

УДК 544.636

### ГИБРИДНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ НА БАЗЕ АККУМУЛЯТОРА И БЛОКА СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

**В. Ю. Изотов, Н. И. Клюй, Д. С. Гавриков, И. Н. Бурлака, Д. О. Ярмоленко**

Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарьова НАН Украины  
просп. Науки, 41, г. Киев, 03028, Украина. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

**И. В. Кольцов**

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»  
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: veterkoltsov@gmail.com

Рациональное использование электроэнергии, запасенной в автономных источниках питания – одна из актуальных задач современной энергетики. Техническое решение этой задачи связано с созданием гибридных источников питания на базе аккумуляторов и блоков суперконденсаторов. В настоящей работе предложена математическая модель, позволяющая рассчитать оптимальное соотношение между входящими в гибридный источник составляющими. Исходя из свойств, входящих в гибридный источник питания составляющих, показано, что энергоемкость источника определяет аккумулятор, а мощность источника представляется в виде суммы мощностей аккумулятора и блока суперконденсаторов. Показано, что для бесперебойной и длительной работы гибридного источника питания в его состав должны входить электронный блок защиты аккумулятора от перегрузок по току, а также блок ограничивающий ток зарядки блока суперконденсаторов. Показано, что использование блока ограничивающего ток заряда суперконденсаторов позволяет, не прерывая нормальной эксплуатации источника питания, проводить заряд суперконденсаторов.

**Ключевые слова:** блок суперконденсаторов, аккумулятор, гибридный источник питания.

### ГИБРИДНЕ ДЖЕРЕЛО СТРУМУ НА БАЗІ АККУМУЛЯТОРА ТА БЛОКУ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

**В. Ю. Изотов, Н. І. Клюй, Д. С. Гавриков, І. Н. Бурлака, Д. О. Ярмоленко**

Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України  
просп. Науки, 41, м. Київ, 03028, Україна. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

**І. В. Кольцов**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»  
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: veterkoltsov@gmail.com

Рациональное використання електроенергії, запасеної в автономних джерелах живлення - одне з актуальних завдань сучасної енергетики. Технічне рішення цієї задачі пов'язане зі створенням гібридних джерел живлення на базі акумуляторів і блоків суперконденсаторів. У даній роботі запропонована математична модель, що дозволяє розрахувати оптимальне співвідношення між вхідними в гібридне джерело складовими. Виходячи з властивостей, що входять в гібридне джерело живлення складових, показано, що енергоємність джерела визначає акумулятор, а потужність джерела представляє у вигляді суми потужностей акумулятора і блоку суперконденсаторів. Показано, що для безперебійної та тривалої роботи гібридного джерела живлення до його складу повинні входити електронний блок захисту акумулятора від перевантажень по струму, а також блок обмеження струму зарядки блоку суперконденсаторів. Показано, що використання блоку обмеження струму заряду суперконденсаторів дозволяє, не перериваючи нормальної експлуатації джерела живлення, проводити заряд суперконденсаторів.

**Ключові слова:** блок суперконденсаторів, акумулятор, гібридне джерело живлення.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Суперконденсатор – новый перезаряжаемый источник энергии, обладающий высокой удельной мощностью [1–3]. Современные суперконденсаторы демонстрируют удельную мощность 2–4 кВт/кг, при коэффициенте полезного действия 95 % и 10–15 кВт/кг в импульсном режиме. Суперконденсаторы не боятся короткого замыкания, выдерживают больше  $10^5$  циклов заряд/разряд и работают в широком температурном диапазоне.

Однако, наряду с указанными положительными характеристиками, у них есть и существенный недостаток – относительно низкая удельная энергоемкость.

Удельная энергоемкость аккумуляторов на три порядка выше, чем у суперконденсаторов, но они имеют существенно более узкий рабочий температурный диапазон, количество циклов заряд/разряд составляет порядка  $10^3$ . Кроме того, аккумуляторы очень чувствительны к перегрузкам по току.

Из сказанного следует, что свойства суперконденсаторов существенно дополняют и расширяют эксплуатационные возможности аккумуляторов. Изложенное выше подводит к мысли о целесообразности совмещения суперконденсаторов и аккумуляторов в одном блоке питания, т.е. создания гибридного источника питания на базе суперконденсаторов и аккумуляторов.

