

О.Ф. Бондаренко, Ю.В. Кожушко, Т.О. Карбівська, Є.О. Желязков, П.С. Сафронов

## СТІЙКІСТЬ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРА ТА АКУМУЛЯТОРНОЇ БАТАРЕЇ

*В роботі розглянуто комбінований ємнісний накопичувач енергії на основі акумуляторної батареї (АБ) та суперконденсатора джерела живлення для установки контактної мікрозварювання. Для забезпечення рівномірного споживання струму від АБ обрано напівактивну топологію АБ та перетворювач SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter). Методом усереднення в просторі змінних стану аналітично отримано математичну модель системи. З метою проведення аналізу стійкості комбінованого накопичувача при різних значеннях коефіцієнта заповнення імпульсів, струму навантаження та напруги АБ отримано передавальну характеристику системи керування. Результати аналізу показали, що запропонована система є стійкою при зміні параметрів у встановлених межах. Бібл. 10, табл. 1, рис. 8.*

**Ключові слова:** комбінований ємнісний накопичувач енергії, SEPIC перетворювач, метод усереднення в просторі змінних стану, аналіз стійкості, контактне мікрозварювання.

*В работе рассмотрен комбинированный емкостный накопитель энергии на основе аккумуляторной батареи (АБ) и суперконденсатора источника питания для установки контактной микросварки. Для обеспечения равномерного потребления тока от АБ были выбраны полупассивная топология АБ и преобразователь SEPIC (Single-Ended Primary-Inductor Converter). Методом усреднения в пространстве переменных состояния аналитически получена математическая модель системы. С целью проведения анализа устойчивости комбинированного накопителя при различных значениях коэффициента заполнения импульсов, тока нагрузки и напряжения АБ получена передаточная характеристика системы управления. Результаты анализа показали, что предложенная система является устойчивой при изменении параметров в установленных пределах. Библ. 10, табл. 1, рис. 8.*

**Ключевые слова:** комбинированный емкостный накопитель энергии, SEPIC преобразователь, метод усреднения в пространстве переменных состояния, анализ устойчивости, контактная микросварка.

**Вступ.** Переважна більшість портативних електронних пристроїв має складний нелінійний характер енергоспоживання. Джерела живлення таких пристроїв повинні забезпечувати середню та пікову потужність навантаження, забезпечувати прийнятні масогабаритні показники та високі показники енергоефективності [1]. Поширеним є використання різних типів акумуляторних батарей (АБ) в якості накопичувачів енергії для портативних систем. Проте значний піковий струм навантаження, який перевищує середній струм АБ, може спричинити значне скорочення їхнього терміну експлуатації. Використання комбінацій АБ та суперконденсаторів (СК) може бути ефективним вирішенням таких проблем [1].

Залежно від конфігурації накопичувачів та навантаження розрізняють три основні топології гібридних систем зберігання енергії: пасивна, напівактивна та активна топології [2]. Кожна з них знаходить широке використання в галузі електротранспорту, технології Microgrid, системах відновлювальної енергії [1-3]. Також використання комбінованих ємнісних накопичувачів є перспективним напрямом у галузі контактної мікрозварювання [4].

Контактне мікрозварювання є ефективною технологією отримання нероз'єднаних з'єднань, яка широко використовується в сучасному процесі виготовлення електронної апаратури. Технологія зварювання реалізується шляхом нагрівання деталей завдяки протіканню електричного струму великої амплітуди через місце їх контакту. Амплітуда струму зазвичай варіюється від сотень до тисяч ампер і залежить від форми та матеріалу зварюваних деталей [5].

Енергоспоживання зварювальних установок має специфічний характер, а саме споживання значної по-

тужності короткотривалими імпульсами у порівнянні з паузами між ними. Ці особливості енергоспоживання можуть бути причиною негативного впливу зварювальних апаратів на промислову мережу. Щоб знівелювати цей ефект, джерела живлення зварювальних установок розробляються за топологією з проміжним накопиченням енергії (Energy Storage Topology). Зазвичай джерела побудовані за такою топологією можна умовно розділити на три основні функціональні блоки:

- зарядний пристрій – забезпечує кращу електромагнітну сумісність з мережею та регулює споживання енергії для заряду проміжного накопичувача;
- проміжний ємнісний накопичувач – забезпечує необхідну енергію протягом зварювального циклу;
- формувач зварювальних імпульсів – забезпечує високу точність регулювання параметрів імпульсів зварювального струму [5].

Енергія для заряду таких накопичувачів споживається з мережі рівномірно, майже не спричиняючи на неї негативного впливу [5]. Комбінації СК, АБ та електролітичних конденсаторів можуть бути використані в якості проміжних накопичувачів енергії для Energy Storage Topology [4, 5].

Однак, незалежно від галузі використання, енергоефективність, стійкість та масогабаритні показники є ключовими параметрами при розробці систем на основі комбінованих накопичувачів енергії. Наявність накопичувача енергії великої ємності та нелінійного навантаження в перетворювачі постійного струму може негативно впливати на стійкість його роботи. Нестійкість системи може проявлятися у вигляді біфуркацій, хаотичних та квазіперіодичних режимів роботи [6]. Отже, мінімізація ймовірності виникнення подібних явищ є критичним завданням для запобіган-

ня виходу з ладу системи електроживлення та зменшення темпів деградації характеристик акумуляторних батарей та суперконденсаторів.

