



ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ В УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ИМПУЛЬСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СВАРКИ

А. Е. КОРОТЫНСКИЙ, Н. П. ДРАЧЕНКО, В. А. ШАПКА

ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

К перспективным областям применения суперконденсаторов (СК) можно отнести точечную контактную сварку, контактную сварку сопротивлением, а также импульсно-дуговую сварку, где они могут использоваться как модуляторы сварочного тока. Приведены основные технические характеристики СК и батарей СК (БСК), построенных на основе последовательного соединения отдельных СК. Даны основные расчетные соотношения, предназначенные для оценки электрических параметров БСК, экспериментально определены зарядно-разрядные характеристики для разработанных БСК. Показано, что при последовательном соединении ячеек СК в батарее основным недостатком является разброс по напряжению, который в данной работе предлагается исключить путем применения специального зарядного устройства — эквалайзера. Рассмотрены различные схемы эквалайзеров, описаны их преимущества и недостатки при использовании в генераторах импульсных токов. Показана целесообразность применения энергосберегающей схемы эквалайзера для импульсных способов сварки. Предложена и описана схема такого устройства, даны расчетные соотношения, аналитически описывающие ее работу. В качестве примера приведена схема для точечной контактной сварки, выполненная на основе эквалайзера и батареи из 6-ти СК, и даны технические характеристики предложенного устройства. Библиогр. 7, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: импульсная сварка, генераторы импульсных токов, модулятор сварочного тока, суперконденсатор, батарея суперконденсаторов, зарядно-разрядные характеристики, эквалайзер

В некоторых сварочных процессах весьма эффективно применять импульсные электрические накопители энергии. Это в первую очередь относится к точечной контактной сварке [1], контактной сварке сопротивлением [2], приварке шпилек [3], а также импульсно-дуговой сварке в защитных газах [4], где они используются в качестве импульсных модуляторов. Авторы данной статьи имеют положительный опыт применения емкостных накопителей энергии при дуговой резке, где импульсное воздействие в отличие от воздушно-дуговой резки создается импульсом тока, что позволяет значительно упростить оборудование.

К существенным преимуществам емкостных накопителей энергии, расширяющим их применение в импульсных технологиях, следует отнести простоту коммутации при заряде и разряде батареи конденсаторов и возможность строгого дозирования накопленной энергии за счет регулирования уровня напряжения заряда или длительности импульса воздействия. В настоящее время в качестве емкостных накопителей энергии все чаще находят применение конденсаторные батареи, выполненные на базе ячеек с двойным электрическим слоем, — суперконденсаторы (СК). Однако из-за низкого уровня рабочего напряжения ячейки СК ($U_{СК} \leq 2,7 В$) для получения нужных электрических характеристик накопителей ячейки СК

объединяют в батареи. Но в связи с тем, что СК имеют технологический разброс значений емкости в пределах одного номинала, возникают определенные трудности при изготовлении батарей с последовательным соединением СК (БСК). Примеры выполнения таких БСК для 4-х и 6-ти ячеек показаны на рис. 1.



Рис. 1. Примеры выполнения последовательной БСК на основе 4-х (а) и 6-ти (б) ячеек

Характеристики СК, применяемых для последовательных БСК

Тип БСК	Количество ячеек	C, Ф	R, МОм	$\tau = RC$, с	U_p , В	W, Дж
БСК-4	4	750	0,96	0,72	10,8	43740
БСК-6	6	500	1,44	0,72	16,2	65610
БСК-10*	10	300	2,44	0,72	27	109350

* БСК-10 — структура с последовательным соединением БСК-4 и БСК-6.

При расчете энергии, накопленной в последовательной БСК, будем учитывать $C_{\Sigma}(n) = Ci/n$, $U_{\Sigma}(n) = nU_i$ (где C_i — емкость отдельного СК; U_i — его рабочее напряжение). Отсюда согласно известным формулам следует, что энергия

$$W(n) = \frac{C_{\Sigma}(n)(U_{\Sigma}(n))^2}{2} = \frac{nC_i U_i^2}{2} = nW_i.$$

Технические характеристики применяемых СК приведены в таблице.