В работе [4] было показано, что гибридный источник питания, состоящий из блока суперконденсаторов и аккумуляторной батареи, полностью отвечает требованиям, предъявляемым к автономным перезаряжаемым источникам питания для системы ориентации солнечных батарей.

Работы по созданию гибридных источников питания для автотранспорта, проводятся во всех лабораториях ведущих фирм производителей автомобилей. Необходимо отметить, что в последнее время эти исследования привели к весьма весомым резуль-

татам. Однак, незважаючи на суттєвий прогрес в створенні гібридних джерел струму, залишається відкритим ряд фундаментальних питань, пов'язаних з моделюванням роботи гібридних джерел живлення на основі акумуляторів і блоків суперконденсаторів.

К спробам створення моделі, що описує роботу гібридного джерела живлення можна віднести роботи [5–6]. Однак, спробу створення в роботі [6] математичної моделі, яка здатна описувати роботу гібридного джерела живлення і оптимізувати співвідношення між параметрами акумулятора і блоку суперконденсаторів можна вважати невдачею. Згідно [6], авторам цієї роботи не достатньо знати параметри навантаження, щоб розрахувати оптимальні параметри входять в гібридний джерело живлення. Для цього необхідно провести ряд додаткових експериментів. Це, природно, знижує цінність отриманих результатів.

Метою даної роботи є створення математичної моделі, яка дозволить розраховувати, виходячи з експлуатаційних вимог, пред'являються до джерела живлення, оптимальне співвідношення між параметрами складових гібридного джерела живлення для випадку, коли акумулятор і блок суперконденсаторів, з'єднані паралельно.

**МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.** Розглянемо спочатку модельні представлення, що дозволяють оцінити основні параметри і визначити умови ефективного функціонування гібридних джерел живлення на основі акумуляторної батареї і блоку суперконденсаторів:

Характеристиками джерела живлення є: запасена енергія ( $E$ ), максимальна потужність, з якою джерело живлення буде передавати енергію на зовнішнє навантаження ( $P$ ), час, протягом якого блок живлення буде працювати з максимальною потужністю ( $t_d$ ) і ККД ( $\eta$ ) з яким повинен працювати гібридний джерело живлення при передачі енергії з максимальною потужністю. Для простоти будемо вважати, що розряд здійснюється при температурі 25 °С.

Враховуючи співвідношення між питомою ємністю акумулятора і суперконденсатора доцільно вважати, що запасена гібридним джерелом живлення енергія визначається ємністю акумулятора. Після визначення типу акумулятора можна говорити про максимально допустимий струм розряду ( $I_A$ ) і про робочий струм ( $I_w$ ) розряду для акумуляторної підсистеми гібридного джерела живлення. Для того, щоб забезпечити роботу акумулятора в режимі, коли струм, що протікає через навантаження ( $I$ ), не перевищує номінальний струм, в гібридний джерело живлення необхідно включити електронний блок обмежуючий струм розряду акумулятора величиною  $I_A$ .

Виходячи з того, що суперконденсатори можуть передавати накоплену енергію з високою питомою

потужністю, в гібридному джерелі живлення їх необхідно використовувати для зняття пікових навантажень з акумуляторів. Отже, передача енергії на зовнішнє навантаження з максимальною потужністю в гібридному джерелі живлення буде здійснюватися за рахунок роботи блоку суперконденсаторів.

Принципальна схема експериментальної установки, яка моделює роботу гібридного джерела живлення, наведена на рис. 1. Зовнішнє навантаження змінюється, в залежності від режиму роботи споживача енергії. В нашому випадку навантаження характеризується постійними опорами  $R_{L1}$  і  $R_{L2}$ , а блок суперконденсаторів – ємністю  $C$  і внутрішнім опором  $R_{in}$ . Ємність блоку суперконденсаторів і внутрішній опір блоку – параметри, які необхідно визначити.

