

Ю. В. КОЖУШКО, к. т. н. О. Ф. БОНДАРЕНКО

Україна, Національний технічний університет України
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
 E-mail: kozhushko_yullia@ukr.net, bondarenkoaf@gmail.com

БАЛАНСУВАННЯ НАПРУГИ МОДУЛЬНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

Запропоновано схемне рішення для балансування напруги модульного накопичувача енергії на основі суперконденсаторів джерела живлення для контактного мікрозварювання. Наведено формули для розрахунку вузлів керування окремої комірки суперконденсаторного модуля. Проведено моделювання роботи схеми балансування напруги модуля та отримано часові діаграми процесу заряду суперконденсатора. Підтверджено працездатність та ефективність запропонованого рішення.

Ключові слова: контактне мікрозварювання, накопичувач енергії, суперконденсатор, балансування напруги, імпульсний перетворювач.

Контактне зварювання на сьогодні є ефективною технологією отримання нероз'ємних з'єднань металевих виробів та конструкцій, яке не потребує допоміжних матеріалів та речовин і характеризується високою продуктивністю, малими зварювальними деформаціями конструкцій, відсутністю шкідливих викидів [1]. Характерні для контактного зварювання амплітуди струму знаходяться в діапазоні від сотень ампер до одиниць кілоампер і залежать від матеріалу та конфігурації зварюваних деталей. Зварювання може здійснюватись як змінним, так і постійним струмом, при цьому зварюванню постійним струмом надається перевага при з'єднанні деталей відповідального призначення. Це пов'язане з тим, що джерела живлення постійного струму здатні здійснювати більш точне формування зварювального струму і, відповідно, забезпечувати вищу якість з'єднань [2].

З точки зору енергоспоживання, контактне зварювання має певні особливості. Енергія для зварювання споживається імпульсами, тривалість яких є дуже малою на фоні пауз між ними і може складати від одиниць до десятків мілісекунд [3].

Побудова джерел постійного струму для зварювальних установок традиційно виконується із застосуванням топології з прямим споживанням енергії з мережі (Direct Energy). Приклад такої топології наведений на **рис. 1**. Принцип її роботи полягає в наступному. Вхідний випрям-

ляч із фільтром випрямляє та згладжує мережеву напругу. Інвертор перетворює постійний струм, що подається на його вхід, на змінний з частотою 50–100 кГц. Високочастотний знижувальний трансформатор забезпечує формування струму в кілька сотень ампер. Вихідний випрямляч із фільтром випрямляє та згладжує високочастотний змінний струм. Система керування забезпечує функцію регулювання зварювального струму.

Джерела живлення зварювальної установки, побудовані за топологією Direct Energy, зазвичай характеризуються низькою електромагнітною сумісністю з мережею, оскільки кола корекції та фільтрації не можуть повністю знівелювати вплив установки на мережу.

Для зменшення впливу на мережу бажаним є використання для живлення зварювальних установок джерел, виконаних за топологією з проміжним накопиченням енергії (Energy Storage). Така топологія сама по собі забезпечує кращу електромагнітну сумісність з мережею, а також надає більше можливостей для її поліпшення

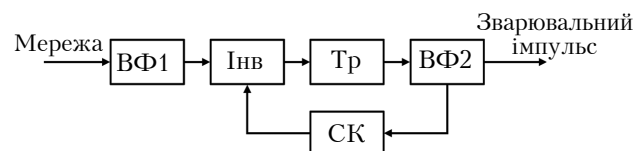


Рис. 1. Структурна схема джерела живлення постійного струму з прямим споживанням енергії з мережі (Direct Energy):

ВФ1 – вхідний випрямляч із фільтром; Інв – інвертор; Тр – трансформатор; ВФ2 – вихідний випрямляч із фільтром; СК – система керування

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ №0116U006924).

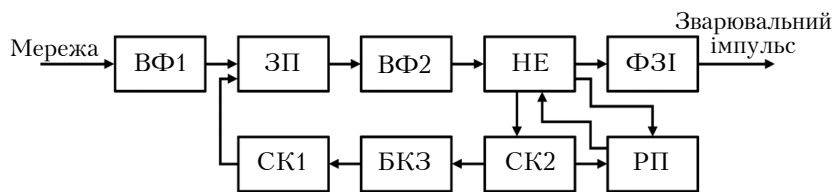


Рис. 2. Структурна схема джерела живлення постійного струму з проміжним накопиченням енергії (Energy Storage):

ВФ1 – вхідний випрямляч із фільтром; ЗП – зворотногодовий перетворювач; НЕ – накопичувач енергії; РП – розрядний перетворювач; ВФ2 – вихідний випрямляч із фільтром; СК1 – система керування зарядного пристрою; СК2 – система керування розрядного перетворювача; БКЗ – блок керування зарядом накопичувача енергії; ФЗІ – формувач зварювального імпульсу

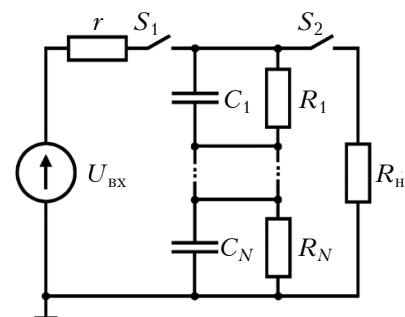


Рис. 3. Еквівалентна схема модуля з суперконденсаторами [5]

шляхом застосування кіл корекції та фільтрації. Варіант структури джерела живлення, побудованого за топологією Energy Storage, наведено на **рис. 2**. Принцип роботи цієї схеми полягає в наступному. Змінна напруга мережі живлення випрямляється вхідним випрямлячем і згладжується фільтром. Зворотногодовий перетворювач нормалізує напругу до рівня, необхідного для зарядження суперконденсаторного модуля. Система керування зарядного пристрою здійснює керування напругою заряду, змінюючи ширину високочастотних імпульсів.

