

К. т. н. Ю. В. БОНДАРЕНКО¹, к. т. н. П. С. САФРОНОВ¹, к. т. н. А. Ф. БОНДАРЕНКО¹,
д. т. н. В. Н. СИДОРЦ², Т. С. РОГОЗИНА¹

Украина, г. Алчевск, ¹Донбасский государственный технический университет;
г. Киев, ²Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины

E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ГИБРИДНЫЕ ЭНЕРГОНАКОПИТЕЛИ НА ОСНОВЕ АККУМУЛЯТОРОВ И СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ ДЛЯ КОНТАКТНОЙ МИКРОСВАРКИ

С помощью имитационного моделирования показана возможность применения в установках контактной микросварки гибридных энергонакопителей на основе аккумуляторных батарей и суперконденсаторов, которые обладают высокими энергетическими и динамическими характеристиками, достаточными для обеспечения формирования импульсов сварочного тока с необходимыми параметрами.

Ключевые слова: автономный источник питания, энергонакопитель, суперконденсатор, аккумуляторная батарея, контактная микросварка.

Контактная микросварка является эффективной технологией неразъемного соединения малогабаритных деталей, широко используемой в электронной промышленности и приборостроении. Для установок, реализующих контактную микросварку, характерны следующие особенности потребления электроэнергии во время технологического процесса: потребление значительной энергии короткими импульсами, длительность которых не превышает нескольких миллисекунд, нелинейный характер нагрузки, специальный закон изменения сварочного тока [1]. Все это негативно влияет на питающую сеть при использовании сварочных установок в промышленном масштабе [2] и вызывает необходимость применения специальных технических средств, таких как корректоры коэффициента мощности и фильтры электромагнитных помех. Чтобы минимизировать влияние сварочных установок на сеть можно также применять автономные источники питания. Их основой являются энергонакопительные элементы, способные обеспечивать бесперебойную работу сварочной установки в течение определенного времени (рабочей смены или др.). При этом потребление энергии во время периодического заряда таких автономных источников происходит достаточно равномерно, не оказывая негативного влияния на сеть. Использование автономных источников питания для установок контактной микросварки также делает возможным их использование в тех случаях, когда доступ к электросетям ограничен или отсутствует, например при работе в космосе или в открытом море.

Актуальной задачей при построении автономных источников питания для установок контактной микросварки является выбор эффективных энергонакопительных элементов, обладающих большой емкостью и малым внутренним сопро-

тивлением, способных накапливать и отдавать энергию с высокой скоростью и эффективно, а также сохранять свои характеристики при частых перезарядках.

На сегодняшний день довольно широкое применение в качестве энергонакопителей получили суперконденсаторы, известные также как ионисторы [3]. Они используются в электро-транспорте, бытовой электронике, энергетике. Суперконденсаторы обладают рядом существенных преимуществ по сравнению с другими накопительными элементами, такими как, например, аккумуляторные батареи и электролитические конденсаторы. В частности, суперконденсаторы имеют лучшие массогабаритные показатели, чем электролитические конденсаторы той же емкости, и более высокую скорость заряда/разряда, чем аккумуляторы, к тому же они выдерживают сотни тысяч циклов перезаряда. Известны также гибридные решения, когда совместно используются аккумуляторные батареи и суперконденсаторы [4]. Следует, однако, отметить, что публикации, в которых рассматриваются вопросы применения таких гибридных энергонакопителей в установках контактной микросварки, отсутствуют.

Целью данной работы является исследование возможности применения гибридных энергонакопителей, включающих различные типы накопительных элементов, в автономных источниках питания для установок контактной микросварки. Ожидаемый эффект от такой комбинации — высокая энергоемкость накопителя и высокая скорость отдачи энергии в нагрузку.

