

# Електронні системи та сигнали

УДК 621.314: 621.311.6

DOI: [10.20535/2523-4455.2018.23.2.130391](https://doi.org/10.20535/2523-4455.2018.23.2.130391)

## Ефективне використання гібридного ємнісного накопичувача енергії джерела живлення для контактного мікрозварювання

Кожушко Ю. В., ORCID [0000-0002-4045-4088](https://orcid.org/0000-0002-4045-4088)e-mail [y.v.kozhushko@gmail.com](mailto:y.v.kozhushko@gmail.com)Бондаренко О. Ф., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)e-mail [bondarenkoaf@gmail.com](mailto:bondarenkoaf@gmail.com)Зінченко Д. О., ORCID [0000-0003-0711-7554](https://orcid.org/0000-0003-0711-7554)e-mail [zinchenko.denys.o@gmail.com](mailto:zinchenko.denys.o@gmail.com)Рижакова Т. О., ORCID [0000-0003-4340-2889](https://orcid.org/0000-0003-4340-2889)e-mail [ryzhakova.tetiana@gmail.com](mailto:ryzhakova.tetiana@gmail.com)

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Київ, Україна

**Реферат**—З метою підвищення ефективності використання гібридного ємнісного накопичувача енергії джерела живлення для контактного мікрозварювання запропоновано схемну топологію системи контролю розподілу енергії між ємнісними елементами накопичувача, що забезпечує стабільність вихідної напруги при значних пікових навантаженнях в умовах обмеженого доступу до промислової мережі. Здійснено імітаційне моделювання роботи запропонованої системи, отримано діаграми напруги та струму, що ілюструють процес заряду суперконденсаторного модуля від акумуляторної батареї та принцип дії комірок балансування.

Бібл. 10, рис. 3, табл. 1.

**Ключові слова** — автономне джерело живлення; гібридний ємнісний накопичувач; акумуляторна батарея; суперконденсатор; балансування напруги; контактне мікрозварювання.

### I. Вступ

На сьогодні контактне зварювання є розвинутою технологією та одним з найпоширеніших методів отримання нероз'єднаних деталей та конструкцій з металів та металевих сплавів [1]. Для контактного зварювання характерні такі особливості, як споживання значної потужності короткими імпульсами з тривалими паузами між ними та нелінійний характер навантаження. Ці особливості обумовлюють негативний вплив зварювальних машин на промислову мережу. Одним з методів вирішення цієї проблеми є застосування автономних джерел живлення. Робота таких джерел базується на використанні накопичувальних елементів, здатних забезпечувати енергію для роботи зварювальної установки впродовж необхідного часу. При цьому під час заряду накопичувачів енергія відбирається з мережі рівномірно, майже не спричиняючи на неї негативного впливу [2].

Накопичувачі енергії автономних джерел живлення мають акумулювати достатню кількість енергії, реалізовувати сотні тисяч циклів заряду-розряду

та забезпечувати швидку передачу енергії в навантаження з мінімальними втратами. Завдяки високій щільності енергії найбільш поширеним є використання акумуляторних батарей (АБ) як автономного джерела живлення [3]. Однак значні пікові струми, властиві установкам контактного зварювання, погіршують характеристики АБ і спричиняють значне скорочення терміну їх експлуатації. Ефективним рішенням в таких випадках може вважатись застосування суперконденсаторів (СК) [2]. Хоча вони поступаються АБ за щільністю збереженої енергії, проте значно випереджають за швидкістю доступу до неї та кількістю циклів заряду-розряду [4].

Використання гібридних ємнісних накопичувачів енергії, які включають АБ та СК і поєднують в собі їх переваги, дозволяє забезпечити імпульсні режими споживання значної потужності в навантаженні та тривалий час роботи за обмеженого доступу до промислової мережі [2]. Одним з недоліків СК при такому використанні є те, що його вихідна напруга



є лінійно пропорційною стану заряду, тобто вона збільшується або зменшується при заряді чи розряді СК. Таким чином, ефективність перетворювача, що живиться від суперконденсатора, значно варіюється в залежності від рівня напруги на ньому [3], [5]. Ще один недолік СК полягає в тому, що він має низьке значення номінальної напруги, яке зазвичай не перевищує 3 В. Для отримання більшої напруги створюють модулі з послідовно з'єднаних СК. При цьому, через наявність струмів саморозряду та відхилення ємності від номінальної величини, напруги на окремих СК модуля не є однаковими, що може спровокувати вихід елементів з ладу [6], [7].

