

УДК 621.314.1

doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06

## АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ СХЕМ АКТИВНОГО БАЛАНСУВАННЯ АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЙ

**Б. О. СТИСЛО<sup>1\*</sup>, Р. В. ЗАЙЦЕВ<sup>2</sup>, К. О. МІНАКОВА<sup>2</sup>, М. В. КІРІЧЕНКО<sup>2</sup>, О. В. ЄРЕСЬКО<sup>1</sup>**<sup>1</sup> кафедра промислової і біомедичної електроніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА<sup>2</sup> кафедра фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

\*e-mail: bohdan.styslo@khpі.edu.ua

**АНОТАЦІЯ** В роботі виконано огляд існуючих схемних рішень пристроїв для балансування акумуляторних батарей. Описано принцип балансування на основі ємнісного та індуктивного буферного елемента. Показано особливості їх роботи і основні розрахунки кожного з типів пристроїв. Для схем з трансформаторною топологією вказано розрахункові значення для визначення балансуємого струму. На підставі аналізу схемних рішень, чисельно визначено і доведено ефективність використання схемних рішень на основі індуктивних буферних елементів. Потужні акумуляторні батареї для систем електричного живлення використовуються у вигляді стеків, що складаються з послідовно-паралельного з'єднання одиничних накопичувачів. Під час їх експлуатації виникає проблема нерівномірного розряду або заряду, для компенсації якої необхідно виконувати балансування рівнів напруги в акумуляторах стеку. Безпека використання електрохімічних накопичувачів вимагає застосування спеціалізованих балансуємих пристроїв. Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, є системи активного балансування. Аналіз математичної моделі роботи двох типів буферних елементів (ємнісного та індуктивного) дозволив дати якісну оцінку їх ефективності. Перші, в порівнянні з індуктивними - не тільки мають гірші енергетичні характеристики, але і не дозволяють виконувати «масштабування» пристрою без істотного ускладнення системи управління. Амплітудне значення струму у схемах з ємнісним буферним елементом обмежене лише внутрішніми паразитними опорами елементів схеми, тому, при відносно великому значенні розбалансування, в елементах схеми (в тому числі акумуляторних батареях) виділяється значна величина енергії втрат у вигляді теплової енергії, що негативно позначається на параметрах акумуляторної батареї. Амплітудне значення струму в схемі на основі індуктивних буферних елементів обмежене величиною індуктивності. Воно може бути розраховане на етапі проектування пристрою. Крім того, забезпечення системою керування переривчастого режиму роботи перетворювача дозволяє зменшити комутаційні втрати в силових ключах схеми і дозволяє підвищити ефективність роботи в цілому. При великій кількості накопичувачів (більше трьох) слід віддати перевагу трансформаторним системам балансування, як окремого випадку індуктивної топології.

**Ключові слова:** накопичувач енергії; акумуляторна батарея; балансування; схемне рішення; буферний елемент; режими роботи; ефективність

## ANALYSIS OF BATTERIES ACTIVE BALANCE SCHEMES EFFICIENCY

**B. STYSLO<sup>1\*</sup>, R. ZAITSEV<sup>2</sup>, K. MINAKOVA<sup>2</sup>, M. KIRICHENKO<sup>2</sup>, O. ERESKO<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Industrial and Biomedical Equipment Department, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE<sup>2</sup> Materials for Electronics and Solar Cells Department, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The paper reviews the existing circuit solutions of devices for balancing electric batteries. The balancing principle on the basis of capacitive and inductive buffer elements has been described. It was shown the features of their work and the basic calculations for each device type. For circuits with transformer topology, the calculated values for determining the balancing current are indicated. Based on the circuit solutions analysis, the efficiency of using solutions based on inductive buffer elements is numerically determined and proved. Powerful batteries for power supply systems are used in the form of stacks, consisting of a series-parallel connection of single cells. During their operation, there is a problem of uneven discharge or charge, to compensate which it is necessary to make voltage levels balancing in the stack batteries. For safely using electrochemical batteries the using of specialized balancing devices is required. The most efficient, from an energy point of view, are active balancing systems. The analysis of the mathematical model of two types (capacitive and inductive) buffer elements operation allowed to give a qualitative assessment of their efficiency. The first, in comparison with inductive - not only have worse energy characteristics, but also do not allow to perform "scaling" of the device without significant complication of the control system. The current amplitude value in circuits with a capacitive buffer element is limited only by the internal parasitic resistances of the circuit elements, therefore, with a relatively large value of imbalance, in circuit elements (including batteries) takes place a significant energy loss in the form of heat which negatively effects on rechargeable battery parameters. The current amplitude value in the circuit based on inductive buffer elements is limited by the inductance value. It can be calculated at the device design stage. In addition, providing the control system with intermittent converter operation allows to reduce switching losses in the circuit power switches and increases the overall operation efficiency. With a large number of batteries (more than three) should be preferred transformer balancing systems, as a special case of inductive topology.

**Keywords:** energy storage; battery; balancing; circuit solution; buffer element; operating modes; efficiency

### Вступ

Останнім часом, розробники пристроїв перетворювальної техніки приділяють підвищену увагу структурам перспективних систем електрозабезпечення,

що мають в своєму складі електрохімічні накопичувачі електричної енергії (БСНЕ).

Однак, їх застосування в системах електроживлення вимагає використання спеціалізованих енергоефективних перетворювачів

електричної енергії: узгоджуючих – що забезпечують зв'язок між БСНЕ і мережею [1] та сервісних – що забезпечують безпечний режим роботи накопичувачів (вирівнювання рівнів напруги на послідовно з'єднаних акумуляторах, контроль за дотриманням граничних значень рівнів напруги на кожному з акумуляторів БСНЕ) [2]. Відомо, що акумуляторні батареї на основі літію мають ряд переваг над свинцево-кислотними, але вимагають більш жорсткого дотримання напруги на одиничному акумуляторі. Так, регламентований розробником діапазон напруги на LiFePO<sub>4</sub> акумуляторі складає 2,0-3,65В [3]. Вихід за нижню межу спричиняє передчасне «старіння» батареї, а вихід за верхню – може спричинити остаточний вихід з ладу накопичувача.

