недолік основного джерела у моменти перенавантаження. Загальні переваги імплементації гібридних накопичувачів енергії [5]:

- мінімізація початкових витрат на побудову загальної системи накопичення (через розподілення потужності та енергії вторинна система має покривати лише частину необхідної потужності);
- підвищення загальної ефективності системи;
- мінімізація динамічного навантаження на вторинну систему накопичення та оптимізація роботи установки зі збільшенням її загального терміну експлуатації.

Використання суперконденсаторів як вторинного джерела

Зважаючи на вимоги до розмірів та ваги системи накопичення енергії, серед можливих варіантів гібридизації розглядатимемо поєднання стандартного літій-іонного акумулятора із суперконденсатором. Утворена система, відповідно, матиме два джерела енергії, причому суперконденсаторний блок відіграватиме роль допоміжного джерела, відбираючи на себе частину навантаження у пікові моменти споживання.

Батареї, які застосовуються в системах живлення, зазвичай мають електрохімічну природу. Тому системи накопичення енергії на базі таких батарей матимуть більший внутрішній опір та інерційність процесів, що зменшує питому потужність системи.

Накопичення ж енергії у суперконденсаторі має електростатичну природу й характеризується високою питомою потужністю — від 300 до 5000 Вт/кг [6], але водночас його недоліком є мала питома енергія та високий рівень саморозряду.

Як було зазначено вище, поєднання акумулятора та суперконденсаторів може повністю задовольняти вимогам щодо видачі потужності протягом усього руху на велосипеді. Варто зауважити, що у разі перевищення номінального режиму роботи стандартних акумуляторів частина енергії розсіюється на внутрішньому опорі у вигляді тепла, тим самим знижуючи ККД. У роботі [7] наведено порівняльну таблицю з зазначеною ефективністю розряду звичайних батарей та суперконденсаторів. Ефективність стандартних батарей складає близько 70—85% при розряджанні номінальним струмом. Своєю чергою, суперконденсатори, на відміну від літій-іонних акумуляторів, при пікових навантаженнях здатні забезпечити ККД на рівні 95%, тобто лише 5% енергії розсіюється у вигляді тепла [6]. Крім того, недоліком батареї є тривалий час заряджання, в середньому понад годину, що зумовлено інерційністю хімічних процесів всередині комірки. Натомість повне заряджання суперконденсаторів може відбуватися за лічені хвилини.

Огляд топологій гібридації для використання у мікромобільному електротранспорті

Поєднання двох або більше накопичувачів забезпечує більшу гнучкість системи, кращу динамічну характеристику, ефективність та більшу тривалість експлуатації всієї системи. Акумулятор і суперконденсаторний блок можуть бути під'єднані до навантаження напряму або через силові перетворювачі. Пряме підключення має найпростішу архітектуру, відносно малу вартість та невелику гнучкість, що позначається на складності регулювання. Натомість застосування одного чи декількох перетворювачів забезпечує розподілення навантаження на обидва накопичувачі. Загалом топології з'єднання двох джерел енергії можна класифікувати як:

- пасивна;
- напівактивна, в якій застосовується один керований перетворювач;
- повністю активна, що має у своїй конструкції два керованих перетворювачі.

Вибір тієї чи іншої топології повністю залежить від вимог до системи та бажаного ступеню управління розподіленням споживаної енергії між накопичувачами [5].

Пасивна топологія — найпростіший шлях поєднання накопичувачів енергії з, відповідно, високою питомою енергією та потужністю. Навантаження під'єднується до системи живлення напряму, без проміжних силових перетворювачів, які здатні регулювати розподілення енергії. Пасивна

архітектура являє собою паралельне з'єднання обох накопичувачів. При використанні суперконденсатора він буде відігравати роль фільтра нижніх частот через свій низький внутрішній опір. 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 [8].

Напівактивна топологія є компромісом між вартістю та гнучкістю управління всією системою, оскільки вона потребує один перетворювач постійної напруги [9]. Це дозволяє раціональніше використовувати ресурс джерела, до якого під'єднується перетворювач, що дозволяє зменшити кінцеву вагу та розміри накопичувача порівняно з пасивною топологією. Залежно від розташування перетворювача у системі можна виділити три типи напівактивної топології:

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

Кероване джерело у назві топології відповідає місцю встановлення перетворювача. Паралельна топологія має перетворювач на виході системи накопичення, тому така топологія є наслідуванням 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 двигуни 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 теоретично можливим є використання напівактивної системи з керованим допоміжним джерелом, що узгоджує рівні напруги незалежно від номінальної напруги допоміжного джерела. Втім на практиці такий перетворювач не здатен повністю регулювати споживання енергії двигуном, а відповідно, і швидкість транспорту. Необхідно, щоб користувач регулював потужність двигуна, а кола зворотного зв'язку дозволять автоматизувати розподілення енергії між обома джерелами. Для розв'язання цієї проблеми розглянемо активні архітектури.

Усі варіації активних топологій наслідують напівактивні конфігурації з додаванням до системи ще одного перетворювача для створення повністю контрольованої системи (рис. 3). Загалом вони характеризуються найбільшою гнучкістю системи,

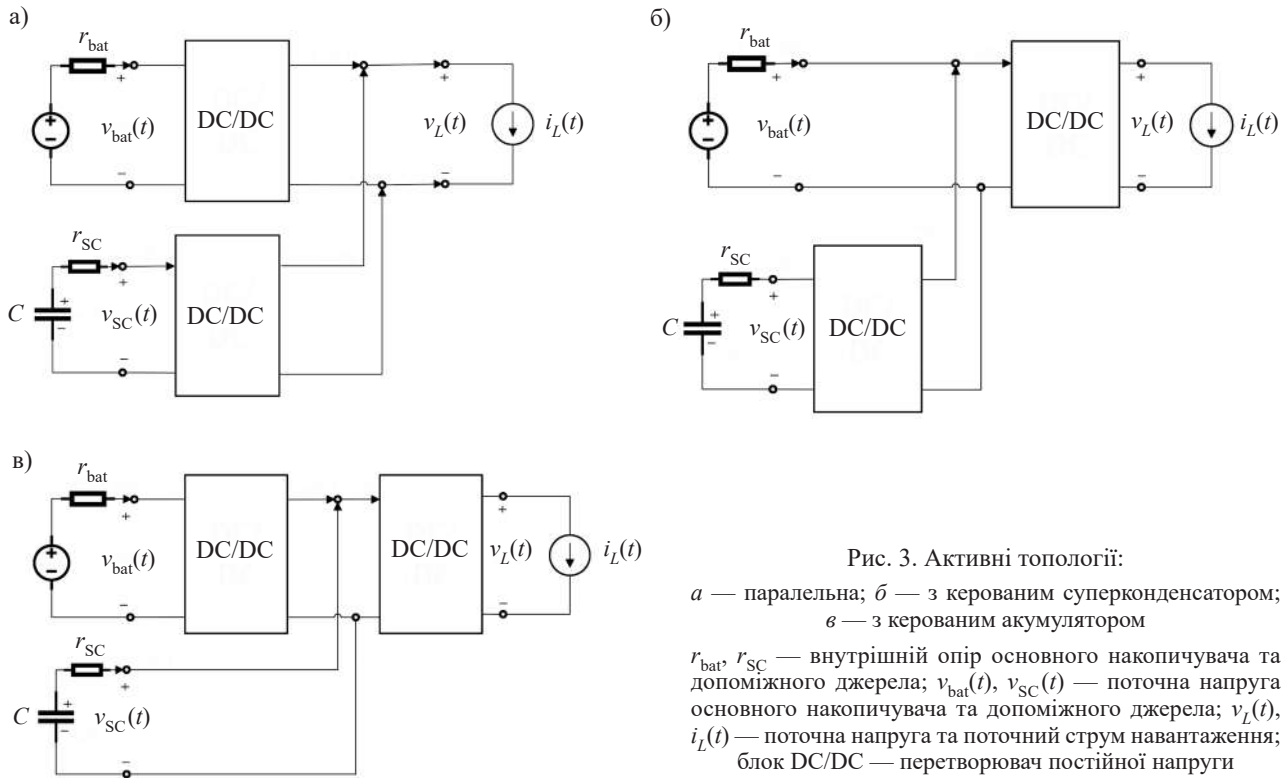


Рис. 3. Активні топології:
 а — паралельна; б — з керуванням суперконденсатором;
 в — з керуванням акумулятором
 r_{bat} , r_{sc} — внутрішній опір основного накопичувача та допоміжного джерела; $v_{bat}(t)$, $v_{sc}(t)$ — поточна напруга основного накопичувача та допоміжного джерела; $v_L(t)$, $i_L(t)$ — поточна напруга та поточний струм навантаження; блок DC/DC — перетворювач постійної напруги