Проектування систем живлення на основі гібридних ємнісних накопичувачів енергії з урахуванням вищезазначених особливостей використання СК та АБ є актуальною проблемою, якій присвячено багато робіт. Наприклад, в [5] розроблено методику керування зарядно-розрядними циклами АБ в режимі реального часу. Така система забезпечує тривалий експлуатаційний термін АБ в складі гібридного ємнісного накопичувача енергії джерела живлення для електротранспорту. В [8] розглядаються основні топології поєднання АБ та СК – пасивна, напівактивна та активна – та методи керування ними.

Задача вирівнювання напруги на елементах суперконденсаторного модуля (СКМ) є окремим напрямом дослідження, що висвітлено в роботах [6, 7, 9]. В [6] запропоновано систему балансування напруги СКМ джерела живлення для контактного мікрозварювання. Особливістю цієї системи є те, що вирівнювання напруги кожної комірки відбувається незалежно від рівня напруги на інших комірках. Роботу [7] присвячено розробці системи балансування напруги СКМ на основі двотактного DC-DC перетворювача, запропоновано алгоритм керування процесом балансування, що ґрунтується на прогнозованій поведінці комірок, за рахунок чого скорочується час та підвищується енергоефективність процесу балансування. В [9] запропоновано систему вирівнювання напруги на елементах СКМ на основі узгоджувальних трансформаторів, принцип дії якої базується на процесах

енергообміну між комірками СКМ. Проте необхідно відзначити, що в розглянутих роботах автори не враховували особливості навантаження, характерні для процесу контактного мікрозварювання.

Таким чином, мета цієї роботи – досягти ефективного використання та стабільної вихідної напруги гібридного ємнісного накопичувача енергії при значних пікових навантаженнях в умовах обмеженого доступу до промислової мережі.

## II. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ РОЗПОДІЛУ ЕНЕРГІЇ МІЖ ЄМНІСНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ ГІБРИДНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ

Найпростіший спосіб поєднання АБ та СКМ – пасивне паралельне підключення до АБ зарядженого СКМ, напруга на якому дорівнює напрузі АБ. Перевагами такого рішення є простота, низька вартість та висока надійність конструкції. Основним недоліком є те, що розподіл струму навантаження між АБ і СКМ визначається лише внутрішніми еквівалентними послідовними опорами цих елементів. При цьому напруги на елементах мають бути рівними в будь-який момент часу. Суттєве зниження напруги СКМ в порівнянні з напругою АБ обмежує кількість енергії, яку може віддати накопичувач в навантаження [3], [8].

Для ефективного використання АБ та забезпечення стабільної напруги СКМ необхідно контролювати розподіл енергії між двома накопичувачами. А саме: необхідно забезпечити рівномірний розряд батареї при переході від низького до високого струму під час перехідних процесів, щоб обмежити зниження напруги акумулятора. Розподіл енергії між накопичувачами може контролюватись за допомогою перетворювача постійного струму [5]. Авторами пропонується схема (рис. 1), яка завдяки перетворювачу з дроселем дозволяє відбирати лінійний струм від АБ для заряду СКМ та забезпечує вирівнювання напруги комірок модуля за рахунок системи балансування на основі зворотньоходового перетворювача.

