

УДК 621.314

DOI: 10.15587/1729-4061.2020.198950

Розробка потужного низьковольтного перетворювача постійної напруги для систем акумулювання електроенергії

А. М. Панченко, Д. В. Карлов, Ю. О. Кусакін, М. В. Куравський, О. Ю. Дроль

Представлене розв'язання проблеми, пов'язаної з використанням акумуляторів на автономних сонячних та вітрових електростанціях, установках гарантованого живлення, електромобілях. Відомо, що один елемент акумулятора може видавати 1,2–4 В, отже виникає необхідність комплектувати батарею, в послідовно паралельному з'єднанні, від декількох елементів до декількох тисяч елементів. У процесі експлуатації з'являються незначні відхилення напруг елементів, які в процесі експлуатації накопичуються і призводять до виходу з ладу батареї. Для запобігання таких явищ необхідне діагностування з точністю до 0,1–0,001 В на елемент. Це ускладнює систему контролю та призводить до вибракування усієї батареї, при виході із ладу певної кількості елементів. Збільшується навантаження на навколишнє середовище, пов'язане з утилізацією свинцю, кадмію, літію. Встановлено, що не існує ефективних перетворювачів постійної напруги в постійну, на зазначених рівнях напруги і потужності. Перетворювачі напруг з рівня 3 В використовують проміжну ланку перетворення енергії магнітного поля. Низьковольтні перетворювачі цього типу використовуються тільки на малих потужностях.

Доведено, що значну кількість послідовно паралельно ввімкнутих елементів акумулятора можна замінити одним еквівалентним по енергії. Проведеним дослідженням встановлено, що подальше підвищення напруги доцільно виконувати іоністорами шляхом їх заряджання в паралельному режимі з послідовним розрядом у послідовному.

Розроблений математичний опис роботи перетворювача, починаючи з моменту вмикання, виходу на усталений режим і з подальшим реагуванням на зміну навантаження. Оскільки робота перетворювача передбачає великі струми, враховуються складові внутрішніх опорів усіх елементів. Такий підхід дозволяє дослідити можливі технічні реалізації, виявити закономірності при варіації його параметрів та оптимізувати умови залежно від типу хімічних елементів і потужності споживача

Ключові слова: акумулятор, іоністор, паралельний заряд, послідовний розряд, енергія електричного поля, баланс заряду.

1. Вступ

Існуючі хімічні джерела енергії, як правило, мають напругу на один елемент у межах від 1,2 В – це лужні, до 4 В – це літієві. Для сфери споживання необхідні напруги і потужності значно більші. Традиційний шлях – комбінація з'єднання від декількох елементів до декількох тисяч в установках гарантованого живлення, електромобілях. Це призводить до відомих ускладнень в їхньо-

му виробництві та експлуатації. Перетворювачів постійної напруги в постійну на зазначених рівнях напруги та потужності на рівні до 200 кВт не існує. Це власне й змушує комбінувати таку кількість елементів. Наступна проблема полягає в системі контролю та управління такою кількістю акумуляторів. Враховуючи властивості літійових акумуляторів щодо їхньої пожежної небезпеки, точність вимірювання напруги кожного елемента повинна складати до 0.01 В. Отже, актуальним слід вважати дослідження, яке спрямоване на заміну великої кількості малопотужних хімічних елементів одним, еквівалентним по енергії, з напругою до 4 В. Це можливо шляхом створення перетворювача постійної напруги в постійну з 1,2–4 В до 200 В.

Ефективне використання електроенергії можливе лише при наявності систем її накопичення. Відомо, що рівні споживання електроенергії різко змінюються в залежності від доби, сезону та інших факторів. Бурхливий розвиток вітрової та сонячної енергетики додатково ускладнюють непередбачуваність перетоків електроенергії. Єдиний вихід – це створення акумулюючих систем. Поширення набули хімічні накопичувачі електроенергії. Але вони потребують вкрай складну систему управління, при зростанні кількості елементів. Вихід з ладу 10–20 % елементів змушує бракувати всю батарею.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Хімічні джерела електричної енергії як накопичувачі знайшли широке використання як в промисловій, так і в побутовій енергетиці. Проблеми, пов'язані з її накопиченням та віддачею в мережу, досліджувалися в роботах [1, 2], у яких показана доцільність використання мегаватних акумуляторних станцій сумісно з вітровими. Разом з тим, у роботі не розглянуті питання функціонування кількох тисяч хімічних елементів з напругою елемента до 1,2–3 В. Використання проточних акумуляторів для потужних енергосистем є найбільш доцільним, з точки зору авторів [3, 4], але виникають труднощі з виведенням енергії. Причинами тому можуть бути нестабільність хімічного складу компонентів та інші умови. Авторами запропоновано низку математичних моделей, які на їхню думку, дозволяють знайти оптимальні варіанти роботи батареї залежно від режиму функціонування. У той же час, не враховуються особливості перерозподілу потужності між елементами хімічних батарей під час заряду та розряду. Аналогічні проблеми виникають і на менших потужностях, наприклад у системах гарантованого електропостачання. Це стосується досліджень, проведених на гібридних вітрових і сонячних електростанціях, де використовується система накопичення електричної енергії. Зокрема в роботі [5] порівнюється варіанти використання конденсаторів, акумуляторів та проточних акумуляторів. У зазначених роботах вирішуються питання оптимізації багатofакторних задач різними математичними методами, у роботі [3] також були проведені натурні дослідження ванадієво-церієвої батареї для пікових навантажень. В даних роботах не висвітлено питання щодо структури поєднання хімічних джерел. Під час моделювання ці роботи не враховують той факт, що хімічний акумулятор складається не з одного елемента, а з багатьох сотень, а інколи й тисяч елементів. У роботі [6] дослідження проводяться на літійових акумуляторах шляхом порівняння натурних даних з даними моделі, отриманими на базі Matlab

Simulink. Але в середовищі Simulink використовуються спрощені стандартні моделі, принаймні по акумуляторам, що не враховують особливості різнотипних джерел живлення. Дослідження сумісної роботи сонячної станції та системи акумуляторів запропоновано в роботі [7] для мереж з обслуговування електромобілів. Динамічні режими роботи акумуляторів розглядаються в середовищі Simulink, що не є доцільним.

Можливості використання як накопичувача іоністора (вживається також назва молекулярний накопичувач, суперконденсатор) розглянуті в роботі [8]. Не вказано лише на той факт, що його допустима напруга на елемент також становить 3–4 В, а отже, слід комбінувати з їх з'єднанням, а значить ускладнювати систему контролю. Система поєднання сонячних станцій для зарядки електромобілів з літєвими акумуляторами, що представлена в праці [9], базується на середовищі Simulink, що може бути сумнівним, особливо при перехідних процесах. У роботі [10] пропонується вирішення питання розбалансування літєвих елементів батареї, у процесі циклів заряд-розряд, вирішувати методом паралельно послідовної комутації. Оскільки мова йде про підводні автономні апарати спеціального призначення, де вартість не має вирішального значення, метод допустимий, але для серійного виробництва обтяжливий.

Проблему можна окреслити як прогресуючу нестабільність параметрів елементів акумулятора в процесі заряду-розряду. Розбіжність цих параметрів з часом накопичується. Її вплив на термін роботи акумулятора та складність вирішення висвітлена в роботі [11]. Розглядаються свинцево-кислотні батареї, необхідна точність вимірювання становить 10 мВ/елемент, порівнюється активна і пасивна системи балансування. Але такий підхід не вирішує головного питання чисельності елементів і необхідність поелементного управління.

Якщо зважити на те, що напруга кожного елемента не може бути більше 4 В, батарея повинна видавати 100–200 В, то їхня чисельність у послідовно паралельному з'єднанні може сягати тисяч. У той же час, кожний елемент батареї має незначні відхилення вже на стадії виробництва, ємність, напругу, внутрішній опір, опір комутаційних шин. І що характерно, відхилення параметрів на соті відсотків величини викликає зміну струмів в сотні ампер. Це пов'язано з тим, що внутрішні опори складають тисячні долі Ом, а електрорушійна сила 2–5 В. Як наслідок, паралельне з'єднання елементів батареї викликає зрівнювальні струми, а послідовне з'єднання порушує пропорційний розподіл напруги.