відносно невеликими розмірами, а також найскладнішою архітектурою та високою вартістю, враховуючи ціну розробки. Додатковий перетворювач призначається для усунення недоліків управління у напівактивній системі. У конфігурації з керуванням основним або допоміжним джерелами є недолік подвійної трансформації енергії через встановлення двох перетворювачів послідовно. У конфігурації з керуванням основним джерелом суперконденсатор виконує роль проміжного фільтра пасивних частот, причому у цьому випадку він знову ж таки має узгоджувати рівень напруги з виходом першого перетворювача (рис. 3, в). Паралельна конфігурація має найбільший ККД серед активних топологій, але вона потребує, щоб обидва перетворювачі були керувані, автоматично або вручну. Зважаючи на те, що у нашому випадку один перетворювач має керуватися вручну, щоб регулювати споживання енергії двигуном, таку конфігурацію використовувати не можна. З інших доступних топологій доцільно використовувати активну систему з керуванням допоміжним джерелом (рис. 3, б), оскільки інша конфігурація потребує масивного вторинного джерела через необхідність узгодження рівнів напруги. У такій конфігурації допоміжне джерело зможе виконувати основну функцію — відбирати надмірне навантаження навіть у разі його відносно невеликих розмірів. Додаткові переваги такої конфігурації розглядалися у роботі [10].

Алгоритм управління гібридною системою

Оптимальна для електровелосипеда топологія гібридного накопичувача містить два перетворювачі: один має бути керуванням вручну, інший — автоматично за допомогою кіл зворотного зв'язку. Керований перетворювач містить інвертор, який трансформує постійну напругу у змінну й управляє режимами роботи двигуна. Завдяки акселератору (ручці газу) користувач може керувати швидкістю велосипеда за допомогою саме вихідного перетворювача. Автоматизований перетворювач, своєю чергою, повинен мати певний алгоритм роботи, який передбачає усі можливі варіанти споживання енергії.

На рис. 4 узагальнено представлені три варіанти розвитку подій під час руху. Вибір певного алгоритму повністю визначається струмом споживання I_{dem} , який може бути як додатним — прискорення або рух з постійною швидкістю, так і від'ємним — під час рекуперації енергії від двигуна, яку отримано від обертання педалей. Нульовий струм споживання під час руху можливий лише протягом переходу до режиму рекуперації та навпаки. Втім він цілком реальний під час зупинки.

Автоматизовану систему управління перетворювачем найкраще всього будувати на базі мікроконтролера, оскільки це надає системі універсальності та дозволяє досить швидко змінювати реакцію на зміну вхідних параметрів. Тому надалі при описанні конкретизованих алгоритмів будемо опиратися на використання саме мікропроцесорної системи.

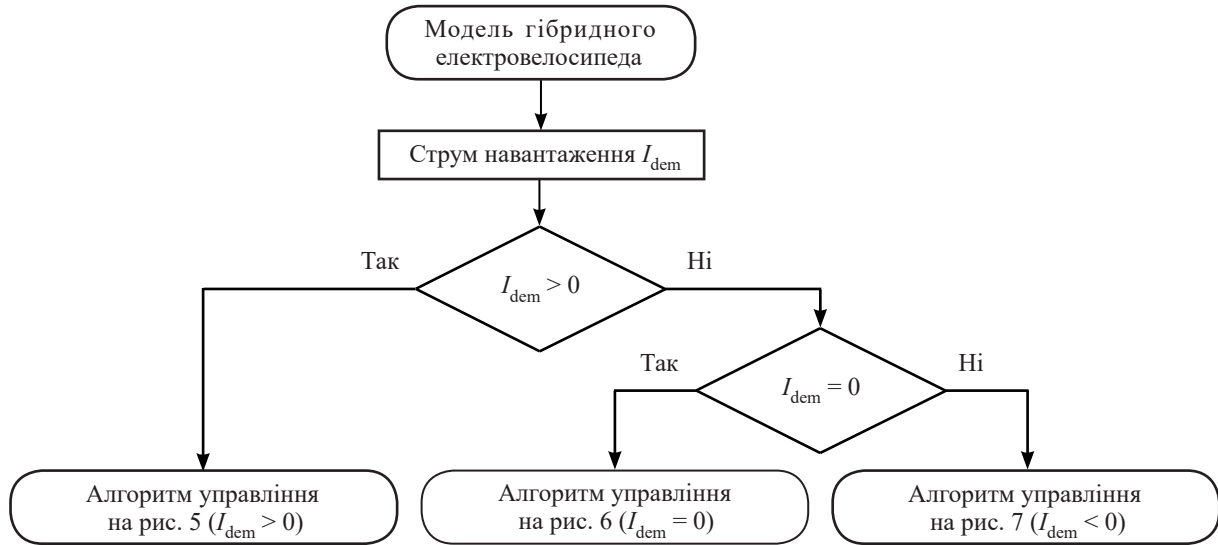


Рис. 4. Узагальнена схема вибору алгоритму розподілення споживаного струму

Вхідними параметрами для усіх випадків є мінімальне та максимальне значення напруги вторинного джерела — $V_{SC\ min}$, $V_{SC\ max}$, від яких залежить, чи дозволено взагалі вмикати допоміжне джерело. Також для основного джерела важливим параметром є максимально допустимий струм $I_{bat\ max}$, перевищення якого є недопустимим з точки зору збереження його ресурсу. Ще один параметр, який має особливе значення, — напруга відсічки батареї $V_{bat\ min}$. Він необхідний для розуміння загального стану системи накопичення, хоча й може бути виключений з алгоритму, зважаючи на систему захисту від глибокого розряду BMS.

Обидва ці параметри, $I_{bat\ max}$ та $V_{bat\ min}$, встановлюються програмно у мікропроцесорній системі.

З кола зворотного зв'язку отримують миттєві значення напруги на джерелах V_{bat} , V_{SC} та поточний вихідний струм основного накопичувача I_{bat} . Згідно з алгоритмом, якщо струм навантаження не перевищує максимально допустиме значення струму основного джерела енергії, виконується поновлення заряду вторинного джерела струмом, що визначається різницею максимального і поточного струмів.