Величину внутрішнього опору можна визначити виходячи з значення ККД для блоку суперконденсаторів при роботі на мінімальну зовнішню навантаження. Значення  $R_{in}$  пов'язано з опором навантаження рівнянням:

$$R_{in} = R_L \frac{(1-\eta)}{\eta} \quad (1)$$

Струм, що протікає через навантаження, в процесі роботи гібридного джерела живлення, складається з двох струмів. Перший – струм розряду блоку суперконденсаторів ( $I_s$ ) і другий – струм розряду акумулятора. Струм, що протікає через блок суперконденсаторів, визначається зовнішнім навантажувальним опором і параметрами блоку. Струм розряду блоку суперконденсаторів зменшується з часом за законом

$$I_s = \frac{U}{R_{in} + R_L} e^{\frac{-t}{C(R_{in} + R_L)}}, \quad (2)$$

де  $U$  – напруга на блоку суперконденсаторів в початковий момент часу.

Струм акумулятора збільшується в процесі роботи таким чином, щоб сумарний струм, що протікає через опір  $R_L$ , залишався постійним. Виходячи з вимог, пред'являються до гібридному джерелу живлення, в момент часу  $t_d$  струм акумулятора не повинен перевищувати значення  $I_A$ . Використавшись тим, що потужність, з якою гібридний джерело живлення розряджається на зовнішню навантаження, залишається постійною і в момент часу  $t_d$ , отримуємо вираження для розрахунку ємності блоку суперконденсаторів. Після підстановки в вираження для ємності значення внутрішнього опору з рівняння (1) остаточно отримуємо вираження:

$$C = \frac{\eta t_d}{R_L \ln \left[ \frac{U \eta}{\sqrt{P R_L - I_A R_L}} \right]} \quad (3)$$

Для проверки справедливости сделанных математических выкладок был поставлен следующий эксперимент.

Постановка эксперимента. Принципиальная схема экспериментальной установки для исследования работы гибридного источника питания при разных режимах эксплуатации приведена на рис. 1.

Энергонакапливающая составляющая гибридного источника питания состоит из аккумулятора и блока суперконденсаторов. Для нормальной работы аккумулятора в состав гибридного источника включено электронное устройство, ограничивающее ток разряда аккумулятора. Чтобы обеспечить нормальной работу блока суперконденсаторов, он снабжен электронным устройством, которое поддерживает одинаковое напряжение на суперконденсаторах внутри блока в процессе работы гибридного источника. Для нормальной работы гибридного источника питания, при переходе от одного режима эксплуатации к другому, в состав источника включено электронное устройство, которое ограничивает ток заряда блока суперконденсаторов.

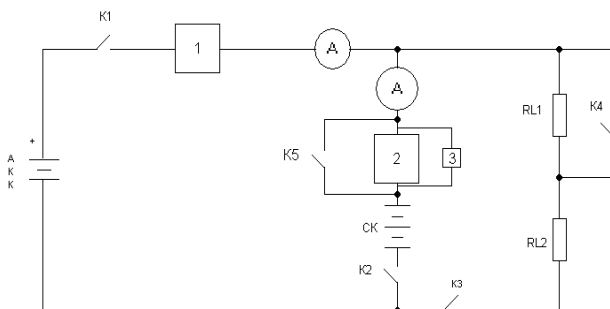


Рисунок 1 – Принципиальная схема установки для испытания гибридного источника питания:  
 1 – ограничитель тока разряда аккумулятора;  
 2 – ограничитель тока заряда блока суперконденсаторов; 3 – балансирующее устройство

При изготовлении макета гибридного источника использовался аккумулятор емкостью 6 А\*час с рабочим напряжением 12,5 В и максимально допустимом токе разряда 2 А. В качестве нагрузочных сопротивлений  $R_{L1}$  и  $R_{L2}$  использовались постоянные сопротивления номиналом 5 и 2,5 Ом, соответственно. При разряде на нагрузку  $R_{L2}$  гибридный источник питания должен разряжаться в течение 60 секунд с постоянной максимальной мощностью 90 Вт, а при разряде на нагрузку  $R_{L1} + R_{L2}$  работать в обычном режиме.

Рассмотрим работу каждого элемента гибридного источника питания в процессе его эксплуатации.

Не трудно проверить, что для того, чтобы обеспечить заданные условия эксплуатации, ток разряда аккумулятора, без блока суперконденсаторов, соста-

вит 6 А, что в три раза превышает максимально допустимый ток аккумулятора. При эксплуатации аккумулятора с такой перегрузкой резко сократится его срок эксплуатации. Чтобы избежать перегрузок аккумулятора его защищают электронным устройством, которое ограничивает его ток разряда. А чтобы обеспечить работу гибридного источника питания с требуемой мощностью в состав гибридного источника питания включают блок суперконденсаторов.