При эксплуатации таких батарей напряжение по ячейкам обычно распределяется неравномерно и будет обратно пропорциональным значениям емкости в цепочке последовательно соединенных конденсаторов: $U_1 C_1 = U_2 C_2 = U_3 C_3 = \dots = U_n C_n$. Поэтому при зарядке такой батареи нужно учитывать фактор неравномерного распределения напряжений по цепочке последовательно соединенных СК и прекращать процесс заряда при достижении каким-либо из конденсаторов максимального напряжения $U_{Ci} = U_{C \max}$. При этом суммарное напряжение на конденсаторной батарее будет меньше номинального: $U_{\Sigma} \leq nU_{C \max} = U_{\Sigma \max}$ или $\Delta U_{\Sigma \max} = U_{\Sigma \max} - U_{\Sigma}$.

Экспериментальные исследования разброса напряжений по ячейкам БСК в процессе тестовой эксплуатации проводили на опытном стенде, схема которого показана на рис. 2. По полученным результатам испытаний построены гистограммы распределения напряжений по ячейкам БСК (рис. 3), состоящей из 10-ти последовательно соединенных СК типа ВСАР3000 P270 K05. Результаты изучения поведения СК в режиме длительного

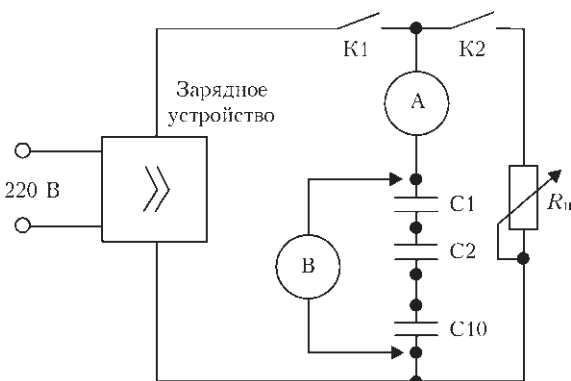


Рис. 2. Схема экспериментального стенда для проверки БСК: K1, K2 — коммутаторы; C1–C10 — конденсаторы ячейки

хранения электрического заряда представлены на рис. 4. Полученные экспериментальные данные показали, что при последовательном соединении мощных СК возникают проблемы, связанные с недозарядом отдельных элементов БСК, что в значительной мере снижает энергоэффективность импульсного генератора.

Устранению данного недостатка и, тем самым, повышению энергоэффективности импульсных генераторов, выполненных с применением СК, посвящена данная работа.

Для того, чтобы при заряде батареи последовательно соединенных СК напряжения на ячейках были равны и $U_{\Sigma} = U_{\Sigma \max}$, обычно производится предварительный отбор СК по значениям емкости и сборка батареи из ячеек СК с одинаковой емкостью. Однако в процессе эксплуатации СК возможно некоторое изменение емкости ячеек СК, в результате чего распределение напряжений по ячейкам БСК может быть не всегда одинаковым (см. рис. 3). В настоящее время с целью наи-

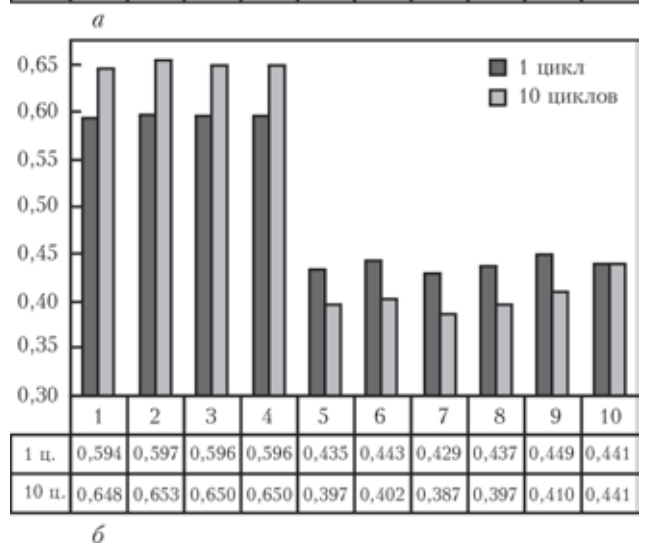
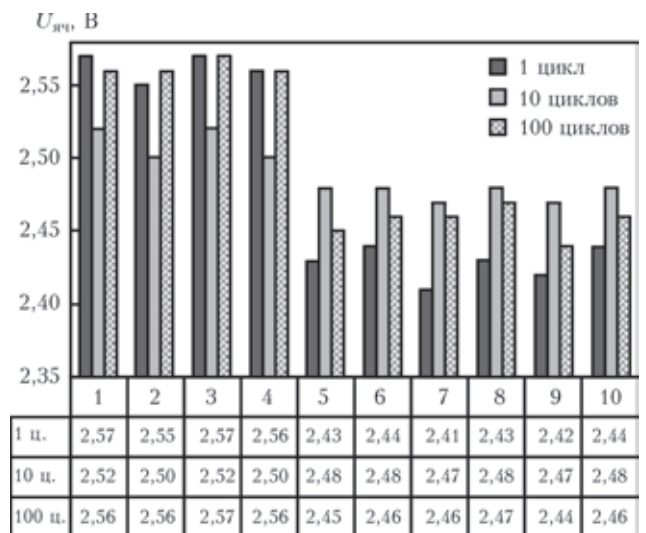


