

УДК 621.355.9

**С.М. Карабанов, А.И. Мороз, Д.В. Суворов,
Е.В. Сливкин, Г.П. Гололобов, Д.Ю. Тарабрин**

АВТОНОМНЫЕ СОЛНЕЧНЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СУПЕРКОНДЕНСАТОРОВ

С использованием математического моделирования выполнен анализ эффективности автономных солнечных энергетических систем с применением гибридных накопителей электроэнергии на основе суперконденсаторов. Полученные экспериментальные данные показывают, что использование суперконденсаторов в качестве дополнительных краткосрочных накопителей энергии в автономных солнечных энергетических системах способствует существенному увеличению срока службы аккумуляторов и времени эксплуатации всей системы.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, конденсатор с двойным электрическим слоем, батарея, мощность.

Введение. Срок эксплуатации аккумуляторного накопителя энергии невелик и определяется интенсивностью электрической нагрузки. Именно он является одним из основных элементов современной автономной солнечной энергетической системы. В большинстве случаев используются необслуживаемые гелевые аккумуляторы, срок эксплуатации которых ограничен и не превышает 3-7 лет. Одним из перспективных направлений является использование суперконденсаторов (конденсаторов с двойным электрическим слоем) в автономных солнечных энергетических системах, имеющих ряд достоинств.

Главными преимуществами использования суперконденсаторов являются:

- длительный срок эксплуатации (несколько десятков лет);
- возможность эксплуатации при низких температурах;
- возможность глубокого заряда-разряда без уменьшения срока эксплуатации;
- относительная простота заряда-разряда.

Кроме того, использование таких конденсаторов (EDLC, Ultra capacitors) [1-5] в качестве элементов накопления энергии в фотоэлектрических (photovoltaic, PV) системах позволяет оптимизировать работу устройств отслеживания точки максимальной мощности (maximum power point tracking, MPPT), сгладить мощности PV генератора при частичном затенении, увеличить отдаваемую пиковую мощность энергетической системы. В наших ранних работах [1]

показаны возможности использования суперконденсаторов в качестве энергетического буфера, непосредственно подключаемого к солнечному элементу. В работе [3] выполнен анализ требований к суперконденсаторам, используемым в качестве накопителей энергии в условиях их непосредственного подключения к нагрузке. В работе [4] представлены результаты исследования использования суперконденсаторов в составе автономной солнечной энергетической системы в качестве основного накопителя энергии.

Целью данной работы является определение эффективности работы суперконденсаторов в качестве дополнительного накопителя энергии в автономных солнечных энергетических системах.

Структура автономных солнечных энергетических систем с использованием суперконденсаторов. На рисунке 1 представлена структура автономных солнечных энергетических систем с использованием гибридных накопителей электроэнергии на основе суперконденсаторов. В состав такой автономной солнечной энергетической системы входит: батарея солнечных модулей; MPPT устройство для обеспечения максимального съема мощности; контроллер заряда суперконденсаторов; контроллер заряда аккумуляторов; основной накопитель на аккумуляторах (изготовленных по GEL-технологии); накопитель на суперконденсаторах; DC/AC инвертор с интегрированным управляющим устройством.

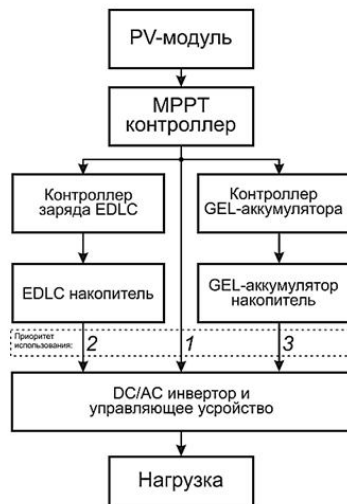


Рисунок 1 – Структура автономных солнечных энергетических систем с использованием Суперконденсаторов