Потужні акумуляторні батареї для систем електричного живлення використовуються у вигляді стеків, що складаються з послідовно-паралельного з'єднання одиничних накопичувачів. Під час їх експлуатації виникає проблема нерівномірного розряду або заряду, для компенсації якої необхідно виконувати балансування рівнів напруги в акумуляторах стеку. Існує велика кількість схемних рішень, що здійснюють вирівнювання напруги. Умовно їх можна поділити на дві великих групи: системи пасивного (резистивного) і активного балансування.

Першу групу іноді називають «резисторним балансуванням» [4–6]. Такий метод переважно використовують в недорогих додатках. Практично вся надлишкова енергія від батарей з надмірним зарядом розсіюється у вигляді тепла, що, безумовно, є основним недоліком пасивного методу. В активному методі балансування [7–15] для передачі енергії від батарей з надлишковим зарядом до менш заряджених батарей використовуються ємності або індуктивності, втрати енергії в яких незначні.

### Мета роботи

Метою даної роботи є порівняльний аналіз ефективності існуючих топологій схем активного балансування та визначення чисельного значення ефективності використання кожної з них.

### Системи активного балансування

**1. Активні балансири з ємнісним буферним елементом.** Принцип роботи балансира пояснюється рис. 1 а, б. Для передачі енергії між акумуляторами В1 і В2, буферний конденсатор С1 спочатку підключається за допомогою ключів до акумулятора В1, за час  $\Delta t_1$  заряджається до значення напруги на акумуляторі В1, на наступному такті роботи схеми, заряджений до величини  $U_{B1}$  конденсатор підключається за допомогою ключів S1, S2 до акумулятора В2, що має менший в порівнянні з акумулятором В1 рівень заряду. Кожен з ключів може бути виконаний на двох транзисторах, як показано на рис. 1, в.

Слід зазначити, що алгоритм переключення конденсатора при протилежному значенні зарядів акумуляторів (акумулятор В2 має надлишковий заряд, а акумулятор В1 - недостатній) не змінюється, а це

означає що немає необхідності чіткого визначення, який з пари акумуляторів має більший рівень напруги.

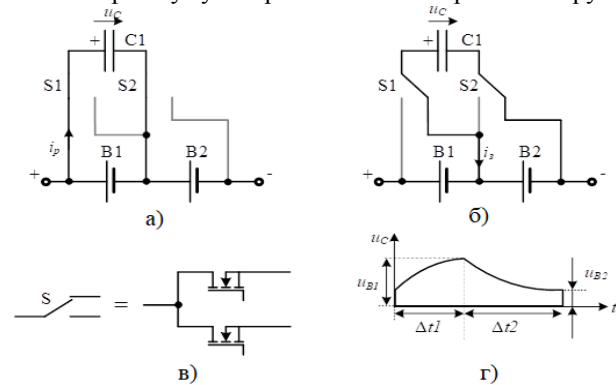


Рис. 1 – Принцип роботи ємнісного балансира

Модифікована схема балансира із одним конденсатором, що перемикається (рис. 2) для контролю за напругою на кожному з акумуляторів стеку має лише один датчик напруги, який вимірює напругу на конденсаторі. За допомогою двох ключів балансує конденсатор С може бути підключено до будь-якого акумулятора стеку. Вимірюючи в цей час напругу на конденсаторі, система керування може визначити значення поточного розбалансування в стеку.

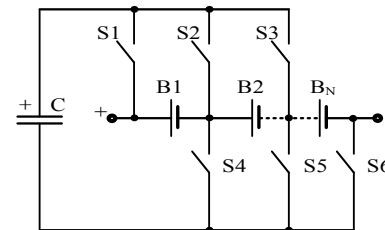


Рис. 2 – Модифікована схема ємнісного балансира

В схемі (рис. 2) вирішено проблему передачі енергії між двома акумуляторами, що знаходяться на протилежних кінцях стеку, оскільки перетворювач має можливість «адресної» передачі енергії минаючи включені між донором і акцептором акумулятори. Використання лише одного конденсатора, що перемикається, спрощує процес вимірювання напруги на акумуляторах та зменшує кількість датчиків напруги до одного.

Всім існуючим схемам балансірів на основі ємнісного буферного елемента притаманний суттєвий недолік: заряд конденсатора при відборі від акумулятора-донора надлишкової енергії та його розряд під час передачі енергії до акумулятора-акцептора відбувається неконтрольованим струмом, що, фактично, обмежений лише внутрішніми опорами елементів. Таким чином, основним недоліком балансірів з ємнісним буферним елементом є неможливість роботи балансира в оптимальному для акумуляторів режимі – джерела струму.

**2. Активні балансири з індуктивним буферним елементом.** Дуальною по відношенню до розглянутих вище активних балансірів є схема, де в

якості буферного елемента використовується індуктивність [16-20]. Робота схеми (рис. 3) схожа за принципом на схему (рис. 2). Схема балансування для  $N$  батарей, що наведено на рис. 3, складається з  $N-1$  дроселів, що використовуються в якості буферного елемента під час обміну енергією між акумуляторами, та  $2(N-2)+2$  ключів.