У процесі експлуатації розбіжності неминуче зростають, підсилюються розбіжності, зумовлені різницями температур. Активна і пасивні системи балансування дещо покращують ситуацію, але за рахунок того, що відстаючі елементи отримують додаткову енергію, а кращі переводяться в пасивний стан. В наступних циклах заряду, ситуація повторюється, до повної деградації відстаючого елемента. Як результат – термін служби батареї з такими елементами, буде істотно меншим, ніж окремого елемента. При регулярних глибоких розрядах, через певний час, починається експоненціальне зростання відмов окремих елементів. Усі перераховані проблеми, ймовірно, можна вирішити замінивши багатоеlementний акумулятор одним елементом, еквівалентним по енергії.

Однією зі специфічних властивостей електричної енергії є необхідність її миттєвого використання. При порушенні балансу генерація – споживання виникає аварійна ситуація. Величина збитків залежить від кількості невикористаної електроенергії. Тому, з урахуванням вартості енергоносіїв зараз бурхливо розвиваються різноманітні напрямки її зберігання та послідууючої віддачі споживачеві. Один із шляхів акумулювання електроенергії – це використання хімічних накопичувачів електроенергії. Проблема спільна, що для автономної сонячної чи вітрової електростанції декілька кіловат потужності, так і для енергосистеми мегаватної потужності. Складно охопити все різноманіття електрохімічних груп, що використовуються, головні ж є кадмієві, свинцеві, літієві, ванадієві (для проточних акумуляторів). У цьому ряду також знаходяться і паливні елементи [12, 13]. Об'єднує усе це різноманіття лише один параметр їхня вихідна напруга знаходиться в межах 0,7–4 В. Для малопотужних споживачів 10–100 Вт існують DC-DC перетворювачі, але з вхідною напругою 5 В і вище. На потужності до 500 Вт з 8 В і вище, для малопотужних автономних – 12–24 В, для промислової потужності 100–400 В.

Нині рішення для всього цього діапазону потужності 500Вт – 100МВт також одне – комбінація паралельно послідовного з'єднання елементів. При цьому чисельність елементів складає від 6 до 12 в автомобілі, до декількох тисяч – в установках гарантованого живлення промислових енергосистем та електромобілях. Слід зауважити, що будь-яка група акумуляторів, наприклад свинцева розгалужується на величезну кількість підгруп, що розрізняються добавками металів і конструктивним виконанням, кожна під свої цілі [14]. Аналогічна картина і по іншим групам акумуляторів [15, 16]. Загалом під будь-яку групу чи підгрупу акумуляторів можна створити систему контролю. Але цього не достатньо, враховуючи токсичність певних електролітів, вибухо- та пожежонебезпечність деяких акумуляторів необхідно контролювати кожний окремий елемент. У низці випадків кожний не проконтролюєш, то ж їх розбивають на групи і контроль ведеться по секціям [17].

Глобальна проблема в цій ситуації полягає в наступному. Під час випуску будь-якого акумулятора кожна із його “банок” має близькі параметри за складовими внутрішнього опору, напругою розімкненого кола, співвідношенням і розподіленням активних мас. Уже після першого розряду ці показники на кожному із елементів “роз”їжджаються”, кожний акумулятор розряджається по-своєму, а система управління у них спільна. Як наслідок, наступний заряд починається не з однакових умов і ці відхилення накопичуються в процесі експлуатації. Для літієвих акумуляторів критичним параметром є температура, точність вимірювання до десятих градуса (пожежо- і вибухонебезпечність), і вона також стає різною. Тобто система управління хімічним накопичувачем стає вкрай складною, а отже надійність її бажає бути кращою. Один із яскравих прикладів, інцидент на космічній станції Салют-7, яка була знеструмлена через хибне спрацювання датчика рівня заряду батареї, який показував 100 % зарядку [18].

Ситуація ускладнюється тим фактом, що при виході із ладу однієї чи двох банок у всіх свинцевих акумуляторів та до 10–15 % літієвих, батарея вибраковується. У деяких державах, для свинцевої батареї налагоджена утилізація, а з літієвими

питання не вирішується, опрацьовані лише технології щодо вилучення із них нікелю та кобальту. У Європі нині, переробляється лише 5 % літієвих батарей [19], а в складі цих батарей лише 10–20 % непридатних до експлуатації.

Автори пропонують, замість певної кількості паралельно послідовно ввімкнених елементів, встановити один еквівалентний по потужності з відповідною напругою. Переваги в системі контролю, надійність, безпечність, ефективність процесів заряду – розряду очевидні. Зростає достовірність інформації за станом джерела, а отже і ремонтнопридатність.

Понижуючі перетворювачі великої потужності, постійної напруги в постійну широко, використовуються в світовій практиці. З підвищувальними перетворювачами є певні складнощі. Зокрема відпрацьовані перетворювачі на потужності до 40–50 Вт з напруги 2–4 В, потужність 1 кВт з напруги 8–9 В, потужність 3 кВт з 48 В і вище [20–22]. Створити підвищувальний перетворювач з напруги 0,8–5 В і на потужності більше за 10 кВт проблематично. Ймовірно це й спонукало йти шляхом паралельно послідовного з'єднання хімічних джерел живлення.

Причин такого стану декілька. Згідно з [23] при низьковольтному живленні на струмах понад 100 А статичні втрати в напівпровідниках на порядок перевищують динамічні. Отже силові кола повинні містити в собі мінімум напівпровідникових елементів і силовий трансформатор. Другим фактором є надлишкова енергія, що накопичується в індуктивностях розсіювання. У роботі [23] розглядаються перетворювач з переносом заряду, але таке рішення потребує додаткового стабілізатора напруги, що суттєво знижує ККД при напругах понад 10 В. Згідно з роботами [24, 25] відпрацьовані безіндуктивні перетворювачі напруги з 0,9–1,8 В, ККД 90 % але при потужності до 10–20 Вт. Унаслідок обмеженої кількості енергії цей тип перетворювачів не має широкого розповсюдження, із-за обмеженості кількості енергії, яку може передавати конденсатор. У літературі вони мають декілька назв – перетворювач з накачкою конденсатора, з переносом заряду, з перемиканням конденсаторів. Поява іоністора, дає можливість передати значно більшу енергію.

Авторами проведено дослідження іоністорного перетворювача постійного струму напруги 0,9–5 В до напруги понад 200 В без використання індуктивних елементів. Це стало можливим завдяки поєднанню властивостей хімічних накопичувачів електроенергії з напругою до 5 В та іоністорів, з аналогічною напругою. І перший і другий елемент не мають обмеження по енергії накопичення.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є розробка способу збільшення низьковольтної постійної напруги хімічного накопичувача енергії, без використання індукційних елементів, тобто без проміжного перетворення енергії магнітного поля.

Для досягнення мети були поставлені такі завдання:

- визначити доцільність використання підвищувального DC-DC перетворювача з рівнів напруги 1–5 В, з електромагнітним перетворенням енергії;
- з'ясувати можливості іоністорів виконувати пряме перетворення низьковольтної електричної енергії постійного струму;

– отримати математичну модель роботи іоністорного перетворювача, з’ясувати закономірності його роботи при варіації параметрів.

4. Матеріали та методи дослідження

На першому етапі була досліджена принципова можливість самої ідеї ємнісного перетворення. Для цього збиралася силова схема представлена на рис. 1. Використовувалися конденсатори і тиристори, в якості ключів, без примусової комутації. Головним показником було досягти ефекту “трансформатора” на постійній напрузі. Тобто при збільшенні вихідної напруги в двічі вихідний струм, по відношенню до входу, зменшується в двічі. Вихідна напруга повинна стабілізуватися автоматично при зміні навантаження, без додаткової регуляції через схему управління. Також оцінювався вплив на потужність тактової частоти, та співвідношення тривалості заряд – розряд.

На другому етапі виконувався перехід на іоністори та транзисторні ключі. Це дало змогу в широких межах змінювати частоти, потужності, працювати на різних типах іоністорів. По отриманим залежностям проводилася порівняльна характеристика конденсаторного перетворювача та іоністорного.

Третій етап. Він проводився з метою охоплення широкого діапазону потужностей, від енергосистем промислових об’єктів, до автономних систем вітрової та сонячної генерації. На них використовуються різні хімічні накопичувачі електроенергії, які відрізняються по кількості енергії, по їх типу, кількістю елементів та схем їх з’єднання. Не доцільно виконувати дослідження перетворювача для кожного окремого об’єкту. Тому була досліджена математична модель, яка дозволить визначити параметри перетворювача для конкретного типу хімічного накопичувача та умов їх експлуатації.