Система керування розрядного перетворювача відслідковує рівень напруги на елементах накопичувача енергії і в момент досягнення певного значення напруги дозволяє роботу розрядного перетворювача. При досягненні напругою на кожному елементі накопичувача номінального значення блок керування зарядом дозволяє роботу зворотногодового перетворювача і накопичувач відключається від мережі живлення. Блок формування зварювального імпульсу здійснює розряд модуля за певним законом, формуючи таким чином зварювальний імпульс.

Отже, використання топології з проміжним накопиченням енергії дозволяє зменшити негативний вплив зварювальних установок на промислову мережу живлення. Проте побудова джерел живлення для установок контактного зварювання за топологією Energy Storage ще донедавна мала невисоку розповсюдженість, оскільки передбачала застосування громіздких акумуляторних батарей та електролітичних конденсаторів для накопичення енергії, що позначалося на масогабаритних показниках. Поява і розвиток нового типу накопичувачів – суперконденсаторів – здатні суттєво покращити масогабаритні показники зварювальних установок і посприяти розширенню застосування топології з проміжним накопиченням енергії для побудови

джерел живлення установок контактного зварювання [3].

Завдяки великій ємності, низькому струму саморозрядження, широкому діапазону робочих температур і тривалому терміну експлуатації суперконденсатори широко застосовуються в сучасних електронних пристроях [4]. Основним недоліком суперконденсаторів є низьке значення номінальної напруги, яке зазвичай не перевищує 3 В. Для отримання більш значної напруги створюють модулі з послідовно з'єднаних накопичувачів. При цьому, в процесі зарядження за рахунок струму саморозрядження та відхилень від номінальної величини ємності напруга на окремих суперконденсаторах модуля не є однаковою, що може спровокувати вихід з ладу одного або кількох елементів [4–7].

Метою даної роботи є створення системи балансування напруги суперконденсаторного модуля джерела постійного струму для контактного мікрозварювання.

Балансування напруги суперконденсаторного модуля

Еквівалентна схема модуля, до складу якого входять N суперконденсаторів, з колами заряду та розряду зображена на **рис. 3**. Загальна ємність такого модуля визначається як

$$C = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_N} \right)^{-1}, \quad (1)$$

де C_1, C_2, \dots, C_N – ємність суперконденсаторів.

Кожний суперконденсатор з номінальною напругою $U_{ном}$ має еквівалентний опір втрат. В перший момент часу всі суперконденсатори розряджені, ключі $S1$ та $S2$ розімкнені. При замиканні ключа $S1$ починається процес зарядження суперконденсаторів від джерела електрорушійної сили ($U_{вх} = U_{ном}$) з внутрішнім опором r . Через суперконденсатори протікає струм I_{max} , що до-

рівнює відношенню вхідної напруги до внутрішнього опору.

По мірі збільшення накопиченого заряду на суперконденсаторах струм зменшується за експоненційним законом:

$$i(t) = I_{\max} \cdot \exp(t/\tau), \quad (2)$$

де τ – стала часу, $\tau = rC$;

C – номінальна ємність модуля суперконденсаторів;
 I_{\max} – максимальний струм модуля.

За рахунок неоднакового значення ємностей суперконденсаторів величина напруги на них в загальному випадку буде неоднаковою і визначатиметься за формулою

$$U_k(t) = \frac{1}{C_k} \int_0^t i(t) dt, \quad (3)$$

де U_k, C_k – напруга та ємність k -го суперконденсатора відповідно.

Якщо ємність суперконденсатора є меншою за номінальне значення, його напруга буде перевищувати номінальне значення, а якщо більшою – суперконденсатор не встигне зарядитись до $U_{\text{ном}}$.

Аналогічне співвідношення діє для процесу розряду модуля через замкнений ключ $S2$ і опір навантаження R_n при розімкненому ключі $S1$. За умови, що всі суперконденсатори були заряджені до номінальної напруги, після повного розрядження модуля суперконденсатори з ємністю $C > C_{\text{ном}}$ зберігають деякий позитивний заряд, а суперконденсатори з $C < C_{\text{ном}}$ є негативно зарядженими, тобто відбувається зміна полярності, яка може призвести до деградації характеристик елементів.

Отже, неоднакові значення ємності суперконденсаторів у модулі обумовлюють дисбаланс напруги. Для усунення цього явища застосовують методи активного і пасивного балансування модуля суперконденсаторів.

Суть пасивного методу полягає в паралельно-му підключенні шунтуючих резисторів до кожної комірки модуля. В результаті утворюється резистивний дільник, який вирівнює потенціали між окремими комірками [4–6]. Недоліком пасивного методу є те, що шунтуючі резистори споживають енергію весь час, доки на суперконденсаторах є заряд, хоча необхідність в шунтуванні виникає тільки при перенапрузі чи при переполюсуванні. Цей недолік усувається методами активного балансування, зокрема за допомогою схеми, наведеної на **рис. 4** [8].