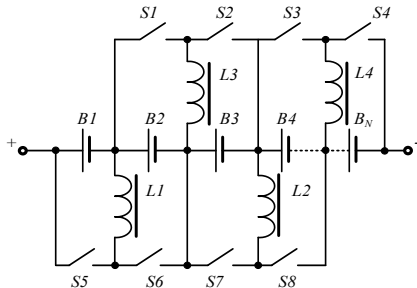


Рис. 3 – Схема активного балансира з індуктивностями, що перемикаються

В якості ключів можуть бути використані MOSFET-транзистори, як показано на рис. 4, а. В цьому випадку на другому півперіоді роботи схеми (інтервал  $\Delta t_2$ ) можна не здійснювати керування ключем  $S2$ , оскільки напрямок протікання струму  $i_2$  є прямим по відношенню до діода, що входить до внутрішньої структури транзистора.

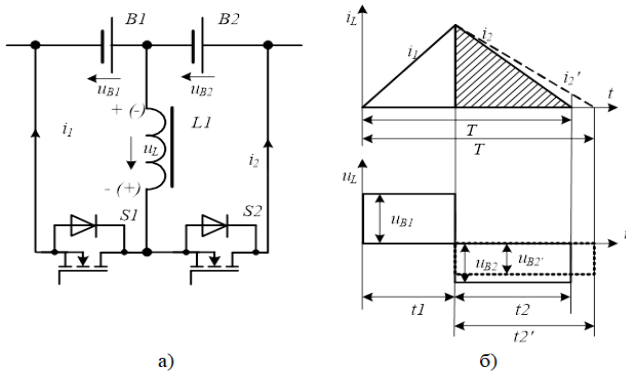


Рис. 4 – Принцип роботи перетворювача (а) і діаграми струм та напруги на обмотці індуктивного буферного елемента (б)

Робота балансира нагадує роботу широтно-імпульсного перетворювача, тому, балансір може працювати в двох режимах: переривчастий і безперервний. В першому режимі вся енергія, що була накоплена на протязі першого напівперіоду передається до акумулятора-акцептора за час другого напівперіоду, і струм  $i_2$  встигає зменшитись до нуля. В другому режимі за час  $\Delta t_2$  до акумулятора-акцептора передається лише частина енергії, що була накоплена на протязі першого півперіоду. Другий режим дозволяє зменшити пульсації струму, проте, викликає збільшення енергії комутації в ключах, оскільки комутація відбувається при ненульовому значенні струму, призводить до суттєвого збільшення потужності втрат в транзисторі [21,22].

### 3. Активні балансири на основі багатообмоточних трансформаторів.

Окремим класом активних балансірів виділяють схеми, де в якості буферного елемента для передачі енергії між акумуляторами використовується багатообмоточний трансформатор або декілька трансформаторів. Такі схемні рішення дозволяють сумістити в собі функції балансування та системи енергоменеджменту батареї. В ряді робіт [23–25] пропонується топологія (рис. 5). В інших модифікаціях схеми пропонується замість декількох окремих трансформаторів використання одного багатообмоточного трансформатора [26,27]. В цьому випадку достатньо лише однієї вторинної обмотки  $w_2$  і одного діода  $VD1$ . Схема перетворювача виконана на базі оберненоходової топології. Принцип балансування розглянемо на прикладі: нехай акумулятор  $B1$  має надлишковий заряд в порівнянні з іншими акумуляторами стека  $B1-B_N$ . На першому такті роботи схеми замикається ключ  $S1$ . В первинній обмотці трансформатора (інтервал  $t_0 - t_1$  рис. 6) починає лінійно зростати струм від нульового значення до значення  $i_{1MAX}$  в цей час відбувається накопичення енергії в осерді трансформатора  $TV1$ , і, відповідно, зменшення її у акумуляторі  $B1$ . В цей час на обмотках трансформатора  $TV1$  (всіх обмотках у випадку багатообмоточного трансформатора) прикладена напруга з полярністю, що вказана на рис. 6 без дужок. До діодів  $VD1-VD_N$  прикладено зворотну напругу і струм у вторинних обмотках в цей час не протікає.

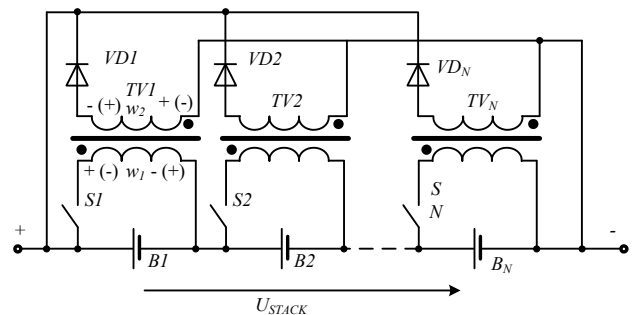


Рис. 5 – Активний балансір на основі оберненоходової топології з поверненням надлишкової енергії до стеку

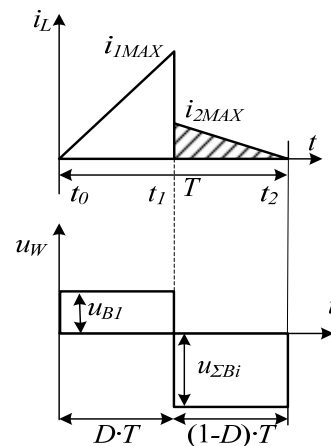


Рис. 6 – Діаграми струму та напруги на обмотках трансформатора

В момент часу  $t_1$  виконується вимкнення ключа S1, внаслідок чого напруга на обмотках трансформатора змінює знак на протилежний (вказана в дужках). На другому такті роботи (інтервал часу  $t_1 - t_2$  рис. 6) починається інтервал повернення накопиченої енергії до стека B1-BN.