За останні роки велика кількість досліджень сконцентрована на методах оцінки стійкості перетворювачів постійного струму [6] та, зокрема, джерел живлення на основі комбінацій ємнісних накопичувачів [7]. Наприклад, у роботі [6] представлено докладний огляд різних методів оцінки стійкості систем на основі перетворювачів постійного струму, наведено особливості застосування, переваги та недоліки цих методів, а також приклади аналізу стійкості системи. Також проаналізовано різні математичні моделі, серед яких дискретні та неперервні в часі моделі перетворювачів постійного струму, що використовуються для дослідження стійкості за різними критеріями. Аналіз стійкості та ієрархічний контроль систем на основі комбінованих ємнісних накопичувачів енергії для Microgrid розглянуто в роботі [8].

Попри низку переваг систем керування для комбінованих ємнісних накопичувачів запропонованих у згаданих роботах [7, 8], завдання дослідження стійкості потребує особливої уваги для систем, що використовуються в технології контактного мікрозварювання, оскільки до такого обладнання висуваються підвищені вимоги надійності.

Отже, метою статті є аналіз стійкості гібридного накопичувача енергії джерела живлення для апарату контактного мікрозварювання.

### Математична модель комбінованої системи накопичення енергії.

Узагальнена структурна схема джерела живлення для установки контактного мікрозварювання побудована за топологією з проміжним накопиченням енергії наведена на рис. 1.

Зарядний пристрій споживає енергію від промислової мережі та забезпечує необхідне значення та форму зарядного струму, крім того необхідно забезпечити гальванічну розв'язку між мережею і навантаженням та корекцію коефіцієнту потужності. В якості накопичувача можуть бути використані електrolітичні конденсатори великої ємності, різні типи акумуляторних батарей, суперконденсатори та комбінації вищезгаданих накопичувачів. Формувач імпульсів на рисунку наведено у вигляді двох комірок, однак для забезпечення в навантаженні зварювального струму необхідної форми та амплітуди використовується N-комірок паралельно підключених до комбінованого накопичувача. У якості однієї такої комірки виступає понижуючий перетворювач (на рис. 1 позначено BUCK) [4, 5].

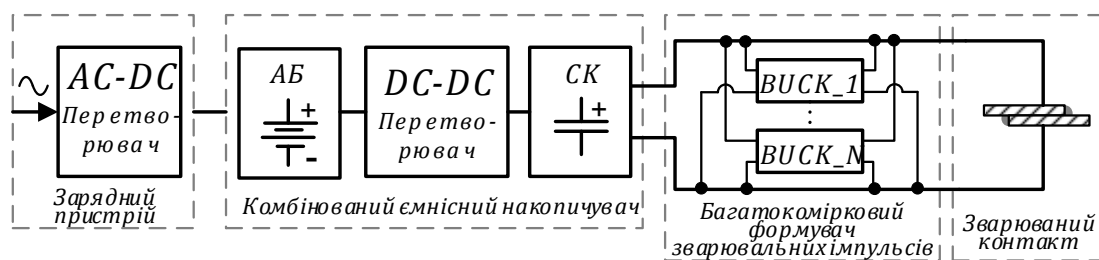


Рис. 1. Узагальнена структурна схема джерела живлення установки контактного мікрозварювання

На рис. 2 представлена запропонована система накопичення енергії на основі напівактивної топології АБ. В якості перетворювача постійного струму для контролю розподілу енергії між АБ та СК обрано SEPIC. Основною перевагою напівактивної топології АБ є споживання постійного струму від акумулятора з низьким рівнем пульсацій незважаючи на коливання струму навантаження. Ця особливість дозволяє значно підвищити продуктивність роботи акумулятора в умовах різкого зростання струму навантаження [2]. Перетворювач SEPIC обрано в якості допоміжного, оскільки забезпечується відповідність основним вимогам: споживання постійного струму від АБ; регулювання вихідного струму; широкий діапазон регулювання вихідної напруги. Така регульовальна характеристика необхідна для Li-іон акумулятора, оскільки напруга повністю зарядженої батареї дорівнює приблизно 4,2 В і поступово знижується до 2,5 В. Водночас для ефективної роботи вихідного формувача зварювальних імпульсів, що живиться від СК, його вхідна напруга повинна підтримуватися на рівні 2,7 В.

Основним джерелом статичних втрат в схемах низької потужності та з відносно великим середнім значенням вихідного струму є опір напівпровіднико-

вих ключів у стані провідності. Для підвищення енергоефективності запропонованої системи діод Шотткі, що зазвичай використовується в топології SEPIC, замінено на MOSFET транзистор, оскільки падіння напруги на опорі відкритого каналу таких транзисторів ( $U_{Rds\_on} = 0,3 \text{ мВ} \dots 0,7 \text{ В}$ ), при номінальних значеннях струму комутації є водночас прямим падінням напруги діоду Шотткі ( $U_F = 0,3 \dots 1,5 \text{ В}$ ). Проте слід зазначити, що з підвищенням частоти зростають динамічні втрати транзистора за рахунок перезаряду паразитних ємностей [5].