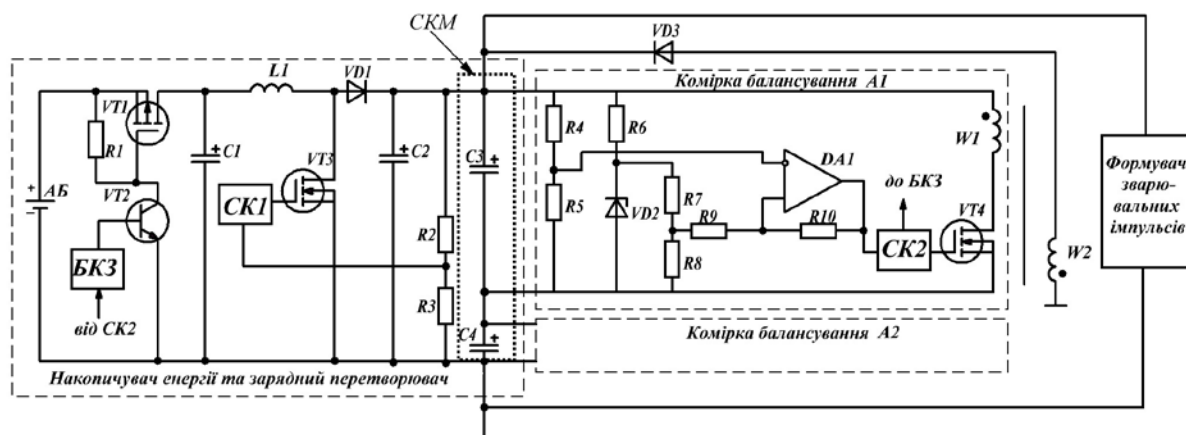


Рис. 1 Схемна топологія системи контролю розподілу енергії між ємнісними елементами гібридного накопичувача.

Система керування 1 (СК1) на рис. 1 здійснює керування фазами накопичення та передачі енергії підвищувального перетворювача. При відкритому транзисторі  $VT3$  перетворювач знаходиться у фазі накопичення енергії, при цьому розрядний струм АБ лінійно наростає в дроселі  $L1$ , накопичуючи в ньому енергію. СКМ отримує енергію від накопичувального конденсатора  $C2$ . При закритому транзисторі  $VT3$  перетворювач переходить у фазу передачі енергії. Енергія, накопичена в дроселі, складається з енергією АБ і через діод  $VD1$  заряджає СКМ, в складі якого 2 СК номінальною напругою 2,5 В [9]. Паралельно до кожного СК під'єднано комірку балансування напруги. При досягненні на певному конденсаторі модуля номінальної напруги Система керування 2 (СК2) дозволяє роботу зворотного перетворювача на елементі  $VT4$ , обмотка  $W1$  зашунтовує СК, надлишкова енергія через вторинну обмотку  $W2$  та випрямляючий діод  $VD3$  підзаряджає модуль [6]. Такий процес триває до досягнення на кожному конденсаторі номінальної напруги, потім Блок керування зарядом (БКЗ) відключає АБ. Таким чином забезпечується вирівнювання напруги на елементах модуля та ефективне використання АБ.

### III. ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАРЯДНИХ ПРОЦЕСІВ СКМ

Для перевірки ефективності запропонованої топології проведено імітаційне моделювання зарядно-розрядних процесів у середовищі LTspice. В якості схемних елементів використано компоненти бібліотек Component, Comparators, Misc. Необхідно зазначити, що типи АБ та СКМ обрано такими, щоб їх параметри були зручними для моделювання та ілюстрації процесів заряду (табл. 1). Частота перетворення при моделюванні була задана рівною 100 кГц, напруга заряду СКМ 5 В, максимальний час балансування напруги СКМ 1 мс, максимальне відхилення напруги на СК  $\pm 0,05$  В.

В результаті моделювання електромагнітних процесів в схемі (рис. 1) при заряді СК модуля від початкової напруги 2 В до номінальної напруги 2,5 В отримано діаграми напруги і струму СКМ та АБ (рис. 2). Ці діаграми підтверджують ефективність запропонованої схеми, оскільки від АБ відбирається майже постійний струм без імпульсних навантажень. Також на діаграмах видно, що за рахунок використання системи балансування та Блоку керування зарядом, який підключає АБ до перетворювача або відключає її в залежності від рівня напруги на СК модуля, підтримується постійний рівень напруги СКМ.