Середнє значення струму  $i_{1AV}$ , що характеризує швидкість розряду акумулятора-донора на першому інтервалі роботи схеми і середнє значення струму  $i_{2AV}$ , що характеризує швидкість заряду акумуляторів стека становить, відповідно

$$i_{1AV} = \frac{i_{1MAX}}{K_\phi} = \frac{i_{1MAX}}{\sqrt{3}}, \quad (1)$$

$$i_{2AV} = \frac{i_{1MAX}}{N \cdot K_\phi} = \frac{i_{1MAX}}{N \cdot \sqrt{3}}, \quad (2)$$

де  $K_\phi$  – коефіцієнт форми сигналу, що становить для пилкоподібного струму величину  $\sqrt{3}$ . З аналізу відношень (1, 2) видно, що швидкість розряду акумулятора-донора в  $N$  разів швидше ніж швидкість заряду будь-якого акумулятора стека. Це накладає обмеження на ефективну роботу схеми при розряді акумуляторів, коли існує проблема запобігання зменшення рівня напруги на акумуляторі стека за нижню границю припустимого діапазону. Оскільки на інтервалі часу  $t_1 - t_2$  (рис. 6) відбувається заряд всіх акумуляторів середнім струмом величиною  $i_{2AV}$ , в тому числі, і акумулятора-донора що розряджався на попередньому такті роботи схеми, значення еквівалентного середнього значення розрядного струму має бути скорегованим на величину зарядного струму

$$i_{1AV}^* = \frac{i_{1MAX}}{\sqrt{3}} - i_{2AV} = \frac{i_{1MAX}}{\sqrt{3}} - \frac{i_{1MAX}}{N \cdot \sqrt{3}} = \frac{i_{1MAX} \cdot (N-1)}{N \cdot \sqrt{3}} \quad (3)$$

### Аналіз ефективності буферних елементів в схемах активних балансирів

Як зазначалося вище, передача енергії між акумуляторами стеку за умови активного балансування, виконується за допомогою індуктивного або ємнісного буферного елемента. Розглянемо більш детально процеси, що протікають в ланцюгах передачі енергії для двох типів буферних елементів. На рис. 7 наведено спрощені схеми ланцюгів балансування (а, б) і їх операторні схеми заміщення на етапах накопичення енергії (г, е) і передачі (в, д) відповідно. На всіх схемах виконується умова  $U_{B2} > U_{B1}$ .

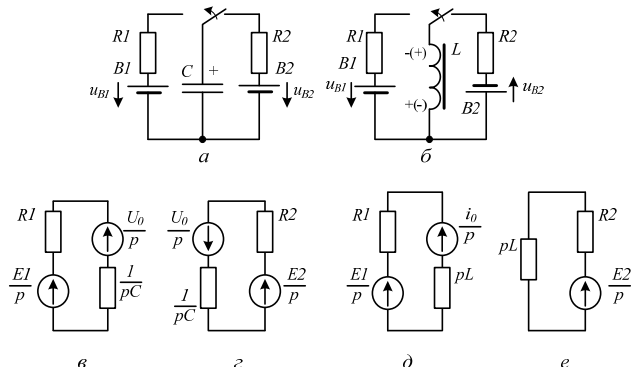


Рис. 7 – До визначення ефективності типу буферного елемента

Для схеми з ємнісним буферним елементом в сталому режимі на інтервалі накопичення енергії початкове значення напруги на буферному елементі становить  $U_{B1}$  (рис. 7, в). Тоді, операторні рівняння, що описують процеси заряду ємності описуються наступним чином

$$I_{C\_c\Box} = \frac{\frac{E_2}{p} - \frac{E_1}{p}}{R_2 + \frac{1}{pC}}, \quad (4)$$

$$U_{C\_c\Box} = \frac{\left(\frac{E_2}{p} - \frac{E_1}{p}\right) \left(R_2 + \frac{1}{pC}\right)}{pC}. \quad (5)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо їхні оригінали

$$I_{C\_c\Box} = \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R_2}} \cdot (E_2 - E_1)}{R_2}, \quad (6)$$

$$U_{C\_c\Box} = -\left(e^{-\frac{t}{C \cdot R_2}} - 1\right) \cdot (E_2 - E_1) + E_2. \quad (7)$$

На інтервалі передачі енергії операторні рівняння, що описують процеси розряду ємності описуються наступним чином

$$I_{C\_disc\Box} = \frac{\frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p}}{R_1 + \frac{1}{pC}}, \quad (8)$$

$$U_{C\_disc\Box} = \frac{\left(\frac{E_1}{p} - \frac{E_2}{p}\right) \left(R_1 + \frac{1}{pC}\right)}{pC}. \quad (9)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо їхні оригінали:

$$I_{C\_disc\Box} = \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R_1}} \cdot (E_1 - E_2)}{R_1}, \quad (10)$$

$$U_{C\_disc\Box} = E_1 - \left(e^{-\frac{t}{C \cdot R_1}} - 1\right) \cdot (E_2 - E_1). \quad (11)$$

Для схеми з індуктивним буферним елементом на інтервалі накопичення енергії початкове значення струму в буферному елементі відсутнє (рис. 7, е). Операторні рівняння, що описують процес накопичення енергії в індуктивному буферному елементі (процес зростання струму) описуються наступним чином

$$I_{L\_c\Box} = \frac{\frac{E_2}{p}}{R_2 + pL}. \quad (12)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо оригінали струму

$$I_{L\_c\Box} = -\frac{E_2 \cdot \left(e^{-\frac{t \cdot R_2}{L}} - 1\right)}{R_2}. \quad (13)$$

На інтервалі передачі енергії операторне рівняння, що описує процес спадання струму індуктивності описується наступним чином

$$I_{L\_disc\Box} = \frac{\left(Li_0 - \frac{E_1}{p}\right)}{R_1 + pL}. \quad (14)$$

Після виконання зворотного перетворення Лапласа, отримаємо оригінал струму індуктивного буферного елемента

$$I_{L\_disc} = \frac{E1 \cdot e^{-\frac{-R1 \cdot t}{L}} - E1 + R1 \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{-R1 \cdot t}{L}}}{R1} \quad (15)$$