Для отримання достатньо точної для аналізу стійкості математичної моделі використано метод усереднення змінних стану [9]. Для спрощення аналізу систему можна представити у вигляді двох окремих схем, для інтервалів часу коли ключ замкнено  $[0, dT]$  та розімкнено  $[dT, T]$ . Параметр  $d$  – коефіцієнт заповнення імпульсів, що визначає інтервали провідності ключів у ШІМ-керуваних перетворювачах. Для SEPIC мінімальне та максимальне значення  $d$  в залежності від рівня вхідної напруги визначається виразами (1) і (2) відповідно:

$$d_{\min} = \frac{U_{out} + U_f}{U_{in\max} + U_{out} + U_f}; \quad (1)$$

$$d_{\max} = \frac{U_{out} + U_f}{U_{in\min} + U_{out} + U_f}, \quad (2)$$

де  $U_{out}$  – вихідна напруга;  $U_f$  – пряме падіння напруги на замкненому ключі  $S_2$ ;  $U_{in\min}$  – мінімальне значення вхідної напруги;  $U_{in\max}$  – максимальне значення вхідної напруги.

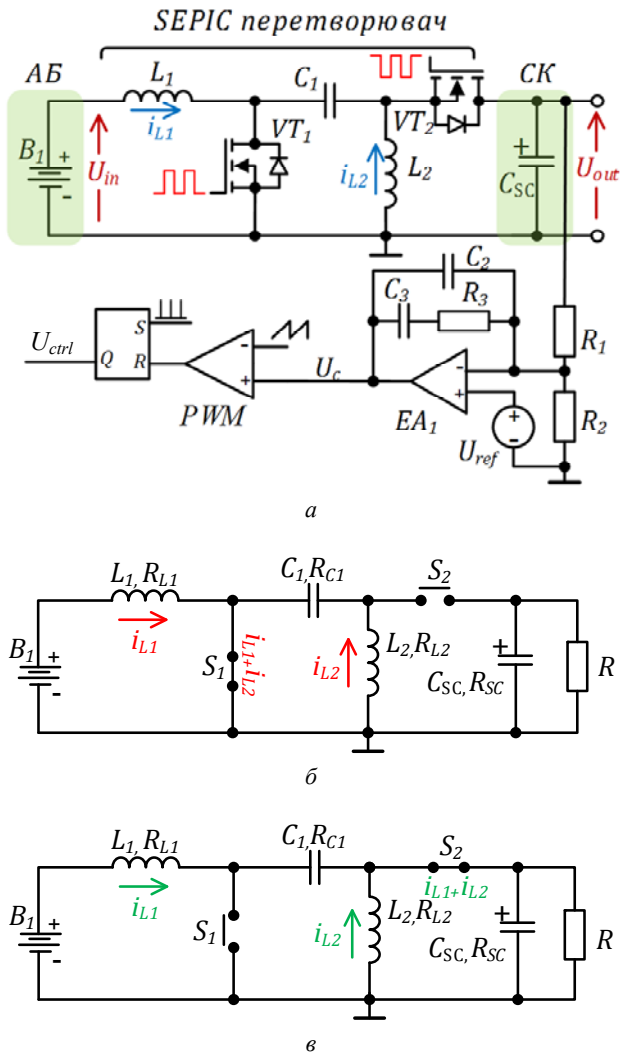


Рис. 2. Спрощена схема комбінованого ємнісного накопичувача енергії (а); лінеаризована еквівалентна схема перетворювача на інтервалі  $[0; dT]$  (б); лінеаризована еквівалентна схема перетворювача на інтервалі  $[dT; T]$  (в)

В роботі розглядається квазіусталений режим, коли АБ та СК заряджені до номінального значення. Значення максимальної частоти для аналізу обрано таким чином, щоб запас по фазі для перетворювача не перевищував  $50^\circ$ , що знаходиться в межах загальноприйнятих стандартів. Запропонована модель є справедливою, для такого типу перетворювачів на частотах до 150 кГц, оскільки не враховує динамічні втрати напівпровідникових елементів. MOSFET транзистори  $VT_1$  та  $VT_2$  замінено ідеальними ключами  $S_1$  та  $S_2$ , опір в замкненому стані яких нескінченно малий, а в розімкненому стані нескінченно великий. Ідеалізовані діаграми напруги і струму перетворювача, що демонструють роботу перетворювача за період перемикання наведено на рис. 3.