Воспользовавшись выражениями (1) и (3) находим параметры блока суперконденсаторов. Внутреннее сопротивление блока суперконденсаторов определяем из условия, что при разряде на нагрузку 2,5 Ом его КПД составляет 95 %. Следовательно,  $R_{in}$  составляет 0,13 Ом, а емкость блока суперконденсаторов приблизительно равна 56 Ф. Зная рабочее напряжение одного суперконденсатора (2,5 В), нетрудно посчитать, что блок суперконденсаторов должен состоять из пяти элементов. Следовательно, емкость единичного суперконденсатора составляет 280 Ф, а его и внутреннее сопротивление – 0,026 Ом. Однако, следует отметить, что внутреннее сопротивление единичного суперконденсатора, изготовленного в лаборатории, на порядок меньше и составляет 0,0024 Ом. Поэтому во внешнюю цепь блока суперконденсаторов были дополнительно включены последовательно соединенные два сопротивления: одно номиналом 0,086 Ом и  $R_{ушум}$  номиналом 0,033 Ом. Последнее использовалось для измерения токов заряда/разряда блока суперконденсаторов. Для проведения измерений токов заряда/разряда параллельно к  $R_{ушум}$  был подключен осциллограф.

Необходимо отметить, что для нормальной работы блока суперконденсаторов он должен быть снабжен балансирующим устройством [7]. В работе было использовано балансирующее устройство, в основу работы которого положен метод активной балансировки. Метод активной балансировки с энергетической точки более выгоден, чем метод пассивной балансировки. Идея метода [8] состоит в том, чтобы «перекачивать» энергию суперконденсатора с повышенным напряжением в суперконденсатор с пониженным напряжением. Практическая реализация такого подхода с применением дополнительного конденсатора в качестве «переносчика энергии» предложена в патенте [9]. На схеме рис. 2 конденсатор  $C_2$  с помощью ключей  $S_1$ ,  $S_2$ , управляемых контроллером, подключается параллельно к одному из суперконденсаторов  $C_i$  или  $C_{i+1}$ , заряд которого больше, а затем к суперконденсатору, заряд которого меньше.

После серии переключений напряжения на суперконденсаторах внутри блока выравниваются. В настоящее время этот метод рассматривается как наиболее перспективный, т.к. выполняется одно из основных требований, предъявляемых к эксплуатации блоков суперконденсаторов – высокий КПД.

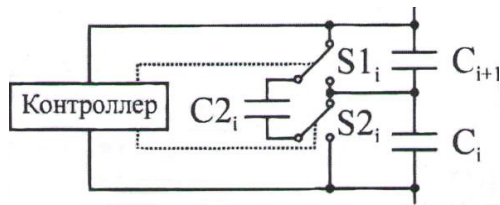


Рисунок 2 – Схема балансирующего устройства для блока суперконденсаторов, использующая метод активной балансировки

Для того, чтобы понять необходимость включения в состав гибридного источника питания электронного ограничителя для тока заряда блока суперконденсаторов рассмотрим работу гибридного источника в отсутствие этого устройства.

Перед началом эксперимента аккумулятор и блок суперконденсаторов заряжены до одинакового напряжения  $U$ . После того как ключи К1 и К2 замкнуты, гибридный источник подключается к нагрузке  $R_{L2}$  и начинает разряжаться с максимальной мощностью. При этом разряжаются и блок суперконденсаторов и аккумулятор. Через 60 секунд замыкается ключ К3 и гибридный источник должен перейти в обычный режим эксплуатации при котором разряжается только аккумулятор. В нормальном режиме эксплуатации ток, протекающий через нагрузку приблизительно равен 1,7 А.

На рис. 3 приведены экспериментальные зависимости от времени суммарного тока протекающего через внешнюю нагрузку, тока разряда (отрицательные значения) и тока заряда блока суперконденсаторов и тока разряда аккумулятора.