Эквивалентная схема гибридного энергонакопителя

Обобщенная принципиальная схема источника питания, состоящего из гибридного энергона-

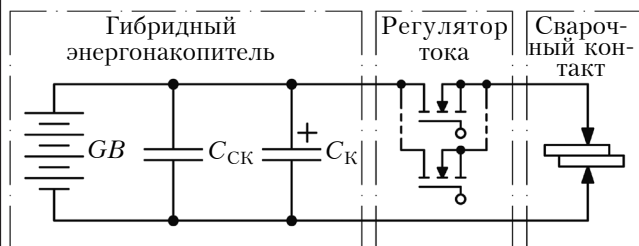


Рис. 1. Обобщенная принципиальная схема автономного источника питания

копителя и транзисторного регулятора тока, в упрощенном виде показана на **рис. 1**. Гибридный энергонакопитель включает аккумуляторную батарею GB , суперконденсатор $C_{СК}$ и электролитический конденсатор C_K . Транзисторный регулятор осуществляет формирование необходимого закона изменения сварочного тока в нагрузке [5]. Нагрузкой источника питания является сварочный контакт.

Для проведения теоретических исследований работы предлагаемого гибридного энергонакопителя в составе автономного источника питания для установки контактной микросварки необходимо составить его эквивалентную схему, которая с достаточной точностью будет отражать его электрические свойства. Рассмотрим известные эквивалентные схемы элементов, входящих в состав гибридного энергонакопителя.

Простейшая эквивалентная схема суперконденсатора представляется в виде RC -цепочки, как это показано на **рис. 2, а**, где $C_{СК}$ — электрическая емкость суперконденсатора, а $R_{СК}$ — его паразитное последовательное активное сопротивление [4].

Также известна эквивалентная схема суперконденсатора, показанная на **рис. 2, б** [6]. При ее составлении принята во внимание внутренняя пористость структуры электродов суперконденсатора: каждая пора представлена отдельным конденсатором, обладающим собственной малой емкостью и внутренним сопротивлением. Суперконденсатор в целом представлен параллельным соединением таких пор ($R_1C_1...R_nC_n$) и параллельно подключенным сопротивлением утечки ($R_{УТ}$).

На **рис. 2, в** представлена эквивалентная схема суперконденсатора, которая учитывает емкость двойного электрического слоя (C_1, C_2), сопротивление диэлектрика (R_1, R_2), сопротивления электродов ($R_{Э1}, R_{Э2}$) и сопротивление слоя сепаратора ($R_{СЕП}$) [7].

Еще один вариант эквивалентной схемы суперконденсатора представлен на **рис. 2, г** [8], где помимо ранее упомянутых параметров учтена эквивалентная последовательная паразитная индуктивность обкладок и выводов суперконденсатора ($L_{СК}$), влияние которой проявляется при работе в импульсных режимах.

Необходимо отметить, что эквивалентная схема на **рис. 2, а** является слишком упрощенной,