Рис. 3. Гистограммы распределения напряжений по ячейкам 1...10 заряженной (а) и разряженной (б) БСК при разном количестве рабочих циклов заряда-разряда



более эффективного использования энергетических свойств СК в течение всего гарантированного срока эксплуатации используются устройства типа эквалайзера для выравнивания напряжения на ячейках БСК. Существуют различные типы эквалайзеров: пассивные рассеивающие [5], активные рассеивающие [6] и активные энергосберегающие [7].

В связи с современными требованиями к экологии энергосистем и энергосбережению представляется целесообразным подробно рассмотреть построение систем дозаряда СК с применением активных энергосберегающих эквалайзеров.

Принцип их работы основан на использовании энергообменных процессов между ячейками БСК, причем ячейки с повышенным напряжением используются для дозаряда ячеек с пониженным напряжением. В результате работы такой системы в процессе энергообмена между ячейками в БСК поддерживается равномерное распределение напряжений в цепочке практически во всем рабочем диапазоне напряжений батареи. Раньше подобные аппаратные средства [6, 7] использовали при эксплуатации мощных литий-ионных аккумуляторных батарей в различных мобильных и аэрокосмических устройствах. По некоторым характеристикам литий-ионные аккумуляторные батареи весьма сходны с БСК (например, они отличаются прямо пропорциональной зависимостью напряжения на ячейке от уровня заряда), поэтому аналогичные подходы в эквалайзерах можно использовать для БСК. Пример такой адаптированной схемы эквалайзера применительно к СК показан на рис. 5.

Схема содержит зарядный блок питания (ЗБП), предназначенный для формирования тока заряда БСК от первичной сети электропитания, и последовательно соединенные суперконденсаторы СК1...СК n , где их количество определяется требованиями к питанию нагрузки. Схема активного эквалайзера выполнена на согласующих трансформаторах Тр1...Тр($n + 1$) и силовых электронных ключах Т1...Т n . Диоды Д1...Д n интегрированы в структуру кристалла силового электронного ключа. Драйверы Др1... Др n предназначены для согласования цепей управления ключей Т1...Т n со схемой управления. Схема управления задающего генератора (ЗГ) выполнена на стандартном двухфазном ШИМ-контроллере, причем выход первой фазы Ф1 подключен к нечетным, а второй Ф2 — к четным по схеме ключам. Высокочастотный инвертор (Инв) предназначен

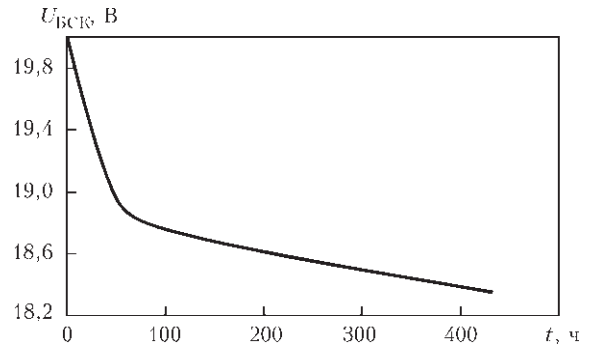


Рис. 4. Саморазряд батареи из 10-ти последовательно соединенных СК

для параллельного питания согласующих трансформаторов с целью выравнивания напряжений между четными и нечетными группами ячеек. В процессе работы устройства конденсаторная батарея заряжается от ЗБП или разряжается на нагрузку (Н). Если напряжения на всех конденсаторах равны, к вторичным обмоткам W2.1...W2($n + 1$) согласующих трансформаторов Тр1... Тр($n + 1$) подводится напряжение $U_{W2i} = U_{СКi}/2 - \Delta U_{VTi}$ (где ΔU_{VTi} — напряжение дисбаланса). Напряжение на вторичных обмотках трансформаторов определяется из условия $U_{W2i} \approx U_{БСК}/2n$, тогда как напряжение на первичных обмотках $U_{W1i} = U_{БСК}$.