5. Результати дослідження перетворювачів низьковольтної електричної енергії постійного струму

5.1. Дослідження низьковольтного підвищувального електромагнітного DC-DC перетворювача

Були проведені дослідження щодо використання серійних DC-DC перетворювачів. Встановлено, що при вхідній напрузі 2–3 В максимально можлива потужність 10–20 Вт. Починаючи з напруги 8–10 В, під час доопрацювання модульних блоків, потужність більше 300 Вт отримати не можливо. Застосування додаткових радіаторів, додаткової вентиляції є малоефективним. Перехід на напруги понад 10 В дозволив збільшити потужність до 500 Вт, але виникли проблеми з високочастотним силовим трансформатором. Під час комутації силових ключів виникає протиелектрорушійна сила, зумовлена індуктивністю розсіювання трансформатора. До певної міри її вплив зменшили за рахунок схемних рішень, але зі зростанням потужності ці міри виявилися не ефективними. Наступним кроком було використання секціонованих обмоток трансформатора. Як показали подальші дослідження, таке рішення дозволяє збільшити потужність лише до 1–1,5 кВт. Вирішення проблеми перетворення електричної енергії постійного струму напругою до 4 В, потужністю понад 500 Вт традиційними DC-DC перетворювачами виявилось неможливим.

5. 2. Дослідження іоністорного перетворювача низьковольтної електричної енергії постійного струму

Відомі перетворювачі постійної напруги в постійну (DC-DC) працюють з використанням індуктивного елементу, трансформатора або дроселя. Відбувається ланцюг перетворень енергій: постійний струм в змінний, в енергію магнітного поля, знову змінний струм, випрямлення. Створити високочастотний (100–300 кГц) трансформатор потужністю 100–200 кВт при входній напрузі до 5 В вкрай проблематично. Тому було реалізовано ідею заряду певної кількості іоністорів у паралельному режимі, з наступним розрядом у послідовному. При такому підході органічно поєднуються низьковольтні властивості хімічних накопичувачів енергії та іоністорів. На рис. 1, *a* представлена схема перетворювача, на якій досліджувалися умови двократного збільшення напруги. Під час подачі управляючих імпульсів на тиристори VS_1 , VS_2 вони відкриваються і відбувається заряд по колу: $+G$, VD_1 , VS_1 , C_1 , $-G$, та по колу G , VD_1 , C_2 , VS_2 , $-G$. По мірі заряду ємностей тиристори закриваються і відбувається розряд ємностей C_1 , C_2 в послідовному включенні по колу: $+C_1$, VD_2 , C_2 , VD_3 , C_3 , $-C_1$. Після певної кількості циклів заряду – розряду на ємності C_3 і R напруга вдвічі більша за напругу живлення G . У момент розряду ємностей діод VD_1 запирається сумарною напругою ємностей і не допускає розряду через джерело живлення. Аналогічно діод VD_3 запобігає розряду накопичувальної ємності C_3 на коло живлення.

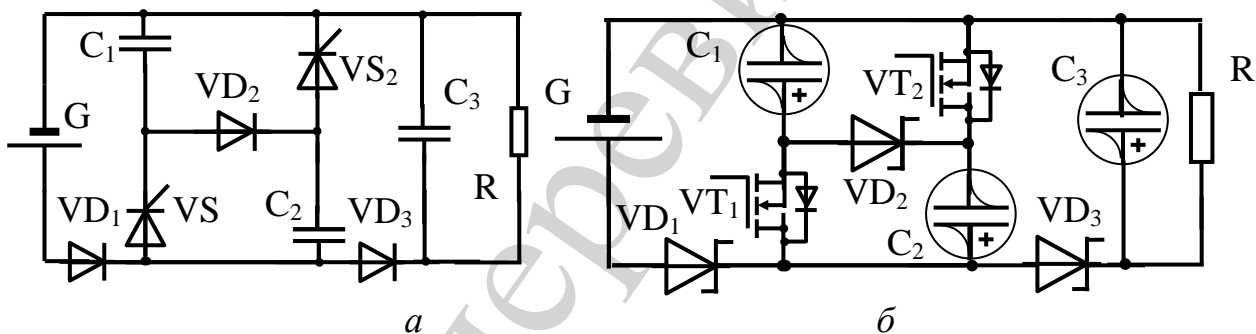


Рис. 1. Іоністорний перетворювач постійної напруги в постійну: *a* – тиристорний; *б* – транзисторний

Під час збільшення навантаження R збільшується розряд ємностей і відповідно більша кількість енергії надходить від джерела, тобто відбувається саморегуляція подвоєної вихідної напруги. Для збільшення напруги в n раз складається схема з n паралельно ввімкнених конденсаторів C_1, C_2, \dots, C_n .

Наведена схема задовільно працює на потужності до 500 Вт, проста в управлінні, тиристори запираються природнім шляхом, по мірі заряду ємностей і зменшенні струму. Для збільшення потужності необхідно використовувати примусову комутацію тиристорів, що ускладнює схему і погіршує якість вихідної напруги розрядними імпульсами комутаційного конденсатора. У цілому тиристорна схема дає певні переваги, але під час зростання потужності, процеси заряду ємності стають мало керованими.

Використання електролітичних конденсаторів дозволило підняти потужності до кіловата, подальше її збільшення призводить до їх перегрівання.

Силова частина перетворювача на іоністорах представлена на рис. 1, б. Типовий сучасний іоністор має ємність до 3000 Ф [26]. Серійно використовуються, як додатковий засіб, для пуску двигунів при низьких температурах. Оскільки для перетворення значної потужності на низьких напругах і високій частоті необхідні струми 1–10 кА, то елемент має мати низький внутрішній активний опір і малий імпеданс. Нині складно без натурних досліджень з'ясувати вказані параметри, оскільки вони суттєво залежать від частоти, а виробник не завжди вказує контрольні частоти, тому ці значення коливаються. Випускаються спеціалізовані іоністори з малим внутрішнім опором під маркуванням Low ESR де використовується іонопровідний сепаратор [27], у роботі [28] зазначена технологія їхнього виробництва, для суттєвого зменшення внутрішнього опору запропонований матеріал CNF-PANI [29]. Молекулярний накопичувач 24ПІ 30/0,003 ємністю 104 Ф має внутрішній опір 0,003 Ом [30]. За даними, які наведені у [31], використання рідких органічних електролітів відкриває нові можливості. Для отримання високочастотних іоністорів, з малим послідовним еквівалентним опором, необхідно використання електролітів з високими іонотранспортними властивостями [32].

Тобто, є шляхи подальшого зниження внутрішнього опору іоністора, оскільки цей параметр може стати критичним при їхній роботі в іоністорному перетворювачі.

Для схеми рис. 1б використовували діоди Шотткі, оскільки вони працюють при низьких напругах і мають незначне падіння напруги в відкритому стані 80–250 мВ. Як варіант можна використати здвоєні діоди серії STPS120L15TV від 15 В на струмі понад 100 А [33]. Для роботи на низьких напругах, високих потужностях і на частотах понад 50–100 кГц, як ключові елементи, використовувалися транзистори MOSFET. Зокрема модель IRL2505 при струмах 74 А має опір стік – витік R_{DS} 8 мОм, модель AUIRFS8409 з напругою 40 В, при струмові 195 А має опір 1,2 мОм, IRF2804S – 40 В, 320 А, 1,6 мОм [34, 35].

На рис. 1, б показані VD_1 – VD_3 – діоди Шотткі, C_1 – C_2 – іоністори напругою до 4 В, C_3 – комбінований іоністор з напругою споживача. Щодо іоністора C_3 можливо його поєднати з декількох іоністорів на 2–4 В, для отримання 12–24 В. Враховуючи здатність транзисторів MOSFET працювати на високих частотах, був опрацьований варіант – використання для C_3 імпульсного конденсатора – типу ИКЭ-90/300 на 300 В, 2 Ф, ИКЭ-115/300 300 В, 2,5 Ф.

У розглянутій схемі іоністори працюють в край складних умовах, якщо будуть повністю розряджатися і заряджатися при певній частоті. Такий режим ускладнить роботу ключових елементів. Тому використовувався режим роботи, при якому відбувається частковий розряд, а залишковий заряд буде послугувати обмеженню пікових струмів. Була отримана залежність частоти від залишкової напруги при умові передачі незмінної енергії.

$$f_1 \frac{CU_1^2}{2} = f_2 \frac{C(U_1 - U_x)^2}{2}, \quad (1)$$

де C – ємність накопичувача; U_1, U_x – максимальна та залишкова напруга заряду і розряду відповідно; f_1 – частота при повному розряді ємності; f_2 – частота при частковому розряді ємності до рівня U_x .