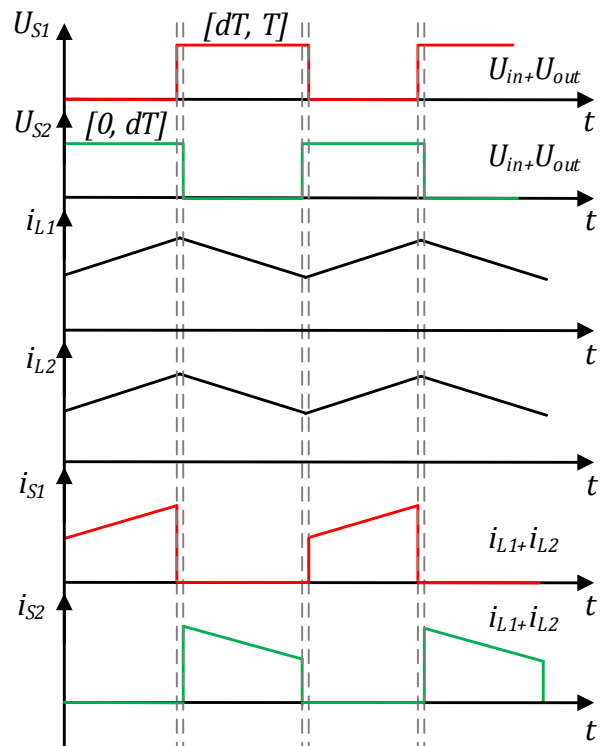


Рис. 3. Ідеалізовані діаграми напруги і струму SEPIC перетворювача за період перемикання

Енергія для зварювання споживається короткотривалими імпульсами зі значно тривалішими паузами між ними, та на певному інтервалі може розглядатися як імпульсне навантаження з періодом  $T_w$ . Таким чином, середній струм споживання за один зварювальний цикл  $[0, T_w]$  можна визначити як [2]:

$$i_{ave}(t) = \frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} i_{load}(t) dt = D_w i_{\max} + (1 - D_w) i_{\min} = I_{ave}, \quad (3)$$

де  $i_{load}$  – струм, що споживається формувачем зварювальних імпульсів;  $i_{\max}$  – амплітуда зварювального струму;  $i_{\min}$  – мінімальне значення зварювального струму (рівне нулю);  $D_w$  – коефіцієнт заповнення імпульсів, фіксована величина, що визначається технологічними особливостями зварювального циклу.

Оскільки період перемикання ключів  $S_1$  та  $S_2$  значно менший тривалості одного циклу зварювання  $T_w$ , струм навантаження на періоді  $[0; T]$  буде постійним та визначатиметься усередненим струмом  $I_{ave}$  за один зварювальний цикл.

Математична модель базується на диференціальних рівняннях, складених для кожної лінійної схеми заміщення. В колах зі змінною структурою системи диференціальних рівнянь для лінійних схем для різних інтервалів складають незалежно одна від одної. Таким чином, усереднена модель системи за один цикл перемикання може бути описана наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{X} = (dA_1 + (1-d)A_2) \cdot X + (dB_1 + (1-d)B_2) \cdot U; \\ \dot{Y} = (dC_1 + (1-d)C_2) \cdot X + (dE_1 + (1-d)E_2) \cdot U, \end{cases} \quad (4)$$

де  $X$  – вектор-змінних стану;  $A_1$  та  $A_2$  – матриці коефіцієнтів при змінних стану для кожної лінійної схеми заміщення;  $U$  – вектор-стовпець зовнішньої дії;  $B_1$  та  $B_2$  – матриці коефіцієнтів при елементах зовнішньої дії для кожної лінійної схеми заміщення;

$Y$  – вектор-стовпець вихідних величин;  $C_1$  та  $C_2$  – матриці зв'язку вихідних величин зі змінними стану для кожної лінійної схеми заміщення;  $E_1$  та  $E_2$  – матриці зв'язку вихідних величин з вектором зовнішньої дії для кожної лінійної схеми заміщення.

Систему рівнянь можна представити у вигляді суми системи алгебраїчних рівнянь (5) для постійного складника та системи диференціальних рівнянь (6) для змінного складника:

$$\begin{cases} X' = A^{-1}BU; \\ Y = -CA^{-1}BU + EU. \end{cases} \quad (5)$$

Після застосування перетворення Лапласа система диференціальних рівнянь для змінного складника приймає вигляд:

$$\begin{cases} \hat{x}(s) = [C(sI - A)^{-1}B \quad C(sI - A)^{-1}B_d] \cdot \begin{bmatrix} \hat{u}(s) \\ \hat{d}(s) \end{bmatrix}; \\ \hat{y}(s) = [C(sI - A)^{-1}B + E \quad C(sI - A)^{-1}B_d + E_d] \cdot \begin{bmatrix} \hat{u}(s) \\ \hat{d}(s) \end{bmatrix}. \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{bmatrix} i'_{L_1} \\ i'_{L_2} \\ u'_{C_1} \\ u'_{C_{SC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{L_1}}{L_1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R_{C_1}}{L_2} - \frac{R_{L_1}}{L_2} & \frac{1}{L_2} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{C_{SC}(R + R_{SC})} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ u_{C_1} \\ u_{C_{SC}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [U_{in}], \quad (8)$$

$$U_{out} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{R}{R + R_{SC}} \end{bmatrix} \cdot [i_{L_1} \quad i_{L_2} \quad u_{C_1} \quad i_{SC}]^T + [0] \cdot [U_{in}], \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} i'_{L_1} \\ i'_{L_2} \\ u'_{C_1} \\ u'_{C_{SC}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_{C_1}}{L_1} - \frac{R_{L_1}}{L_1} - R_{E1} & -R_{E1} & -\frac{1}{L_1} & -\frac{R}{L_1(R + R_{SC})} \\ -R_{E2} & -\frac{R_{L_1}}{L_2} - R_{E2} & 0 & -\frac{R}{L_2(R + R_{SC})} \\ \frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{R}{C_{SC}(R + R_{SC})} & \frac{R}{C_{SC}(R + R_{SC})} & 0 & -\frac{1}{C_{SC}(R + R_{SC})} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{L_1} \\ i_{L_2} \\ u_{C_1} \\ u_{C_{SC}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_1} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot [U_{in}], \quad (10)$$