На рис. 5 наведено алгоритм під'єднання вторинного джерела у випадку руху велосипеда або його роз-

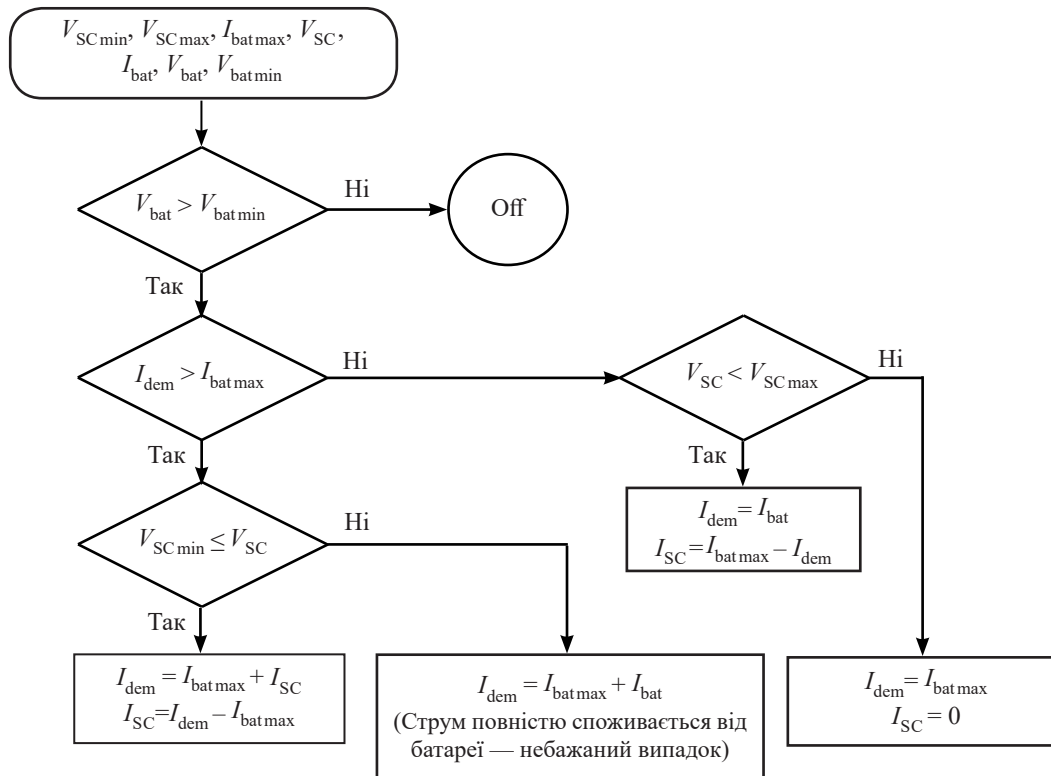


Рис. 5. Алгоритм під'єднання вторинного джерела при додатному струмі навантаження

гону при $I_{dem} > 0$. Алгоритм побудовано таким чином, щоб була змога підтримувати вторинне джерело у зарядженому стані під час стандартного руху, а у піки навантаження підключати це джерело до силової шини, щоб забезпечити необхідну різницю між максимальним струмом батареї та споживаним струмом.

Ще один алгоритм під'єднання вторинного джерела, наведений на **рис. 6**, можливий за нульового струму навантаження — під час зупинки. У такому випадку гібридна система, як і в попередньому, намага-

тиметься поновити стан максимальної зарядженості допоміжного джерела, використовуючи основний. Але тут немає додаткової умови віддавати частину енергії навантаженню, тому процес заряджання може протікати швидше, аніж під час руху.

Останній можливий випадок під час користування електровелосипедом — режим рекуперації, коли повернута енергія в першу чергу використовується для заряджання вторинного джерела, оскільки воно не має високої ємності (**рис. 7**).

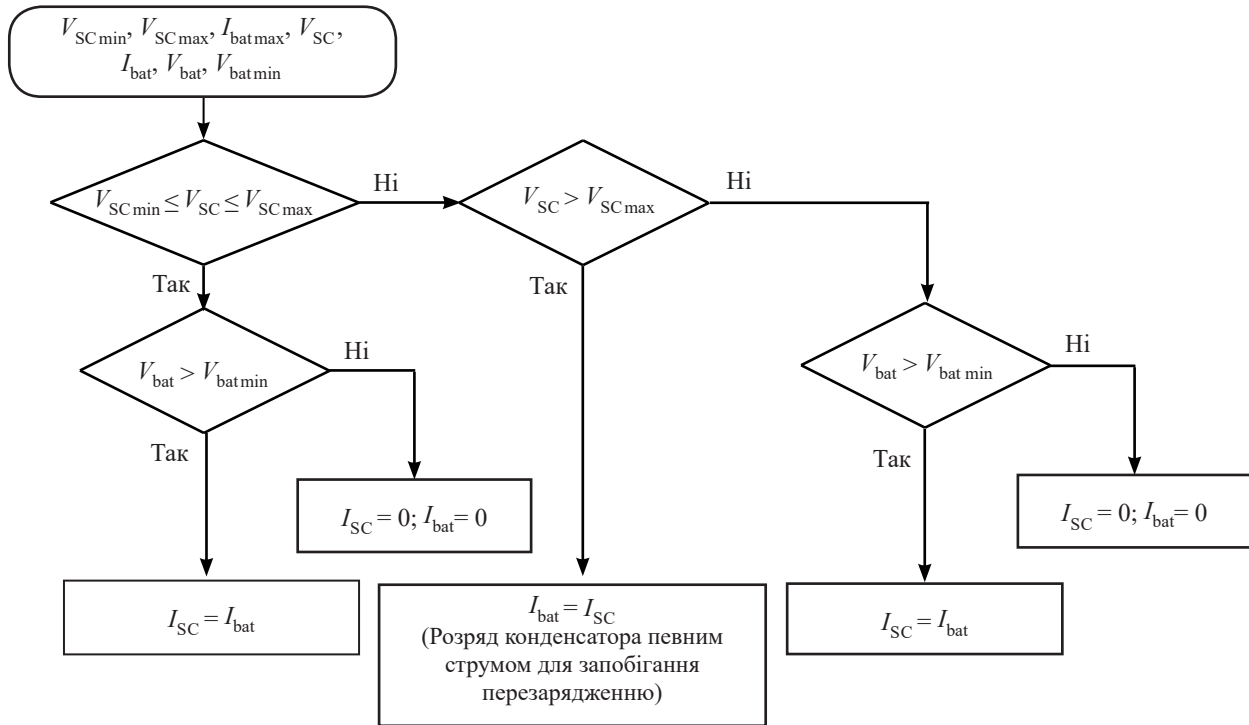


Рис. 6. Алгоритм під'єднання вторинного джерела за відсутності струму навантаження

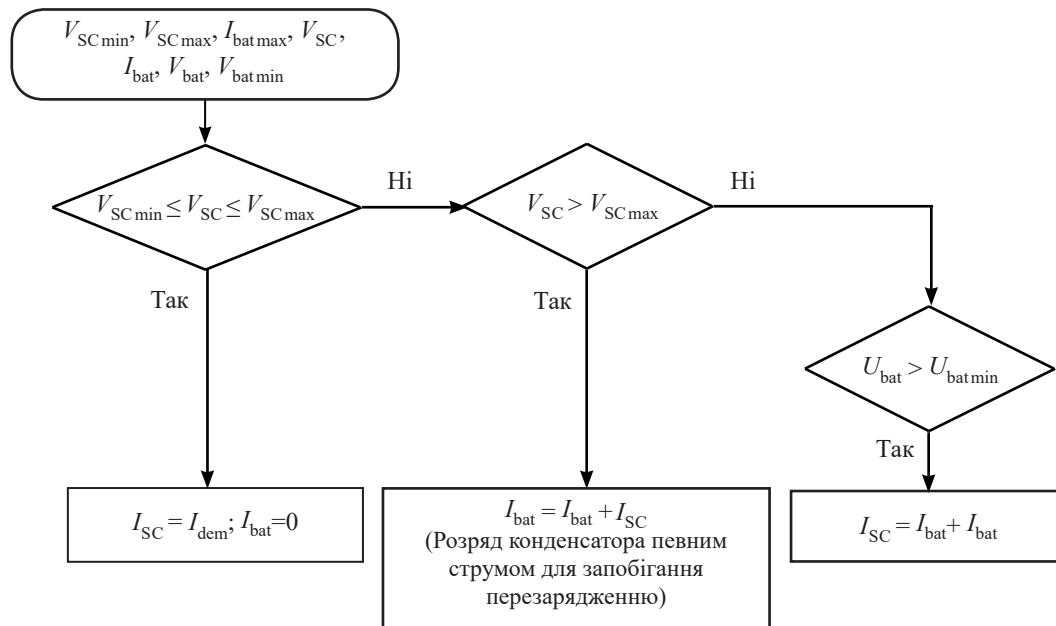


Рис. 7. Алгоритм під'єднання вторинного джерела при від'ємному струмі навантаження