Індуктивність первинної обмотки імпульсного зворотноходового трансформатора визначає кількість енергії, накопиченої в трансформаторі. Обмотка трансформатора w_2 служить зворотнім зв'язком для збудження генерації імпульсів ке-

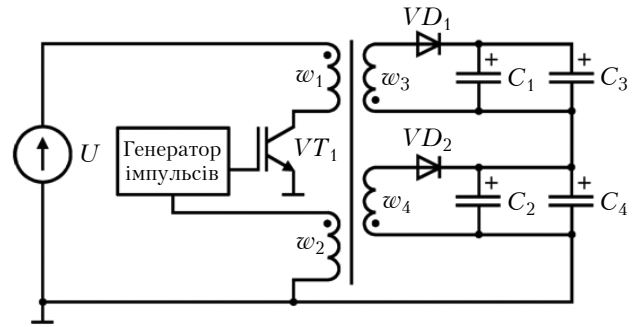


Рис. 4. Схема активного балансування

рування силовим ключем у схемі. Вторинні обмотки зворотного ходу w_3 і w_4 підключаються до елемента модуля через діоди $VD1$ та $VD2$. Полярність підключення обмоток і діодів обирається таким чином, щоб не здійснювався вплив на процес накопичення енергії в трансформаторі. Після накопичення енергії первинною обмоткою трансформатора транзистор закривається за рахунок позитивного зворотного зв'язку, і на обмотках трансформатора змінюється полярність напруги. Починається другий такт роботи схеми, коли в первинному колі зникає струм, за рахунок взаємної індукції струм з'являється одночасно у вторинних обмотках. Оскільки напруга на елементах модуля є однаковою, значення падіння напруги на однотипних діодах теж можна вважати однаковими.

Амплітуди струму вторинних обмоток є однаковими, а їх сума дорівнює амплітуді струму первинної обмотки:

$$i_1 w_1 = i_3 w_3 + i_4 w_4, \quad (4)$$

де i_1, i_3, i_4 – струм у відповідних обмотках трансформатора, а w_1, w_3, w_4 – кількість витків в них.

За умови наявності різниці напруги на суперконденсаторах 0,2 В лише одна обмотка w_3 приймає участь в процесі розмагнічення трансформатора. Рівень напруги 0,2 В відповідає напрузі відсічки діоду Шоткі, тому струм в діоді $VD2$ відсутній. Амплітуда струму обмотки w_4 дорівнює амплітуді струму вторинної обмотки, отже виконується рівність (4), оскільки струм в обмотці w_3 дорівнює нулю. По мірі зменшення різниці напруги на суперконденсаторах, з'являється струм в обмотці w_3 .

Отже, при розмагнічуванні трансформатора напруга на всіх обмотках з рівною кількістю витків є однаковою, а її значення визначається суперконденсатором з найменшою напругою і падінням напруги на діоді, через який протікає струм розмагнічування трансформатора. Така

особливість схеми зворотного трансформатора дозволяє визначати мінімальну напругу на елементах в модулі послідовно з'єднаних суперконденсаторів за допомогою додаткової обмотки, яка має таку ж кількість витків, як і вторинні обмотки [8]. Точність балансування напруги в схемі визначається напругою відсічки діоду.

Схему, в якій енергія більш заряджених комірок використовується для зарядження комірок з нижчою напругою, представлено на **рис. 5**. Формування зарядного струму від промислової мережі забезпечує зарядний блок. Драйвери призначені для узгодження кола керування силовим ключем з системою управління, високочастотний інвертор — для паралельного живлення узгоджувальних трансформаторів для вирівнювання напруги між парними та непарними групами комірок задавального генератора, виконаного за схемою двофазного ШІМ-контролера.

Якщо напруга на будь-якому з суперконденсаторів модуля буде вищою або нижчою за середню напругу, то через обмотки узгоджувальних трансформаторів $Tr1...Tr(n+1)$ та відкриті ключі $K1...Kn$ почне протікати струм, що призведе до вирівнювання напруги на суперконденсаторах модуля. Інвертор працює синхронно з комутацією ключів і по чергову здійснює перезаряд парної та непарної групи комірок, вирівнюючи напругу між групами. В результаті роботи схеми напруга на комірках модуля вирівнюється і струм зменшується до мінімального значення. Струм в первинних обмотках трансформаторів знижується до значень, які визначаються втратами холостого ходу трансформаторів [9].

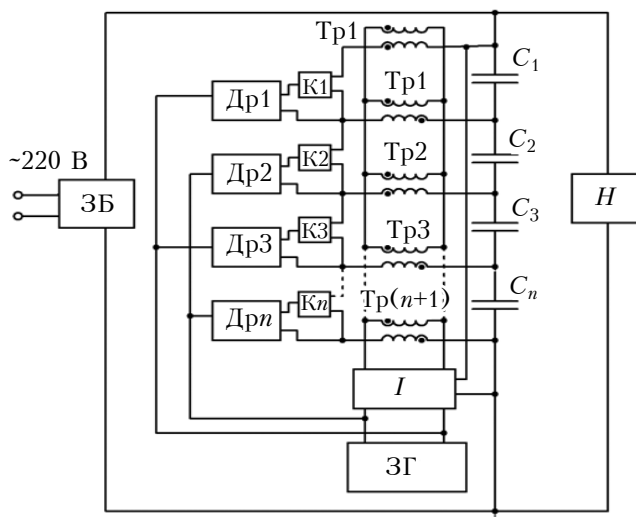


Рис. 5. Схема з використанням енергії більш заряджених комірок для заряду комірок з нижчою напругою: ЗБ — зарядний блок; Tr — узгоджувальні трансформатори; K — силові електронні ключі; $Др$ — драйвери; ЗГ — задавальний генератор; I — високочастотний інвертор; H — навантаження

Через розбіжності параметрів трансформаторів знижується точність балансування напруги модуля. Спочатку суперконденсаторний модуль заряджається не до максимальної напруги, оскільки через відхилення параметрів суперконденсаторів напруга на певному елементі модуля може перевищувати максимальну рекомендовану напругу при зарядженні до номінальної напруги самого модуля. Тому повне зарядження модуля відбувається в кілька етапів, оскільки схема вирівнює напругу між групами суперконденсаторів, а не контролює напругу кожного суперконденсатора окремо.