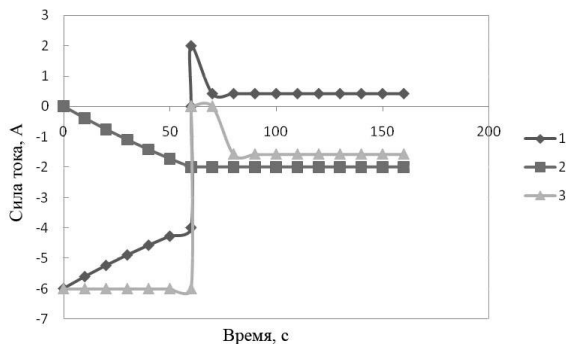


Рисунок 3 – Значения: 1 – токов разряда и заряда блока суперконденсаторов; 2 – тока разряда аккумулятора; 3 – тока протекающего через внешнюю нагрузку

Как видно из этого рисунка в первые 60 секунд через внешнюю нагрузку течет суммарный ток равный 6 А, который состоит из тока разряда аккумулятора и тока разряда блока суперконденсаторов. После подключения дополнительной нагрузки  $R_{L1}$  ток разряда аккумулятора, благодаря электронному ограничителю тока разряда аккумулятора, остается в пределах нормы. Ток разряда блока суперконденсаторов меняется на ток заряда и становится внешней нагрузкой для аккумулятора. В тоже время ток, про-

текающий через суммарное нагрузочное сопротивление  $R_{L1} + R_{L2}$ , меньше требуемого тока 1,7 А, что не соответствует условиям технического задания работы гибридного источника питания. Аккумулятор заряжает блок суперконденсаторов, а через нагрузку течет ток меньше необходимого. Блок суперконденсаторов после подключения дополнительной нагрузки сам начинает играть роль внешней нагрузки для аккумулятора и мешает нормальной работе гибридного источника питания.

Чтобы избежать этого нежелательного эффекта и обеспечить нормальную работу гибридного источника питания при переходе от одного режима эксплуатации к другому блок суперконденсаторов необходимо заряжать через электронное устройство, ограничивающее его максимальный ток заряда. Максимальный ток заряда блока суперконденсаторов можно оценить, используя уравнение:

$$I_{ch} = I_A - I_n, \quad (4)$$

где  $I_{ch}$  – максимальный ток заряда блока суперконденсаторов;  $I_n$  – ток потребления нагрузкой при постоянном режиме эксплуатации.

В нашем случае максимальный ток заряда блока суперконденсаторов равен 0,3 А. После подключения электронного устройства, ограничивающего ток заряда блока суперконденсаторов, распределение токов в системе во время заряда блока суперконденсаторов имеет вид, приведенный на рис. 4.

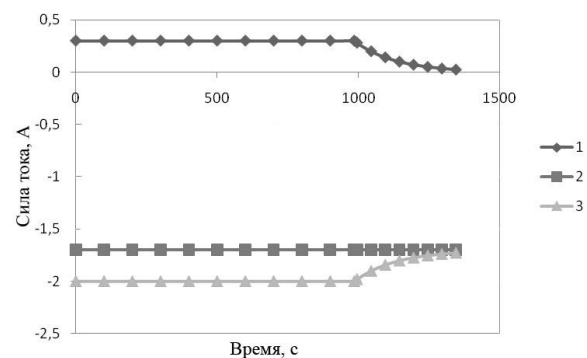


Рисунок 4 – Значения: 1 – тока заряда блока суперконденсаторов; 2 – тока, протекающего через внешнюю нагрузку; 3 – тока разряда аккумулятора

Как видно из этого рисунка, после подключения электронного устройства ограничивающего ток заряда блока суперконденсаторов ток, протекающий через нагрузку, всегда соответствует требованиям технического задания. В режиме максимальной мощности ток равен 6 А, а при нормальном режиме работы ток не превышает 1,7 А. Следовательно, предложенное техническое решение обеспечивает нормальную работу всех составляющих гибридного источника питания и обеспечивает бесперебойное питание внешнего устройства.