Принцип работы данной системы следующий: электрическая энергия, вырабатываемая батареями солнечных модулей, с выхода MPPT распределяется между накопителями на суперконденсаторах и аккумуляторах. Инвертор подключен к текущей потребляемой нагрузке, а также соединен с выходом MPPT-контроллера для прямой передачи энергии без накопления (буферизации в аккумуляторе). С инвертором соединены батареи суперконденсаторов и аккумуляторов. Алгоритм заряда состоит в следующем: если вырабатываемая модулями мощность превышает текущее потребление, то энергия затрачивается в первую очередь на заряд EDLC, а после его полного заряда – на подзарядку батареи аккумуляторов. Алгоритм использования накопленной энергии аналогичен предыдущему: если потребляемая в текущий момент времени нагрузкой мощность превышает вырабатываемую PV-модулями, то в первую очередь используется энергия, запасаемая в батарее EDLC, после того как эта энергия будет использована, начинает использоваться энергия аккумуляторов.

Математическая модель. Математическая модель автономной солнечной энергетической системы с использованием гибридных накопителей электроэнергии на основе суперконденсаторов представляет собой систему уравнений и логических условий, определяющих алгоритм работы всей системы.

Математическая модель автономной солнечной энергетической системы описывает распределение и перераспределение энергии между генерирующим элементом (солнечный модуль), мощность которого изменяется во времени в соответствии с графиком солнечной инсоляции, накопителями энергии (аккумуляторная батарея

и EDLC), имеющими определённую ёмкость, и изменяющейся во времени нагрузкой.

Вырабатываемая PV-модулем мощность P_{PV} расходуется на обеспечение текущего потребления электроэнергии P_{load} , а также на заряд суперконденсатора P_{ELDC} и аккумуляторной батареи P_{GEL_bat} . В общем уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$P_{PV}(t) = \frac{P_{load}(t)}{\eta_{DC/AC}} + \frac{P_{ELDC}(t)}{\eta_{ELDC_contr}} + \frac{P_{GEL_bat}(t)}{\eta_{GEL_bat_contr}}, \quad (1)$$

где $\eta_{DC/AC}$ – КПД инвертора; η_{ELDC_contr} – КПД контроллера заряда суперконденсатора; $\eta_{GEL_bat_contr}$ – КПД контроллера заряда аккумуляторной батареи.

Перераспределение энергетических потоков в системе осуществляется в соответствии с перечисленными ниже условиями.

При условии превышения вырабатываемой модулем мощности, мощности, потребляемой нагрузкой, происходит накопление энергии в аккумуляторной батарее и EDLC. Условием перехода к режиму накопления энергии является превышение уровня вырабатываемой энергии потребления с учетом КПД инвертора:

$$P_{PV}(t) \geq \frac{P_{load}(t)}{\eta_{DC/AC}}. \quad (2)$$

Определение приоритета заряда накопителей энергии происходит с учетом следующих условий:

- если энергия, запасенная в накопителе на суперконденсаторах W_{ELDC} , меньше некоторого её порогового (максимального) значения W_{ELDC_max} , то вырабатываемая PV-модулем мощность используется только для заряда суперконденсаторов, т.е.

$$W_{ELDC}(t) < W_{ELDC_max},$$

при этом уравнение энергетического баланса записывается следующим образом:

$$P_{PV}(t) = \frac{P_{load}(t)}{\eta_{DC/AC}} + \frac{P_{ELDC}(t)}{\eta_{ELDC_contr}} \quad (3)$$

и выражение для мощности заряда батареи суперконденсаторов примет следующий вид:

$$P_{ELDC}(t) = \eta_{ELDC_contr} \left(P_{PV}(t) - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{DC/AC}} \right); \quad (4)$$

- если энергия, запасенная в накопителе на суперконденсаторах W_{ELDC} , достигает своего максимального значения W_{ELDC_max} , то вырабатываемая PV-модулем мощность используется для заряда аккумуляторной батареи до своего максимального значения $W_{GEL_bat_max}$, т.е.