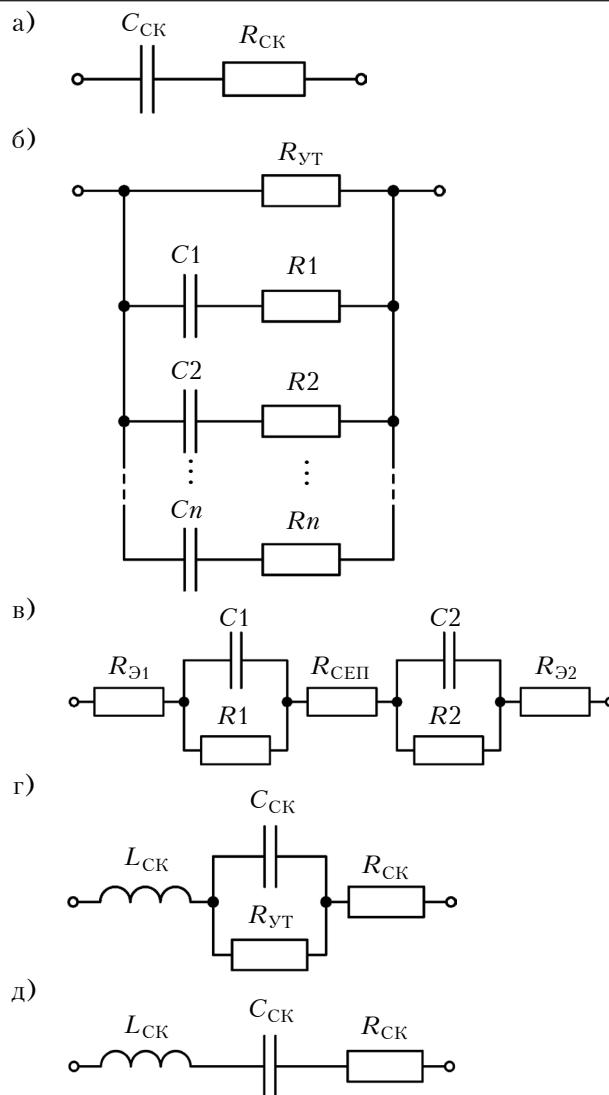


Рис. 2. Эквивалентные схемы суперконденсаторов

т. к. не отражает индуктивную составляющую суперконденсатора, которая важна при исследовании динамических процессов передачи энергии в нагрузку. Эквивалентные схемы на **рис. 2, б, в** довольно точно отражают особенности внутреннего строения суперконденсаторов и могут быть интересны при теоретических исследованиях протекающих в них процессов, однако использовать их при исследовании поведения суперконденсатора как компонента электрической схемы весьма затруднительно, поскольку определить реальные параметры входящих в их состав элементов невозможно. Наиболее подходящей для планируемых исследований представляется схема на **рис. 2, г**, которая отражает все необходимые составляющие, влияющие на динамику процесса передачи энергии. Данная схема может быть упрощена за счет исключения сопротивления утечки $R_{УТ}$, поскольку величина тока утечки суперконденсатора составляет доли миллиампера, а сварочного тока — сотни ампер. С учетом такого упрощения эквивалент-

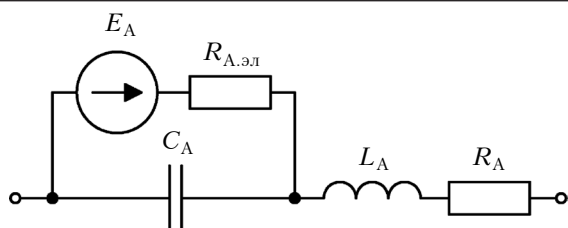


Рис. 3. Эквивалентная схема аккумуляторной батареи

ная схема суперконденсатора будет выглядеть так, как показано на рис. 2, д. Для представления электролитического конденсатора будем использовать аналогичную ей схему, позволяющую учесть емкость конденсатора, его паразитное последовательное активное сопротивление и паразитную индуктивность обкладок и выводов [9], которые, как правило, приводятся в технической документации.

Для представления аккумуляторной батареи воспользуемся эквивалентной схемой, приведенной на **рис. 3** [10], которая учитывает все основные электрические параметры батареи: E_A — ЭДС батареи; $R_{A.эл}$ — сопротивление, отражающее проводящие свойства электролита; C_A — эквивалентная емкость, обусловленная внутренней структурой батареи; R_A , L_A — сопротивление и индуктивность выводов батареи.

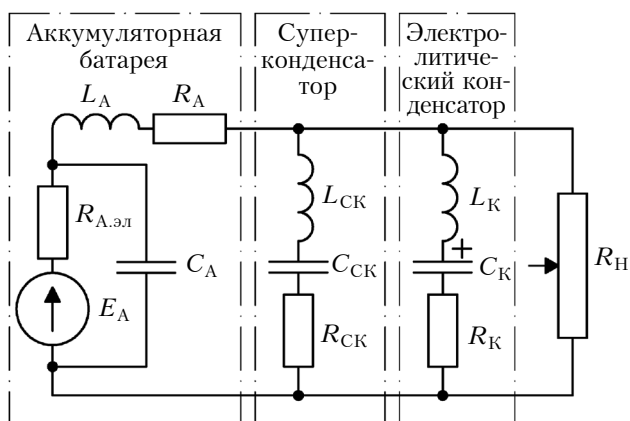


Рис. 4. Общая эквивалентная схема гибридного энергонакопителя

Общая эквивалентная схема гибридного энергонакопителя, которая далее будет использоваться для проведения исследований, показана на **рис. 4**. Транзисторный регулятор и сварочный контакт представлены здесь в виде переменного сопротивления R_H .