Підвищення ресурсу батареї завдяки гібридизації

Для наочної демонстрації поліпшення використання ресурсу стандартного акумулятора проведемо розрахунок діапазону робочої напруги акумулятора при використанні гібридної та стандартної систем.

Прийемо, що нахил шляху пересування дорівнює 10%. Також для їзди на велосипеді важливо враховувати швидкість вітру, оскільки вітер впливає на споживану двигуном енергію. Візьмемо, наприклад, середнє значення для Києва: згідно з даними Українського гідрометеорологічного центру [11] воно становить 2,21 м/с. Щоб змодельовати пік споживання двигуном, вважатимемо, що вітер є зустрічним, велосипедист рухається вгору, не допомагаючи педалями, тобто потужність рекуперації — 0 Вт. Маса користувача — 75 кг, початкова швидкість велосипеда — 40 км/год.

Використовуючи онлайн-сервіс симуляції для дослідження параметрів електровелосипедів, побудуємо маршрут руху велосипедиста, що складається з підйому на пагорб з 10-відсотковим нахилом та спуском, зображений на **рис. 8**. Слід зауважити, що симуляція проводиться для випадку використання стандартного літій-іонного акумулятора. Під час підйому спостерігається спад швидкості велосипедиста, на цій ділянці виберемо точку найбільшого споживання енергії двигуном для подальших розрахунків і позначимо її на рис. 8.

Відповідно до описаного вище алгоритму роботи необхідно задати піковий струм, який забезпечується акумулятором. Проаналізувавши стандартні акумулятори, прийемо, що $I_{bat\ max} = 25\ A$ [12]. Згідно з документацією внутрішній опір обраного акумулятора становить $R_{esr} = 0,14\ \Omega$. За результатами симуляції (**рис. 9**) вихідна потужність батареї становить $P_{load} = 1555\ W$. При розрахунку важливо брати до уваги номінальну напругу, на яку розраховано двигун. Для цього виберемо двигун з прямим приводом компанії Volta Bikes: 48—60 В, 600 Вт [13]. Отже, можна прийняти, що номінальна напруга складає $V_{bat\ nom} = 48\ V$.

Задавшись необхідними величинами, розрахуємо діапазон робочої напруги акумулятора за відсутності гібридної системи. Спочатку необхідно визначити вихідний струм акумулятора:

$$I_{dem} = P_{load} / V_{bat\ nom} = 1555/48 \approx 32,40\ A. \quad (1)$$

Порівнявши пікове значення струму зі споживаним, можна 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 резисторі основного джерела дорівнюватиме

$$V_{esr} = I_{dem} R_{esr} = 32,4 \cdot 0,14 \approx 4,54\ V. \quad (2)$$

Повертаючись до обраного акумулятора, зазначимо, що для захисту від виснаження в ньому встановлено систему контролю батареї BMS. Для обраного акумулятора напруга відсічки становить $39 \pm 1\ V$. Втім, з метою збереження ресурсу батареї між двигуном та акумулятором встановлено контролер, який має власний захист. В обраного контролера напруга відсічки становить $42 \pm 0,5\ V$ [14]. Тому діапазон робочої напруги акумулятора за ідеальних умов становить 42—54,6 В, без урахування коливань напруги відсічки систем захисту.

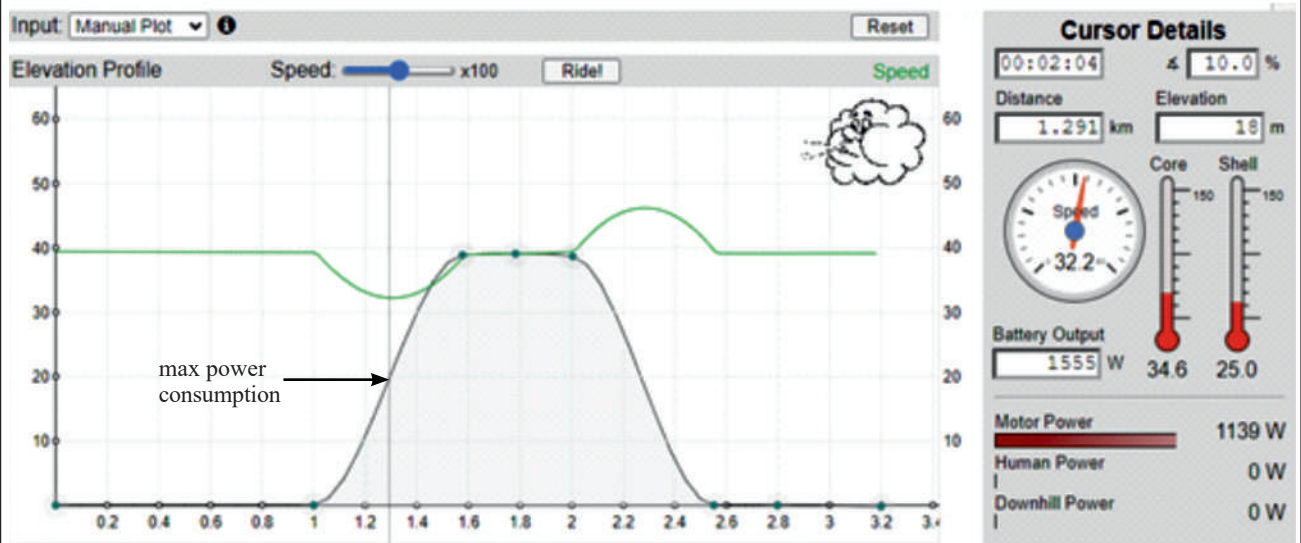


Рис. 8. Умовний маршрут велосипедиста

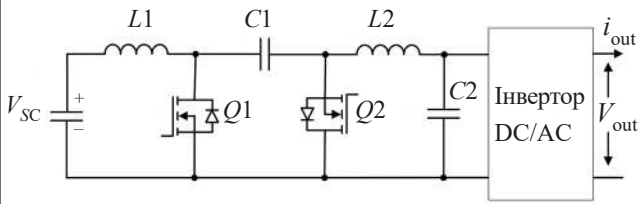


Рис. 9. Перетворювач Чука [15]

Розраховане падіння напруги на внутрішньому опорі впливає на нижнє порогове значення діапазону робочої напруги, оскільки при її проходженні акумулятор перестає постачати енергію. Тоді скорегований діапазон напруги для стандартного рішення буде таким:

$$(V_{\min} + V_{\text{bat esr}}) \dots V_{\max} = (42 + 4,54) \dots 54,6 = 46,54 \dots 54,6 \text{ В.} \quad (3)$$

З отриманих значень діапазону можна зробити висновок, що значна частина запасеної енергії акумулятора не використовується. При цьому сама батарея працює у піковому режимі, що значно шкодить тривалості її життя.