$$R_{E1} = \frac{R \cdot R_{SC}}{L_1(R + R_{SC})} \quad R_{E2} = \frac{R \cdot R_{SC}}{L_1(R + R_{SC})}$$

$$U_{out} = \begin{bmatrix} \frac{R \cdot R_{SC}}{R + R_{SC}} & \frac{R \cdot R_{SC}}{R + R_{SC}} & 0 & \frac{R}{R + R_{SC}} \end{bmatrix} \cdot [i_{L_1} \quad i_{L_2} \quad u_{C_1} \quad i_{SC}]^T + [0] \cdot [U_{in}]. \quad (11)$$

Передавальна характеристика перетворювача в режимі малих відхилень отримана аналітично на основі рішення узагальненої системи диференціальних рівнянь для обох інтервалів і має вигляд:

$$G_{dv}(s) = \frac{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (12)$$

де  $a_0 \dots a_4$  – коефіцієнти знаменника передавальної характеристики;  $b_0 \dots b_4$  – коефіцієнти чисельника передавальної характеристики.

**Аналіз стійкості комбінованої системи накопичення енергії.** Система керування SEPIC перетво-

де  $B_d = (A_1 - A_2) \cdot X + (B_1 - B_2) \cdot U$  та  $E_d = (C_1 - C_2) \cdot X + (E_1 - E_2) \cdot U$ .

Рішення системи рівнянь (6) дає передавальну характеристику перетворювача в режимі малих відхилень:

$$G_{dv}(s) = C(sI - A)^{-1}B_d + E_d. \quad (7)$$

На основі вищевикладених рівнянь проведено аналіз запропонованої топології. Рівняння стану в матричній формі для інтервалу роботи  $[0, dT]$  отримано на основі законів Кірхгофа (8). Рівняння вихідних величин у матричній формі для інтервалу роботи  $[0, dT]$  визначається як (9). Аналогічним чином отримано рівняння стану (10) та рівняння вихідних величин (11) в матричній формі для інтервалу роботи  $[dT, T]$ :

рювачем представлена у вигляді блок-схеми на рис. 4, де основні ланки системи керування замінено їхніми передавальними характеристиками.

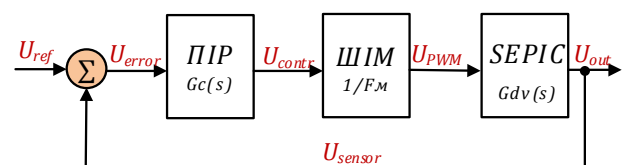


Рис. 4. Узагальнена структура системи керування SEPIC перетворювачем для комбінованого ємнісного накопичувача енергії

Передавальна характеристика розімкненої системи для аналізу впливу зміни параметрів (коефіцієнт заповнення, середній струм навантаження та вхідна напруга) на стійкість системи, визначається як:

$$H(s) = G_C(s) \cdot F_M \cdot G_{dv}(s), \quad (13)$$

де  $G_C(s)$  – передавальна характеристика ПІ-регулятора,  $F_M$  – коефіцієнт підсилення ШІМ компаратора,  $G_{dv}(s)$  – передавальна характеристика SEPIC в режимі малих відхилень.

Передавальна характеристика SEPIC перетворювача  $G_{dv}(s)$ , що використовується для контролю розподілу енергії між елементами комбінованого ємнісного накопичувача, отримана аналітично на основі рівнянь, представлених у попередньому розділі.

Основною функцією регулятора є забезпечення необхідної точності керування і запасу за фазою та амплітудою відповідно до критерію стійкості Найквіста. В якості регулятора обрано ПІ (пропорційно-інтегральний) регулятор, доповнений фільтром низьких частот. Цей тип регуляторів широко використовується в промисловості завдяки простій конструкції, низькій вартості та нескладному алгоритмові налаштування. ПІ-регулятор усуває вимушені коливання та статичну помилку, передавальна характеристика якого має наступний вигляд [10]:

$$G_C(s) = \frac{K_C(1+T_Cs)}{T_Cs(1+T_f s)}, \quad (14)$$

де  $K_C$  – коефіцієнт підсилення;  $T_C$  – постійна часу інтегрування;  $T_f$  – постійна часу фільтрації.

Коефіцієнт підсилення ШІМ-компаратора  $F_M$  визначається амплітудою пілкоподібного сигналу та має наступний вигляд:

$$F_M = \frac{1}{U_M}, \quad (15)$$

де  $U_M$  – амплітуда пілкоподібної напруги.

В табл. 1 наведено основні параметри компонентів SEPIC перетворювача та ПІ-регулятора, а також вихідні дані комбінованої системи накопичення енергії, що використані для аналізу стійкості.