$$W_{ELDC}(t) \geq W_{ELDC_max}$$

при этом уравнение энергетического баланса записывается как:

$$P_{PV}(t) = \frac{P_{load}(t)}{\eta_{DC/AC}} + \frac{P_{GEL_bat}(t)}{\eta_{GEL_bat_contr}} \quad (5)$$

и выражение для мощности заряда аккумуляторной батареи имеет вид:

$$P_{GELbat}(t) = \eta_{GEL_bat_contr} \left(P_{PV}(t) - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{DC/AC}} \right). \quad (6)$$

Переход от режима накопления к режиму расходования накопленной энергии происходит при условии превышения энергии, потребляемой нагрузкой, над энергией, вырабатываемой PV-модулем с учетом КПД:

$$P_{PV}(t) < \frac{P_{load}(t)}{\eta_{DC/AC}}. \quad (7)$$

Определение приоритета разряда накопителей энергии происходит с учетом следующих условий:

- при наличии положительного баланса запасенной энергии в батарее EDLC:

$$W_{ELDC}(t) > 0$$

потребуется электроэнергия, запасенная в батарее суперконденсаторов. В этом режиме потребляемая нагрузкой мощность складывается из мощности, вырабатываемой солнечным модулем, а недостающая мощность отбирается от батареи EDLC. Уравнение энергетического баланса имеет вид

$$P_{load}(t) = \eta_{DC/AC} \left(P_{PV}(t) + \frac{P_{ELDC}(t)}{\eta_{ELDC_contr}} \right). \quad (8)$$

Выражение для мощности разряда EDLC при этом имеет вид, аналогичный выражению (4);

- при полном разряде батареи суперконденсаторов:

$$W_{ELDC}(t) = 0$$

потребуется энергия, запасенная в аккумуляторной батарее, до тех пор, пока уровень энергии не снизится до некоторого порогового значения $W_{GEL_bat_min}$ (определяется типом аккумуляторов, изготовленных по GEL-технологии лежит в пределах 20-30 %), разряд ниже которого приводит к существенному снижению срока службы аккумулятора:

$$W_{GEL_bat}(t) > W_{GEL_bat_min}$$

В этом случае потребляемая нагрузкой

мощность складывается из мощности, вырабатываемой солнечным модулем, а недостающая мощность отбирается от аккумуляторной батареи EDLC. Уравнение энергетического баланса имеет вид:

$$P_{load}(t) = \eta_{DC/AC} \left(P_{PV}(t) + \frac{P_{GEL_bat}(t)}{\eta_{GEL_bat_contr}} \right). \quad (9)$$

Выражение для мощности разряда EDLC при этом имеет вид, аналогичный выражению (6).

Энергетический баланс каждого из накопителей в каждый момент времени определяется с помощью выражений:

$$W_{ELDC}(t) = \int_0^t P_{ELDC}(t) dt, \quad (10)$$

$$W_{GEL_bat}(t) = \int_0^t P_{GEL_bat}(t) dt.$$

Разработанная модель содержит приоритет заряда-разряда различных типов накопителей энергии и может быть использована для расчета распределения энергетических потоков в условиях изменяющихся во времени мощности, вырабатываемой солнечным модулем, и мощности, потребляемой нагрузкой при различных параметрах системы (емкости аккумуляторной батареи и батареи суперконденсаторов, КПД преобразователей и т.д.).

Начальные условия численного эксперимента. В качестве зависимости $P_{PV}(t)$ была использована динамика мощности солнечной инсоляции, представленная в [6] и пронормированная на некоторое значение максимальной пиковой установленной мощности P_{PV_max} на выходе МРРТ-контроллера. В расчетах использовалось значение установленной пиковой мощности, равное 2 кВт. Начальный момент времени был выбран равным началу календарных суток 00.00, конечный момент времени – завершению суток – 24.00.