Характеристики гибридного энергонакопителя

Исследование характеристик гибридного энергонакопителя было проведено путем имитационного моделирования с использованием пакета MATLAB/Simulink. При этом были рассмотрены два варианта автономных источников энергии для микросварки — стационарный и

портативный, отличающиеся между собой величиной емкости аккумуляторных батарей. В первом случае был применен автомобильный аккумулятор большой емкости, во втором — набор миниатюрных аккумуляторов малой емкости.

Значения параметров блоков имитационной модели были заданы в соответствии с параметрами реальных компонентов, взятыми из [11, с. 15; 12, с. 119; 13, с. 1; 14, с. 23; 15; 16].

Для стационарного автономного источника энергии были выбраны автомобильный аккумулятор типа 6СТ-55 емкостью 55 А·ч, суперконденсаторы ВСАР0350Е270Т11 емкостью 350 Ф, электролитический конденсатор К50-77 емкостью 0,1 Ф. При моделировании были заданы следующие параметры эквивалентной схемы аккумулятора: $E_A=12$ В; $C_A=1,25$ Ф; $R_{A.эл}=83,3$ мОм; $R_A=7,7$ мОм; $L_A=0,2$ мГн. Параметры эквивалентной схемы батареи из пяти последовательно соединенных суперконденсаторов: $C_{СК}=70$ Ф; $R_{СК}=16$ мОм; $L_{СК}=0,3$ мкГн. (Последовательное соединение суперконденсаторов применено для их согласования по напряжению с аккумуляторной батареей, т. к. каждый из суперконденсаторов рассчитан на 2,7 В, а напряжение аккумулятора — 12 В.) Параметры эквивалентной схемы электролитического конденсатора: $C_K=0,1$ Ф; $R_K=15$ мОм; $L_K=0,1$ мкГн.

Для портативного автономного источника энергии были выбраны пять последовательно соединенных миниатюрных Ni-MH аккумуляторов GP130AАНЕ емкостью 1,3 А·ч и величиной ЭДС 1,2 В, три последовательно соединенных суперконденсатора ВСАР0350Е270Т11. При моделировании были заданы следующие параметры эквивалентной схемы аккумуляторной батареи: $E_A=6$ В; $C_A=0,125$ Ф; $R_{A.эл}=75$ мОм; $R_A=10$ мОм; $L_A=0,3$ мкГн. Параметры эквивалентной схемы батареи суперконденсаторов: $C_{СК}=116,7$ Ф; $R_{СК}=9,6$ мОм; $L_{СК}=0,18$ мкГн.

При моделировании был задан закон изменения сопротивления (R_H), приближенно отражающий реальное поведение сварочного контакта в процессе сварки [17], и закон изменения тока (i_H), который является одним из типовых для микросварки [1] (**рис. 5**).

На **рис. 6, а** приведены диаграммы изменения тока в ветвях схемы при нерегулируемом разряде стационарного энергонакопителя на нагрузку. Здесь видно, что ток аккумуляторной батареи (i_A) нарастает довольно медленно, ток суперконденсаторов ($i_{СК}$) нарастает значительно быстрее, а скорость нарастания тока электролитического конденсатора (i_K) самая высокая. Ток в нагрузке является суммой всех этих трех токов, что обеспечивает его стабильность на исследуемом интервале времени, равном типовой длительности сварочного импульса. Поддержание тока нагрузки на самом начальном участке формирования тока определяется конденсатором, а на среднем и конечном — суперконденсатора-