На **рис. 6** представлено розроблену авторами схему, яка позбавлена вказаного недоліку та дозволяє забезпечити повернення надлишкової енергії і більш високий рівень точності балансування напруги окремо для кожного суперконденсатора модуля. Схема відображує балансування двох сусідніх суперконденсаторів модуля. В загальному випадку для балансування модуля з N суперконденсаторів застосовується N ідентичних комірок балансування, підключених паралельно до кожного з них.

Розглянемо принцип дії схеми та призначення її елементів на прикладі комірки суперконденсатора C_{scap1} .

При досягненні напругою на суперконденсаторі C_{scap1} номінального значення відповідна система керування, що складається з компаратора $DA1$, ШІМ-контролера $DA2$ та елементів їх об'язки, дозволяє роботу розрядного перетворювача на транзисторі $VT1$. Після цього суперконденсатор C_{scap1} стає зашунтованим, а надлишкова енергія повертається в джерело через обмотку w_3 трансформатора $TV1$ та діод $VD3$. Такий процес триває до моменту досягнення на кожному суперконденсаторі модуля номінальної напруги. У цей момент блок керування зарядом (на схемі рис. 6 не показаний) забороняє роботу зворотного перетворювача силової частини зарядного пристрою і суперконденсаторний модуль відключається від мережі.

Для керування рівнем напруги суперконденсатора C_{scap1} використовується схема компаратора з гістерезисом, яка включає елементи $DA1$, $VD1$, $R1...R7$. Стабілітрон $VD1$ та резистори $R3$, $R4$, $R6$ забезпечують на неінверсному вході компаратора опорну напругу, значення якої визначається як

$$U_{ref} = \frac{n+1}{n} U_{swt}, \quad (5)$$

де n — коефіцієнт співвідношення значень опору резистивного дільника компаратора;

U_{swt} — напруга спрацювання компаратора.

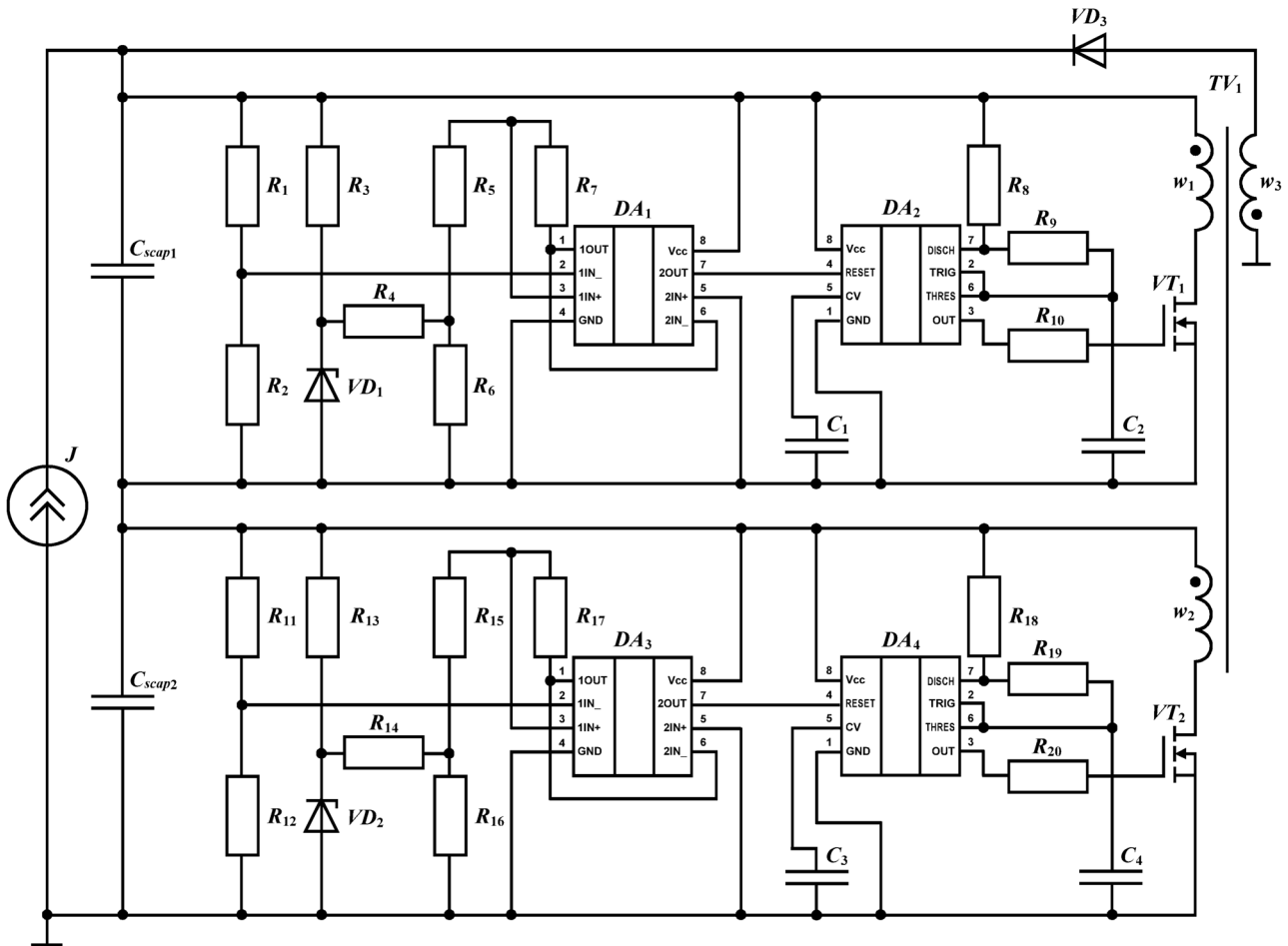


Рис. 6. Схема балансування двох сусідніх суперконденсаторів модуля з поверненням надлишкової енергії

Напруга спрацювання компаратора визначається як

$$U_{swt} = \frac{U_{Hswt} - U_{Lswt}}{2}, \quad (6)$$

де U_{Hswt} , U_{Lswt} – відповідно, верхня та нижня межі спрацювання компаратора, що обираються згідно з вимогами до точності балансування напруги суперконденсаторного модуля.