Предельная глубина разряда аккумуляторной батареи $W_{GEL_bat_min}$ устанавливалась на уровне 25 % от $W_{GEL_bat_max}$. Максимальные емкости накопителей:

- батареи GEL-аккумуляторов – 9600 Вт·ч (48 В×200 А·ч);

- емкость батареи суперконденсаторов изменялась в пределах 96-192 Вт·ч.

Начальные условия для накопителей энергии:

- заряд аккумуляторной батареи на уровне 50 % от $W_{GEL_bat_max}$;

- нулевой начальный заряд батареи суперконденсаторов.

Коэффициенты полезного действия контроллеров были заданы на уровне:

- КПД инвертора $\eta_{DC/AC}$ – 90 %;
- КПД контроллера заряда суперконденсатора η_{ELDC} – 90 %;
- КПД контроллера заряда аккумуляторной батареи $\eta_{GEL_bat_contr}$ – 90 %.

Модель временной зависимости потребления электроэнергии P_{load} была представлена функцией, включающей три составляющих:

- некоторый уровень постоянного круглосуточного потребления (холодильник, беспроводной телефон, бытовая техника в спящем режиме, телевизионная антенна и т.д.) – P_{load_1} на уровне 200 Вт;

- периодический средний уровень потребления в утренний (8-10 ч) и вечерний (18-22 ч) период (освещение, телевизор, компьютерная техника и т.д.) на уровне 500 Вт и средний уровень потребления в дневной (10-18 ч) на уровне 200 Вт – P_{load_2} ;

- периодический пиковый уровень потребления P_{load_3} на уровне 2000 Вт в течение 5 мин в количестве по 5 пиков в утренний (8-10 ч), дневной (10-18 ч) и вечерний (18-22 ч) периоды (эл. чайник, эл. плита, микроволновая печь, стиральная машина, эл. уют и т.д.).

В целом представленные условия являются типичными для автономных солнечных энергетических систем.

Анализ полученных результатов численного расчета. С помощью разработанной математической модели выполнен численный расчет автономных солнечных энергетических систем с использованием суперконденсаторов, результаты которого представлены ниже.

На рисунке 2 изображена зависимость выходной мощности солнечной батареи и модель потребляемой мощности нагрузки от времени. Согласно расчетам, в ночное время используется только энергия, запасенная в аккумуляторной батарее. В утреннее и вечернее время, характеризующееся наиболее интенсивным потреблением электроэнергии, расходуются оба типа энергии – вырабатываемая солнечной батареей и запасенная в накопителях.

В дневное же время используется преимущественно энергия солнечной батареи. Стоит отметить, что большую часть утреннего и вечернего времени, а также в течение всего дневного периода потребляемый уровень мощности ниже уровня вырабатываемой мощности. Однако при подключении потребителей с высоким энергопотреблением используемая мощность существенно

превышает вырабатываемую даже в дневное время при максимальной инсоляции. Все это приводит к кратковременным импульсным разрядам аккумуляторной батареи. На рисунках 3 и 4 показаны временные зависимости мощности разряда-заряда аккумуляторной батареи емкостью 9600 Вт·ч и её энергии в фотовольтаических системах традиционной конструкции (без накопителя на суперконденсаторах). Таким образом, результаты численных расчетов показывают, что использование накопленной в батарее энергии приводит к её многократному неглубокому разряду в 2-5 %, который приводит к снижению срока службы аккумуляторной батареи.