Таблиця 1  
Дані для аналізу стійкості

Вихідні параметри		Параметри компонентів			
$U_{in}$ , В	2,5; 3,7; 4,2	$L_1, L_2$ , мкГн	10		
$U_{out}$ , В	2,7	$C_1$ , мкФ	820		
$I_{out}$ , А	5; 10; 15	$C_{SC}$ , Ф	350		
$\gamma$	0,4; 0,5; 0,6	$R_{L1}, R_{L2}, R_{C1}, R_{C_{SC}}$ , МОм	10		
$U_M$ , В	2,7	$C_2$ , пФ	100	$R_1, R_2$ , кОм	1,2
$U_{ref}$ , В	1,35	$C_3$ , мкФ	1	$R_3$ , кОм	15

Рішення усередненої системи диференціальних рівнянь та логарифмічні амплітудно-фазові частотні характеристики (ЛАФЧХ) розімкненої системи за різних умов було отримано за допомогою пакету прикладних програм MATLAB.

На рис. 5 наведена ЛАФЧХ розімкненої системи для різних значень струму навантаження при номіна-

льних параметрах компонентів схеми, вхідній напрузі  $U_{in} = 3,7$  В та коефіцієнті заповнення імпульсів  $d = 0,5$ . З діаграм видно, система керування забезпечує запас за фазою від  $45,4^\circ$  до  $54,8^\circ$  та за амплітудою від 14,6 дБ до 26,4 дБ, при зміні струму навантаження система лишається стійкою.

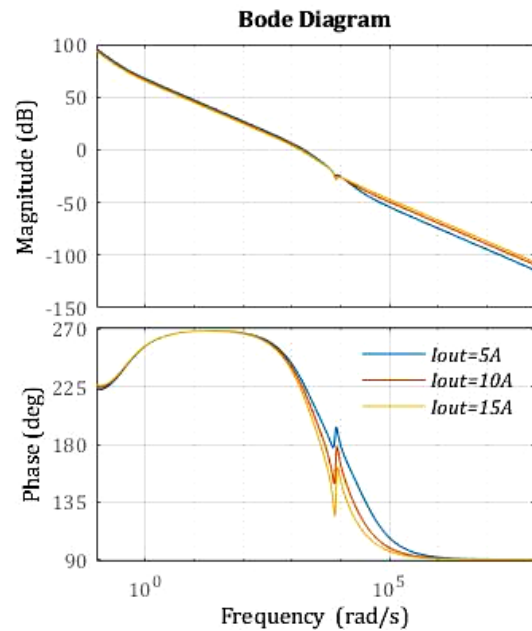


Рис. 5. ЛАФЧХ розімкненої системи для різних значень струму навантаження

ЛАФЧХ системи при зміні коефіцієнту заповнення імпульсів та номінальній вхідній напрузі  $U_{in} = 3,7$  В, струмові навантаження  $I_{out} = 10$  А наведено на рис. 6. Система є стійкою за різних значень коефіцієнта заповнення імпульсів. Аналогічно на стійкість системи впливає зміна вхідної напруги при  $d = 0,5$  та  $I_{out} = 10$  А (рис. 7). Всі інші параметри системи лишаються незмінними у всіх трьох випадках.

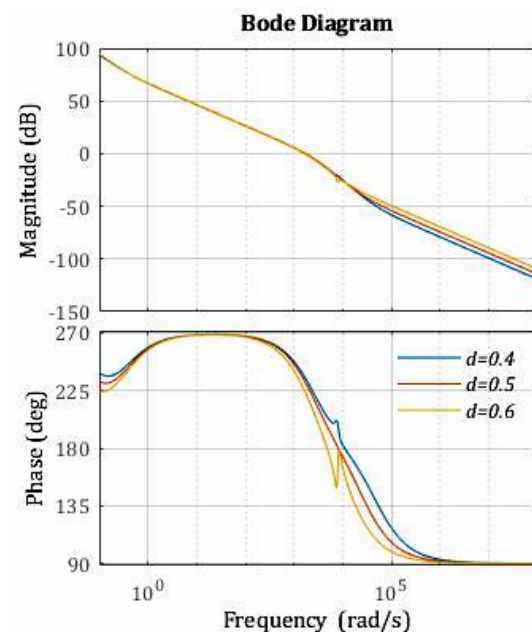


Рис. 6. ЛАФЧХ розімкненої системи для різних значень коефіцієнта заповнення імпульсів

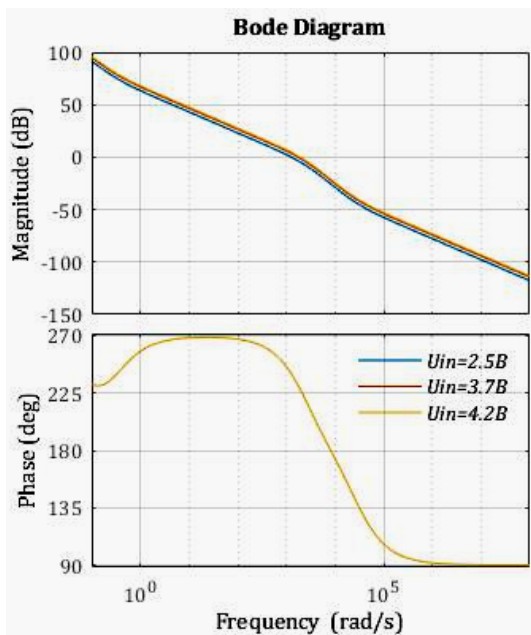


Рис. 7. ЛАФЧХ розімкненої системи для різних значень вхідної напруги

Реакція системи на вплив у вигляді одиничної ступінчастої функції зображена на рис. 8. Оскільки в системі присутній суперконденсатор великої ємності, тривалість перехідного процесу складає одиниці мілісекунд. З метою нівелювання цього ефекту суперконденсатор можна представити у вигляді джерела напруги, оскільки напруга на ньому за один період перемикання майже не змінюється.

