

УДК 621.316

**СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ДЛЯ НАЗЕМНОЙ СПУТНИКОВОЙ СТАНЦИИ\***

А. С. Сидоров, Н. Н. Горяшин

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Российская Федерация, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: sidorovalex83@gmail.com

*Рассмотрена разработка и моделирование системы электропитания (СЭП) автономной наземной спутниковой станции для дистанционного мониторинга параметров окружающей среды и состояния технических объектов. Предложена новая структура системы электропитания автономной наземной спутниковой станции, где первичным источником электроэнергии является солнечная батарея на основе кремниевых фотоэлектрических преобразователей, а накопительным источником электроэнергии – суперконденсаторы с повышенным ресурсом работы и крайне низкой зависимостью характеристик от параметров окружающей среды. Были выработаны требования к мощности солнечной батареи, энергии, запасаемой суперконденсаторами, их количеству исходя из средней мощности нагрузки, параметров окружающей среды, длительности темного и светлого времени суток. Была разработана модель СЭП в формате P-Spice. Проведено ее моделирование в пакете MicroCAP 7.1. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной СЭП.*

*Ключевые слова:* спутниковая станция, система электропитания, солнечная батарея, суперконденсатор.

**POWER SUPPLY SYSTEM FOR STANDALONE SATELLITE COMMUNICATION TERMINAL**

A. S. Sidorov, N. N. Goryashin

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31, Krasnoyarsky Rabochy Av., Krasnoyarsk, 660014, Russian Federation  
E-mail: sidorovalex83@gmail.com

*This paper covers developing and modeling of a power supply system of a standalone satellite communication terminal for remote monitoring of environmental conditions and manmade objects state. A new structure of a power supply system of a standalone satellite communication terminal where Si solar array is used as a primary power source and supercapacitors with high lifetime and low value thermal characteristics are used as a reservoir power source, is proposed. Expressions allowing calculating minimal solar array power, energy stored in supercapacitors, their quantity in dependence of average load power, environmental conditions, daytime and nighttime duration, are proposed. A P-SPICE model of the proposed power supply system was developed. This model was simulated in MicroCAP 7.1. The simulation results confirmed operability of the proposed power supply system.*

*Keywords:* satellite communication terminal, power supply system, solar array, supercapacitor.

В настоящее время одним из актуальных направлений в разработке сети наземных спутниковых станций являются автономные наземные спутниковые станции (АНСС), которые в труднодоступных и удаленных районах Земли, например с помощью многофункциональной системы персональной спутниковой связи и передачи данных с космических аппаратов (КА) на низких орбитах «Гонец-Д1М» [1], могут выполнять ряд значимых задач, таких как дистанционный мониторинг работы газопроводов, сбор метеорологических данных, контроль сейсмоактивности и т. д. Одной из важнейших подсистем в данных терминалах является система электропитания, которая должна обеспечивать непрерывную работу терминала в любое время суток при любых погодных условиях.

Общая структура СЭП АНСС представлена на рис. 1. Первичный источник энергии (ПИЭ) предназначен

для питания нагрузки и заряда накопительного источника энергии (НИЭ). НИЭ предназначен для питания нагрузки в то время, когда ПИЭ не вырабатывает энергию. ЭПУ предназначено для согласования уровней напряжения ПИЭ, НИЭ и нагрузки и осуществления заряда/разряда НИЭ. Схема управления (СУ) управляет потоками энергии между источниками и нагрузкой и собирает телеметрическую информацию.

Особенностью работы АНСС на территории России является широкий диапазон изменения параметров окружающей среды, таких как температура, плотность потока солнечного излучения, продолжительность дня, что требует надлежащего выбора первичного и вторичного источника электроэнергии и структуры системы электропитания, которая позволит наилучшим образом управлять и использовать доступную энергию.

\* Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 11.7189.2013, и Германской службы академических обменов (DAAD).