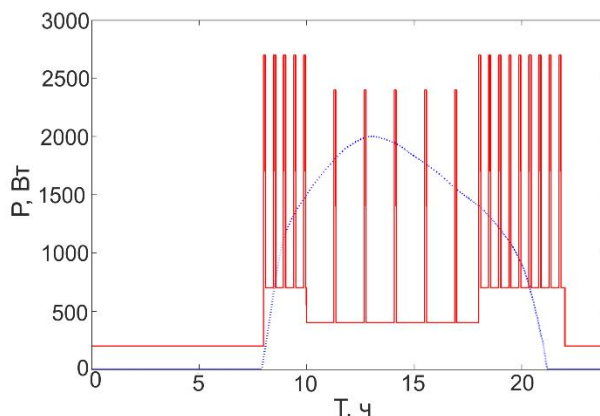


Рисунок 2 – Временная зависимость выходной мощности солнечной батареи и потребляемой мощности нагрузки (модельная)

Временные зависимости мощности разряда-заряда аккумуляторной батареи емкостью 9600 Вт·ч в составе автономной солнечной энергетической системы с гибридным накопителем, имеющим в своем составе суперконденсаторы, показаны на рисунках 5 и 6.

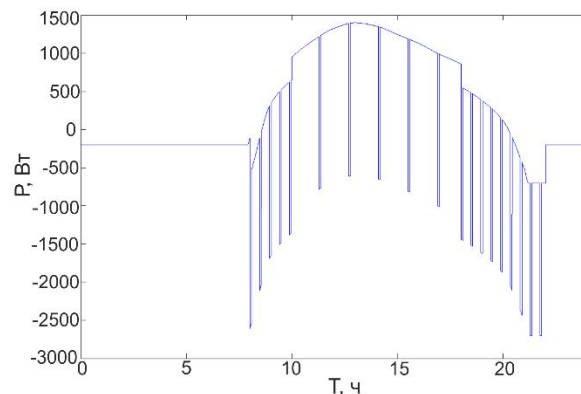


Рисунок 3 – Временная зависимость мощности разряда-заряда аккумуляторной батареи емкостью 9600 Вт·ч без суперконденсатора

Сопоставляя рисунки 3, 4 и 5, 6, можно увидеть, что использование гибридных накопителей на основе суперконденсаторов позволяет существенно снизить нагрузку на основной накопитель – аккумуляторную батарею и число ее цик-

лов заряд-разряд. Это обеспечивается путем выполнения накопителем на основе суперконденсаторов функции энергетического буфера с использованием накопленной энергии для обеспечения питания кратковременных высокомоощных потребителей. Временные зависимости мощности разряда-заряда суперконденсатора емкостью 96 Вт·ч и запасаемой в нем энергии представлены на рисунках 7 и 8.

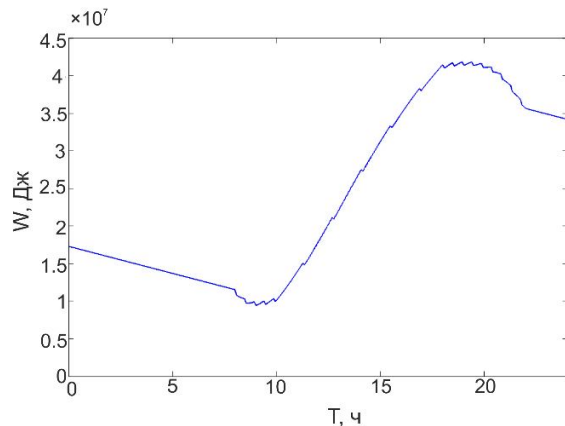


Рисунок 4 – Временная зависимость энергии аккумуляторной батареи емкостью 9600 Вт·ч без суперконденсатора

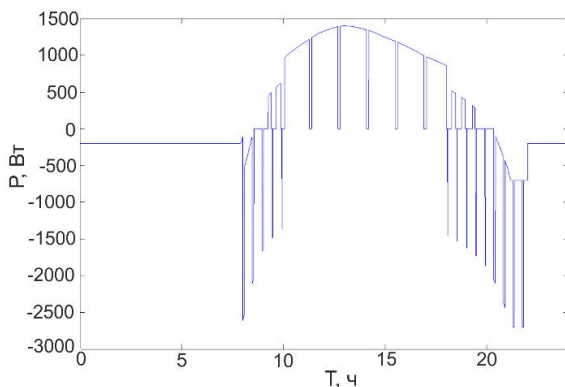


Рисунок 5 – Временная зависимость мощности разряда-заряда аккумуляторной батареи емкостью 9600 Вт·ч с суперконденсатором емкостью 96 Вт·ч