Разумеется, заряд блока суперконденсаторов можно осуществлять и от независимого источника пита-

ния. Например, в автотранспорте [9] это может быть энергия рекуперации или заряд от двигателя внутреннего сгорания. При работе в составе солнечной электростанции блок суперконденсаторов может заряжаться от солнечных батарей [4, 10], как портативных так и большой мощности [11]. Возможно, в некоторые случаях, как например, в системе рекуперации, электронное устройство, ограничивающее ток заряда блока суперконденсаторов, не понадобится. Однако, это отдельные задачи, решение которых зависит от того где используется гибридный источник питания.

**ВЫВОДЫ.** Предложена математическая модель, позволяющая рассчитать параметры составляющих гибридного источника питания исходя из требований, предъявляемых к источнику питания в процессе его эксплуатации.

Энергоемкость гибридного источника питания определяется емкостью аккумулятора, а максимальная мощность – суммарной мощностью аккумулятора и блока суперконденсаторов.

Показано, что для непрерывной работы гибридного источника питания, в котором для зарядки блока суперконденсаторов используется аккумулятор необходимо устанавливать два ограничителя тока. Первый – обеспечивает нормальный режим работы аккумулятора, второй – бесперебойную работу гибридного источника питания во время зарядки блока суперконденсаторов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ultracapacitors: why, how, and where is the technology. / Burke Andrew // J. Power Sources – 2000. – Vol. 91(1). – PP. 37–50.
2. Carbon properties and their role in supercapacitors / Pandolfo A.G., Hollenkamp A.F. // J. Power Sources. – 2006. – Vol. 157(1). – PP. 11–27.

3. Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors / Frackowiak E., Beguin F. // Carbon. – 2001. – Vol. 39(6). – PP. 937–50.

4. Гибридный источник питания для системы ориентации солнечных батарей / В.Ю. Изотов, Н.И. Клюй, А.В. Макаров, Д.С. Гавриков и др. // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. – 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 44–48.

5. Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems / A.J. Ruddell, A.G. Dutton, H. Wenzl, C. Ropeter and other // Journal Power Sources. – 2002. – V. 112 – PP. 531–546.

6. Optimal battery/ultracapacitor storage combination. / W. Henson // Journal of Power Sources. – 2008. – V. 179. – PP. 417–423.

7. Методы балансировки напряжений суперконденсаторных элементов / Ю.Ю. Разуваев, М.Ю. Чайка, В.В. Агупов, В.С. Горшков и др. // Вестник Воронежского государственного университета. – 2012. – Т. 8 – № 7.2 – С. 101-105.

8. Thrap G.C. Charge balancing circuit for double-layer capacitors //US Patent 2004/026312 1 A1. – 2004.

9. Беляков А.И. Электрохимические суперконденсаторы: текущее состояние и проблемы развития // Электрохимическая энергетика. – 2006. – Т.6 – № 3. – С. 146–149.

10. Бекиров Э.А. Автоматические источники питания на базе солнечных батарей. – Монография. Симферополь. – 2011. – 486с.

11. Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії / А.П. Оксанич, В.А. Тербан, С.О. Волохов, М.І. Клюй та інші. – Монографія. Кривий Ріг. Мінерал. – 2010. – 267 с.

### HYBRID POWER SOURCE BASED ON BATTERY AND BLOCK OF SUPERCAPACITORS

V. Izotov, N. Klyui, D. Gavrikov, I. Burlaka, D. Iarmolenko

Institute of Semiconductor Physics V. Lashkaryova NAS of Ukraine  
prosp. Nauki, 41, Kiev, 03028, Ukraine. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

I. Koltsov

National Technical University of Ukraine «KPI»  
prosp. Peremogi, 37, 03056, Ukraine. E-mail: veterkoltsov@gmail.com