Дослідним шляхом підтверджена залежність частоти від ступеня розряду ємності

$$f_2 = \frac{f_1 U_1^2}{(U_1 - U_x)^2}; \quad U_x = \frac{U_1}{n}; \quad f_2 = f_1 n^2, \quad (2)$$

де n – кратність залишкової напруги. На практиці це означає, що одну і ту ж енергію можна передати при повному розряді ємності на частоті 50 Гц, або при часткових розрядах (1/3) на частоті 450 Гц. По мірі збільшення частоти, збільшувався залишковий заряд, який обмежуватиме кидок струму на початку процесу заряду іоністора.

5. 3. Створення математичної моделі іоністорного перетворювача низької напруги

Була створена наступна структура по часу. Процес ділимо на такти:

- 1 – заряд іоністорів в паралельному вмиканні;
- 2 – розрив кола живлення ключем і дозарядка іоністорів, за рахунок індуктивних складових;
- 3 – розряд послідовно ввімкнених іоністорів на накопичувальну ємність і навантаження;
- 4 – розряд накопичувальної ємності та індуктивних складових на навантаження.

Позначимо цей процес, як перший цикл. Під час роботи четвертого такту першого циклу починається перший такт другого циклу. Його відмінність полягає в наявності залишкових зарядів на іоністорах. Відмінність циклів полягає в зростанні залишкових зарядів. Тобто реалізується схема, коли початковими умовами наступного такту і циклу є кінцеві умови попереднього. Ознакою усталеного процесу є стабілізація вихідної напруги.

Перший такт – заряд ємності від джерела живлення рис. 2, де G – джерело постійного струму напругою 4 В символізує літєвий акумулятор, що складається з однієї банки великої ємності. K – транзисторний ключ, VD – зворотній діод, r_z – зарядний опір, що включає в себе: активний опір ключа, акумулятора, індуктивності і ємності. C – зарядна ємність (іоністор), що складається з певної кількості іоністорів ввімкнених паралельно.

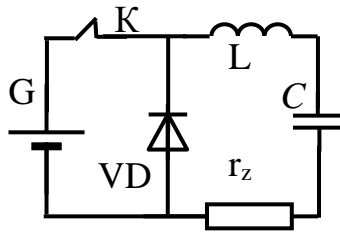


Рис. 2. Такт 1. Зарядне коло

Напишемо диференційне рівняння, що описує процес заряду іоністорів від хімічного джерела струму.

$$U_G = L_2 q'' + r_2 q'' + \frac{q + q_{03}}{C}, \quad (3)$$

де L_2 , r_2 – сумарна індуктивність, та опір зарядного кола; C – ємність, коли акумулятори ввімкнені в паралельному режимі, відповідна кількість ємностей; q_{03} – залишковий заряд, для початкового процесу дорівнює нулю, у подальшому відповідає заряду, що залишився від третього такту.

Отримали диференційне рівняння другого порядку, його початковими умовами є заряд і струм на момент спрацювання ключа К.

Другий такт розмикання ключа К (рис. 3), дозаряд іоністорів в паралельному вмиканні за рахунок індуктивних складових елементів, через зворотній діод VD. Як зазначалося раніше, перетворення електричної енергії постійного струму відбувається без використання індуктивних елементів. Але можуть бути випадки, коли на високих частотах (оскільки ми їх також не обмежуємо), слід враховувати індуктивність з'єднувальних шин, індуктивність хімічного джерела та іоністора. З іншого боку, під час роботи на низьких частотах, доречним є введення певної індуктивності для обмеження початкового кидка струму. І в тому, і в іншому випадках, відпрацює зворотній діод VD рис. 3, який дасть певне збільшення енергії. Його значення особливо важливе при комутації на великих струмах.

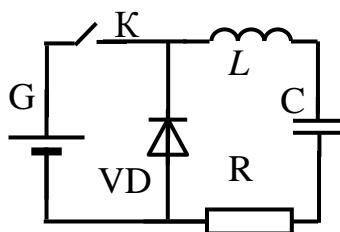


Рис. 3. Такт 2. Розрядне коло

Диференційне рівняння, що описує цей процес з початковим струмом, отриманим з рівняння (3) по його кінцевому значенню для першого такту, і до-

датковим зарядом, отриманим за рахунок відпрацювання індуктивності по зворотному діоду, має вигляд:

$$Lq'' + Rq' - \frac{q + q_{01}}{C} = 0, \quad (4)$$

де q_{01} – заряд накопичений у момент комутації в попереднім такті на ємності C .

Початковими умовами для нього є заряд q_0 та струм i_0 , на момент комутації. Розв'язок рівняння (3) та (4) для двох варіантів показані на рис. 4. Позиція a – зарядний струм, b – напруга на ємності, d – відпрацювання зворотного діоду.

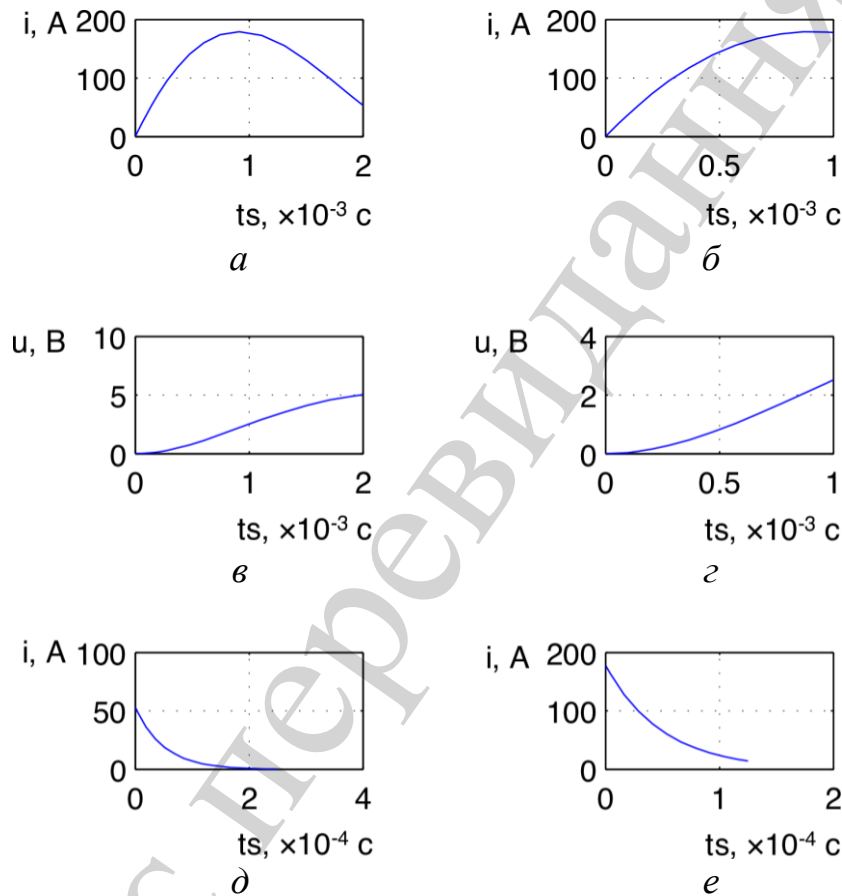


Рис. 4. Варіанти заряду ємності: a, v, d – перемикання при спадаючому струмі, b, z, e – при максимальному струмі

Комутація на спадаючому струмі 50 А в момент $2 \cdot 10^{-3}$ с при максимальній напрузі 5 В. Другий варіант, комутація відбулася раніше 10^{-3} с, позиції b, z, e відповідають попереднім, але комутація відбулася при максимальному струмі 180 А, напрузі 2,5 В, результуючій напрузі 2,6931 В. У цьому випадку вдвічі більша тривалість заряду $2 \cdot 10^{-3}$ с дала напругу 5 В, проти тривалості 10^{-3} с з результуючою напругою 2,7 В. Тобто ефективність відпрацювання зворотного діоду на струмові 175 А (позиція e) по напрузі дещо менша, ніж у першому варіанті. Неможливо передбачити, як будуть впливати частоти, співвідношення тривалості заряду і розряду та низка інших параметрів. Відповіді на ці питання

може дати лише дослідження математичної моделі перетворювача. Наступний, третій такт (рис. 5), описує процес перемикання іоністорів в послідовне включення і їх розряд на накопичувальну ємність C_2 , та навантаження R_H .