Розрахуємо тепер діапазон робочої напруги для гібридизованої системи.

При використанні гібридного накопичувача надмірний струм відбирається вторинним джерелом, у нашому випадку — суперконденсаторним блоком, тобто вихідний струм основного джерела дорівнює своєму піковому значенню, щоб не переходити у режим перенавантаження: $I_{\text{bat max}} = 25 \text{ А}$. За такого струму падіння опору на внутрішньому резисторі дорівнюватиме

$$V_{\text{bat esr}} = I_{\text{bat max}} R_{\text{csr}} = 25 \cdot 0,14 \approx 3,5 \text{ В.} \quad (4)$$

Додаючи отриману величину до ідеального діапазону отримаємо діапазон робочої напруги основного джерела для гібридного накопичувача:

$$(V_{\min} + V_{\text{bat esr}}) \dots V_{\max} = (42 + 3,5) \dots 54,6 = 45,5 \dots 54,6 \text{ В.} \quad (5)$$

Очевидно, що тут нижня межа робочої напруги наблизилася до ідеального стану, це свідчить про збільшення використання ресурсу основного джерела. Додатково зауважимо, що батарея не переходить між пікового струму, а значить, не перебуває у стані перенавантаження, що також позитивно впливає на стан акумулятора.

При розробленні вторинного джерела з системою керування на базі мікроконтролера можна обмежити порогове значення вихідного струму основного накопичувача для ввімкнення допоміжного джерела на рівні програмного забезпечення. З метою відбирання струмів більшого діапазону на допоміжне джерело, таке порогове значення можна встановити з деяким запасом. При цьому варто враховувати, що у такому

режимі вторинне джерело буде здатне забезпечувати різницю струму протягом меншого часу.

Необхідно зауважити, що оптимізувати використання ресурсу основного джерела можна, зважаючи на деяке компромісне рішення, яке поєднуватиме відповідність вимогам щодо задовільної ємності вторинного джерела, ваги кінцевого гібридного накопичувача та займаного ним об'єму.

Як було зазначено вище, одним з перетворювачів у активній топології є стандартне рішення [14], доступне на ринку, тому надалі його розглядати не будемо.

Аналітичний розрахунок передавальної характеристики допоміжного перетворювача

Допоміжним перетворювачем, який би забезпечував регулювання вихідної напруги у широкому діапазоні, причому як у режимі підвищення, так і пониження напруги, був обраний перетворювач Чука, який відповідає зазначеним вимогам (див. рис. 9). Для можливості рекуперації енергії його необхідно реалізувати у двонаправленому форматі.

Розглянемо практичний випадок, використовуючи наявні на ринку компоненти. Номінальні параметри обраних елементів наведені у таблиці. Схему заміщення перетворювача Чука з урахуванням усіх паразитних опорів елементів та джерела наведено на рис. 10.

Мінімальне та максимальне значення вхідної напруги вторинного джерела зумовлюються обраним суперконденсаторним блоком [16]. Прийmemo, що робочий діапазон складатиме 50% від ємності суперконденсаторів. Оскільки напруга лінійно пропорційна запасеній енергії, тому $V_{\min} = 0,5V_{\max}$. Вихідні параметри напруги мають відповідати діапазону напруги обраного основного джерела з врахуванням отриманої величини падіння напруги при максимальному навантаженні [12]. Вихідний струм перетворювача обмежимо максимальною величиною 10 А.

Передавальні параметри перетворювача Чука

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

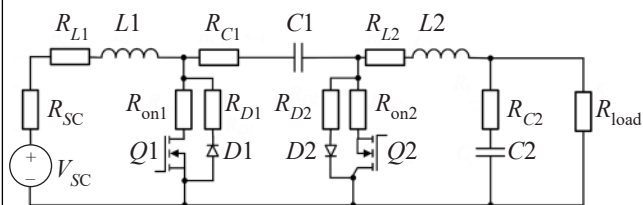


Рис. 10. Схема заміщення перетворювача Чука

Розрахунок будемо проводити для усталеного режиму, тому за навантаження можемо прийняти опір з таким значенням:

$$R_{\text{load}} = V_{\text{bat nom}} / I_{\text{SC out max}} = 48 / 10 = 4,8 \text{ Ом.} \quad (6)$$

Отримане значення навантаження може змінюватися залежно від ступеня заряду батареї та, відповідно, від струму споживання навантаження.

Передавальну характеристику перетворювача отримаємо, використовуючи метод усередненого стану [17]. Прийнемо деякі фундаментальні та передавальні змінні, відносно яких буде проводитися розрахунок. Для цього задамо матриці \mathbf{x} та \mathbf{y} , які будуть містити фундаментальні та передавальні змінні відповідно:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ v_{c1} \\ v_{c2} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} i \\ v \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де i_1, i_2 — струми крізь відповідні котушки, причому обидва у напрямку до конденсатора $C1$;

i — вхідний струм;

v_{c1}, v_{c2} — напруга на відповідних конденсаторах;

v — вихідна напруга перетворювача, інвертована відносно входу.

Тоді загальна система для розрахунку виглядатиме так:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}v_{\text{SC}}; \\ \mathbf{y} = \mathbf{c}\mathbf{x}, \end{cases} \quad (8)$$

де $\dot{\mathbf{x}}$ — зміна вищезазначених величин протягом періоду роботи перетворювача;

\mathbf{A} — матриця коефіцієнтів розміром 4×4 , що пов'язує усі фундаментальні величини протягом періоду роботи;

\mathbf{b} — матриця коефіцієнтів розміром 4×1 , що пов'язує вхідну напругу джерела v_{SC} з фундаментальними величинами;

\mathbf{c} — матриця коефіцієнтів розміром 2×4 , що пов'язує фундаментальні та передавальні величини.

Друге рівняння у системі (8) пов'язує значення струму та напруги компонентів перетворювача з передавальними. Кожна матриця коефіцієнтів складається з двох частин — вони відповідають станам, коли транзистор замкнений та коли він розімкнений, тому необхідно розглянути обидва ці стани.

Схеми заміщення для різних станів транзисторів перетворювача представлено на **рис. 11**, де опір каналу R_{on} відповідає увімкненому стану транзистора $Q1$, а опір R_{D2} — стану провідності зворотного діода $D2$.

Використовуючи закони Ома та Кірхгофа, отримаємо матриці для періоду часу γT_S , коли транзистор $Q1$ знаходиться у замкненому стані, де γ — коефіцієнт заповнення сигналу широтно-імпульсної модуляції; T_S — період перемикання (рис. 11, а). Для замкненого стану позначення матриць будемо супроводжувати індексом «1». У розімкненому стані ключа $Q1$ діод $D2$ перебуває у стані провідності, тому його опір необхідно врахувати при розрахунках. За такої схеми (рис. 11, б) отримаємо матриці коефіцієнтів з індексом «2» для періоду часу $\gamma' T_S$, де $\gamma' = 1 - \gamma$.