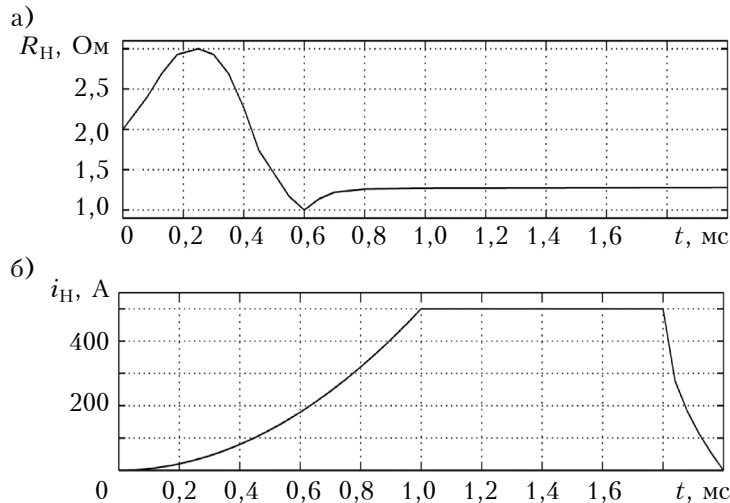


Рис. 5. Диаграммы изменения сопротивления (а) и тока (б) нагрузки

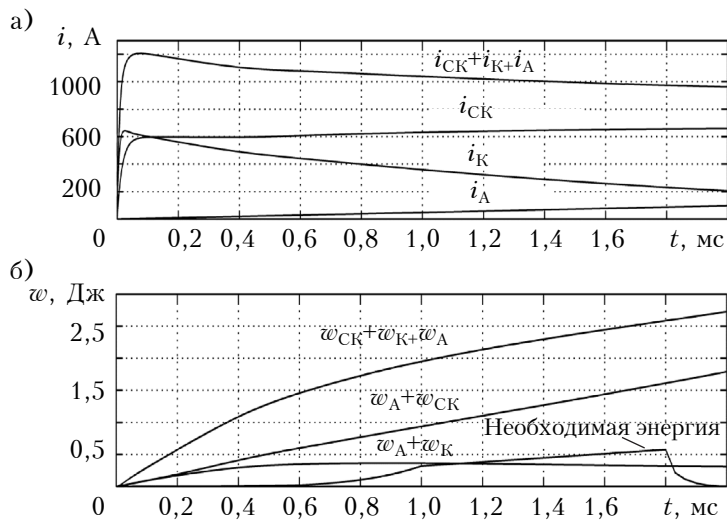


Рис. 6. Диаграммы изменения тока в ветвях схемы (а) и выделяемой в нагрузке энергии (б) при нерегулируемом разряде стационарного энергонакопителя на нагрузку

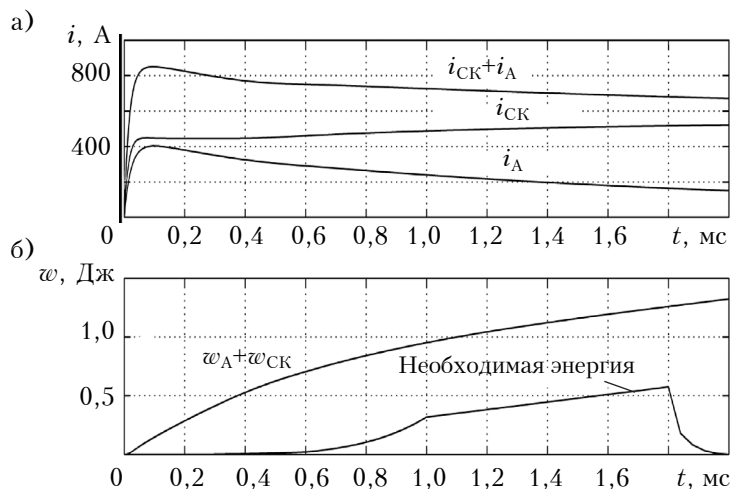


Рис. 7. Диаграммы изменения тока в ветвях схемы (а) и выделяемой в нагрузке энергии (б) при нерегулируемом разряде портативного энергонакопителя на нагрузку

ми. Роль аккумулятора становится более заметной на конечном участке.

На рис. 6, б показаны диаграммы изменения энергии, выделяемой в нагрузке при нерегулируемом разряде накопительных элементов в различных комбинациях, а также энергии, необходимой для формирования импульса сварочного тока с заданными параметрами (см. рис. 5, б). Как видно из рисунка, энергия, которую обеспечивает накопитель «аккумуляторная батарея + конденсатор» ($w_A + w_K$), ниже необходимого уровня на среднем участке формирования тока. Это связано с тем, что конденсатор к этому времени уже успевает существенно разрядиться, а ток аккумулятора еще не успевает нарасти. Накопитель «аккумуляторная батарея + суперконденсаторы» ($w_A + w_{CK}$) обеспечивает необходимую энергию на всем интервале времени с достаточным запасом. Вариант накопителя, включающий все три типа элементов, обеспечивает энергию ($w_A + w_K + w_{CK}$), уровень которой можно считать избыточным в данном случае.