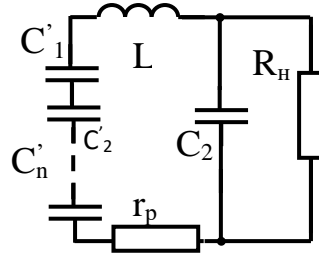


Рис. 5. Такт 3. Послідовне розрядне коло

Знаходимо залежність вихідної напруги U_2 від кількості іоністорів n , їх ємності та значення ємності C_{1-n} в послідовному вмиканні

$$U_2 = \frac{q_0}{n \cdot \frac{C}{n^2}} = n \cdot \frac{q_0}{C}, \quad C_{1-n} = \frac{C}{n^2}, \quad (5)$$

де q_0 – заряд накопичений ємностями; n – кількість ємностей.

На рис. 5 ємності C_1 – C_n символізують певну кількість однакових за номіналом, послідовно ввімкнутих іоністорів, r_p – розрядний опір, що включає в себе активний опір іоністорів, з'єднувальних шин, ключів, аналогічно і по індуктивностях L_p . C_2 – накопичувальна ємність, R_H – активне навантаження. Складемо диференційне рівняння розрядного кола рис. 5.

$$\begin{cases} \frac{q}{C_{1-n}} + L_p q'' + r_p q' - u_2 = 0, \\ q' + C_2 u_2 + \frac{u_2}{R_H} = 0. \end{cases} \quad (6)$$

де L_p , r_p – сумарний активний і індуктивний опір розрядного кола, u_2 – напруга на навантаженні; R_H – активне навантаження.

Дослідження зручніше вести, коли систему диференційних рівнянь привести до явної форми, відносно старшої похідної. Виконавши стандартні перетворення отримаємо

$$q''' = \frac{1}{L_p C_2} \left[- \left(r_p C_2 + \frac{L_p}{R_H} \right) \cdot q'' + \left(\frac{C_n}{C_{1-n}} - \frac{r_p}{R_H} - 1 \right) \cdot q' + \frac{1}{R_H C_{1-n}} \cdot q \right], \quad (7)$$

Оскільки маємо диференційне рівняння третього порядку, визначаємо початкові умови q_0 , q'_0 , q''_0 . Для їх знаходження врахуємо такі факти. У момент спрацювання ключів струм дорівнює нулю. Початковий заряд на ємностях C_{1-n} знаходимо як суму зарядів першого і другого тактів, після інтегрування струму другого такту. Розв'язок рівняння (7) представлений на рис. 6.

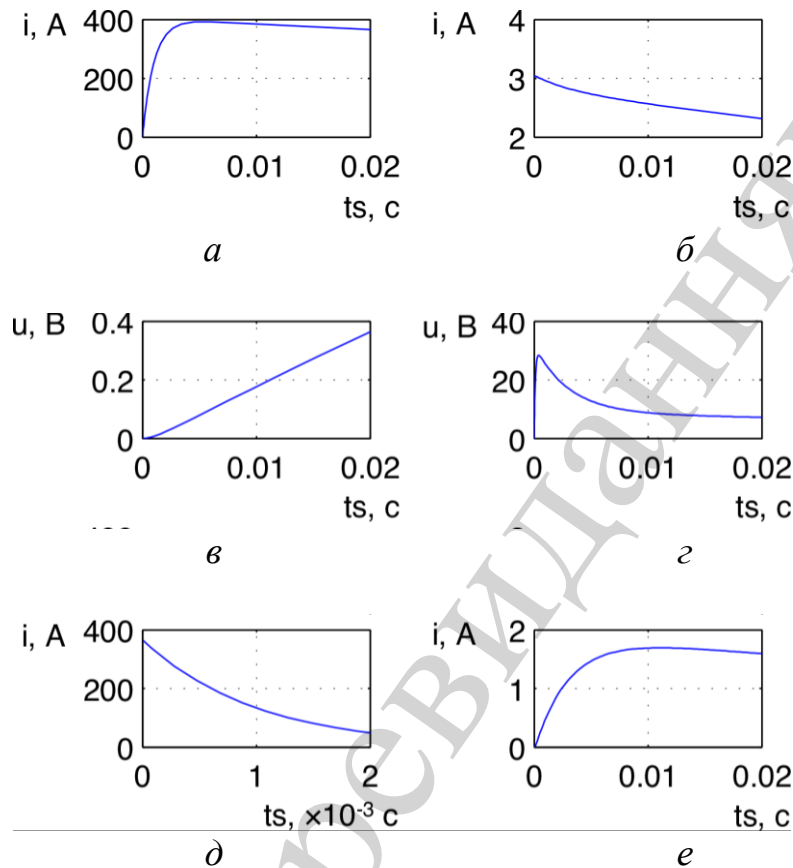


Рис. 6. Перехідні процеси в ємностях: *a*, *в*, *д* – заряд в паралельному режимі; *б*, *г*, *е* – розряд в послідовному

З метою показу різних варіантів на рис. 6 представлений випадок, коли ємність іоністорів збільшили до 20 Ф. Перший такт, позиція *a* – зарядний струм від акумулятора напругою 4 В, спрацювання ключа $2 \cdot 10^{-2}$ с, при струмі 350 А. Позиція *в* – зростання напруги на ємності. Збільшення напруги до 0,4 В. Позиція *д* – струм заряду за рахунок зворотного діоду VD1 і відпрацювання індуктивності. Позиція *б* – ввімкнено 8 ємностей C в паралель їх перемикачів в послідовне з'єднання (напруга зросла в 8 разів) і розряд на ємність C_2 . Позиція *г* – зарядний струм перетоків на ємність C_2 . Позиція *е* – зростання напруги на ємності C_2 (навантаження R_H).

Четвертий такт рис. 7, дозаряд накопичувальної ємності C_2 через індуктивність і живлення навантаження R_H . Одночасно з четвертим тактом відбувається перший і другий такт другого циклу. Тобто тривалість четвертого такту відповідає сумі тривалості першого і другого тактів. У момент комутації K_2 струм

зберігає своє значення і певним чином розподіляється між ємністю і навантаженням. Систему диференційних рівнянь складаємо таким чином, щоб струм, який йде на ємність, вилучити і не шукати окремо. Початкова умова – ємність C_2 має певний заряд q_{03} (від третього такту). На момент комутації в колі $L_p - C_2, R_H - r_r - VD$ був струм i_{03} , який визначається як кінцевий із попереднього такту. Також згідно закону збереження заряду зберігається і заряд, що відповідав струму на момент комутації, тобто маємо початкові умови по заряду, по струму (перша похідна), в подальшому знайдемо другу похідну. Складемо систему диференційних рівнянь, що описують вказані процеси.

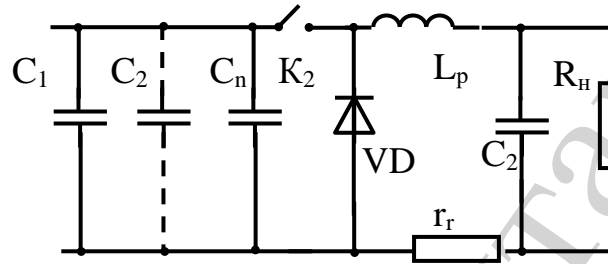


Рис. 7. Такт 4. Розряд на навантаження

$$\begin{cases} L_p q'' + r_r q' - \frac{q_c - q_{03}}{C_2} = 0; \\ q' + q'_c + \frac{q_c - q_{03}}{C_2} = 0, \end{cases} \quad (8)$$

де q, q' – заряд і струм, що переміщується по індуктивності, діоду, опору кола r_r ; q_c, q'_c – заряд і струм, що проходить через ємність C_2 .

Виконавши математичні перетворення, отримаємо

$$q''' = \frac{1}{C_2 L_p} \left[\left(\frac{L_p}{R_H} - C_2 r_r \right) \cdot q'' + \left(\frac{r_r}{R_H} - 1 \right) \cdot q' \right], \quad (9)$$

Початкові умови $q_{00}, q'_{00}, q''_{00}$ – беруться із кінцевих значень попереднього рівняння (7), початкові умови для другої похідної знаходимо з першого рівняння системи (8), виходячи з того, що струм у момент комутації дорівнює нулю, отримаємо значення другої похідної

$$q_{00} = -\frac{1}{L_p} \cdot (r_r \cdot i_0 - u_k), \quad (10)$$

де $(q_c - q_{02})/C_2$ перше рівняння системи (8); – напруга (u_k) на ємності C_2 , на момент початку комутації ключа, визначається як кінцеве значення з попереднього рівняння. Зміна знаку на напрузі зумовлена зміною напрямку ЕРС на індуктивності в момент комутації. Таким чином завершився перший цикл, що складається із чотирьох тактів.