Таким чином, струм в буферних елементі змінюється за законом

$$I_C(t) = \begin{cases} \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R2}} \cdot (E2 - E1)}{R2}, & \text{нпу } t \leq T/2 \\ \frac{e^{-\frac{t}{C \cdot R1}} \cdot (E1 - E2)}{R1}, & \text{нпу } t > T/2 \end{cases}; \quad (16)$$

$$I_L(t) = \begin{cases} -\frac{E2 \cdot \left( e^{-\frac{t \cdot R2}{L}} - 1 \right)}{R2}, & \text{нпу } t \leq T/2 \\ \frac{E1 \cdot e^{-\frac{-R1 \cdot t}{L}} - E1 + R1 \cdot i_0 \cdot e^{-\frac{-R1 \cdot t}{L}}}{R1}, & \text{нпу } t > T/2 \end{cases}. \quad (17)$$

Виконаємо розрахунок ефективності застосування різних типів буферних елементів шляхом порівняння енергії, що передається за один період перетворення за умови рівності діючих значень струмів  $I_L, I_C$ .

Нехай, відбувається балансування двох  $LiFePO_4$  акумуляторів з гранично припустимим рівнем розбалансування (в цьому випадку буде досягнуто максимальної ефективності ємнісного балансира). Завдаємо ємністю буферного конденсатора  $C = 100$  мкФ та напругою на акумуляторах:  $E1 = 2,0$  В;  $E2 = 3,65$  В.

Величина енергії, що буде передаватися за один такт роботи схеми складає

$$W_C = \frac{C \cdot (E2 - E1)^2}{2} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot (3,6 - 2,0)^2}{2} = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.} \quad (18)$$

Визначимо діюче значення струму  $I_C$

$$I_{C \text{ RMS}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_C^2 dt} = 9,5 \text{ А.} \quad (19)$$

Визначимо параметри індуктивного буферного елемента, що забезпечить те саме значення діючого струму на тій самій частоті перетворення:  $I_{C \text{ RMS}} = I_{L \text{ RMS}}$ .

Амплітудне значення струму в індуктивності складає

$$I_m = I_{C \text{ RMS}} \cdot \sqrt{3} = 9,5 \cdot \sqrt{3} \approx 16,5 \text{ А.} \quad (20)$$

За умови рівнів напруги на акумуляторних батареях  $E1 = 2,0$  В;  $E2 = 3,65$  В, для роботи схеми в режимі гранично переривчастого магнітного потоку тривалість накопичення енергії в індуктивності складає

$$t_u = \frac{E1}{E1 + E2} \cdot T \text{ (с)}, \quad (21)$$

де  $E1, E2$  – значення напруги на акумуляторі-донорі та акумуляторі-акцепторі відповідно;  $T$  – період перетворення, для даного прикладу становить 60 мкс.

$$t_u = \frac{2}{2 + 3,65} \cdot 60 \cdot 10^{-6} = 21 \cdot 10^{-6} \text{ (с)} \quad (22)$$

Визначимо значення буферної індуктивності  $L$ , струм в якій зростає до значення  $I_m$  за час  $t_u$  при підключенні її до джерела напруги  $E2$

$$L = \frac{E2 \cdot t_u}{I_m} \text{ (Гн)}. \quad (23)$$

$$L = \frac{3,65 \cdot 21 \cdot 10^{-6}}{16,5} = 6,6 \cdot 10^{-6} \text{ (Гн)} \quad (24)$$

Визначимо величину енергії, що передається за один такт роботи індуктивного балансира в розглянутому вище прикладі

$$W_L = \frac{L \cdot I_m^2}{2} = \frac{6,6 \cdot 10^{-6} \cdot 16,5^2}{2} = 9 \cdot 10^{-4} \text{ Дж.} \quad (25)$$

За умови прийнятого вище припущення про рівність діючих значень струму балансування та частоти перетворення, можна дати оцінку ефективності ємнісного та індуктивного буферного елемента схеми активного балансира порівнявши значення енергій  $W_L$  і  $W_C$

$$\frac{W_L}{W_C} = \frac{9 \cdot 10^{-4}}{1,36 \cdot 10^{-4}} \approx 7 \quad (26)$$

Отримане значення характеризує ефективність застосування в схемах активного балансування індуктивного буферного елемента в порівнянні з ємнісним. При зменшенні величини розбалансування акумуляторів  $B1, B2$  відношення (26) значно збільшується, і досягає свого максимального значення (близько 1000) за умови  $U_{B1} \approx U_{B2} \approx (U_{MAX} = 3,65 \text{ В})$ . Окрім зазначеного вище критерію, слід звернути увагу і на форми зарядного і розрядного струмів при використанні ємнісного та індуктивного буферних елементів.

Амплітудне значення струму у схемах з ємнісним буферним елементом (рис. 8) обмежене лише внутрішніми паразитними опорами елементів схеми, тому, при відносно великому значенні розбалансування, в елементах схеми (в тому числі акумуляторних батареях) виділяється значна величина енергії втрат у вигляді теплової енергії, що негативно позначається на параметрах акумуляторної батареї.