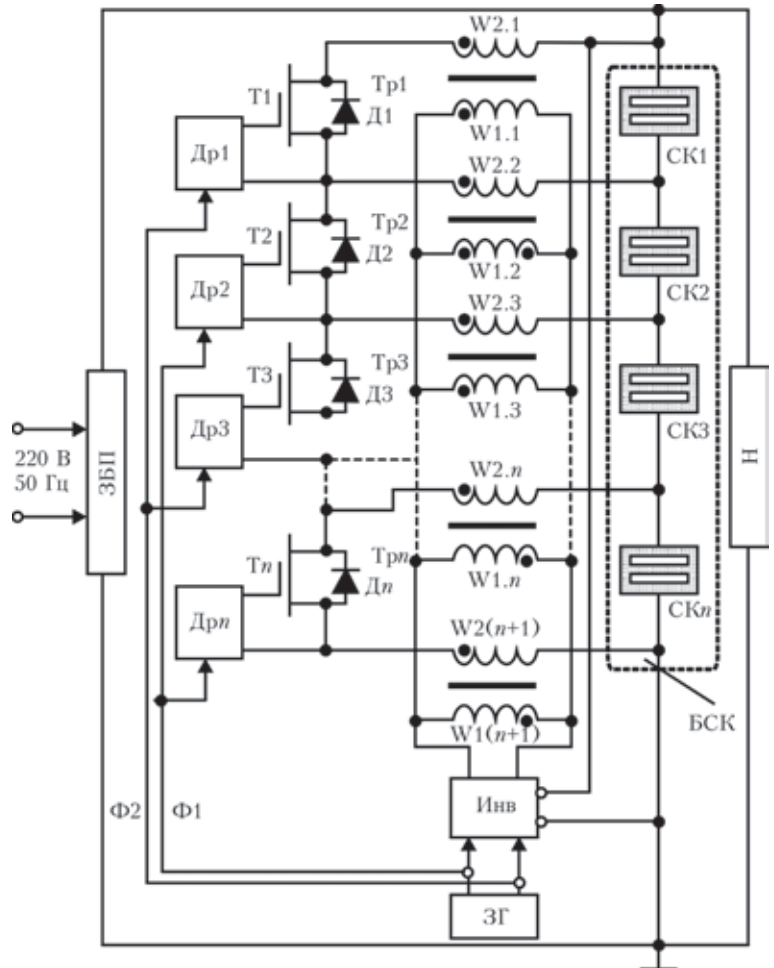


Рис. 5. Схема эквалайзера БСК (обозначения см. в тексте)

Если напряжение на каком-либо из конденсаторов будет больше или меньше среднего напряжения ($U_{СК\text{ ср}} \neq U_{БСК}/n$), тогда через обмотки $Tr1...Tr(n+1)$ и открытые ключи $T1...Tn$ начинают протекать уравнивающие токи, приводящие к выравниванию напряжений на конденсаторах. Согласующий Инв работает синхронно с коммутацией ключей $T1...Tn$ и поочередно производит перезарядку четной и нечетной групп конденсаторов, тем самым выравнивая напряжения между группами. В результате работы схемы напряжения на ячейках СК выравниваются и уравнивающие токи уменьшаются до минимальных значений. Токи в первичных обмотках трансформаторов снижаются до значений, определяемых потерями холостого хода трансформаторов. Именно таким образом осуществляется выравнивание напряжений по ячейкам БСК.

Особенностью этого устройства (см. рис. 5), отличающим его от описанного в работе [7], является применение отдельных секций согласующих трансформаторов для каждой ячейки СК, а также замена диодов на синхронные выпрямители (полевые транзисторы), что обеспечило более высокую скорость и точность выравнивания напряжений.

Проведем сравнительный анализ энергетических параметров БСК при использовании схемы активного эквалайзера (см. рис. 5).

Энергия, запасаемая в БСК с последовательным соединением конденсаторных ячеек, определяется выражением

$$E_{БСК} = \frac{nC_0 U_0^2}{2}, \quad (1)$$

где n — количество ячеек; C_0 — номинальная емкость; U_0 — номинальное напряжение.