Зв'язок в часі тактів зображений на рис. 8, навантаження завжди буде під напругою. У такті 3, коли відбувається процес переходу заряду з послідовно ввімкнених ємностей на навантаження, або при заряді ємностей під напругою накопичувальної ємності. Їхня сумарна тривалість (частота) та співвідношення тривалості в тактах може змінюватися в широких межах.

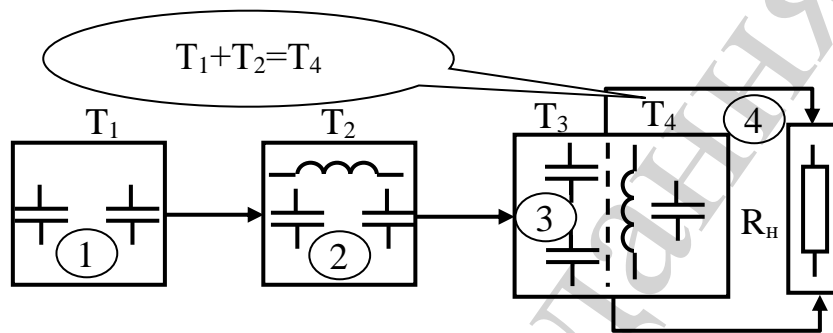
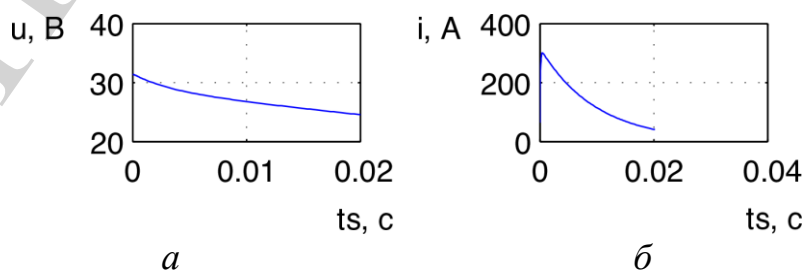


Рис. 8. Зв'язок часу тактів в циклі

Таким чином, описано перший цикл, який починався при нульових початкових умовах як по заряду q_0 , так і по струму i_0 . Наступні цикли будуть відрізнятися від попередніх кількістю накопичених зарядів. Визначивши на час комутації кінцеву напругу і знаючи ємність, знаходимо залишковий заряд, який відповідає початковим умовам наступного такту. У другому і наступних циклах диференціальні рівняння, що їх описують, залишаються незмінними, змінюються лише початкові умови.

Диференціальне рівняння (9) розв'язується відносно струму через індуктивність і тому в першому циклі напруга і струм на навантаженні мають один напрямок. Для наступних циклів, коли на ємності C_2 існує заряд, то навантаження живиться струмом з ємності C_2 , напрямок якого протилежний напрямку зарядного струму, тобто маємо графіки напруги і струмів протилежної полярності. Результуюче рішення 20 циклу для струмів і напруги наведено на рис. 9.



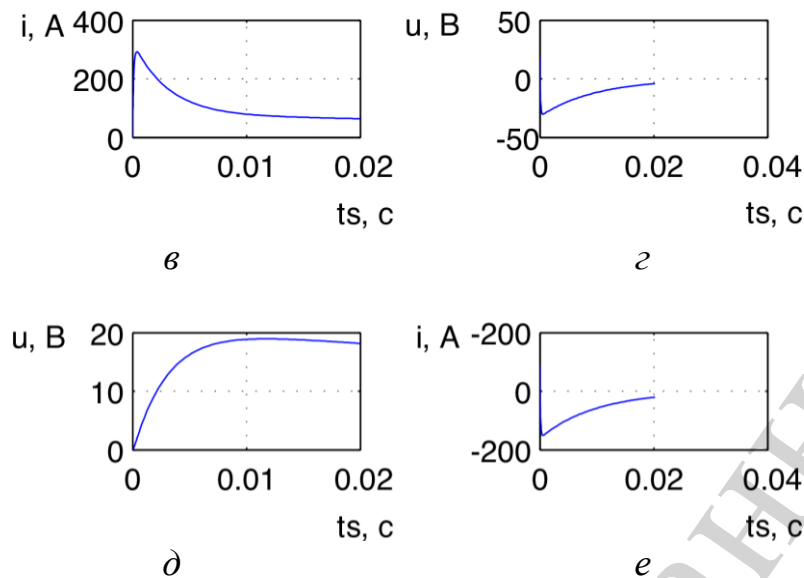


Рис. 9. Епюри струмів і напруги на навантаженні, 3 і 4 такти, 20-го циклу. *a, в, д* – процеси на послідовно ввімкнутих ємностях, *б, г, е* – процеси на навантаженні

По мірі накопичення зарядів в циклах зростає струм і напруга на навантаженні. Критерієм виходу пристрою на усталений режим може слугувати умова, коли різниця кінцевої напруги 4 такту між попереднім циклом і наступним не буде перевищувати наперед заданого значення ΔU .

Використання ємнісного перетворювача, наведеного на рис. 1, передбачає його роботу з електрохімічними накопичувачами електроенергії як у складі енергетичної системи, так і на електромобілі, і на звичайному автомобілі та в інших випадках. Отже там, де бажана заміна певної кількості елементів одним, еквівалентним по енергії. Отже, й електрохімічні елементи, й іоністори можуть суттєво відрізнятися за своїми параметрами. Звісно, у натурних дослідженнях не охопити такий об'єм даних. Отримана математична модель дозволяє дослідити роботу перетворювача для кожного конкретного випадку. Такі параметри, як імпеданси акумуляторів, іоністорів, реалізації елементної бази перетворювача, можуть змінюватися в широких межах. Вони, у свою чергу, будуть взаємозв'язаними з частотою, співвідношенням тривалості тактів, потужністю. Тому, як результат дослідження наводимо графіки для однієї із комбінацій параметрів, коли в усталеному режимі (цикл 50) вихідна напруга становить приблизно 100 В, навантаження має активний опір 0,2 Ом. Отже, вихідна потужність складає близько 40 кВт. На рис. 10, *a* спостерігаємо струм перемикання іоністорів після їхнього розряду на навантаження (у послідовному з'єднанні) і роботу зворотного діоду такт 4.

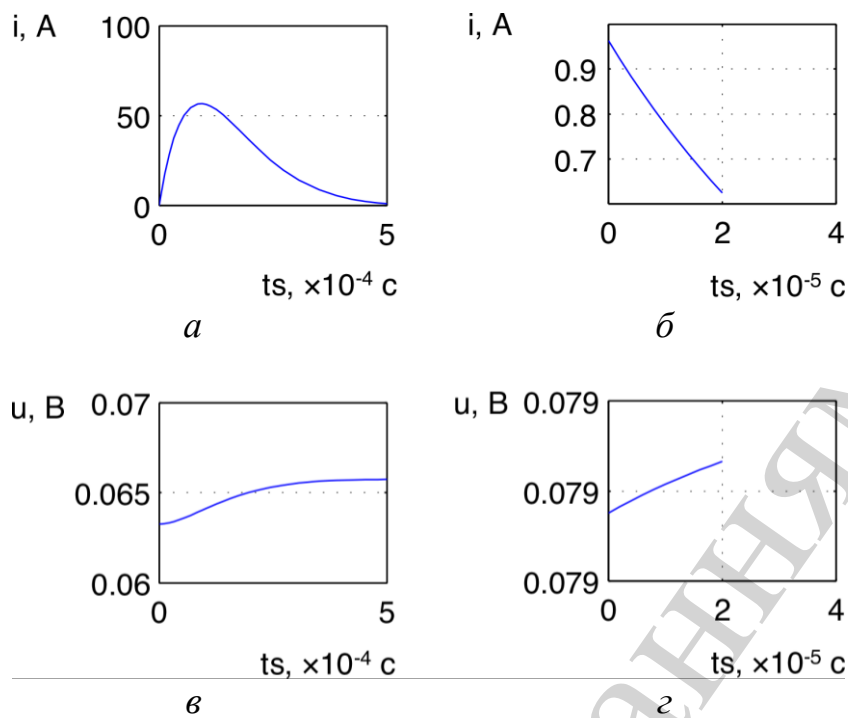
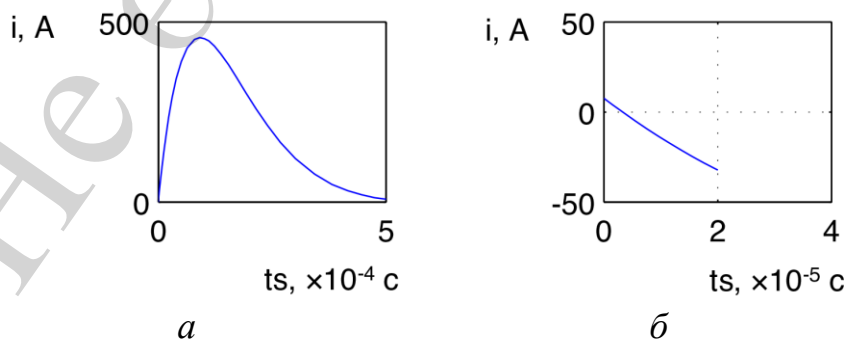