**Purpose.** Electrochemical double layer capacitors or so-called supercapacitor (SC) possess rather high specific energy (4–6 Whkg<sup>-1</sup>), and very high specific power (1–2 kWkg<sup>-1</sup> at 95 % efficiency) and (10–20 kWkg<sup>-1</sup> in pulse regime). Besides, the SCs successfully act in wide temperature range and have long lifetime (>10<sup>5</sup> charge/discharge cycles). Specific capacity of batteries is three orders of magnitude higher than that for supercapacitors. However, they possess substantially narrower work temperature range and value of charge/discharge cycles is also lower and is close to 10<sup>3</sup>. Besides, the batteries are very sensitive to current overloading. It means that the supercapacitor properties and the battery properties are widen exploitation characteristics each other's. The above mentioned considerations allow us to conclude that it is very promising to create hybrid power source consisting of a battery with high specific energy and block of supercapacitors with high specific power. In order to create an effective hybrid power source it is required to develop approach giving possibility to coordinate parameters of the source components and to optimize their characteristics. That is why the aim of this work was creation of mathematical model that may allow us to calculate the optimal relation between components of the hybrid power source taking into account the exploitation requirements. **Methodology.** In the work we considered the situation of parallel connection of the battery and block of supercapacitor. Using the results of theoretical calculations and taking into consideration the required parameters for hybrid power source we determined optimal characteristics for both the battery and block of supercapacitors. Electronic components those ensure effective functioning of the hybrid power source were also proposed. **Results.** As a result, such model was developed and calculations of the hybrid power source parameters have been performed. The energy capacity of the hybrid power source is determined by the battery capacity and maximal power by the common power of the supercapacitor and the battery. It

was also shown that for continuous and effective functioning of the hybrid power source where the battery is used to charge the block of supercapacitors two devices for current limitation are required. First is necessary to ensure optimal regime for the battery functioning and the second one for non-interrupting functioning of the hybrid power source during charging of the supercapacitors. **Originality.** The proposed approach and developed model allow one to optimize functioning of battery and block of supercapacitors as components of hybrid power source and ensure effective and uninterrupted work of the source. **Practical value.** Thus, the proposed approach may be successfully applied to predict properties and to create a construction of hybrid power sources for supplying of various devices, electrical and hybrid cars etc. References 11, figures 4.

**Key words:** block of supercapacitors, battery, hybrid power source.

#### REFERENCES

- Burke, A. (2000), "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology", *J. Power Sources*, no. 91(1), pp. 37–50.
- Pandolfo, A.G., Hollenkamp, A.F. (2006), "Carbon properties and their role in supercapacitors", *J. Power Sources*, no. 157 (1), pp. 11–27.
- Frackowiak, E., Beguin F. (2001), "Carbon materials for the electrochemical storage of energy in capacitors", *Carbon*, no. 39 (6), pp. 937–50.
- Izotov, V.Yu., Klyui, N.I., Makarov, A.V., Gavrikov, D.S., Ganus, V.O., Han, Wei, (2014), "The hybrid power supply system for the orientation of solar panels", *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*, iss. 84(1). pp. 44–48.
- Ruddell, A.J., Dutton, A.G., Wenzl, H., Ropeter, C., Sauer, D.U., Merten, J., Orfanogsannis, C., Twidell, J. W., Vezin, P. (2002), "Analysis of battery current microcycles in autonomous renewable energy systems", *J. Power Sources*, no. 112, pp. 531–546.
- Henson, W. (2008), "Optimal battery/ultracapacitor storage combination", *Journal of Power Sources*, no. 179, pp.417–423.
- Razuvaev, Yu.Yu., Chayka, M.Yu., Agupov, V.V., Gorshkov, V.S., Silyutin, D.E. (2012), "Methods of supercapacitor voltage balancing elements", *Journal of the Voronezh State University*, no. 72, pp. 101–105.
- Thrap, G.C. (2004), "Charge balancing circuit for double-layer capacitors", US Patent 2004/026312 1 A1.
- Belyakov, A.I. (2006), "Electrochemical Supercapacitors: current status and problems of development", *Electrochemical energy*, no. 6 (3), pp.146–149.
- Bekirov, E.A. (2011), *Avtomaticheskie istochniki pitaniya na baze solnechnykh batarej: monografiya* [Automatic power supply on the solar battery basis: Monograph], Simferopol, Ukraine.
- Oksanich, A.P., Terban, V.A., Volkhov, S.O., Klyui, M.I., Skryshevskyy, V.A., Makarov, A.V., Kostylev, V.P. (2010), *Suchasni tehnologii' vyrobnyctva kremniju ta kremnijevyh fotoelektrychnykh peretvorjuvachiv sonjachnoi' energii: monografiya* [Modern technology of silicon and silicon photoelectric transformation ryuvachiv solar energy: Monograph], Mineral, Krivoy Rog, Ukraine.

Стаття надійшла 04.11.2015.