

УДК 255.29.1; 621.315.592; 621.3.049.77; 004.93'1

ГИБРИДНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМЫ ОРИЕНТАЦИИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**В. Ю. Изотов, Н. И. Клюй, А. В. Макаров, Д. С. Гавриков, В. А. Ганус**Институт физики полупроводников им. В. Е. Лашкарёва НАН Украины
просп. Науки, 41, г. Киев, 03028, Украина. E-mail: klyui@isp.kiev.ua**Хань Вэй**Институт физики, Дзилинский университет
г. Чаньчунь, 130012, Китайская Народная Республика

Исследована возможность использования гибридного источника питания созданного на базе аккумулятора и блока суперконденсаторов для энергообеспечения системы ориентации в солнечной электростанции. Показано, что для эффективной и длительной работы гибридного источника питания его энергонакапливающие элементы аккумулятор и блок суперконденсаторов, необходимо оборудовать электронными системами защиты, аккумулятор – системой защиты от перегрузок по току, а блок суперконденсаторов – системой защиты от разбалансировки по напряжению единичных элементов внутри блока. Установлен механизм возникновения тока саморазряда – основной причины, который ведет к рассогласованию напряжений суперконденсаторов. Показано, что саморазряд суперконденсаторов обусловлен наличием электрохимически активных микропримесей, устранить которые при изготовлении суперконденсаторов невозможно. Разряд паразитных микропримесей протекает по механизму «Шаттл» и характеризуется удельной величиной порядка единиц микроампер на фараду. Предложено электронное устройство защиты блока суперконденсаторов от разбалансировки.

Ключевые слова: суперконденсатор, токи утечки, рабочее напряжение, гибридный источник питания.**ГІБРИДНЕ ДЖЕРЕЛО ЖИВЛЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМИ ОРІЄНТАЦІЇ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ****В. Ю. Изотов, М. І. Клюй, О. В. Макаров, Д. С. Гавриков, В. О. Ганус**Институт фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України
просп. Науки, 41, м. Київ, 03028, Україна. E-mail: klyui@isp.kiev.ua**Хань Вэй**Институт фізики, Дзилинський університет
м. Чаньчунь, 130012, Китайська Народна Республіка

Досліджено можливість використання блоку суперконденсаторів спільно з акумулятором як гібридне джерело живлення для енергозабезпечення системи орієнтації в сонячній электростанції. Показано, що для ефективної і тривалої роботи гібридного джерела живлення його енергонакопичуючі елементи, акумулятор і блок суперконденсаторів треба обладнати електронними системами захисту. Акумулятор має бути обладнаний системою захисту від перевантажень за струмом, а блок суперконденсаторів – системою захисту від розбалансування за напругою одиничних елементів усередині блоку. Встановлено механізм виникнення струму саморозряду – основної причини, що веде до неузгодженості напруг суперконденсаторів. Показано, що саморозряд суперконденсаторів обумовлений наявністю електрохімічно активних мікродомішок, усунути які при виготовленні суперконденсаторів неможливо. Розряд паразитних мікродомішок перебігає за механізмом «Шаттл» і характеризується питомою величиною порядку одиниць мікроампер на фараду. Запропоновано електронний пристрій захисту блоку суперконденсаторів від розбалансування.

Ключові слова: суперконденсатор, струми самовитоку, робоча напруга, гібридне джерело живлення.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В связи с истощением запасов традиционного топлива возникает необходимость поиска новых альтернативных источников энергии и рационального использования полученной энергии. В первую очередь, к таким источникам следует отнести фотовольтаические солнечные электростанции (ФСЭ), работающие по принципу прямого превращения солнечной энергии в электрическую. На сегодняшний день это направление альтернативной энергетики развивается наиболее интенсивно. Учитывая то обстоятельство, что поток солнечной энергии меняется в зависимости от особенностей суточного и годового движения Земли, создание высокоэффективных ФСЭ невозможно без создания систем ориентации солнечных батарей (СБ), входящих в состав ФСЭ.

Использование в фотовольтаических солнечных электростанциях системы слежения приводит к увеличению коэффициента полезного действия (КПД) на ~30 % по сравнению с аналогичными солнечными батареями, но без систем слежения [1, 2]. Особенно

актуальна разработка таких систем для ФСЭ с концентраторами солнечного излучения [3, 4]. Для рационального использования накопленной энергии в системе ориентации ФСЭ систему слежения необходимо оборудовать автономным источником питания, который должен отвечать следующим требованиям: хранить накопленную энергию длительное время; отдавать накопленную энергию мощными импульсами длительностью в несколько секунд с высоким КПД; быть долговечным; работать в широком температурном диапазоне.