На рис. 7 представлены диаграммы изменения тока в ветвях схемы и энергии портативного энергонакопителя, в состав которого входит набор аккумуляторных батарей небольшой емкости и суперконденсаторы. Как видно из рисунка, такой энергонакопитель также обеспечивает достаточную для сварочного импульса энергию, хотя и меньшую, чем стационарный.

Энергетические возможности двух описанных вариантов гибридных энергонакопителей, определяемые емкостью аккумуляторных батарей, оценим путем расчета количества сварочных импульсов с заданными параметрами (см. рис. 5, б), которые они способны обеспечить до достижения допустимой глубины разряда.

Примем допустимую глубину разряда батареи ξ равной 70% от полного заряда, и тогда

$$\xi W_A = n W_{II} \quad (1)$$

где W_A — максимальная энергия, накопленная в аккумуляторе;

W_{II} — энергия, необходимая для одного сварочного импульса;

n — количество сварочных импульсов.

Энергию, необходимую для одного сварочного импульса, рассчитаем по формуле

$$W_{\text{И}} = I_{\text{Н.ср}}^2 R_{\text{Н.ср}} t_{\text{И}}, \quad (2)$$

где $I_{\text{Н.ср}}$, $R_{\text{Н.ср}}$ — средние значения тока в нагрузке и сопротивления нагрузки на интервале формирования сварочного импульса длительностью $t_{\text{И}}$:

$$I_{\text{Н.ср}} = \frac{1}{t_{\text{И}}} \int_0^{t_{\text{И}}} i_{\text{Н}}(t) dt; \quad (3)$$

$$R_{\text{Н.ср}} = \frac{1}{t_{\text{И}}} \int_0^{t_{\text{И}}} r_{\text{Н}}(t) dt. \quad (4)$$

Таким образом, количество сварочных импульсов, которое способен обеспечить автономный источник питания с энергонакопителем, можно определить по формуле

$$n = \frac{\xi W_{\text{А}}}{I_{\text{Н.ср}}^2 R_{\text{Н.ср}} t_{\text{И}}}. \quad (5)$$

Согласно расчетам, энергонакопитель на основе автомобильного аккумулятора может обеспечить примерно $6 \cdot 10^6$ импульсов, а энергонакопитель на основе аккумуляторов малой емкости — почти на два порядка меньше — около $7 \cdot 10^4$ импульсов. Отметим, что при изготовлении одного изделия (микросхемы, аккумуляторной батареи, электромеханического фильтра и др.) число сварочных операций исчисляется единицами или десятками. То есть, на протяжении одного цикла разряда энергонакопителя можно изготовить несколько тысяч изделий в случае его портативного исполнения и несколько десятков тысяч штук в случае стационарного.