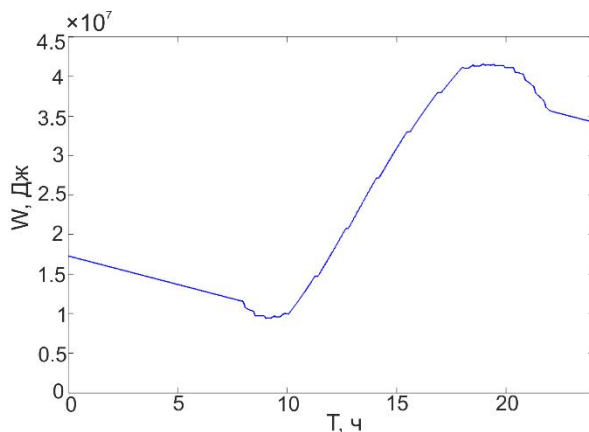


Рисунок 6 – Временная зависимость энергии аккумуляторной батареи емкостью 9600 Вт·ч с суперконденсатором емкостью 96 Вт·ч

Установлено, что значительная часть запасенной в батарее суперконденсаторов энергии используется для обеспечения питания кратковременных высокомоощных нагрузок. Это указывает на то, что при типовых условиях для солнечной автономной энергосистемы соотношение энергетических емкостей суперконденсаторов и аккумуляторной батареи 1/100 является минимально необходимым.

Изучение результатов численного эксперимента, представленных на рисунках 3 и 5, показывает, что при заданных изначально одинаковых условиях в традиционной системе аккумуляторная батарея в течение суток испытывает 14 циклов перехода от заряда к разряду, а при использовании гибридного накопителя – всего 6 циклов перехода. Таким образом, без учета временного затенения вследствие облачности сокращение числа циклов использования аккумуляторной батареи составит более чем 57 %. Необходимо отметить, что эти расчетные данные получены в идеализированном случае, не учитывающем временное затенение из-за облачности. С учетом влияния затенения среднее количество циклов перехода от заряда к разряду увеличится до 25-35 в день.

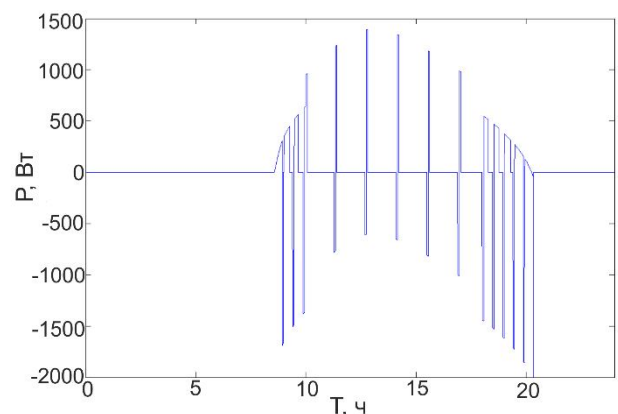


Рисунок 7 – Временная зависимость мощности разряда-заряда суперконденсатора емкостью 96 Вт·ч