Коефіцієнт n розраховується за допомогою виразу

$$n = \frac{U_{vcc+} - U_{vcc-}}{U_{hys}} - 1, \quad (7)$$

де U_{vcc+} , U_{vcc-} – напруга джерела живлення компаратора;

U_{hys} – ширина петлі гістерезису компаратора, $U_{hys} = U_{Hswt} - U_{Lswt}$;

U_{Hswt} , U_{Lswt} – відповідно, верхня та нижня межі спрацювання компаратора.

Резистори $R5$, $R7$ реалізують позитивний зворотний зв'язок. З ділянки напруги $R1$, $R2$ на інверсний вхід компаратора надходить напруга, пропорційна напрузі на суперконденсаторі C_{scap1} . Якщо ця напруга перевищить номіналь-

не значення, напруга на інверсному вході компаратора перевищить значення напруги на неінверсному вході, і на виході встановиться низький рівень напруги. Напруга з виходу 1OUT подається на інверсний вхід 1IN-. Таким чином, з виходу 2OUT інвертований сигнал подається на вхід RESET ШІМ-контролера, тим самим дозволяючи його роботу.

Частота генерування прямокутних імпульсів залежить від співвідношення величин опору резисторів $R8$ і $R9$ та ємності конденсатора $C2$ і визначається як

$$f = (\ln 2 \cdot (R_8 + 2R_9) \cdot C_2)^{-1}, \quad (8)$$

де R_8 , R_9 – опір відповідних резисторів;
 C_2 – ємність конденсатора $C2$.

Імітаційне моделювання роботи комірки балансування напруги

Моделювання роботи схеми балансування суперконденсаторного модуля здійснено в пакеті LTspice [10]. Схему розробленої моделі представлено на рис. 7, а її параметри – в таблиці. Як схемні елементи використано компоненти бібліотеки Component, Comparators, Misc.

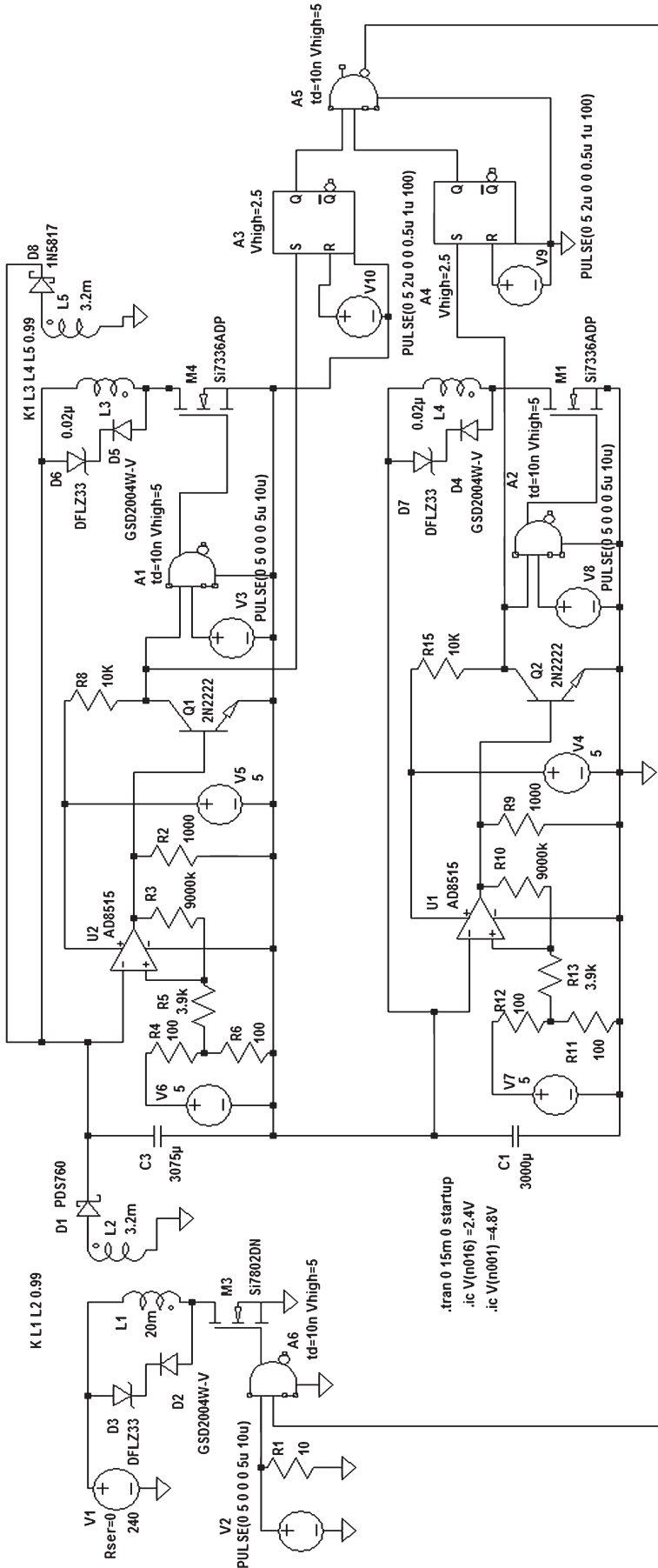


Рис. 7. Модель схеми балансування суперконденсаторного модуля, яку створено в пакеті LTspice