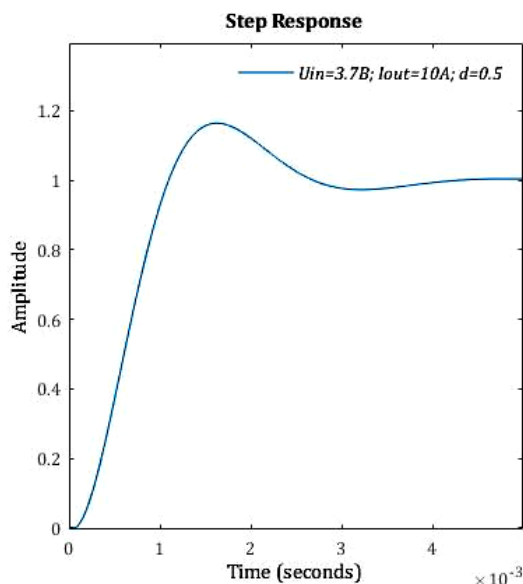


Рис. 8. Перехідна функція передавальної характеристики замкненого контуру

### Висновки.

Запропоновано накопичувач енергії на основі комбінації суперконденсатора та акумуляторної батареї для джерела живлення, розробленого за топологією проміжного накопичення енергії, що використовується для технології контактного мікрозварювання. Обрано напівактивну топологію батареї та SEPIC перетворювач для розподілу енергії між накопичува-

чами, що дозволяє забезпечити розряд батареї номінальним струмом та номінальну напругу на суперконденсаторі незалежно від рівня заряду АБ.

Отримано математичну модель перетворювача, що враховує паразитні опори компонентів схеми. Для дослідження стійкості запропонованої ланки керування використано критерій Найквіста. В результаті аналізу визначено область стійкості системи при варіації ключових параметрів системи. Наведена топологія є стійкою при зміні коефіцієнту заповнення імпульсів, струму навантаження та вхідної напруги в широкому діапазоні.

Подальша робота буде присвячена практичній верифікації отриманих результатів з використанням фізичної моделі запропонованого комбінованого накопичувача.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (ДБ № 0119U100189 та № 0120U101285).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Khalid M. A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids. *Energies*, 2019, vol. 12, no. 23, p. 4559. doi: 10.3390/en12234559.
2. Kuperman A., Aharon I. Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 981-992. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.010.
3. Bocklisch T. Hybrid energy storage approach for renewable energy applications. *Journal of Energy Storage*, 2016, vol. 8, pp. 311-319. doi: 10.1016/j.est.2016.01.004.
4. Kozhushko Y., Pavkovic D., Zinchenko D., Karbivska T., Sydorets V., Bondarenko O. Hybrid Energy Storage System of Power Supply for Micro Resistance Welding. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019 – Proceedings*, 2019, pp. 584-589, doi: 10.1109/elnano.2019.8783890.
5. Bondarenko O., Verbytskyi I., Prokopets V., Kaloshyn O., Spitsyn D., Ryzhakova T., Kozhushko Y. Modular Power Supply for Micro Resistance Welding. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 20-26. doi: 10.1515/ecece-2017-0003.
6. El Aroudi A., Giaouris D., Iu H. H.-C., Hiskens I.A. A Review on Stability Analysis Methods for Switching Mode Power Converters. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and System*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 302-315. doi: 10.1109/jetcas.2015.2462013.
7. Kotra S., Mishra M.K. Design and Stability Analysis of DC Microgrid With Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1603-1612. doi: 10.1109/tste.2019.2891255.
8. Dong C., Jia H., Xu Q., Xiao J., Xu Y., Tu P., Lin P., Li X., Wang P. Time-delay stability analysis for hybrid energy storage system with hierarchical control in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 6633-6645. doi: 10.1109/tsg.2017.2717504.
9. Руденко Ю. В. Способ усреднения модели импульсных преобразователей постоянного напряжения. *Технічна електродинаміка*, 2017, № 3, С. 42-48, doi: 10.15407/techned2017.03.042.
10. Åström K.J., Hägglund T. *PID controllers: theory, design, and tuning*, vol. 2. International Society of Automation, 1995.

### REFERENCES

1. Khalid M. A review on the selected applications of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems for microgrids.