Рис. 10. Цикл 10 такт 3,4 напруга і струми на навантаженні: *a* – такт 3, струм на накопичувальну ємність C_2 і навантаження, *б* – такт 4, струм через зворотній діод, *в* – такт 3, напруга на навантаженні і ємності, *г* – кидок напруги через зворотній діод

Зберігається нерозривність струму на рис. 10, *a* перемикання при 0,95 А, та початок такту ввімкнення діоду рис. 10 *б*, також на рівні 0,95А. Відповідно, напруга на активному навантаженні рис. 10, *в*, присутній скачок напруги за рахунок індуктивності з 0,07 В до 0,08В, рис. 10, *г*.

На рис. 11 показана робота перетворювача в усталеному режимі, який наступив на 50 циклі. Процеси, що протікають при цьому, аналогічні тим, що описані вище для рис. 10, за винятком зростання струму до 150 А та напруги до 113 В. Струм при комутації не переривається в області 8 А.



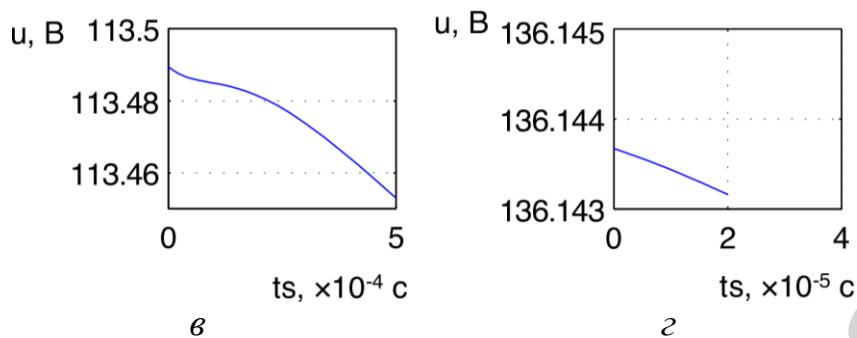


Рис. 11. Цикл 50 такт 3,4 напруга і струми на навантаженні: *a* – зарядний струм на накопичувальну ємність, *б* – струм зворотного діоду, *в* – напруга на навантаженні 3 такту, *г* – напруга на навантаженні 4 такту.

Робота зворотного діоду рис. 11, *б* на $0,5 \cdot 10^{-5}$ с змінила знак струму, але це означає, що він закритється і втрат енергії на перезаряд не станеться, також він запобігає можливим коливальним процесам. Напруга на навантаженні в третьому такті рис. 11, *в* має спадальний характер з 113,5 В до 113,4 В, у четвертому такті стрибок напруги на індуктивності (рис. 11, *г* складає з 113 В до 136 В внаслідок роботи зворотного діоду. У цілому на протязі 50 циклів в усіх 4 тактах ознак порушення закону комутації не спостерігалось, що підтверджує достовірність математичної моделі процесів перетворення напруги.

6. Обговорення результатів дослідження роботи низьковольтного перетворювача постійної напруги

Проведені дослідження підвищувальних серійних DC-DC перетворювачів показали, що відсутні перетворювачі на потужності понад 200 Вт при вхідній напрузі до 5 В. Різноманітні схемні і технологічні прийоми можуть дещо розширити вказаний діапазон [23]. Загалом проблема не вирішена. Шляхом дослідження встановлено, що головною перешкодою підвищення потужності є високочастотний силовий трансформатор. Складно уявити, якою повинна бути його конструкція з обмоткою для струмів понад 200–300 А. Умови охолодження як осереддя, так і обмоток, при суттєвих статичних і динамічних втратах будуть вкрай несприятливі. Інша проблема – це боротьба з магнітними потоками розсіювання. Одна справа – локалізація протиелектрорушійної сили розсіювання на струмах до 10–50 А, і зовсім інша – при струмах понад 100 А. Енергію, що при цьому з'являється, необхідно кудись направити. Усе це призводить до ускладнення схеми, зниження коефіцієнта корисної дії. Доцільним вбачається шлях перетворення постійної напруги з використанням лише енергії електричного поля, що може накопичуватися в іоністорах.

Використання способу паралельного заряду іоністорів, з подальшим їх розрядом в послідовному, дозволяє уникнути проміжного перетворення електричної енергії в енергію магнітного поля. На рис. 1 наведені схемні рішення, що реалізують вказану ідею. Як у трансформаторі, так і в іоністорному перетворювачі відбувається автоматична стабілізація вихідної напруги при зміні наванта-

ження за рахунок ступеня розряду ємності. Цей перетворювач дозволяє “пом’якшити” роботу ключових елементів при збільшенні потужності. Шляхом збільшення циклічної частоти зменшується амплітуда напруги перепаду заряд-розряд, отже зменшуються кидки струмів. Але при цьому “енергоємність” зарядів збільшується, працюють лише “вершини” амплітуд струмів. Отримана залежність представлена у виразах (1), (2).

Процеси, що відбуваються в перетворювачі, описуються послідовним ланцюгом диференціальних рівнянь, пов’язаних між собою початковими умовами. Така структура дозволяє описувати всю динаміку перехідних і усталених процесів при зміні співвідношення тривалості заряд-розряд, значень параметрів хімічних накопичувачів електроенергії, іоністорів, кратності збільшення напруги, внутрішніх опорів усіх елементів. Це означає, що відповідно поставлених завдань шляхом моделювання можна підібрати оптимальні співвідношення параметрів залежно від типу хімічного накопичувача та потужності споживача. Так, на рис. 4 представлено два варіанти варіації тактів 1 і 2, першого циклу. Перший, коли комутація відбувається при струмі 50 А рис. 4, а, по зворотному діоду додатковий імпульс 50 А рис. 4, д, отримуємо напругу 4 В рис. 4, в. У другому варіанті з комутацією при струмі 150 А рис. 4, б, імпульс через діод 150 А рис. 4, е, напруга становитиме лише 2 В рис. 4, з. Який із варіантів кращий незрозуміло, бо це залежить від багатьох параметрів. Провівши моделювання для конкретного типу накопичувача та іоністора, до усталеного режиму, можна визначити оптимальні співвідношення. Так, на рис. 11 наведені графіки 50 циклу (усталений режим), напруга та струм на навантаженні. Пульсації по напрузі незначні, внаслідок великої ємності при зарядному струмі в 450 А.

Використовуючи специфічні властивості іоністорів та хімічних накопичувачів енергії, врахувавши їх параметри та провівши дослідження моделі іоністорного перетворювача, можемо побудувати низьковольтний перетворювач необхідної потужності. Його особливості – відсутність трансформатора, здатність працювати на напругах менше 5 В, при струмах понад 100 А. Це дозволить зменшити кількість елементів в батареї для систем акумулювання електроенергії.

У дослідженні не вирішена оптимізаційна задача щодо впливу співвідношень тривалості тактів, тривалості циклу, кратності підвищення напруги, значень ємностей та інше.

Подальше дослідження полягає в знаходженні відповідності між парами типів акумулятора – тип іоністора, визначення їхніх частотних параметрів. Наступним кроком є вирішення оптимізаційного завдання, де узагальненим критерієм може виступати потужність, рівень напруги, коефіцієнт корисної дії. Після його вирішення отримується оптимальна частота, співвідношення тактів, значення ємностей. Виконується заміна певної кількості елементів одним, еквівалентним по потужності. Ймовірно, однією із проблем, є визначення частоти роботи іоністора, при його частковому розряді, і крім експериментального шляху, іншого не існує.