Таким образом, целью настоящей работы стала разработка долговечного перезаряжаемого источника питания с высоким КПД для систем ориентации солнечных батарей.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ. Циклограмма работы привод следящей системы выглядит следующим образом. За световой день следящая система должна поворачивать солнечные батареи на 150°. Практически отслеживание положения Солнца может осуществляться путем пово-

рота солнечной батареи на $2,5^0$ каждые десять минут. При этом двигатель поворота потребляет достаточно большой ток в течение короткого промежутка времени, что является серьезной нагрузкой для блока электропитания. В остальное время блок электропитания заряжается малыми токами. Для обеспечения эффективного накопления электрической энергии, генерируемой солнечными батареями и, в то же время, обеспечения эффективной работы системы ориентации СБ, оптимальным является использование в составе ФЭС гибридного источника питания на основе традиционного аккумулятора и суперконденсатора (СК) [5].

СК отвечают всем требованиям, которые выдвигаются к высокомоощным перезаряжаемым источникам питания. Они обладают высокой удельной мощностью, количество циклов заряд/разряд без изменения параметров СК достигает 10^6 , а их КПД составляет 90–95 %. Однако, наряду с перечисленными достоинствами, у единичных СК присутствует существенный недостаток – низкое рабочее напряжение. Для СК в которых используются водные электролиты рабочее напряжение немногим более одного вольта, а у СК на базе органических электролитов рабочее напряжение не превышает трех вольт.

Низкое рабочее напряжение единичного элемента диктует необходимость использовать при работе с напряжениями выше трех вольт блоки СК. При использовании блоков СК необходимо учитывать рассогласование единичных СК по напряжению внутри блока. Под рассогласованием понимают отклонение напряжения, в процессе эксплуатации, от рабочего на единичных элементах при сохранении постоянным суммарного рабочего напряжения на внешних клеммах блока в целом. Следует отметить, что рассогласование является основным недостатком блоков СК.

Проанализируем работу гибридного источника питания, состоящего из аккумулятора и блока СК.

При постановке эксперимента использовался блок СК с рабочим напряжением 12,5 В, который был изготовлен из пяти СК емкостью $30 \text{ Ф} \pm 5 \%$ каждый. Каждый СК рассчитан на рабочее напряжение 2,5 В. Внутреннее сопротивление единичного СК (EDR) составляло $18 \text{ мОм} \pm 5 \%$. Все параметры СК определялись методом гальваностатического циклирования. Чтобы набрать нужное напряжение для блока СК единичные элементы соединялись последовательно.

Учитывая, что процесс рассогласования определяется токами саморазряда, был проведен тщательный отбор СК по этому параметру. Для этого на каждом СК исследовался механизм его саморазряда. Методика изучения механизма саморазряда подробно изложена в работе Б. Конвея [6].

Согласно этой методике СК заряжались до рабочего напряжения 2,5 В. С целью устранения влияния эффекта перераспределения заряда на процесс саморазряда, СК выдерживали в потенциостатическом режиме при этом напряжении в течение 8 часов. Как было показано ранее [7–9], для используемых электрохимических систем, в отличие от водных элект-

ролитов, этого времени вполне достаточно, чтобы нивелировать влияние эффекта перераспределения заряда на токи саморазряда СК. Затем СК отключались от внешнего источника питания, и снималась зависимость падения напряжения на внешних контактах СК от времени.

Полученные результаты обрабатывались по методике, предложенной Б. Конвеем [6]. В результате было установлено, что саморазряд СК связан с наличием электрохимически активных микропримесей, которые способны разряжаться по механизму типа «шаттл». В этом случае саморазряд СК, лимитируется скоростью доставки реагентов к поверхности электродов.

К электрохимически активным примесям в первую очередь следует отнести железо. Так, Андреас с сотрудниками [10] показали, что даже при концентрации железа 10 мкмоль на литр оно вносит существенный вклад в процесс саморазряда СК. Устранить или проконтролировать такие концентрации микропримесей практически невозможно. Как следствие, концентрация микропримесей в СК различна, а значит и токи саморазряда у них тоже отличаются. В данном эксперименте, величина тока саморазряда при напряжении 2,5 В и температуре 25°C была незначительной и составляла единицы микроампер на фараду.