Параметри розробленої моделі

Напруга первинного джерела живлення, В	240
Частота перетворення, кГц	100
Напруга заряду модуля, В	5
Ємність суперконденсаторів модуля, Ф	350
Максимальний час балансування напруги суперконденсаторів модуля, мс	5
Відхилення напруги на суперконденсаторах, В	±0,08

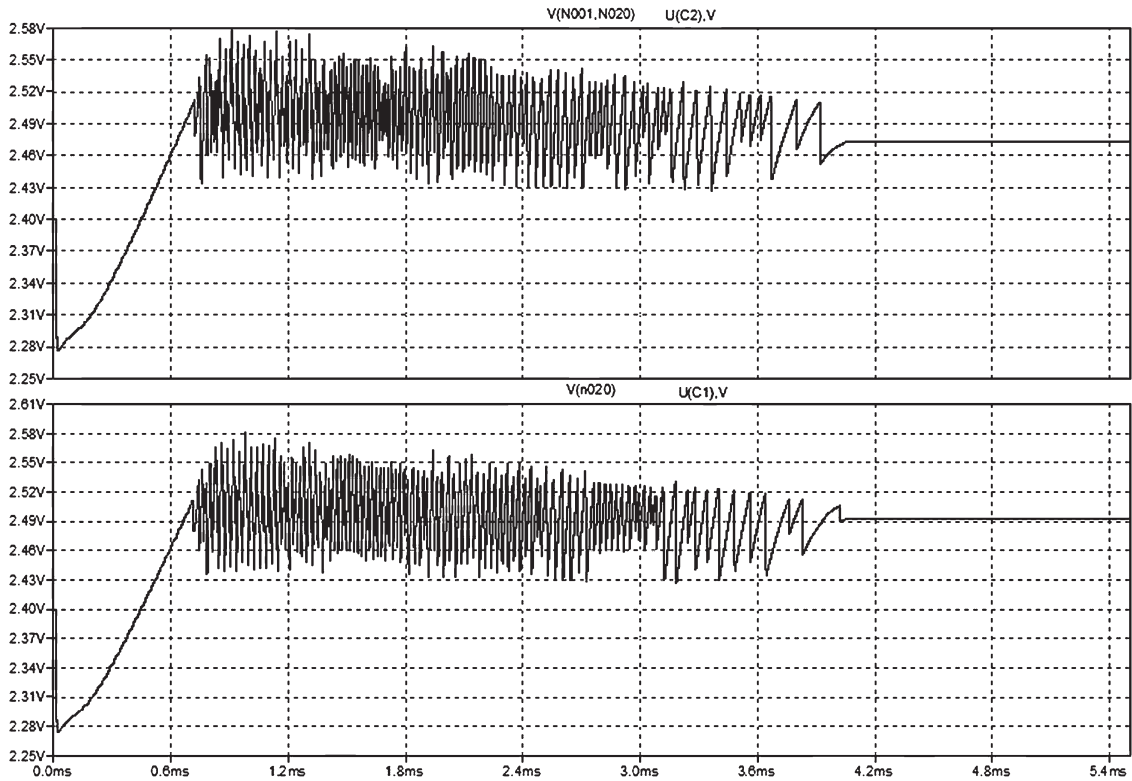


Рис. 8. Діаграми напруги на суперконденсаторах двох сусідніх комірок під час балансування