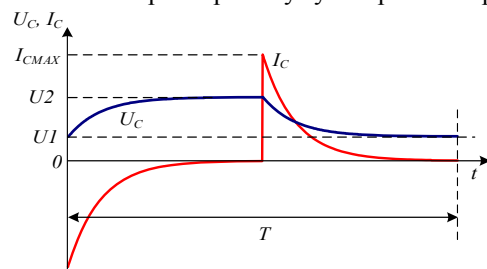


Рис. 8 – Машинограми форми струму та напруги буферного конденсатора

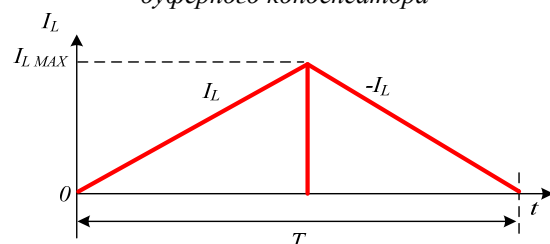


Рис. 9 – Машинограми форми струму буферної індуктивності

Амплітудне значення струму в схемі на основі індуктивних буферних елементів (рис. 9) обмежене величиною індуктивності. Воно може бути розраховане на етапі проектування пристрою. Крім того, забезпечення системою корування переривчастого режиму роботи перетворювача дозволяє зменшити комутаційні втрати в силових ключах схеми і дозволяє підвищити ефективність роботи в цілому.

### Висновки

Безпека використання електрохімічних накопичувачів вимагає застосування спеціалізованих балансуєчих пристроїв. Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, є системи активного балансування. Аналіз математичної моделі роботи двох типів буферних елементів (ємнісного та індуктивного) дозволив дати якісну оцінку їх ефективності. Перші, в порівнянні з індуктивними - не тільки мають гірші енергетичні характеристики, але і не дозволяють виконувати «масштабування» пристрою без істотного ускладнення системи управління.

При великій кількості накопичувачів (більше трьох) слід віддати перевагу трансформаторним системам балансування, як окремого випадку індуктивної топології.

### Список літератури

1. Sokol Y., Ivakhno V., Zamaruev V., Styslo B. Full Soft Switching Dual DC/DC Converter With Four-Quadrant Switch for Systems With Battery Energy Storage System. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, 2018. pp. 155-160. doi: 10.1109/IEPS.2018.8559490.
2. Sokol E., Zamaruev V., Kryvosheev S., Styslo B., Makarov V. The specificity of electrical energy storage unit application. *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*. Kiev, 2017. pp. 432-435. doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524.
3. A123 Automotive Lithium-ion Solutions. URL: <http://www.a123systems.com/>
4. Lindemark B. Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance. *IEEE 13th International Telecommunication Energy Conference*. Kyoto, Japan, 1991. P. 196-201. doi: 10.1109/INTLEC.1991.172396.
5. Stuart A.T. Fast equalization for large lithium ion batteries. *IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag.* 2009. Vol. 24. No 7. P. 27-31. doi: 10.1109/OCEANS.2008.5152122.
6. Zhang X., Liu P., Wang D. The design and implementation of smart battery management system balance technology. *J. Conver. Inf. Technol.* 2011. Vol. 6. № 5. P. 108-116. doi: 10.4156/JCIT.VOL6.ISSUE5.12.
7. Pascual C., Krein P.T. Switched capacitor system for automatic series battery equalization. *IEEE Applied Power Electronic Conference*. 1997. P.848-854. doi: 10.1109/APEC.1997.575744.
8. Hong-Sun P., Chol-Ho K., Ki-Bum P. et al. Design of a charge equalizer based on battery modularization. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 2009. V.58. No.7. P. 3938-3946. doi: 10.1109/TVT.2009.2015331.
9. Baughman A.C., Ferdowski M. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2008. V.55. No.7. P. 2277-2285. doi: 10.1109/TIE.2008.918401.
10. Yuanmao Y., Cheng K.W.E., Yeung Y.P.B. Zero current switching switched capacitor zero voltage gap automatic equalization system for series battery string. *IEEE Trans. Power Electron.* 2012. V.27. No7. P.3234-3242. doi: 10.1109/TPEL.2011.2181868.
11. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A modularized charge equalizer for an HEV lithium-ion battery string. *IEEE Trans. Power Electron.* 2009. V.56. No.5. P. 1464-1476. doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
12. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Jeju*, 2011. P. 310-317. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
13. Nishijima K., Sakamoto H., Harada K. PWM controlled simple and high performance battery balancing system. *IEEE Power Electron. Spec. Conf.* 2000. P. 517-520. doi: 10.1109/PESC.2000.878916.
14. Cassani P.A., Williamson S. Design, testing and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer. *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2010. V.57. No.12. P.3956-3962. doi: 10.1109/TIE.2010.2050750.
15. Moo C., Ng K.S., Hsieh Y. Parallel operation of battery power modules. *IEEE Trans. Energy Convers.* 2008. V.23. No.2. P.701-707. doi: 10.1109/TEC.2007.914310.
16. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A Modularized Charge Equalization Converter for a Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Stack. *Journal of Power Electronics*. 2007. V.7. N.4. P. 343-351. doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
17. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer. *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, Jeju*, 2011. P. 310-317. doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
18. Pham V.L., Duong V.T., Choi W. A low cost and fast cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery strings. *IEEE Power Electron. Spec. Conf.* 2000. P. 517-520. doi: 10.3390/electronics9020248.
19. Zhang M., Li B., Hang L., Tolbert L.M., Lu Z. Digitized feedforward compensation method for high power density three-phase VIENNA PFC converter. *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*. 2010. V. 57. No.12. P. 3956-3962. doi: 10.1109/APEC.2012.6165959.
20. Hopkins D.C., Mosling C.R., Hung S.T. Dynamic equalization during charging of serial energy storage elements. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 1993. V.29. No.2. P. 363-368. doi: 10.1109/28.216545.
21. Rashid M.H. *Power electronics handbook: devices, circuits and applications handbook*. Elsevier Inc, 2011. doi: 10.1016/B978-0-12-088479-7.X5018-4.
22. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. V.1. No8. P. 6-16. doi: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
23. Kim H.S., Park K.B., Park S.H. et al. A new two-switch flyback battery equalizer with low voltage stress on the switches. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. San Jose, CA, 2009. P.511-516. doi: 10.1109/ECCE.2009.5316333.
24. Yang D., Li S., Qi G. A bidirectional flyback cell equalizer for series-connected lithium iron phosphate batteries. *6th International Conference on Power Electronics Systems and*