Для моделирования режима работы гибридного источника питания в системе ориентации солнечных батарей, использовалась установка, электрическая схема которой приведена на рис. 1. Заряд блока СК осуществлялся от источника питания, который имитировал аккумулятор, с постоянным напряжением 12,5 В. Зарядный ток ограничивался величиной 0,2 А. Постоянный ток 0,2 А имитировал работу аккумулятора в нормальном режиме без перегрузок.

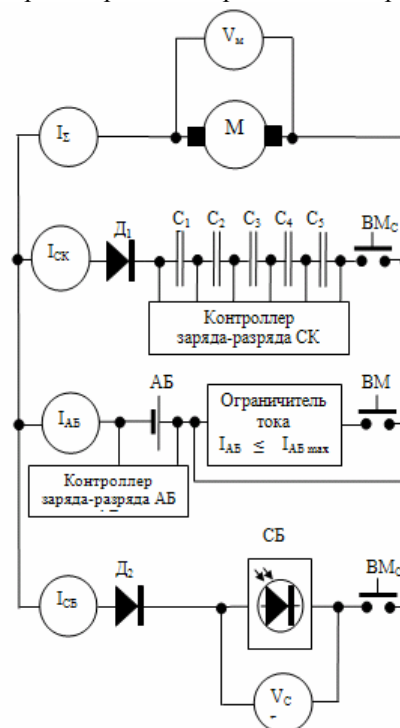


Рисунок 1 – Схема блока электропитания привода СБ с контроллером

В качестве нагрузки, имитирующей привод, был использован электромотор, который через редуктор осуществлял подъем груза. Вес груза равнялся 10 кг. Подъем груза осуществлялся на высоту 1 м. Переменный радиус шкива, на который наматывался трос, прикрепленный к грузу, позволял изменять нагрузку и исследовать возможности блока электропитания работать в режиме с переменной нагрузкой. Величина нагрузки на электромотор, за счет изменения радиуса шкива, изменялась в три раза. Измерительная аппаратура фиксировала потребление электроэнергии от гибридного источника питания. Ток, потребляемый электромотором во время подъема груза, состоял из двух составляющих – постоянного тока от источника питания величиной 0,2 А и тока, потребляемого от блока СК, который изменялся в зависимости от нагрузки на электромотор. Изменение разности потенциалов на внешних контактах блока СК и ток потребления фиксировалось как функции времени. Результаты измерений приведены на рис. 2 и 3.

Как видно из рис. 2, подъем груза, в основном, осуществляется за счет энергии накопленной в блоке СК. Во время подъема груза ток, потребляемый от блока СК, изменялся в пределах от 0,5 А до 1,5 А, в то время как ток от источника питания остается постоянным равным 0,2 А. Такой режим эксплуатации гибридного источника питания имитирует режим работы аккумулятора без перегрузок, что обеспечивает его долговременную работоспособность.

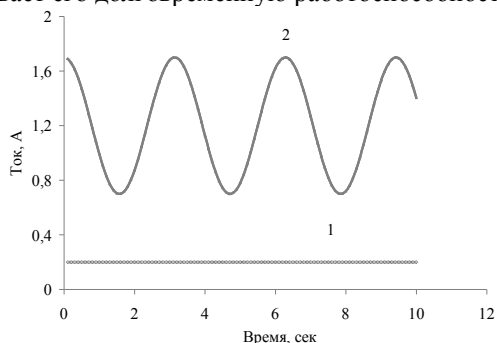


Рисунок 2 – Зависимость тока, потребляемого электродвигателем во время подъема груза, от времени: 1 – ток, потребляемый от источника питания; 2 – суммарный ток, потребляемый актуатором

Все перегрузки, которые возникают при эксплуатации гибридного источника питания устраняются при помощи блока СК. Эксплуатация блока СК в режиме переменной нагрузки с передачей энергии импульсами высокой мощности не влияет на работоспособность блока.

Выбранный, при постановке эксперимента, временной режим потребления энергии имитировал режим работы привода в полевых условиях. В реальных условиях процесс слезнения за положением Солнца относительно солнечных батарей осуществляется путем периодического поворота батарей. Время поворота составляет, приблизительно, 10 % от общего времени работы ФЭС которое разбито на 60 равных интервалов.