Выводы

Результаты исследования показали, что оба рассмотренных варианта гибридных энергонакопителей, содержащих аккумуляторные батареи и суперконденсаторы, обладают высокими динамическими характеристиками и энергетической эффективностью для формирования необходимого количества импульсов сварочного тока с заданными параметрами. Очевидно, что такие энергонакопители могут быть перспективными для использования в автономных источниках питания установок контактной микросварки, поэтому продолжением проведенной работы станет экспериментальная проверка результатов имитационного моделирования, а также выявление оптимальных соотношений значений энергии накопительных элементов.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Бондаренко А. Ф. Формирователи импульсов тока для установок контактной микросварки / Дис. ... канд. техн. наук. — Алчевск, 2007.
2. Bondarenko O. F., Safronov P. S., Bondarenko Yu. V., Sydorets V. M. Direct energy and energy storage circuit topologies of DC power supplies for micro resistance welding // Proc. of IEEE 34th International scientific conference on electronics and nanotechnology (ELNANO). — 2014. — P. 468–470. — DOI: 10.1109/ELNANO.2014.6873431.
3. Guerrero M., Romero E., Barrero F., Milanés M., González E. Supercapacitors: Alternative energy storage systems // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review). — 2009. — Vol. 85, N 10. — P. 188–195.
4. Pay S., Baghzouz Y. Effectiveness of battery-supercapacitor combination in electric vehicles // IEEE Bologna power tech conference. — Italy, Bologna. — 2003. — P. 385–390. — DOI: 10.1109/PTC.2003.1304472.
5. Бондаренко Ю. В., Сидорець В. М., Сафронов П. С., Бондаренко О. Ф. Оцінка точності регулювання струму багатокоміркового транзисторного перетворювача з комбінованим керуванням // Технічна електродинаміка. — 2012. — № 2. — С. 67–68.
6. Панкрашкин А. Ионисторы Panasonic: физика, принцип работы, параметры http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2006_9_12.php. — 23.05.2014.
7. Hushens M. Meeting peak power requirements with supercapacitors <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnwsid=39947>. — 23.05.2014.
8. Marco S. W. Chan, K. T. Chau, C. C. Chan. Effective Charging Method for Ultracapacitors // Journal of Asian Electric Vehicles. — 2005. — Vol. 3, N 2. — P. 771–776. — DOI: 10.4130/jaev.3.771.
9. Конденсаторы: Справочник / И. И. Четверткова, М. Н. Дьяконова. — Москва: Радио и связь, 1993.
10. Паэранд Ю. Э., Бондаренко А. Ф., Бондаренко Ю. В. Комбинированный накопитель энергии «аккумуляторная батарея — электролитический конденсатор» // Технічна електродинаміка. Тем. вип. Проблеми сучасної електротехніки. — 2008. — Ч. 6. — С. 76–79.
11. Здрок А. Г. Выпрямительные устройства стабилизации напряжения и заряда аккумулятора. — Москва: Энергоатомиздат, 1988.
12. Розанов Ю. К. Полупроводниковые преобразователи со звеном повышенной частоты. — Москва: Энергоатомиздат, 1987.
13. Datasheet. BC Series Ultracapacitors. Doc. No. 1017105.4 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/bcseries_ds_1017105-4.pdf. — 23.05.2014.
14. Product Guide. Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors. Doc. No. 1014627.1 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627_boostcap_product_guide.pdf. — 23.05.2014.
15. Оксидно-электролитический алюминиевый конденсатор K50-77 http://www.elecond.ru/k50_77.php. — 23.05.2014.
16. GP Batteries http://www.gpina.com/pdf/GP130AANE_DS.pdf. — 23.05.2014.
17. Атауш В. Е., Леонов В. П., Москвин Э. Г. Микросварка в приборостроении. — Рига: РТУ, 1996.

*Дата поступления рукописи
в редакцию 12.06 2014 г.*

Ю. В. БОНДАРЕНКО¹, П. С. САФРОНОВ¹, О. Ф. БОНДАРЕНКО¹,
В. М. СИДОРЕЦЬ², Т. С. РОГОЗИНА¹

Україна, м. Алчевськ, ¹Донбаський державний технічний університет;
м. Київ, ²Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

ГІБРИДНІ ЕНЕРГОНАКОПИЧУВАЧІ НА ОСНОВІ АКУМУЛЯТОРІВ ТА СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ДЛЯ КОНТАКТНОГО МІКРОЗВАРЮВАННЯ

За допомогою імітаційного моделювання показано можливість застосування в установках контактної мікрозварювання гібридних енергонакопичувачів на основі акумуляторних батарей та суперконденсаторів, які мають високі енергетичні та динамічні характеристики, достатні для забезпечення формування імпульсів зварювального струму з необхідними параметрами.

Ключові слова: автономне джерело живлення, енергонакопичувач, суперконденсатор, акумуляторна батарея, контактне мікрозварювання.

DOI: 10.15222/ТКЕА2014.4.33
UDC 621.314.1: 621.311.61

Yu. V. BONDARENKO, P. S. SAFRONOV,
O. F. BONDARENKO, V. M. SYDORETS, T. S. ROGOZINA
Ukraine, Alchevsk, ¹Donbas State Technical University;
Kiev, ²Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine
E-mail: bondarenkoaf@gmail.com