- Applications*. Hong Kong, 2015. P.1-5. doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
25. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2017. V.7. No.4. P.267-277. doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
  26. Park J.H., Kim K.T. Multi-output differential power processing system using boost-flyback converter for voltage balancing. *International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing*. Da Nang, 2017. P.139-142. doi: 10.1109/SIGTELCOM.2017.7849811.
  27. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications. *IET Electrical Systems in Transportation*. 2017. V.7. No.4. P. 267-277. doi: 10.1049/iet-est.2016.0077.
- References (transliterated)**
1. Sokol Y., Ivakhno V., Zamaruiev V., Styslo B. Full Soft Switching Dual DC/DC Converter With Four-Quadrant Switch for Systems With Battery Energy Storage System. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 155-160, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559490.
  2. Sokol E., Zamaruiev V., Kryvosheev S., Styslo B., Makarov V. The specificity of electrical energy storage unit application, *2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Kiev, 2017, pp. 432-435, doi: 10.1109/UKRCON.2017.8100524.
  3. A123 Automotive Lithium-ion Solutions. Available at: <http://www.a123systems.com/>
  4. Lindemark B. Individual cell voltage equalizers (ICE) for reliable battery performance, *IEEE 13th International Telecommunication Energy Conference*, Kyoto, Japan, 1991, pp. 196–201, doi: 10.1109/INTLEC.1991.172396.
  5. Stuart A.T. Fast equalization for large lithium ion batteries, *IEEE Aerospace Electron. Syst. Mag.*, 2009, Vol. 24, No 7, pp. 27–31, doi: 10.1109/OCEANS.2008.5152122.
  6. Zhang X., Liu P., Wang D. The design and implementation of smart battery management system balance technology, *J. Converg. Inf. Technol.*, 2011, Vol. 6, 5, pp. 108–116, doi: 10.4156/JCIT.VOL6.ISSUE5.12.
  7. Pascual C., Krein P.T. Switched capacitor system for automatic series battery equalization, *IEEE Applied Power Electronic Conference*, 1997, 848–854, doi: 10.1109/APEC.1997.575744.
  8. Hong-Sun P., Chol-Ho K., Ki-Bum P. et al. Design of a charge equalizer based on battery modularization, *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 2009, V.58, No.7, pp. 3938-3946, doi: 10.1109/TVT.2009.2015331.
  9. Baughman A.C., Ferdowsi M. Double-tiered switched-capacitor battery charge equalization technique, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2008, V.55, No7, pp. 2277–2285, doi: 10.1109/TIE.2008.918401.
  10. Yuanmao Y., Cheng K.W.E., Yeung Y.P.B. Zero current switching switched capacitor zero voltage gap automatic equalization system for series battery string, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2012, V.27, No7, pp. 3234–3242, doi: 10.1109/TPEL.2011.2181868.
  11. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A modularized charge equalizer for an HEV lithium-ion battery string, *IEEE Trans. Power Electron.*, 2009, V.56, No5, pp. 1464–1476, doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
  12. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer, *8th International Conference on Power Electronics – ECCE, Asia, Jeju*, 2011, pp. 310-317, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
  13. Nishijima K., Sakamoto H., Harada K. PWM controlled simple and high performance battery balancing system, *IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2000, pp. 517–520, doi: 10.1109/PESC.2000.878916.
  14. Cassani P.A., Williamson S. Design, testing and validation of a simplified control scheme for a novel plug-in hybrid electric vehicle battery cell equalizer, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 2010, V.57, No12, pp.3956-3962, doi: 10.1109/TIE.2010.2050750.
  15. Moo C., Ng K.S., Hsieh Y. Parallel operation of battery power modules, *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2008, V.23, No2, pp.701–707, doi: 10.1109/TEC.2007.914310.
  16. Park H.S., Kim C.E., Kim C.H., Moon G.W. A Modularized Charge Equalization Converter for a Hybrid Electric Vehicle Lithium-Ion Battery Stack, *Journal of Power Electronics*, 2007, V.7, N4, pp. 343-351, doi: 10.1109/TIE.2009.2012456.
  17. Kim M.Y., Kim C.H., Cho S.Y., Moon G.W. A cell selective charge equalizer using multi-output converter with auxiliary transformer, *8th International Conference on Power Electronics – ECCE, Asia, Jeju*, 2011, pp. 310-317, doi: 10.1109/ICPE.2011.5944610.
  18. Pham V.L., Duong V.T., Choi W. A low cost and fast cell-to-cell balancing circuit for lithium-ion battery strings, *IEEE Power Electron. Spec. Conf.*, 2000, pp. 517–520, doi: 10.3390/electronics9020248.
  19. Zhang M., Li B., Hang L., Tolbert L.M., Lu Z. Digitized feedforward compensation method for high power density three-phase VIENNA PFC converter, *2012 Twenty-Seventh Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2010, V.57, No12, pp.3956–3962, doi: 10.1109/APEC.2012.6165959.
  20. Hopkins D.C., Mosling C.R., Hung S.T. Dynamic equalization during charging of serial energy storage elements, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, V.29, No2, pp. 363–368, doi: 10.1109/28.216545.
  21. Rashid M.H. *Power electronics handbook: devices, circuits and applications handbook*, Elsevier Inc, 2011, doi: 10.1016/B978-0-12-088479-7.X5018-4.
  22. Nerubatskyi V., Plakhtii O., Hordiienko D., Mykhalkiv S., Ravlyuk V. A method for calculating the parameters of the sine filter of the frequency converter, taking into account the criterion of starting current limitation and pulse-width modulation frequency, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, V.1, No8, pp. 6-16, doi: 10.15587/1729-4061.2021.225327.
  23. Kim H.S., Park K.B., Park S.H. et al. A new two-switch flyback battery equalizer with low voltage stress on the switches, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, San Jose, CA, 2009, pp.511-516, doi: 10.1109/ECCE.2009.5316333.
  24. Yang D., Li S., Qi G. A bidirectional flyback cell equalizer for series-connected lithium iron phosphate batteries, *6th International Conference on Power Electronics Systems and Applications*, Hong Kong, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
  25. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications, *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, V.7, No4, pp.267-277, doi: 10.1109/PESA.2015.7398904.
  26. Park J.H., Kim K.T. Multi-output differential power processing system using boost-flyback converter for voltage balancing, *International Conference on Recent Advances in Signal Processing, Telecommunications & Computing*, Da Nang, 2017, pp. 139-142, doi: 10.1109/SIGTELCOM.2017.7849811.
  27. Hoque M.M., Hannan M.A., Mohamed A. Optimal algorithms for the charge equalisation controller of series connected lithium-ion battery cells in electric vehicle applications, *IET Electrical Systems in Transportation*, 2017, V.7, No4, pp. 267-277, doi: 10.1049/iet-est.2016.0077.