На рис. 3 представлено отримані діаграми роботи двох сусідніх комірок балансування  $A1$  та  $A2$  (рис. 1), які показують, що рівень напруги на суперконденсаторах модуля, в яких відхилення ємності від номінальної становить  $\pm 20\%$ , не виходить за встановлені межі (табл. 1).

ТАБЛИЦЯ 1 ПАРАМЕТРИ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ

АБ	Li-ion Battery LIR18650	Номінальна напруга, В	3,7
		Послідовний еквівалентний опір, Ом	0,07
СКМ	SAMXON DRE3.3/2.5	Номінальна напруга, В	2,5
		Послідовний еквівалентний опір, Ом	0,01
		Номінальна ємність, Ф	3,3 $\pm$ 20%

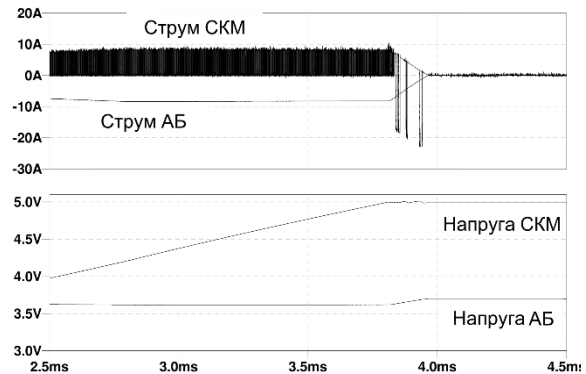


Рис. 2 Діаграми напруги і струму на ємнісних елементах гібридного накопичувача під час зарядних процесів.

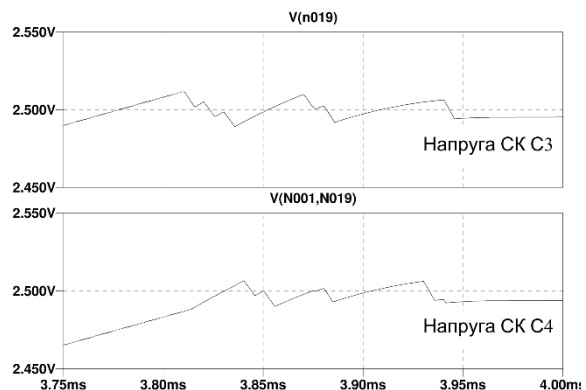


Рис. 3 Діаграми напруги на суперконденсаторах двох сусідніх комірок під час балансування.

З діаграм видно, що при досягненні напругою на  $C3$  або  $C4$  2,5 В починається процес балансування, СК заряджаються і розряджаються в межах, які визначено шириною петлі гістерезису компаратора  $DA1$  (рис. 1).

### ВИСНОВОК

Таким чином, в роботі вирішена задача ефективного використання та досягнення стабільної вихідної напруги гібридного ємнісного накопичувача енергії джерела живлення для контактного мікрозварювання шляхом одночасного застосування перетворювача постійного струму для забезпечення керування розподілом енергії між ємнісними елементами та сис-

теми вирівнювання напруги на елементах СКМ. Підвищувальний перетворювач за рахунок вхідного дроселя дозволяє відбирати від АБ струм без імпульсних навантажень, що позитивно впливає на експлуатаційний термін АБ. В свою чергу, система балансування напруги СКМ не допускає переполюсування напруги або перенапруги елементів модуля, що запобігає його передчасному старінню або виходу з ладу.

Запропонована схемна топологія може бути рекомендована для забезпечення ефективної роботи гібридного ємнісного накопичувача енергії при побудові джерел живлення для контактної мікросварювання. Майбутні роботи плануються присвятити питанням розширення галузі її застосування.