Отримавши аналітичні частини матриць для обох станів транзистора, тобто для повного періоду перетворювача, можемо перейти до утворення єдиних матриць, які описують повний період перемикання транзистора. Розрахувати їх можна, просумувавши частини відповідних проміжків:

$$\begin{cases} \mathbf{A} = \gamma \mathbf{A}_1 + \gamma' \mathbf{A}_2; \\ \mathbf{b} = \gamma \mathbf{b}_1 + \gamma' \mathbf{b}_2; \\ \mathbf{c} = \gamma \mathbf{c}_1 + \gamma' \mathbf{c}_2, \end{cases} \quad (9)$$

де

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{21} & A_{31} & A_{41} \\ A_{12} & A_{22} & A_{32} & A_{42} \\ A_{13} & A_{23} & A_{33} & A_{43} \\ A_{14} & A_{24} & A_{34} & A_{44} \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$$\mathbf{b} = \begin{bmatrix} 1/L_1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (11)$$

$$\mathbf{c} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{\text{load}} \parallel R_{C2} & 0 & \frac{R_{\text{load}}}{R_{C2} + R_{\text{load}}} \end{bmatrix}; \quad (12)$$

$$A_{11} = -\frac{R_{\text{SC}} + R_{L1} + \gamma R_{\text{on}} + \gamma'(R_{C1} + R_D)}{L1};$$

$$A_{12} = -\frac{\gamma R_{\text{on}} + \gamma' R_D}{L2};$$

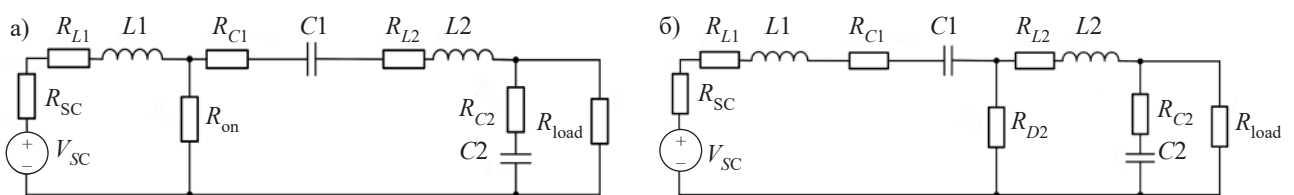


Рис. 11. Схема заміщення перетворювача Чука для замкненого (а) та розімкненого (б) станів транзистора

$$A_{13} = \gamma' / C_1;$$

$$A_{14} = 0;$$

$$A_{21} = -\frac{\gamma R_{on} + \gamma' R_D}{L_1};$$

$$A_{22} = -\frac{R_{L2} + \gamma(R_{C2} + R_{on}) + \gamma' R_D + R_{load} \parallel R_{C2}}{L_2};$$

$$A_{23} = 0;$$

$$A_{24} = \frac{R_{load}}{C_2(R_{load} + R_{C2})};$$

$$A_{31} = -\gamma' / L_1;$$

$$A_{32} = \gamma / L_2;$$

$$A_{33} = 0; A_{34} = 0;$$

$$A_{41} = 0;$$

$$A_{42} = -\frac{R_{load}}{L_2(R_{load} + R_{C2})};$$

$$A_{43} = 0;$$

$$A_{44} = -\frac{1}{C_2(R_{load} + R_{C2})};$$

Зауважимо, що у наведених формулах R_D — це опір діода R_{D2} .

Для визначення передавальної характеристики проведемо аналіз при постійному струмі й, відповідно, виконаємо заміну позначення змінних величин: x на \mathbf{X} , y на \mathbf{Y} , v на \mathbf{V} . При цьому зазначимо, що зміна фундаментальних величин в усталеному режимі дорівнює нулю, і тоді система (8) набуває нового вигляду:

$$\begin{cases} 0 = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{b}V_{SC}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{c}\mathbf{X}. \end{cases} \quad (13)$$

Рішенням цієї системи буде рівняння

$$\mathbf{X} = -\mathbf{A}^{-1}\mathbf{b}V_{SC}, \quad (14)$$

де \mathbf{A}^{-1} — матриця, обернена до матриці коефіцієнтів.

Розв'язувалося це рівняння у програмному середовищі Wolfram Mathematica, яке може працювати із символьними величинами.

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \gamma^2 V_{SC} / F \\ \gamma \gamma' V_{SC} / F \\ (\gamma'^2 R_D + \gamma^2 R_{on} + \gamma'(R_{load} + R_{L2} + \gamma R^*)) \cdot V_{SC} / F \\ \gamma \gamma' V_{SC} / F \end{pmatrix}, \quad (15)$$

$$\text{де } F = \gamma^3 R_D + \gamma^2 \gamma' R^* + \gamma^2 (R_{load} + R_{L2} + \gamma R^*) + \gamma^2 (R_{L1} + \gamma R_{on} + R_{SC});$$

$$R^* = R_{C1} + R_D + R_{on}.$$

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

$$\mathbf{Y} = \mathbf{c}\mathbf{X}; \quad (16)$$

$$I = \gamma^2 V_{SC} / F; \quad (17)$$

$$V = \gamma \gamma' R_{load} V_{SC} / F. \quad (18)$$

В результаті розрахунку одержали 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 з урахуванням того, що опір навантаження відомий.

Побудуємо одержану передавальну характеристику. Для цього необхідно прийняти орієнтовні паразитні опори елементів. Для побудови оцінювальної передавальної характеристики прийнемо такі значення (в Ом):

$$\begin{aligned} R_{on} &= 0,005; R_D = 0,001; R_{C1} = 0,005; \\ R_{I2} &= 0,001; R_{L1} = 0,0005; R_{L2} = 0,0005; \\ R &= 4,8; R_{SC} = 0,011; V_{SC} = 16 \text{ В}. \end{aligned} \quad (19)$$

Після того як підставимо прийняті значення до виразу передавальної характеристики, зможемо побудувати графік, зображений на рис. 12.

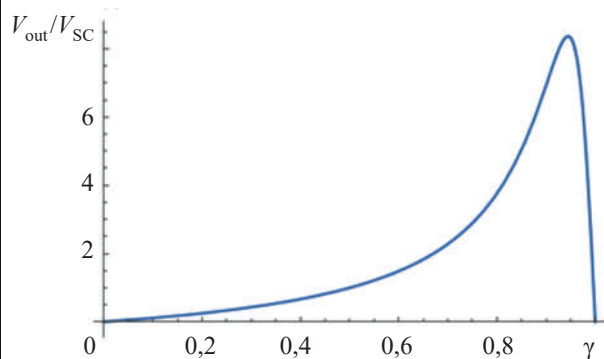


Рис. 12. Передавальна характеристика перетворювача Чука

Імітаційне моделювання перетворювача Чука

Для підтвердження правильності розрахунку передавальної характеристики була створена модель перетворювача Чука у пакеті MatLab. Система перевірялася без кола зворотного зв'язку для коефіцієнта перетворення $k = 3$; номінальна напруга суперконденсаторного блоку — 16 В; навантаження — резистор номіналом 4,8 Ом, що відповідає навантаженню у розрахунках.

Очікувані результати:

$$V_{SC} = 48 \text{ В}; I_{out} = 10 \text{ А}; \Delta V_{out} = 1\%.$$

Для побудови моделі прийняли такі номінали реактивних компонентів перетворювача Чука: $L1 = 12 \text{ мкГн}$, $L2 = 8,2 \text{ мкГн}$, $C1 = 22 \text{ мкФ}$, $C2 = 47 \text{ мкФ}$.