THE HYBRID ENERGY STORAGEES BASED ON BATTERIES AND ULTRACAPACITORS FOR CONTACT MICROWELDING

Micro resistance welding is an effective way to reliably join small-scale parts. It is widely used in electronics and instrument-making. The important particularities of micro resistance welding are pulse character of energy consumption, non-linear load and special form of current pulses. So, these particularities of welding process cause negative influence on the mains. One of the known ways to avoid it is to use autonomous power supplies for micro resistance welding machines. The important task for building autonomous power supplies is to choose effective energy storages, which have high capacity and small internal resistance, and which are capable to be charged and deliver energy to load very quickly. The solution of this task is seen in using hybrid energy storages, which include accumulators and ultracapacitors. The accumulators are able to provide high energy capacitance and the ultracapacitors are able to provide fast energy delivery. The possibility of application of hybrid energy storages, based on accumulator batteries and ultracapacitors, in micro resistance welding machines is confirmed with computer simulation. Two variants of hybrid energy storages are proposed. These hybrid energy storages have high power and dynamic characteristics, which are sufficient to generate current pulses for welding according to necessary settings.

Keywords: autonomous power supply, energy storage, ultracapacitor, accumulator, micro resistance welding.

REFERENCES

1. Bondarenko O. F. [Current pulses generators for micro resistance welding machines]. PhD thesis, Alchevsk, 2007, 211 p. (in Russian)
2. Bondarenko O. F., Safronov P. S., Bondarenko Yu. V., Sydorets V. M. Direct Energy and Energy Storage Circuit Topologies of DC Power Supplies for Micro Resistance Welding *Proceedings of IEEE 34th International Scientific Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2014, pp. 468-470. DOI: 10.1109/ELNANO.2014.6873431.
3. Guerrero M., Romero E., Barrero F., Milanés M., González E. Supercapacitors: Alternative Energy Storage Systems. *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2009, vol. 85, no 10, pp. 188-195.
4. Pay S., Baghzouz Y. Effectiveness of Battery-Supercapacitor Combination in Electric Vehicles. *IEEE Bologna Power Tech Conference*, Italy, Bologna, 2003, pp. 385-390. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304472.
5. Bondarenko Yu. V., Sydorets V. M., Safronov P. S., Bondarenko O. F. [The evaluation of current regulation accuracy of multicell-type transistor converter with combined control]. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2012, no 2, pp. 67-68 (in Ukrainian).
6. Pankrashkin A. [Supercapacitors Panasonic: physics, operation principle, parameters] http://www.kit-e.ru/articles/condenser/2006_9_12.php. — 23.05.2014..
7. Huschens M. Meeting peak power requirements with supercapacitors <http://www.dataweek.co.za/news.aspx?pklnsid=39947>. — 23.05.2014.
8. Marco S. W. Chan, K. T. Chau, C. C. Chan. Effective Charging Method for Ultracapacitors. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 2005, vol. 3, N 2, pp. 771-776. DOI: 10.4130/jaev.3.771.
9. *Capacitors: Reference book*. Moscow, Radio i sviaz, 1993, 392 p. (in Russian)
10. Paerand Yu. E., Bondarenko O. F., Bondarenko Yu. V. [The combined energy storage «battery — electrolytic capacitor»]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tem. vip. Problemi suchasnoyi elektrotehniki*, 2008, part. 6, pp. 76-79. (in Russian)
11. Zdrok A. G. [Rectifier devices for voltage stabilization and battery charging]. Moscow, Energoatomizdat, 1988, 144 p. (in Russian)
12. Rozanov Yu. K. [Semiconductor converters with high frequency unit]. Moscow, Energoatomizdat, 1987, 184 p. (in Russian)
13. Datasheet. BC Series Ultracapacitors. Doc. No. 1017105.4 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/bcseries_ds_1017105-4.pdf. — 23.05.2014.
14. Product Guide. Maxwell Technologies BOOSTCAP Ultracapacitors. Doc. No. 1014627.1 http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/docs/1014627_boostcap_product_guide.pdf. — 23.05.2014.
15. [Oxide electrolytic aluminum capacitor K50-77]. http://www.elecond.ru/k50_77.php. — 23.05.2014.
16. GP Batteries http://www.gpina.com/pdf/GP130AAHE_DS.pdf. — 23.05.2014.
17. Ataush V.E., Leonov V.P., Moskvina E.G. [Micro resistance welding in instrument making]. Riga, RTU, 1996, 332 p. (in Russian)