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

#### ЛІТЕРАТУРА

- [1] M. D. Banov, *Tekhnologiya i oborudovanie kontaknoi svarki [Technology and equipment of re-sistance welding]*, 5rd ed. Moscow: Izdatelskii tcentr "Akademiiia," 2013, ISBN: 978-5-7695-9935-4.
- [2] Y. V. Bondarenko, P. S. Safronov, O. F. Bondarenko, V. M. Sydorets, and T. S. Rogozina, "Hibrydni enerhonakopychuvachi na osnovi akumuliatoriv ta superkondensatoriv dlia kontaktnoho mikrozvariuvannia [The hybrid energy storages based on batteries and ultracapacitors for contact microwelding]," *Tekhnologiya i Konstr. v Elektron. Appar.*, no. 4, pp. 33–38, Aug. 2014, DOI: [10.15222/TKEA2014.4.33](https://doi.org/10.15222/TKEA2014.4.33).
- [3] D. Shin, Y. Kim, J. Seo, N. Chang, Y. Wang, and M. Pedram, "Battery-supercapacitor hybrid system for high-rate pulsed load applications," in *2011 Design, Automation & Test in Europe*, 2011, pp. 1–4, DOI: [10.1109/DATE.2011.5763295](https://doi.org/10.1109/DATE.2011.5763295).
- [4] A.A. Shcherba, N. I. Suprunovska, and O. O. Biletsky, "Energeticheskiye kharakteristiki superkondensatorov pri ikh zaryade ot istochnika napryazheniya i razryade na rezistivnyuyu nagruzku [Power characteristics of supercapacitors during their charge from a source of voltage and discharge on resistive load]," *Pr. Inst. elektrodynamiky Natsionalnoi Akad. Nauk Ukr.*, vol. 39, pp. 65–73, 2014, URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED\\_2014\\_39\\_13](http://nbuv.gov.ua/UJRN/PIED_2014_39_13).
- [5] E. Kim, K. G. Shin, and J. Lee, "Real-Time Discharge/Charge Rate Management for Hybrid Energy Storage in Electric Vehicles," in *2014 IEEE Real-Time Systems Symposium*, 2014, pp. 228–237, DOI: [10.1109/RTSS.2014.16](https://doi.org/10.1109/RTSS.2014.16).
- [6] Y. V. Kozhushko and O. F. Bondarenko, "Balansuvannia napruhy modulnoho nakopychuvacha enerhii dzherela zhyvlennia dlia kontaktnoho mikrozvariuvannia [Voltage balancing in modular energy storage of power supply for micro resistance welding]," *Tekhnologiya i Konstr. v Elektron. Appar.*, no. 4–5, pp. 15–23, Oct. 2017, DOI: [10.15222/TKEA2017.4-5.15](https://doi.org/10.15222/TKEA2017.4-5.15).
- [7] L. Li, Z. Huang, H. Li, and J. Peng, "A rapid cell voltage balancing scheme for supercapacitor based energy storage systems for urban rail vehicles," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 142, pp. 329–340, 2017, DOI: [10.1016/j.epsr.2016.09.021](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.09.021).
- [8] X. Zhang, Z. Dong, and C. Crawford, "Hybrid Energy Storage System for Hybrid and Electric Vehicles: Review and a New Control Strategy," *Volume 4: Energy Systems Analysis, Thermodynamics and Sustainability; Combustion Science and Engineering; Nanoengineering for Energy, Parts A and B*, pp. 91–101, 2011, URL: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1643025>.
- [9] B. Yu. Semenov, *Silovaya elektronika. Ot prostogo k slozhnomu [Power electronics. From simple to complex]*, 3rd ed. Moscow: SOLON-Press, 2015, ISBN: 978-5-91359-148-7.

Надійшла до редакції 08 квітня 2018 р.

УДК 621.314: 621.311.6

## Эффективное использование гибридного емкостного накопителя энергии источника питания для контактной микросварки

Кожушко Ю. В., ORCID [0000-0002-4045-4088](https://orcid.org/0000-0002-4045-4088)

e-mail [y.v.kozhushko@gmail.com](mailto:y.v.kozhushko@gmail.com)

Бондаренко А. Ф., к.т.н. доц., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail [bondarenkoaf@gmail.com](mailto:bondarenkoaf@gmail.com)

Зинченко Д. А., ORCID [0000-0003-0711-7554](https://orcid.org/0000-0003-0711-7554)

e-mail [zinchenko.denys.o@gmail.com](mailto:zinchenko.denys.o@gmail.com)