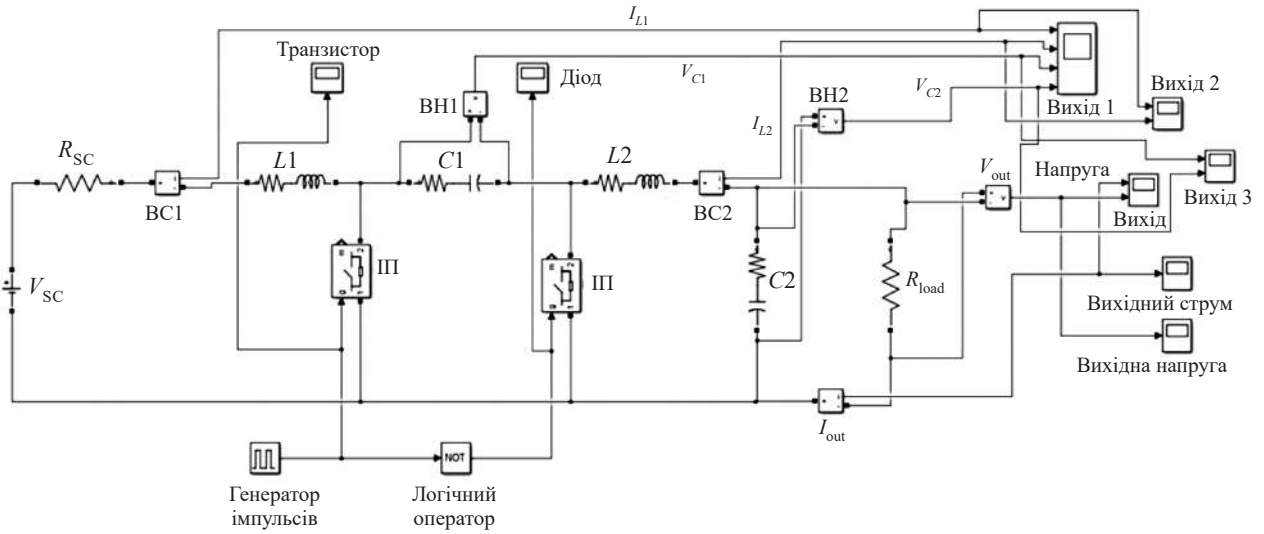


Рис. 13. Схема перетворювача Чука для імітаційного моделювання:
ВН — вимірювачі напруги; ВС — вимірювачі струму; ІП — ідеальний перемикач

Номіналами паразитичних опорів слугували прийняті вище значення (див. (19)). З рис. 12 бачимо, що для коефіцієнта перетворення $V_{out}/V_{SC} = 3$ коефіцієнт заповнення дорівнює 0,76.

Комп'ютерна симуляція виконувалась з синхронним перемиканням ключів. Схема для імітаційного моделювання зображена на рис. 13. Отримані в результаті моделювання діаграми вихідної напруги та струму зображені на рис. 14, де видно проміжок умовного перехідного процесу перетворювача та вихід на усталений режим, причому в усталеному режимі вихідний струм чітко дорівнює очікуваному — 10 А. Вихідна напруга також відповідає очікуваній — приблизно 48 В. Варто зауважити, що амплітуди напру-

ги та струму під час перехідного процесу є досить значними, що свідчить про мале значення фазового допуску.

З вихідних діаграм збільшеного масштабу, представлених на рис. 15, видно, що пульсації струму та напруги близькі до 1%, що відповідає очікуванням.

Імітаційне моделювання дозволило оцінити характер перехідних процесів розімкненої системи та правильність розрахунку передавальної характеристики. З результатів моделювання видно, що введення кола зворотного зв'язку може призводити до нестабільної роботи перетворювача, тому це питання потребує окремого дослідження.

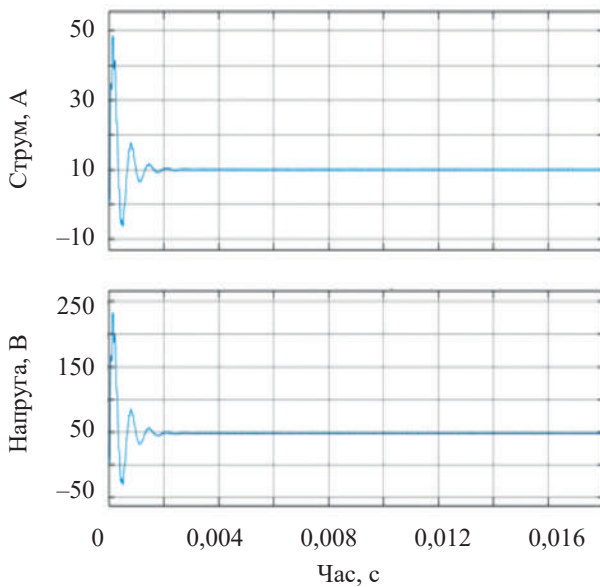


Рис. 14. Вихідні діаграми струму та напруги

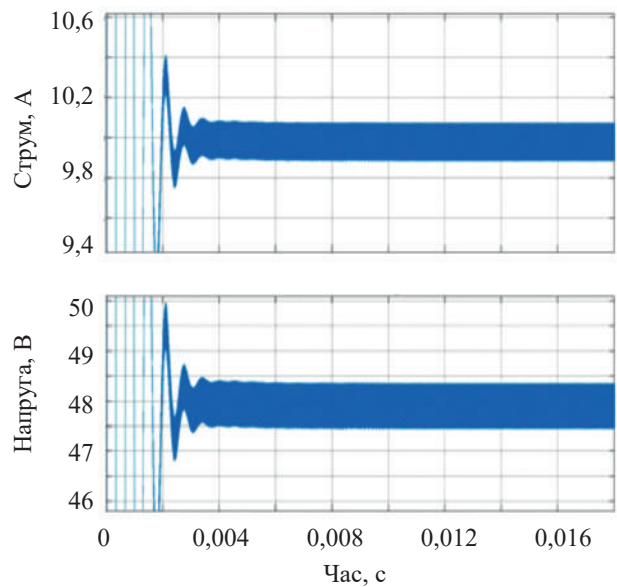


Рис. 15. Масштабовані вихідні діаграми струму та напруги

Висновки

Таким чином, дослідження показали, що гібридизація системи живлення електровелосипеда з використанням суперконденсаторів як вторинного джерела дозволяє розв'язати проблему великих пікових навантажень, яка існує при живленні мікромобільного електротранспорту стандартними літій-іонними акумуляторами. Таке рішення розвантажує основне джерело, відбираючи у пікові моменти споживання надмірний струм, забезпечуючи тим самим більший діапазон робочої напруги порівняно з використанням лише стандартного джерела живлення.

Обрана топологія виконання — активна система з керованим вторинним джерелом — забезпечує оптимальні масогабаритні характеристики накопичувача. Система керування є автоматизованою, вона виконана на основі мікроконтролера, що забезпечує універсальність вторинного джерела, завдяки можливості відносно швидкої зміни алгоритму управління залежно від вимог.

Надалі планується створити прототип гібридної системи з системою управління, побудованою на запропонованому у цій роботі алгоритмі. Це дозволить порівняти на практиці функціонування літій-іонних акумуляторів у стандартних рішеннях і в системах, де використовується гібридний накопичувач. Крім того, прототип системи дозволить визначити кількісні показники ефективності та підтвердити доцільність практичного використання гібридних накопичувачів в мікромобільному електротранспорті.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. da Silva Lima L., Quartier M., Buchmayr A. et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 46, 101286. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>
2. Hussain S., Ali M.U., Nengroo S.H. et al. Semiactive hybrid energy management system: A solution for electric wheelchairs. *Electronics*, 2019, vol. 8, iss. 3. <https://doi.org/10.3390/electronics8030345>
3. Li J., Murphy E., Winnick J., Kohl P. A. Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge-discharge cycling. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 102, iss. 1–2, pp. 294–301. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00821-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00821-7)
4. Savoye F., Venet P., Millet M., Groot J. Impact of periodic current pulses on li-ion battery performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 9, pp. 3481–3488. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2172172>
5. Babu T. S., Vasudevan K. R., Ramachandramurthy V. K. et al. A comprehensive review of hybrid energy storage systems:

Converter topologies, control strategies and future prospects. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 148702–148721, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015919>

6. Zhang Q., Deng W., Zhang S., Wu J. A rule based energy management system of experimental battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, vol. 2016, article ID 6828269. <https://doi.org/10.1155/2016/6828269>

7. Prasad G. G., Shetty N., Thakur S. et al. Supercapacitor technology and its applications: A review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 561, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>

8. Forouzes M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A. et al. Step-Up DC–DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>

9. Kuperman A., Aharon I. Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, iss. 2, pp. 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>

10. So K. M., Wong Y. S., Hong G. S., Lu W. F. An improved energy management strategy for a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA, 2016, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520186>.