7. Висновки

1. Створювати підвищувальний DC-DC перетворювач на напруги нижче 5 В і потужності понад 1 кВт не доцільно. При струмах понад 200 А виникають проблеми з охолодження обмоток та осереддя трансформатора. Необхідно вживати додаткові заходи щодо локалізації протиелектрорушійної сили розсіювання магнітного поля.

2. Пряме перетворення низьковольтної енергії постійного струму доцільно виконувати без перетворення її в енергію магнітного поля, використовуючи паралельний заряд іоністорів з подальшим розрядом в послідовному режимі.

3. Отримана математична модель процесів, що відбуваються в іоністорному перетворювачі. Вона дозволяє, залежно від типу хімічного накопичувача енергії, потужності споживача, вихідної напруги знайти прийнятні режими його роботи. Це дозволить замість певної кількості елементів хімічного накопичувача електроенергії використовувати один, еквівалентний по енергії.

Література

1. Li, X., Zhang, D. (2018). Coordinated Control and Energy Management Strategies for Hundred Megawatt-level Battery Energy Storage Stations Based on Multi-agent Theory. 2018 International Conference on Advanced Mechatronic Systems (ICAMechS). doi: <https://doi.org/10.1109/icamechs.2018.8506868>

2. Badeda, J., Kwiecien, M., Schulte, D., Ruwald, T., Sauer, D. U. (2017). Adaptive battery steering and management system for the optimized operation of stationary battery energy storage systems in multi-use applications. 2017 IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC). doi: <https://doi.org/10.1109/intelec.2017.8214149>

3. Smith, S., Firdous, I., Wang, Q., Esmalla, S., Daoud, W. A. (2019). A two-dimensional model of the vanadium–cerium redox flow battery. *Electrochimica Acta*, 328, 135019. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.135019>

4. Wang, R., Li, Y., Wang, Y., Fang, Z. (2020). Phosphorus-doped graphite felt allowing stabilized electrochemical interface and hierarchical pore structure for redox flow battery. *Applied Energy*, 261, 114369. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114369>

5. Grisales-Noreña, L. F., Montoya, O. D., Gil-González, W. (2019). Integration of energy storage systems in AC distribution networks: Optimal location, selecting, and operation approach based on genetic algorithms. *Journal of Energy Storage*, 25, 100891. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100891>

6. Iurilli, P., Brivio, C., Merlo, M. (2019). SoC management strategies in Battery Energy Storage System providing Primary Control Reserve. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 19, 100230. doi: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2019.100230>

7. Biya, T. S., Sindhu, M. R. (2019). Design and Power Management of Solar Powered Electric Vehicle Charging Station with Energy Storage System. 2019 3rd International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). doi: <https://doi.org/10.1109/iceca.2019.8821896>

8. Abdelkafi, A., Masmoudi, A., Krichen, L. (2018). Assisted power management of a stand-alone renewable multi-source system. *Energy*, 145, 195–205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.133>
9. Khan, A., Memon, S., Sattar, T. (2017). Integration and Management of Solar Energy for Electric Vehicle Charging Station. *Proceedings of SWC2017/SHC2017*. doi: <https://doi.org/10.18086/swc.2017.16.03>
10. Zhang, Y., Lu, S. (2018). Research on Series-Parallel Connection Switching Charging Method for Lithium Battery of Autonomous Underwater Vehicles. 2018 IEEE 8th International Conference on Underwater System Technology: Theory and Applications (USYS). doi: <https://doi.org/10.1109/usys.2018.8779098>
11. Belmokhtar, K., Ibrahim, H., Ghandour, M. (2016). Improving performance of batteries by using charge equalization systems – Experimental validation. 2016 3rd International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC). doi: <https://doi.org/10.1109/redec.2016.7577542>
12. Водородная энергетика: начало большого пути. URL: <https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/428511/>
13. Коровин, Н. В. (2005). Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: Изд-во МЭИ, 208.
14. Аккумуляторы гелевые, мультигелевые и AGM - в чем разница? URL: <https://lantorg.com/article/akkumulyatory-gelevye-multigelevye-i-agm-v-chem-raznitsa>
15. Коровин, Н. (2002). Никель-Металлгидридные аккумуляторы. *Электронные компоненты*, 4, 99–103.
16. Революция закончилась. Есть ли альтернатива литий-ионному аккумулятору? URL: <https://habr.com/ru/company/toshibarus/blog/462185/>
17. Стоимость содержания и ремонта электрокара Nissan LEAF в Украине. URL: https://elektrovesti.net/60052_stoimost-soderzhaniya-i-remonta-elektrokara-nissan-leaf-v-ukraine
18. Савиных, В. (2018). "Салют-7". Записки с "мертвой" станции. М.: Эксмо, 256.
19. Сидорович, В. (2017). К вопросу утилизации литий-ионных аккумуляторов. URL: <https://renen.ru/on-the-issue-of-recycling-lithium-ion-batteries/>
20. Повышающие DC-DC преобразователи. URL: https://bigl.ua/sc-2508878-Povyshayuschie-dc-dc-preobrazovateli?gclid=Cj0KCQiA15zwBRCTARIsAIrukDPxFVpQB7Wt12gea7RxyOYPa4sPn-8d9EL43rXdajAdkeURDetWB58aAnvDEALw_wcB
21. DC/DC-преобразователи мощностью 1 кВт серии FXW от Calex. URL: <https://power-e.ru/components/dc-dc-preobrazovateli-moshhnostyu-1-kvt-serii-fxw-ot-calex/>
22. GaN used to Design 2.5MHz 3kW Resonant DC-DC (2016). URL: <https://www.radiolocman.com/news/new.html?di=276561>
23. Царенко, А., Серегин, Д. (2006). К вопросу построения мощных DC-DC преобразователей напряжения, питающихся от низковольтных сетей. *Силовая Электроника*, 3, 68–72.

24. Loo, S., Keller, K. (2004). Single-cell Battery Discharge Characteristics Using the TPS61070 Boost Converter. Application Report SLVA194–AUGUST 2004. URL: <http://www.ti.com/lit/an/slva194/slva194.pdf>
25. Создание высокоэффективных компактных преобразователей постоянного напряжения для переносной аппаратуры, питаемой от одного 1,5В элемента. URL: http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/publ/powersupply/bat_1-5.htm
26. Васильев, А. (2014). Конденсатор вместо аккумулятора. URL: <https://www.elec.ru/articles/kondensator-vmesto-akkumulyatora/>
27. Деньщиков, К. К. (2013). Суперконденсаторы: принцип построения, техника и применения. Ученый совет ОИВТ РАН.
28. Oakes, L., Westover, A., Mares, J. W., Chatterjee, S., Erwin, W. R., Bardhan, R. et. al. (2013). Surface engineered porous silicon for stable, high performance electrochemical supercapacitors. Scientific Reports, 3 (1). doi: <https://doi.org/10.1038/srep03020>
29. Yan, X., Tai, Z., Chen, J., Xue, Q. (2011). Fabrication of carbon nanofiber–polyaniline composite flexible paper for supercapacitor. Nanoscale, 3 (1), 212–216. doi: <https://doi.org/10.1039/c0nr00470g>
30. Пентегов, И. В. (1996). К теории тесловских процессов зарядки емкостных накопителей энергии. Электричество, 6, 42–47.
31. Деспотули, А. Л., Андреева, А. В. (2003). Создание новых типов тонкопленочных суперконденсаторов для микросистемной техники и микро(нано) электроники. Микросистемная техника, 11, 2–10.
32. Деспотули, А. Л., Андреева, А. В., Веденеев, В. В., Аристов, В. В., Мальцев, П. П. (2006). Высокоёмкие конденсаторы для ультраплотного поверхностного монтажа. Нано- и микросистемная техника, 3, 30–37.
33. Меджахед, Д., Цветков, Д. (2009). «Идеальные диоды» от компании STMicroelectronics. Новости электроники, 14, 23–25.
34. Низковольтные MOSFETs для сильноточных применений и жестких условий (2014). URL: <https://www.compel.ru/lib/65023>
35. Башкиров, В. (2008). Новые семейства высокоэффективных низковольтных MOSFET. Новости электроники, 18, 29–32.