Рыжакова Т. А., ORCID [0000-0003-4340-2889](https://orcid.org/0000-0003-4340-2889)

e-mail [ryzhakova.tetiana@gmail.com](mailto:ryzhakova.tetiana@gmail.com)



Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Киев, Украина

*Реферат*—С целью эффективного использования гибридного емкостного накопителя энергии источника питания для контактной микросварки предложена схемная топология системы контроля распределения энергии между емкостными элементами накопителя, которая обеспечивает стабильность выходного напряжения при значительных пиковых нагрузках в условиях ограниченного доступа к промышленной сети. Проведено имитационное моделирование работы предложенной системы, получены диаграммы напряжения и тока, иллюстрирующие процесс заряда суперконденсаторного модуля от аккумуляторной батареи и принцип действия ячеек балансировки.

Библ. 10, рис. 3, табл. 1.

*Ключевые слова* — автономный источник питания; гибридный емкостной накопитель; аккумуляторная батарея, суперконденсатор; балансировка напряжения; контактная микросварка

UDC 621.314: 621.311.6

## Efficient Operation of Hybrid Capacitive Energy Storage of Power Supply for Micro Resistance Welding

Yu. V. Kozhushko, ORCID [0000-0002-4045-4088](https://orcid.org/0000-0002-4045-4088)

e-mail [y.v.kozhushko@gmail.com](mailto:y.v.kozhushko@gmail.com)

O. F. Bondarenko, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0002-4276-1145](https://orcid.org/0000-0002-4276-1145)

e-mail [bondarenkoaf@gmail.com](mailto:bondarenkoaf@gmail.com)

D. O. Zinchenko, ORCID [0000-0003-0711-7554](https://orcid.org/0000-0003-0711-7554)

e-mail [zinchenko.denys.o@gmail.com](mailto:zinchenko.denys.o@gmail.com)

T. O. Ryzhakova, ORCID [0000-0003-4340-2889](https://orcid.org/0000-0003-4340-2889)

e-mail [ryzhakova.tetiana@gmail.com](mailto:ryzhakova.tetiana@gmail.com)

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" [kpi.ua](http://kpi.ua)  
Kyiv, Ukraine

*Abstract*—The paper is devoted to the problem of efficient operation of a hybrid capacitive energy storage of power supply for micro resistance welding. The efficiency of battery-supercapacitor modules is considered to optimize the operation of hybrid capacitive energy storage for micro resistance welding equipment. The relevance of the problem is explained by the necessity of simultaneous solving two following tasks. First, a large pulsed current, that is inherent for micro resistance welding, greatly exceeds the average value of battery discharge current and can significantly shorten the battery service life in a charge-discharge cycle. Second, the output voltage increases or decreases dynamically as the supercapacitor is charged or discharged. As a result, the efficiency of power converters, which are connected to a supercapacitor varies significantly by the difference in their input and output voltage levels. Thereby, the goal of this paper is to develop energy control system to achieve efficient using of the hybrid capacitive energy storage and stability of its output voltage for high-peak pulsed load and for portable applications. To achieve the stated goal, first, the new battery-supercapacitor hybrid topology which employs a DC-DC converter is proposed. The authors propose a topology, which provides linear discharge current of battery for the supercapacitor module charging and provides for the voltage equalizing of the module cells by means of a balancing system based on a flyback converter. Secondly, the simulation of the system operation is carried out. The diagrams of voltage and current illustrating the process of supercapacitor module charge from the accumulator battery and the principle of the balancing cells operation were obtained. These diagrams confirm the effectiveness of the proposed topology since the battery is discharged current without pulsed loads. The diagrams also show that the constant level voltage of ultracapacitors module is maintained due to the use of a voltage equalizing system and a charge control unit, which connects or disconnects the battery and the converter depending on the voltage level on the supercapacitor. The proposed topology can be recommended for efficient operation of the hybrid capacitive energy storage for developing power supplies for micro resistance welding, which will use in the conditions of large pulsed load current and limited access to the industrial network.

Ref. 10, fig. 3, tabl. 1.

*Keywords* — autonomous power supply; hybrid capacitive energy storage; accumulator battery; supercapacitor; voltage equalizing; micro resistance welding