Если в БСК имеется конденсаторная ячейка с пониженной емкостью

$$C_i = kC_0, \quad (2)$$

(где $k < 1$ — коэффициент недозаряда отдельной ячейки), заряженная до номинального напряжения $U_{Ci} = U_0$, тогда напряжения на остальных ячейках с номинальной емкостью будут равны

$$U_x = kU_0 \quad (kC_0 U_0 = C_0 U_x). \quad (3)$$

Отсюда суммарное напряжение на такой батарее с последовательно соединенными ячейками

$$U_{БСК} = U_0 k(n-1) + U_0 = U_0(1+k(n-1)). \quad (4)$$

Энергия, запасаемая БСК, в составе которой имеется одна конденсаторная ячейка с пониженной емкостью, будет равна

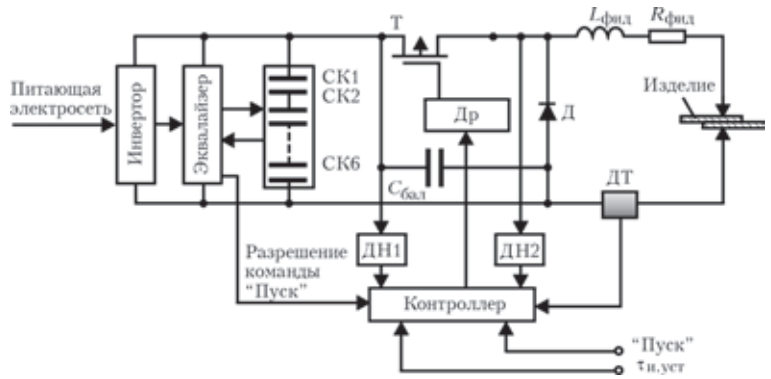


Рис. 6. Пример использования эквалайзера в устройстве для точечной контактной сварки

$$\begin{aligned} E'_{БСК} &= \frac{C'_{БСК} U_p^2}{2} = \\ &= \frac{C_0 \frac{k}{1+k(n-1)} [U_0 k(n-1) + U_0]^2}{2} = \\ &= \frac{C_0 U_0^2 k(1+k(n-1))}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

При применении эквалайзера, выравнивающего напряжения на конденсаторных ячейках, запасаемая в БСК энергия

$$\begin{aligned} E''_{БСК} &= \frac{C''_{БСК} U_p^2}{2} = \\ &= \frac{C_0 \frac{k}{1+k(n-1)} (nU_0)^2}{2} = \\ &= \frac{C_0 U_0^2}{2} \frac{kn^2}{1+k(n-1)}. \end{aligned} \quad (6)$$

Используя приведенные выражения (4)...(6), можно провести сравнительный анализ энергетической эффективности применения эквалайзера. Если принять коэффициент эффективности БСК с одинаковыми ячейками за $K_{эф1} = 1$, тогда эффективность БСК с ячейкой, имеющей пониженную емкость, будет определяться соотношением:

$$K_{эф1} = \frac{E'_{БСК}}{E_{БСК}} = \frac{kC_0 U_0^2 [1+k(n-1)]}{nC_0 U_0^2} = \frac{k^2(n-1)+k}{n}, \quad (7)$$

а эффективность БСК с эквалайзером и ячейкой, имеющей пониженную емкость,

$$K_{эф2} = \frac{E''_{БСК}}{E_{БСК}} = \frac{kn^2}{n(1+k(n-1))} = \frac{kn}{1+k(n-1)}. \quad (8)$$

Следовательно, относительное увеличение эффективности БСК с эквалайзером будет определяться соотношением

$$Q = 1 - \frac{K_{эф1}}{K_{эф2}} = 1 - \left(\frac{k(n-1)+1}{n} \right)^2. \quad (9)$$

Используя приведенные расчетные соотношения (7)...(9) для оценки энергоэффективности эквалайзера, можно доказать, что заметный эффект отмечается даже при 10 %-ном отклонении емкости



сти только одного конденсатора от номинального значения.

Следует подчеркнуть, что применение эквалайзеров в различных устройствах для импульсных технологий сварки позволяет добиться не только высоких энергетических показателей, но и обеспечить высокую стабильность сварочно-технологических показателей за счет прецизионного заряда БСК.