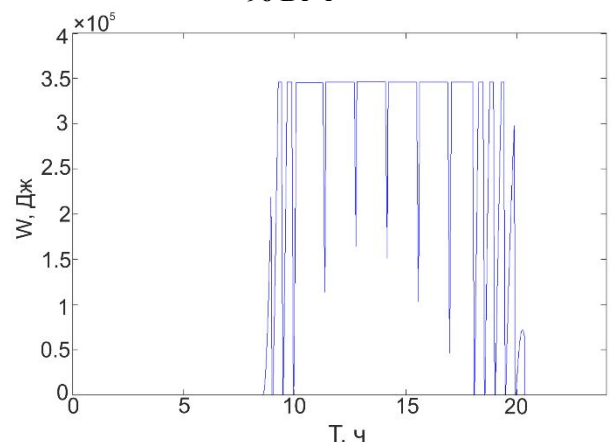


Рисунок 8 – Временная зависимость энергии суперконденсатора емкостью 96 Вт·ч

Прогнозируя срок службы, предположим, что временные мощные нагрузки и затенение вследствие облачности приводят примерно к 30 циклам неглубокого разряда в течение суток. Ресурс используемых гелевых аккумуляторов составляет порядка 30000 циклов при 2-5 %-м разряде [7]. Таким образом, только за счет кратковременных нагрузок и затенения ресурс батареи будет выработан в течение (365 дней $\times$ 30 коротких циклов) 2,7 лет эксплуатации. При использовании «энергетического буфера» на основе суперконденсаторов ресурс за счет коротких циклов будет выработан в течение (365 дней $\times$ 6 коротких циклов) 13,6 лет эксплуатации, что превышает гарантированный срок службы, обусловленный временной деградацией аккумуляторов. Таким образом, представленные расчеты показывают, что применение суперконденсаторов в автономных солнечных энергетических системах позволит существенно повысить срок использования аккумуляторной батареи.

Оценочная стоимость батареи емкостью 96 Вт·ч на основе суперконденсаторов DH5U308W60138TH фирмы SAMWHA составляет 2000 \$, что практически идентично стоимости аккумуляторной батареи из гелевых аккумуляторов GX12-200, 200 А·ч, GEL производства фирмы Delta емкостью 9600 Вт·ч – 1800 \$.

Заключение. В ходе работы разработаны структура, математическая модель. С использованием модели выполнен расчет автономных солнечных энергетических систем с применением гибридных накопителей электроэнергии на основе суперконденсаторов.

Показано, что использование гибридных накопителей на основе суперконденсаторов позволит существенно снизить нагрузку на аккумуляторную батарею и увеличить срок её службы за счет выполнения суперконденсатором функции энергетического буфера, при котором нако-

пленная энергия используется для обеспечения питания кратковременных высокомоощных потребителей. Так, для условий выполненных расчетов (без затенения) снижение числа циклов заряда-разряда аккумуляторной батареи составляет более чем 57 %. Кроме того, использование суперконденсаторов способствует увеличению максимальной пиковой мощности и устранению негативного влияния временного затенения, обусловленного облачностью.

Разработанная математическая модель может быть использована для расчета оптимальных параметров работы автономных солнечных энергетических систем с применением гибридных накопителей электроэнергии.

Библиографический список

1. Karabanov S.M., Suvorov D.V., Kukhmistrov Y.V., Slivkin E.V. The Study of PV Modules with Electric Double Layer Capacitors Integrated in Their Structure // Proceedings of 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. 30.09.2013. 03.10.2013. P. 511 – 516.
2. Карабанов, С.М., Кухмистров, Ю.В., Пономарев Д.И. Ионисторы на основе апротонных растворителей, эквивалентная схема и режимы работы // Электронная промышленность, 1994. С. 32-34.
- 3 A.B. Cultura, Z.M. Salameh. Modeling, Evaluation and Simulation of a Supercapacitor Module for Energy Storage Application // Proceeding of CISIA 2015. June 28-29, 2015, Bangkok, Thailand.
4. Pierre-Olivier Logerais, Olivier Riou, Mohamed Ansoumane Camara, Jean-Felix Durastanti. Study of Photovoltaic Energy Storage by Supercapacitors through Both Experimental and Modelling Approaches // Journal of Solar Energy. Volume 2013, Article ID 659014.
5. Пат. 2139587 RU, МКИ H01G 9/00. Способ изготовления конденсатора с двойным электрическим слоем / Карабанов С.М., Кухмистров Ю.В.
6. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Second Edition, 2011. John Wiley & Sons, Ltd.
7. <http://www.mpoweruk.com/life.htm>