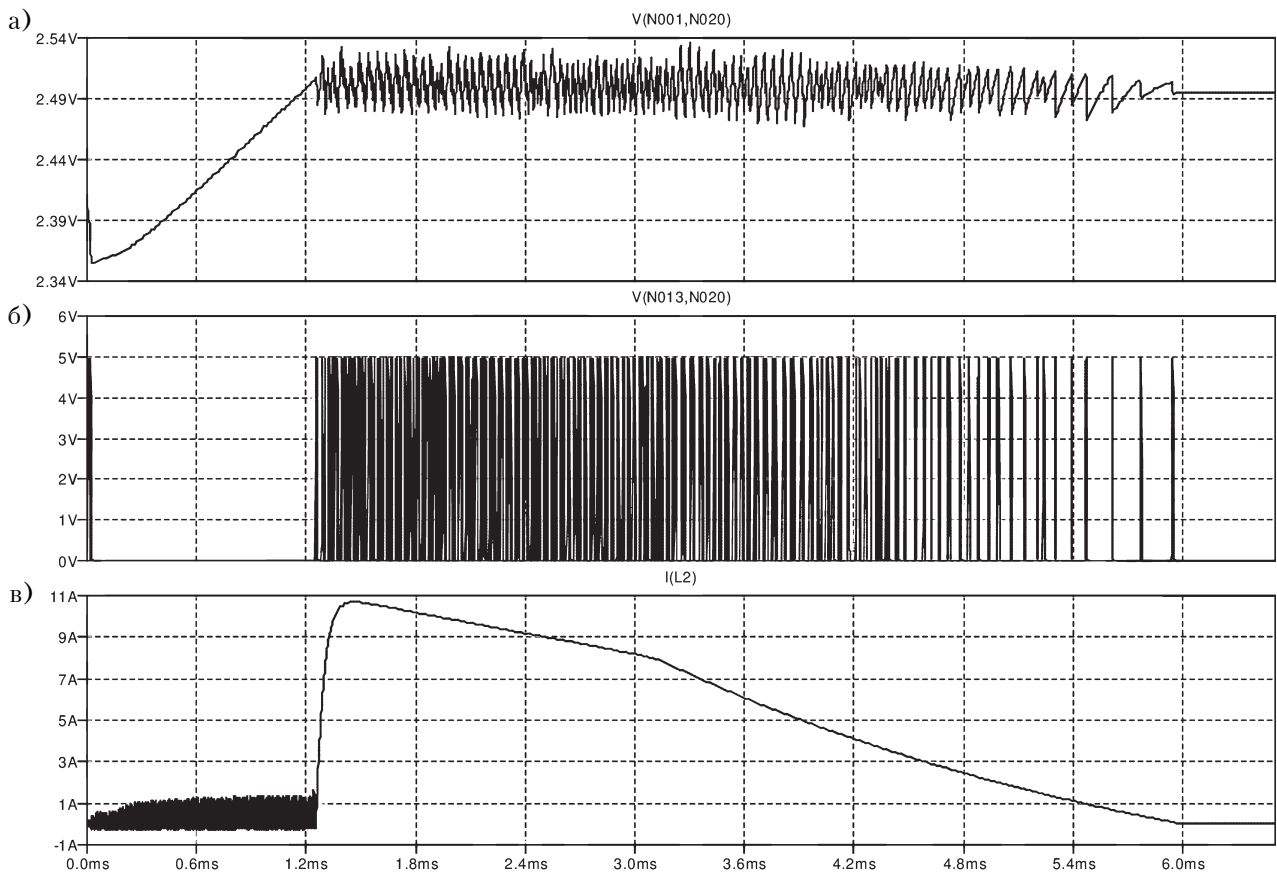


Рис. 9. Діаграми напруги на суперконденсаторі (а), напруги керування (б) та струму індуктивності L1 (в) під час балансування однієї комірки

На **рис. 8** представлено отримані в результаті моделювання діаграми роботи наведених на **рис. 6** двох сусідніх комірок, які підтверджують працездатність запропонованої схеми балансування, оскільки рівень напруги на суперконденсаторах не виходить за встановлені межі. З діаграм видно, що при досягненні напругою на суперконденсаторі 2,5 В починається процес балансування, суперконденсатори заряджаються і розряджаються в межах, які визначено шириною петлі гістерезису компаратора (**рис. 9**). Після встановлення на суперконденсаторі номінальної напруги починається процес балансування (**рис. 9, а**). На виході компаратора U_2 встановлюється напруга низького рівня. Сигнал з виходу компаратора U_2 (див. **рис. 7**) через інвертор на транзисторі Q_1 подається на елемент A_1 , з виходу якого на силовий ключ M_4 подаються високочастотні сигнали керування (**рис. 9, б**). При відкритому ключі суперконденсатор C_3 розряджається через обмотку L_3 . Якщо суперконденсатор C_1 теж зарядився до номінального значення, коло заряду модуля припиняє роботу під дією керуючого імпульсу системи контролю заряду, зібраної на елементах A_3, A_4, A_5, A_6 .

Через активні втрати у напівпровідникових елементах схеми енергія, що була накопичена в обмотках трансформаторів $K-L_1-L_2$ та $K_1-L_3-L_4-L_5$, поступово розсіюється і процес балансування припиняється (**рис. 9, в**).

Висновки

Запропонована схема балансування напруги суперконденсаторного модулю показала свою працездатність та ефективність. Схема дозволяє із заданою точністю здійснювати вирівнювання напруги в модулях з N -ною кількістю суперконденсаторів, що підтверджено результатами моделювання. Перевагою запропонованого схемного рішення є можливість отримання високого коефіцієнту корисної дії, оскільки надлишкова енергія комірки модуля не розсіюється у вигляді тепла, а повертається до джерела живлення. Також перевагою такої схеми є те, що балансування напруги кожного суперконденсатора модуля здійснюється окремо, не-

залежно від стану інших, що запобігає передчасному старінню модуля та скороченню кількості зарядно-розрядних циклів.

Таким чином, запропонована схема балансування напруги може бути рекомендована для забезпечення ефективної роботи суперконденсаторного модуля при побудові джерел живлення з проміжним накопиченням енергії установок контактної мікросварювання.

ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА

1. Бондаренко Ю.В. Багатокомірковий транзисторний перетворювач зі спільним використанням безперервного та імпульсного керування для контактної мікросварювання / Дис. канд. техн. наук. — Алчевськ, 2012 — С. 148.
2. Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Effective circuit topology of DC power supply for micro resistance welding // IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS-2014). — 2014. — P. 68–70. <http://dx.doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874204>
3. Сафронов П.С., Бондаренко Ю.В., Бондаренко О.Ф. та ін. Поліпшення електромагнітної сумісності джерел живлення для систем контактної зварювання // Технічна електродинаміка. — 2014. — № 5. — С. 89–91.
4. Балыкшов А. Ионисторы // Электронные компоненты. — 2005. — № 11. — С. 91–97.
5. Разуваев Ю.Ю., Чайка М.Ю., Агупов В.В. и др. Методы балансировки напряжений суперконденсаторных элементов // Вестник Воронежского государственного университета. — 2012. — № 7. — С. 101–105.
6. Keshmiri V., Westerberg D., Andersson Ersman P. et al. A silicon-organic hybrid voltage equalizer for supercapacitor balancing // IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst. — 2017. — Vol. 7, no. 1. — P. 114–122. <http://dx.doi.org/10.1109/JETCAS.2016.2612724>
7. Castano S., Gauchia L., Sanz-Feito J. Effect of packaging on supercapacitors strings modeling: proposal of functional unit defined around balancing circuit // IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol. — 2013. — Vol. 3, №. 8. — P. 1390–1398. <http://dx.doi.org/10.1109/TCSPMT.2013.2252956>
8. Сизов М. Устройство для выравнивания напряжений на элементах батареи суперконденсаторов // Современная электроника. — 2013. — № 1. — С. 40–43.
9. Korotynsky A.E., Drachenko N.P., Shapka V.A. Peculiarities of application of supercapacitors in devices for pulse welding technologies // The Paton Welding Journal. — 2014. — N 9. — P. 34–38. <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2014.09.05>
10. Сохор Ю. Н. Моделирование устройств в пакете LTspice/SwCAD. — Псков: «Издательство ППИ», 2008.