В качестве примера на рис. 6 приведена схема устройства для точечной контактной сварки. Главным ее отличием от известных устройств [1] является наличие эквалайзера. При включении электропитания инвертор зарядного тока заряжает конденсаторы СК1...СК6 до уровня напряжения, определяемого контроллером, после чего схема переходит в ждущий режим. Одновременно схема эквалайзера анализирует балансировку напряжений по ячейкам СК и, при необходимости, выполняет активное выравнивание напряжений по ячейкам БСК. При поступлении команды «Пуск» блокируется работа зарядного инвертора и подается импульс управления на драйвер токового ключа Т. В результате возникает импульс рабочего тока, протекающий по цепи: СК1...СК6, Т, $L_{\text{фид}}$, $R_{\text{фид}}$, ДТ, СК1...СК6. Сварочное устройство позволяет дозировать энергию, подводимую к контактно-промежутку, путем программирования напряжения СК1...СК6 и длительности импульса тока, определяемого коммутатором. Длительность токового импульса может варьироваться в диапазоне от единиц до нескольких сотен миллисекунд. Также возможно программирование импульсных серий с индивидуальными параметрами для каждого импульса в серии. Информация, снимаемая с датчиков тока и напряжения ДТ и ДН2, используется для контроля и управления энергией, подводимой к контактно-промежутку свариваемого изделия. Высокие технологические показатели в данном устройстве достигаются благодаря применению быстродействующего электронного коммутатора тока, который выполняет точное дозирование энергии, подводимой к зоне сварки.

Экспериментальная проверка устройства для точечной контактной сварки, собранная по приведенной схеме (см. рис. 6), дала следующие результаты: максимальный сварочный ток равен 1200 А; при питании от однофазной сети 220 В потребляемая мощность составляет 2 ВА в режиме холосто-

го хода, 500 ВА в режиме заряда БСК и 100 ВА в режиме выполнения сварки. Плавно регулируемая длительность импульса сварочного тока находится на уровне $0,01 \div 0,5$ с.

На практике ячейки СК следует объединять в батареи для получения необходимых и приемлемых токов нагрузки емкостного накопителя энергии. Количество последовательно соединенных ячеек в такой батарее определяет ее рабочее напряжение, а количество параллельно соединенных ветвей — ее максимальный рабочий ток и КПД, что необходимо учитывать при создании БСК. В связи с тем, что СК имеет некоторое внутреннее сопротивление потерь R_0 , накопленная в нем энергия в процессе разряда выделяется не только на сопротивление нагрузки R_n , но и на R_0 . Очевидно, что чем выше R_0 по отношению к R_n , тем больше уровень потерь в СК и, как следствие, меньше уровень энергоотдачи накопителя в нагрузку в процессе его работы. Понятно, что это приходится учитывать при использовании БСК. Более того, при проектировании современного сварочного и другого технологического оборудования с применением БСК в качестве энергетического накопителя желательно учитывать не только эффективность батареи и ее весогабаритные показатели, но и экологические требования потребителей электроэнергии, а также экономические критерии, определяемые в том числе стоимостью электроэнергии и эксплуатационными расходами.

1. Патон Б. Е., Коротынский А. Е., Драченко Н. П. и др. Использование суперконденсаторов для повышения энергоэффективности устройств для точечной контактной сварки // Тр. Междунар. научно-практ. конф. «Энерго- и ресурсосбережение в промышленности, энергетике и транспорте». – Киев, 2009. – С. 54–58.
2. Кучук-Яценко С. И., Лебедев В. К. Контактная стыковая сварка непрерывным оплавлением. – Киев: Наук. думка, 1976. – 213 с.
3. Пат. 92389 Украина, МПК В 23 К 9/20. Апарат для приваривания шпильок / Б. С. Патон, М. П. Драченко, Д. М. Калеко, О. Є. Коротинський та ін. Опубл. 25.10.2010.
4. Коротынский А. Е. Состояние, тенденции и перспективы развития высокочастотных сварочных преобразователей (обзор) // Автомат. сварка. – 2002. – № 7. – С. 50–63.
5. Шурьгина В. Суперконденсаторы — помощники или конкуренты батарейным источникам питания // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2003. – Т. 3. – С. 20–24.
6. Сизов М. Устройство для выравнивания напряжений на элементах батареи суперконденсаторов // Совр. электроника. – 2003. – № 1. – С. 40–43.
7. Еременко В., Воронцов К., Варламов Д. Аппаратные методы повышения энергетической эффективности высоковольтных аккумуляторных батарей // Электр. компоненты – Украина. – 2007. – № 7/8. – С. 62–66.

Поступила в редакцию 21.10.2013