В данном эксперименте моделирование реальной ситуации осуществлялось путем разделения временного периода работы электромотора аналогичным образом. Потребление энергии электромотором происходило во время подъема груза в течении 10 с. После этого наступал период пассивного ожидания привода продолжительностью 90 с. В это время блок СК заряжался от источника питания. Максимальное значение тока зарядки составляло 0,2 А. За время пассивного ожидания привода, блок СК полностью восстанавливал израсходованную энергию и был способен снова разряжаться на внешнюю нагрузку. Изменение разности потенциалов на внешних контактах блока СК, как функцию времени, приведено на рис. 3.

Следует отметить, что диаграмма, приведенная на рис. 3, не дает полной информации о состоянии блока СК. Она описывает только изменение напряжения на внешних клеммах блока СК. Более полную информацию о работоспособности блока дает зависимость параметров блока СК от количества циклов заряд/разряд. При этом, крайне важно знать не только напряжение на внешних клеммах, но и напряжение на каждом отдельном элементе внутри блока в зависимости от числа циклов заряд/разряд. Для получения полной информации о состоянии блока к каждому отдельному элементу был подключен контроллер.

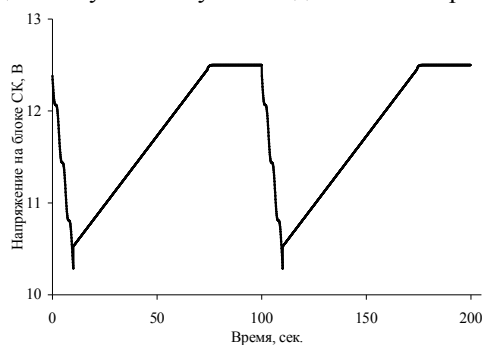


Рисунок 3 – Изменение напряжения на внешних клеммах блока СК в процессе эксперимента

На рис. 4 приведено распределение потенциалов на отдельных элементах блока СК во время эксперимента по циклированию.

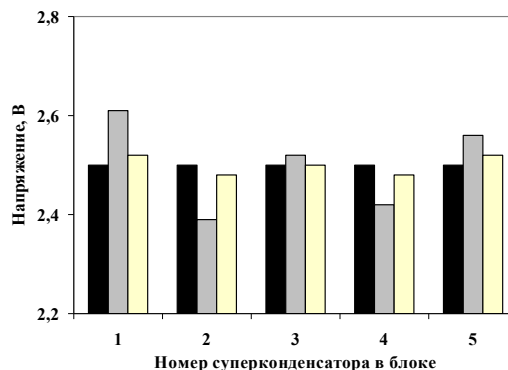


Рисунок 4 – Напряжение на СК внутри блока – перед началом эксперимента по циклированию (крайняя слева); после 1000 циклов заряд/разряд без балансирующего устройства (в центре); 200 циклов заряд/разряд после подключения балансирующего устройства (крайняя правая)

Эта информация существенно дополняет данные, приведенные на рис. 3, и дает представление о расхождении по напряжению единичных элементов внутри блока. Циклирование проводилось при температуре 25 °С. Эксперимент продолжался в течение пяти суток. В течение одного рабочего дня проводилось 200 циклов заряд/разряд, после чего блок СК отключали от электродвигателя заряжали до разности потенциалов на внешних клеммах 12,5 В и отключали от источника питания.

Схема подключения измерительного комплекса приведена на рис. 1.

Несмотря на тщательный подбор единичных СК перед сборкой их в блок по емкости, внутреннему сопротивлению и токам утечки, после 1000 циклов заряд/разряд наблюдается существенное различие по напряжению на единичных элементах внутри блока (рис. 4, центральные гистограммы). Очевидно, что дальнейшая эксплуатация блока СК приведет к росту напряжения на отдельных элементах, на которых после 1000 циклов напряжение превышает 2,5 В, и выходу их из строя.

Как отмечалось выше, причиной, приводящей к расхождению напряжений на отдельных СК внутри блока, является процесс саморазряда. Учитывая, что величина удельного тока саморазряда СК при напряжении 2,5 В и температуре 25 °С составляет единицы мкА/Ф, а суммарный ток саморазряда менее одного миллиампера, внешнее устройство, которое обеспечит работу единичного СК в рабочем диапазоне напряжений, может быть достаточно маломощным. Для решения поставленной задачи была предложена схема стабилизатора напряжения, приведенная на рис. 5.