*Дата надходження рукопису
до редакції 25.09 2017 р.*

Ю. В. КОЖУШКО, к. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО

Украина, Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»
E-mail: kozhushko_yullia@ukr.net, bondarenkoaf@gmail.com

БАЛАНСИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ МОДУЛЬНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

Предложено схемное решение для балансировки напряжения модульного накопителя энергии на основе суперконденсаторов источника питания для контактной микросварки. Приведены формулы для расче-

та узлов управления отдельной ячейки суперконденсаторного модуля. Проведено моделирование работы схемы балансировки напряжения модуля и получены временные диаграммы процесса заряда суперконденсатора. Подтверждены работоспособность и эффективность предложенного решения.

Ключевые слова: контактная микросварка, накопитель энергии, суперконденсатор, балансировка напряжения, импульсный преобразователь.

DOI: 10.15222/ТКЕА2017.4-5.15
UDC 669.054

Yu. V. KOZHUSHKO, O. F. BONDARENKO
Ukraine, National Technical University of Ukraine
«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
E-mail: kozhushko_yullia@ukr.net, bondarenkoaf@gmail.com

VOLTAGE BALANCING IN MODULAR ENERGY STORAGE OF POWER SUPPLY FOR MICRO RESISTANCE WELDING

Micro resistance welding is one of the most effective ways to obtain permanent joints of metal parts. The quality of welded joints strongly depends on the characteristics of the power supply of welding equipment. The power supplies for micro resistance welding based on Energy Storage topology have a softer impact on the network than the ones based on Direct Energy topology. The use of supercapacitors for Energy Storage type power supplies makes it possible to reduce the dimensions of welding equipment and to improve its technical parameters. However, the feature of the supercapacitors is low value of the nominal voltage, which usually does not exceed 3 V. To provide higher voltage, the modules of supercapacitors connected in series are designed. In order to extend the life time of such modules, a voltage balancing system is required.

A circuit for balancing the voltage of a modular supercapacitor energy storage of a power supply for micro resistance welding is proposed. The fragments of calculation of control units of a supercapacitor module cell are given. The simulation of the balancing circuit operation is carried out and time charts of the supercapacitor charge process are obtained. The operability and effectiveness of the proposed solution is confirmed. The advantage of the proposed circuit is the possibility of obtaining the high efficiency because of returning the excessive energy of the module cell back into the power supply.

Key words: micro resistance welding, energy storage, supercapacitor, voltage balancing, pulse converter.

REFERENCES

1. Bondarenko Iu.V. *Multicell-type transistor converter with combined continuous and pulse control for micro resistance welding, Ph. D. thesis.* Alchevsk, 2012, p. 148. (Ukr)
2. Bondarenko O.F., Bondarenko I.V., Safronov P.S., Sydorets V.M. Effective circuit topology of dc power supply for micro resistance welding. *Proceedings of 2014 IEEE International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kiev, Ukraine, 2014. <http://dx.doi.org/10.1109/IEPS.2014.6874204>
3. Safronov P.S., Bondarenko Iu.V., Bondarenko O.F., Sidorets V.M., Kucherenko D.V. Increase of electromagnetic compatibility of power supplies for resistance welding. *Technical Electrodynamics*, 2014, no. 5, pp. 89-91. (Ukr)
4. Balykshov A. [Ionistors]. *Elektronnye komponenty*, 2005, no. 11, pp. 91-97. (Rus)
5. Razuvaev Yu.Yu., Chajka M.Yu., Agupov V.V., Gorshkov V.S., Silyutin D.E. [Methods of voltage balancing for the supercapacitors]. *Vestnik of Voronezh State Technical University*, 2012, no. 7-2, pp. 101-105. (Rus)
6. Keshmiri V., Westerberg D., Andersson Ersman P., Sandberg M., Forchheimer R., Tu D. A silicon-organic hybrid voltage equalizer for supercapacitor balancing. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, 2017, vol. 7, no. 1, pp. 114-122. <http://dx.doi.org/10.1109/JETCAS.2016.2612724>
7. Castano S., Gauchia L., Sanz-Feito J. Effect of Packaging on Supercapacitors Strings Modeling: Proposal of Functional Unit Defined Around Balancing Circuit. *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, 2013, vol. 3, no. 8, pp. 1390-1398. <http://dx.doi.org/10.1109/TCPMT.2013.2252956>
8. Sizov M. [The device for equalizing the voltages on the cells of a supercapacitor battery]. *Modern electronics*, 2013, no. 1, pp. 40-43. (Rus)
9. Korotynsky A.E., Drachenko N.P., Shapka V.A. Peculiarities of application of supercapacitors in devices for pulse welding technologies. *The Paton Welding Journal*, 2014, no. 9, pp. 34-38. <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2014.09.05>
10. Sokhor Yu.N. [Device simulation using LTspice/SwCAD software]. Publishing House of PPI, Pskov, Russia, 2008, p. 165. (Rus)