### Відомості про авторів (About authors)

**Стисло Богдан Олександрович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7057-3523; e-mail: bohdan.styslo@khp.edu.ua.

**Bohdan Styslo** – Ph. D., Associate Professor Industrial and Biomedical Electronics Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: bohdan.styslo@khp.edu.ua.

**Зайцев Роман Валентинович** – доктор технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2286-8452; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

**Roman Zaitsev** – Doctor of Engineering Science, Docent, Head of Department, Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: roman.zaitsev@khp.edu.ua.

**Мінакова Ксенія Олександрівна** – кандидат фізико-математичних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-8869-1082; e-mail: minakova\_kseniia@khp.edu.ua.

**Kseniia Minakova** – Ph. D., Associate Professor, Senior Researcher of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine; e-mail: minakova\_kseniia@khp.edu.ua.

**Кіриченко Михайло Валерійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри фізичного матеріалознавства для електроніки та геліоенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-4847-506X; e-mail: mykhailo.kirichenko@khp.edu.ua.

**Mykhailo Kirichenko** – Ph. D., Associate Professor of Materials for Electronics and Solar Cells Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute, Kharkiv, Ukraine; e-mail: mykhailo.kirichenko@khp.edu.ua.

**Ересько Олександр Вячеславович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри промислової та біомедичної електроніки; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-7067-3273; e-mail: oleksandr.eresko@khp.edu.ua.

**Oleksandr Eresko** – Ph. D., Associate Professor Industrial and Biomedical Electronics Department, National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, Ukraine; e-mail: oleksandr.eresko@khp.edu.ua.

*Будь ласка, посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

Стисло Б. О., Зайцев Р. В., Мінакова К. О., Кіриченко М. В., Ересько О. В. Аналіз ефективності схем активного балансування акумуляторних батарей. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2021. № 2 (8). С. 38-45. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06.

*Please cite this article as:*

Styslo B., Zaitsev R., Minakova K., Kirichenko M., Eresko O. Analysis of batteries active balance schemes efficiency. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2021, no. 2 (8), pp. 38-45, doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06.

*Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

Стысло Б. А., Зайцев Р. В., Минакова К. А., Кириченко М. В., Ересько А. В. Анализ эффективности схем активного балансирования аккумуляторных батарей. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2021. № 2 (8). С. 38-45. doi:10.20998/2413-4295.2021.02.06.

**АННОТАЦІЯ** В роботі проведено огляд існуючих схемних рішень пристроїв для балансування акумуляторних батарей. Описано принципи балансування на основі ємкостного і індуктивного буферного елемента. Показано особливості їх роботи і основні розрахунки кожного з типів пристроїв. Для схем з трансформаторної топологією вказано розрахункові значення для визначення балансуємого струму. На основі аналізу схемних рішень, чисельно визначено і доведено ефективність використання схемних рішень на основі індуктивних буферних елементів. Моцні акумуляторні батареї для систем електроживлення використовуються в формі стеків, складаються з послідовно-паралельного з'єднання єдиничних накопичувачів. В час їх експлуатації виникає проблема нерівномірного розряду або заряду, для компенсації якої необхідно виконувати балансування рівнів напруги в акумуляторах стека. Безпечність використання електрохімічних накопичувачів вимагає застосування спеціалізованих балансуємих пристроїв. Найбільш ефективними, з енергетичної точки зору, є системи активної балансування. Аналіз математичної моделі роботи двох типів буферних елементів (ємкостного і індуктивного) дозволив дати якісну оцінку їх ефективності. Перші, порівняно з індуктивними - не тільки мають менші енергетичні характеристики, але і не дозволяють виконувати «масштабування» пристроїв без суттєвого ускладнення системи управління. Амплітудне значення струму в схемах з ємкостним буферним елементом обмежено тільки внутрішніми паразитними опорами елементів схеми, тому, при відносно великому значенні розбалансування, в елементах схеми (в тому числі акумуляторних батарей) виділяється значительна величина енергії втрат в формі теплової енергії, що негативно впливає на параметри акумуляторної батареї. Амплітудне значення струму в схемі на основі індуктивних буферних елементів обмежено величиною індуктивності. Воно може бути розраховано на етапі проектування пристроїв. Крім того, забезпечення системою управління прерывистого режиму роботи преобразувача дозволяє зменшити комутаційні втрати в силових ключах схеми і підвищує ефективність роботи в цілому. При великому кількості накопичувачів (більше трьох) слід віддати перевагу трансформаторним системам балансування, як частини випадку індуктивної топології.

**Ключові слова:** накопичувач енергії; акумуляторна батарея; балансування; схемне рішення; буферний елемент; режими роботи, ефективність

Надійшла (received) 18.04.2021