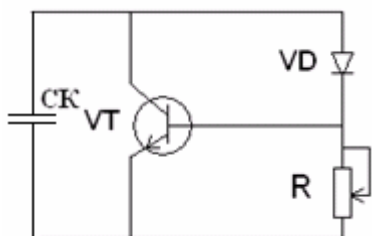


Рисунок 5 – Принципиальная схема стабилизатора напряжения на СК

Стабилизатор, схематическое изображение которого приведено на рис. 5, подключается к каждому СК в блоке. Принцип работы такого стабилизатора следующий. Когда напряжение на СК превышает 2,5 В, транзистор VT открывается и начинает пропускать ток, обеспечивая разряд СК. При разряде напряжение на СК падает. Когда разность потенциалов на внешних клеммах СК становится менее 2,5 В, транзистор VT закрывается и ток через него не протекает. Таким образом, напряжение на отдельных элементах блока с малыми токами утечки происходит за счет их дополнительного разряда через стабилизатор. Потенциометр R обеспечивает регулировку напряжения срабатывания транзистора VT.

После подключения балансирующей цепочки к

блоку суперконденсаторов напряжение на единичных элементах внутри блока начинает выравниваться уже после 200 циклов, что видно из правой гистограммы на рис. 5. Блок СК переходит в нормальный режим работы, все элементы которого работают в области рабочих напряжений. Из изложенного выше можно сделать вывод, что гибридный накопитель энергии, состоящий из аккумулятора и блока СК, отвечает всем требованиям, предъявляемым к автономным источникам энергообеспечения систем ориентации солнечных батарей. Для эффективной работы автономного источника энергообеспечения такой источник должен содержать дополнительное электронное оборудование. Аккумулятор необходимо оборудовать защитой от перегрузок в виде ограничителя тока, а блок СК должен содержать балансирующую систему, чтобы избежать перегрузок по напряжению на отдельных элементах.

ВЫВОДЫ. Гибридный источник питания, состоящий из блока суперконденсаторов и аккумулятора, полностью отвечает требованиям, предъявляемым к автономным перезаряжаемым источникам питания для системы ориентации солнечных батарей. Для стабильной и долговременной работы аккумулятора его надо дополнить электронной системой ограничивающей максимальный ток разряда. Все, возникающие при таком ограничении перегрузки, принимает на себя блок суперконденсаторов.

Для стабильной работы блока суперконденсаторов его необходимо оборудовать балансирующим устройством, которое исключит превышение рабочего напряжения на отдельных элементах внутри блока. Основной причиной приводящей к разбалансировке единичных элементов внутри блока суперконденсаторов следует считать токи утечки связанные с «шаттл» процессами.

При расчетах параметров балансирующего устройства, ток, протекающий через него должен на порядок превосходить разность токов саморазряда единичных суперконденсаторов внутри блока при максимальном рабочем напряжении. Разность токов саморазряда для симметричных суперконденсаторов, изготовленных на базе органического электролита, колеблется в пределах 1–2 мкА/Ф.

Расчеты показывают, что предложенное в работе балансирующее устройство позволяет обеспечить работоспособность блока суперконденсаторов изготовленных с использованием органических электролитов с емкостью единичных элементов до 3000 Ф.

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров А.В., Ганус В. О., Дикуша В.М., Горбулик В.І. Синхронізована фасеточна система інсталяції сонячних модулів // Відновлювана енергетика. – 2013. – Вип. 34. – № 3. – С. 39–43.
2. Оксанич А.П., Тербан В.А., Волохов С.О. и др. Сучасні технології виробництва кремнію та кремнієвих фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії: монографія. – Кривий Ріг. Мінерал, 2010. – 267 с.
3. Сокол Е.И., Замаруев В.В., Ерсько А.В., Кривошеев С.Ю. Интегральная система управления

фотоэнергетической установкой // Технічна електродинаміка. Тем. вип., част. 1. – 2012. – С. 12–16.

4. Химич А.П., Бекиров Э.А. Разработка системы двухосевого слежения за солнцем для концентрирующей энергоустановки с фотопреобразователем // Технічна електродинаміка. Тем. вип., част. 1. – 2012. – С. 111–113.

5. Бекиров Э.А. Автоматические источники питания на базе солнечных батарей: монография. – Симферополь, 2011. – 486 с.

6. Conway B. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications // Kluwer Academic Plenum. – New York, 1999. – 698 p.

7. Kowal J., Avaroglu E., Chamekh F. et al. Detailed

analysis of the self-discharge of supercapacitors // Journal of Power Sources. – 2011. – Vol. 196. – PP. 573–579.