11. Середні місячні температури повітря по м. Києву за багаторічний період. [Електронний ресурс] : *Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського*. Режим доступу: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyevu>

12. Акумулятор для електровелосипеда 48V, 11, 6Ah (Panasonic) [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://electro-bike.com.ua/akkumulyator/akkumulyator-dlya-elektrovelosipeda-48v-11-6ah-panasonik> Battery for e-bike 48V, 11, 6Ah (Rus)

13. 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 Front wheel motor Volta 48-60V 600W (1250W) (Rus)

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

15. Lipu M.S.H., Faisal M., Ansari S. et al. Review of electric vehicle converter configurations, control schemes and optimizations: Challenges and suggestions. *Electronics*, 2021, vol. 10, iss. 4, 477. <https://doi.org/10.3390/electronics10040477>

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

17. Polivka W. M., Chetty P. R. K., Middlebrook R. D. State-space average modelling of converters with parasitics and storage-time modulation. *1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, GA, USA, 1980, pp. 119–143, <https://doi.org/10.1109/PESC.1980.7089440>

Дата надходження рукопису
до редакції 3.04 2023 р.

Опис статті для цитування:

Манжелій А. Ю., Бондаренко О. Ф. Гібридний накопичувач електроенергії типу «акумуляторна батарея — суперконденсатор» для мікромобільного електротранспорту. *Технологія та конструювання в електронній апаратурі*, 2023, № 1–2, с. 14–26. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.1-2.14>

Cite the article as:

Manzhelii A. Yu., Bondarenko O. F. Hybrid battery-supercapacitor energy storage system for micromobile electric vehicles. *Technology and design in electronic equipment*, 2023, no. 1–2, pp. 14–26. <http://dx.doi.org/10.15222/ТКЕА2023.1-2.14>

HYBRID BATTERY-SUPERCAPACITOR ENERGY STORAGE SYSTEM
FOR MICROMOBILE ELECTRIC VEHICLES

The study proves the importance of hybridising the power supply system of micromobile electric vehicles, taking into account the strict limitations on the final size and weight of the storage device, using the example of an electric bicycle. The authors offer a brief overview of the main hybridization topologies and analyze the advantages and disadvantages of each of them. The paper describes the possibilities of using supercapacitors as an additional source of energy for a hybrid system and proposes a way to deal with the disadvantages of using standard batteries by combining them with an additional energy source. A mathematical basis is given to such a solution being able to unload the main power source by drawing excessive current at peak consumption times, thereby providing a wider range of operating voltages compared to using only a standard power source. To ensure optimal weight and size parameters of the drive, an active system with a controlled auxiliary power source is chosen. In this topology, the second converter is installed between the additional energy source, the supercapacitor storage device, and the battery. It is proposed to implement the schematic of this converter using a Chock converter with an automated control system containing a feedback loop and based on a microcontroller, which ensures a relatively quick change of the control algorithm depending on the configuration and requirements for the system. The paper also presents the algorithm of the storage system operation for possible modes of electric bicycle operation. The transfer characteristic is calculated using the averaged state method. To confirm the operability of the auxiliary power source, a converter circuit is developed and simulation modelling is carried out in MATLAB Simulink. The system simulation allowed assessing the nature of the transient processes of the open-loop system and the accuracy of the transfer characteristic calculation.

Keywords: hybrid system, supercapacitor, battery, hybridization, topologies, micromobile electric vehicles, electric bicycle.

REFERENCES

1. da Silva Lima L., Quartier M., Buchmayr A. et al. Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 2021, vol. 46, 101286. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101286>
2. Hussain S., Ali M.U., Nengroo S.H. et al. Semiactive hybrid energy management system: A solution for electric wheelchairs. *Electronics*, 2019, vol. 8, iss. 3. <https://doi.org/10.3390/electronics8030345>
3. Li J., Murphy E., Winnick J., Kohl P. A. Studies on the cycle life of commercial lithium ion batteries during rapid charge-discharge cycling. *Journal of Power Sources*, 2001, vol. 102, iss. 1–2, pp. 294–301. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(01\)00821-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(01)00821-7)
4. Savoye F., Venet P., Millet M., Groot J. Impact of periodic current pulses on li-ion battery performance. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2012, vol. 59, no. 9, pp. 3481–3488. <https://doi.org/10.1109/TIE.2011.2172172>
5. Babu T. S., Vasudevan K. R., Ramachandaramurthy V. K. et al. A comprehensive review of hybrid energy storage systems: Converter topologies, control strategies and future prospects. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 148702–148721, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3015919>
6. Zhang Q., Deng W., Zhang S., Wu J. A rule based energy management system of experimental battery/supercapacitor hybrid energy storage system for electric vehicles. *Journal of Control Science and Engineering*, 2016, vol. 2016, article ID 6828269. <https://doi.org/10.1155/2016/6828269>
7. Prasad G. G., Shetty N., Thakur S. et al. Supercapacitor technology and its applications: A review. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 2019, vol. 561, 012105. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/561/1/012105>
8. Forouzes M., Siwakoti Y. P., Gorji S. A. et al. Step-Up DC–DC converters: A comprehensive review of voltage-boosting techniques, topologies, and applications. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, vol. 32, no. 12, pp. 9143–9178. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2652318>
9. Kuperman A., Aharon I. Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, iss. 2, pp. 981–992. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010>
10. So K. M., Wong Y. S., Hong G. S., Lu W. F. An improved energy management strategy for a battery/ultracapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, Dearborn, MI, USA, 2016, pp. 1–6, <https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520186>.
11. Average monthly air temperatures in Kyiv over a multi-year period. [Electronic resource]: *Boris Sreznevsky Central Geophysical Observatory*. Access mode: <http://cgo-sreznevskiy.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-dani-po-kyievu>
12. *Batteries for e-bikes 48V, 11, 6Ah (Panasonic)* [Electronic resource]. Access mode: <https://electro-bike.com.ua/akkumulyatory/akkumulyator-dlya-elektrovelosipeda-48v-11-6ah-panasonik> Battery for e-bike 48V, 11, 6Ah (Rus)
13. *Front motor wheel Volta 48-60V 600W(1250W)* [Electronic resource]. Access mode: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=898 Front wheel motor Volta 48-60V 600W (1250W) (Rus)
14. *Volta controller 48V 800W* [Electronic resource]. Access mode: https://e-bike.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=803 Volta controller 48V 800W (Rus)
15. Lipu M.S.H., Faisal M., Ansari S. et al. Review of electric vehicle converter configurations, control schemes and optimizations: Challenges and suggestions. *Electronics*, 2021, vol. 10, iss. 4, 477. <https://doi.org/10.3390/electronics10040477>
16. *Maxwell Technologies. 16 Volt Small Module*. [Електронний ресурс]. Access mode: <https://maxwell.com/products/ultracapacitors/16v-small-modules/>
17. Polivka W. M., Chetty P. R. K., Middlebrook R. D. State-space average modelling of converters with parasitics and storage-time modulation. *1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Atlanta, GA, USA, 1980, pp. 119–143, <https://doi.org/10.1109/PESC.1980.7089440>