- Energies*, 2019, vol. 12, no. 23, p. 4559. doi: [10.3390/en12234559](https://doi.org/10.3390/en12234559).
2. Kuperman A., Aharon I. Battery-ultracapacitor hybrids for pulsed current loads: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, vol. 15, no. 2, pp. 981-992. doi: [10.1016/j.rser.2010.11.010](https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.010).
  3. Bocklisch T. Hybrid energy storage approach for renewable energy applications. *Journal of Energy Storage*, 2016, vol. 8, pp. 311-319. doi: [10.1016/j.est.2016.01.004](https://doi.org/10.1016/j.est.2016.01.004).
  4. Kozhushko Y., Pavkovic D., Zinchenko D., Karbivska T., Sydorets V., Bondarenko O. Hybrid Energy Storage System of Power Supply for Micro Resistance Welding. *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology, ELNANO 2019 – Proceedings*, 2019, pp. 584-589, doi: [10.1109/elnano.2019.8783890](https://doi.org/10.1109/elnano.2019.8783890).
  5. Bondarenko O., Verbytskyi I., Prokopets V., Kaloshyn O., Spitsyn D., Ryzhakova T., Kozhushko Y. Modular Power Supply for Micro Resistance Welding. *Electrical, Control and Communication Engineering*, 2017, vol. 12, no. 1, pp. 20-26. doi: [10.1515/ecce-2017-0003](https://doi.org/10.1515/ecce-2017-0003).
  6. El Aroudi A., Giaouris D., Iu H. H.-C., Hiskens I.A. A Review on Stability Analysis Methods for Switching Mode Power Converters. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and System*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 302-315. doi: [10.1109/jetcas.2015.2462013](https://doi.org/10.1109/jetcas.2015.2462013).
  7. Kotra S., Mishra M.K. Design and Stability Analysis of DC Microgrid With Hybrid Energy Storage System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 1603-1612. doi: [10.1109/tste.2019.2891255](https://doi.org/10.1109/tste.2019.2891255).
  8. Dong C., Jia H., Xu Q., Xiao J., Xu Y., Tu P., Lin P., Li X., Wang P. Time-delay stability analysis for hybrid energy storage system with hierarchical control in DC Microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, vol. 9, no. 6, pp. 6633-6645. doi: [10.1109/tsg.2017.2717504](https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2717504).
  9. Rudenko Yu.V. Mode of averaging of pulse DC converter model. *Technical Electrodynamics*, 2017, no. 3, pp. 42-48. (Rus). doi: [10.15407/techned2017.03.042](https://doi.org/10.15407/techned2017.03.042).
  10. Aström K.J., Hägglund T. *PID controllers: theory, design, and tuning*, vol. 2. International Society of Automation, 1995.

Надійшла (received) 03.07.2020

Бондаренко Олександр Федорович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,  
 Кожушко Юлія Віталіївна<sup>1</sup>, аспірант,  
 Карбівська Тетяна Олексіївна<sup>1</sup>, аспірант,  
 Желязков Єгор Олександрович<sup>1</sup>, студент,  
 Сафронів Павло Сергійович<sup>1</sup>, к.т.н., доц.,

<sup>1</sup> Національний технічний університет України  
 «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
 03056, Київ, пр. Перемоги, 37,  
 e-mail: bondarenkoaf@gmail.com

O.F. Bondarenko<sup>1</sup>, Yu.V. Kozhushko<sup>1</sup>, T.O. Karbivska<sup>1</sup>,  
 Y.O. Zheliazkov<sup>1</sup>, P.S. Safronov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,  
 37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

### Stability analysis of hybrid energy storage based on supercapacitor and battery.

The aim of the work is to analyze the stability of the battery-supercapacitor hybrid storage of power supply for resistance micro-welding equipment, considering the possible variation of the system parameters and taking into account parallel series resistance of the circuit components. **Methodology.** The sufficient accurate mathematical model of the hybrid energy storage system to stability analysis has been obtained by the state-space average method. According to the state-space averaging method, PWM switching converters are described by separate circuit topologies for each switching period. The system of differential equations for each time interval has been derived by use of the Kirchhoff rules. The small-signal model transfer function of the SEPIC converter has been obtained by applying the Laplace transform to linear state equations averaged over one switching cycle. Finally, the Nyquist stability criterion has been considered to evaluate the stability of the proposed energy storage system. **Results.** Bode diagrams of an open-loop system for different values of the duty cycle, average load current, and input voltage have been obtained by using MATLAB software. The gain margin ranges from 14.6 dB to 26.4 dB and the phase margin ranges from 45.4 degrees to 54.8 degrees. From these results, it is obvious that the proposed system meets the stability criteria regardless of the aforementioned parameter fluctuations. **Originality.** The high-efficiency energy storage system for micro resistance welding technology has been proposed. Developing of the energy storage system according to the battery semi-active hybrid topology enables to control the Li-ion battery discharge current within the maximum allowable value. SEPIC converter utilization ensures the high-efficient operation of the power supply despite the battery charge state. Moreover, this topology allows implementing series and parallel configuration of both batteries and supercapacitors to obtain the required value of voltage and current. **Practical significance.** The mathematical model of the SEPIC converter has been developed by applying the state-space averaging technique. The stability analysis for parameter variation, such as duty cycle and the average load current, the input voltage has been performed by using Nyquist criteria. References 10, tables 1, figures 8.

**Key words:** hybrid energy storage, SEPIC converter, stability analysis, state-space average method, micro resistance welding.