8. Изотов В.Ю., Рудницька А.А., Громадський Д.Г., Кольцов І.В. Особливості саморозряду суперконденсаторів на основі пористих вугільних матеріалів та органічного електроліту // Відновлювальна енергетика. – 2011. – Вип. 25. – № 2. – С. 5–10.

9. Black J., Andreas A. Effect of charge redistribution on self-discharge of electrochemical capacitors // Electrochimica Acta. – 2009. – Vol. 5. – PP. 3568–3574.

10. Andreas A., Lussier K., Oickle A. Effect of Fe-contamination on rate of self-discharge aqueous electrochemical capacitors // Journal of Power Sources. – 2009. – Vol. 187. – PP. 275–283.

HYBRID POWER SOURCE FOR ORIENTATION SYSTEM OF SOLAR BATTERIES

V. Izotov, N. Klyui, A. Makarov, D. Gavrikov, V. Ganus

V.E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics of NAS of Ukraine
prosp. Nauky, 41, Kyiv, 03028, Ukraine. E-mail: klyui@isp.kiev.ua

Han Wei

College of Physics, Jilin University, Changchun, 130012, P.R. China

The feasibility of using supercapacitors battery in conjunction with accumulator battery as a hybrid power source for orientation system in a solar power plant was investigated. It was shown that for effective and long-term work of the hybrid power source it is necessary to equip the energy storage devices (accumulator battery and battery of supercapacitors) with electronic security systems. The accumulator battery has to be equipped with an overcurrent protection system, and the supercapacitors battery – with a voltage unbalance system for single elements inside the battery. The authors have defined the mechanism of self-discharge current appearance for supercapacitors. The current is the main reason that leads to the voltage mismatch in supercapacitors. It is shown that self-discharge of supercapacitors are caused by electrochemically active microimpurities that can not be removed. The parasitic microimpurities discharge runs by the "Shattl" mechanism and can be characterized by a specific value of microamperes per farad of order unities. It is proposed the electronic device for unbalance protection of the supercapacitors battery.

Key words: supercapacitor, leakage current, operating voltage, hybrid power source.

REFERENCES

1. Makarov, A.V., Ganus, V.O., Dykusha, V.M., Horbuluk, V.I. (2013), "Synchronized facet system install solar modules", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 39–43.

2. Oksanich, A.P., Terban, V.A., Volkhov, S.O., Klyui, M.I., Skryshkevskyy, V.A., Makarov, A.V., Kostylev, V.P. (2010), *Suchasni tehnologii' vyrobnyctva kremniju ta kremnijevyh fotoelektrychnyh peretvorjuvachiv sonjachnoi' energii* [Modern technology of silicon and silicon photoelectric transformation ryuvachiv solar energy], Monograph, Mineral, Krivoy Rog, Ukraine.

3. Sokol, E.I., Zamaruev, V.V., Erosko, A.V., Krivosheev, S.Yu. (2012), "Integrated management system of photovoltaic installation", *Tekhnichna Elektrodynamika*, Thematic issue, part. 1, pp. 12–16.

4. Khimich, A.P., Bekirov, E.A. (2012), "Development of the system of two-axis sun tracking for concentrating power plants with photovoltaic cell", *Tekhnichna Elektrodynamika*, Thematic issue, part. 1, pp. 111–113.

5. Bekirov, E.A. (2011), *Avtomaticheskie istochniki pitaniya na baze solnechnyh batarej* [Automatic power supply on the solar battery basis], Monograph, Simferopol, Ukraine.

6. Conway, B. (1999), *Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications*, Kluwer Academic, Plenum, New York, USA.

7. Kowal, J., Avaroglu, E., Chamekh, F., Senfelds, A., Thien, T., Wijaya, D., Saure, D. (2011), "Detailed analysis of the self-discharge of supercapacitors", *Journal of Power Sources*, vol. 196, pp. 573–579.

8. Izotov, V.Yu., Rudnytska, G.A., Gromadskiy, D.G., Kol'tsov, I.V. (2011), "Features of supercapacitors self-discharge based on porous carbon materials and organic electrolyte", *Renewable Energy*, vol. 25, no. 2, pp. 5–10.

9. Black, J., Andreas, A. (2009), "Effect of charge redistribution on self-discharge of electrochemical capacitors", *Electrochimica Acta*, vol. 5, pp. 3568–3574.

10. Andreas, A., Lussier, K., Oickle, A. (2009), "Effect of Fe-contamination on rate of self-discharge aqueous electrochemical capacitors", *Journal of Power Sources*, vol. 187, pp. 275–283.

Стаття надійшла 03.02.2014.