Из всех видов ПИЭ, таких как солнечные батареи (СБ), ветрогенераторы, погружные ГЭС и т. д., наиболее подходят к применению в СЭП АНСС солнечные батареи. В настоящее время в СБ для наземного применения в качестве фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) используются недорогие ФЭП на основе кремния с КПД около 15 %.

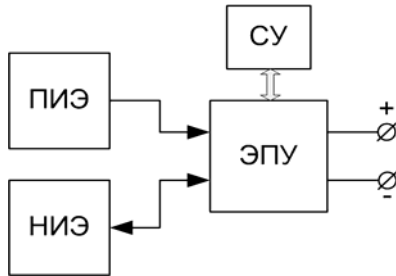


Рис. 1. Общая структура СЭП АНСС:  
 ПИЭ – первичный источник энергии;  
 НИЭ – накопительный источник энергии;  
 ЭПУ – энергопреобразующее устройство;  
 СУ – схема управления

Долгое время в качестве НИЭ использовались аккумуляторные батареи (АБ) разных типов: никель-кадмиевые АБ (NiCD), никель-метал-гидридные (NiMH), на основе лития (литий-ионные Li-Ion или литий-полимерные Li-Pol) и свинцовые АБ. Свинцовые и NiCD АБ обладают низкими удельными характеристиками. К тому же NiCD АБ обладают эффектом «памяти», что требует полного цикла «заряд–разряд». Li-Ion (Li-Pol) и NiMH обладают лучшими удельными характеристиками, причем Li-Ion (Li-Pol) более эффективны, чем NiMH и NiCD, так как имеют больший срок службы, меньший ток саморазряда и количество циклов заряда–разряда не зависит от глубины разряда. Однако у Li-Ion (Li-Pol) срок службы зависит от зарядного тока, данные АБ необходимо заряжать по определенному алгоритму. Также у всех АБ ограничен диапазон рабочих температур, что ограничивает их применение в климатических условиях России (при изменении температуры от –35 до +35 °С, например). Поэтому использование этих АБ нецелесообразно для АНСС при длительном сроке службы в суровых климатических условиях.

Перспективным НИЭ являются суперконденсаторы (СК), неоспоримыми достоинствами которых является то, что их емкость изменяется не более чем на 10 % при изменении температуры в диапазоне –40...+60 °С, в разы большие токи заряда/разряда, количество циклов/разряда больше 500 000. Недостатками являются худшие удельные характеристики, повышенный ток саморазряда при пассивном выравнивании между конденсаторами в составе конденсаторной сборки, более высокая стоимость. Однако исходя из условия надежной работы в суровых климатических условиях СК имеют преимущества перед АБ. Поэтому в данном проекте в качестве ПИЭ рассматриваются СБ на основе кремниевых ФЭП производства ОАО «НПП «Квант» [2], а в качестве НИЭ – суперконденсаторы производства компании Maxwell Technologies [3].

В течение последних нескольких лет наблюдается повышение интереса к АНСС. В ряде публикаций [4–7] предлагаются структуры СЭП АНСС. В качестве ПИЭ во всех решениях используется СБ. В качестве НИЭ используются АБ различных типов и(или) СК.

Самая простая структура СЭП АНСС представлена на рис. 2, а, где СБ подключается к АБ через блокирующий диод, а преобразователь напряжения стабилизирует напряжение выходной шины СЭП. Также вместо АБ можно использовать СК (рис. 2, б). Достоинствами данной структуры являются простота и низкая стоимость. Недостатками являются:

1. Заряд АБ (СК) может происходить тогда, когда напряжение на выходе СБ больше напряжения на АБ (СК) плюс падение напряжения на блокирующем диоде.
2. Ток заряда будет уменьшаться по мере заряда АБ (СК), что снижает скорость заряда НИЭ.
3. Система работает не в оптимальном режиме, т. е. невозможно извлечь из СБ всю доступную мощность.

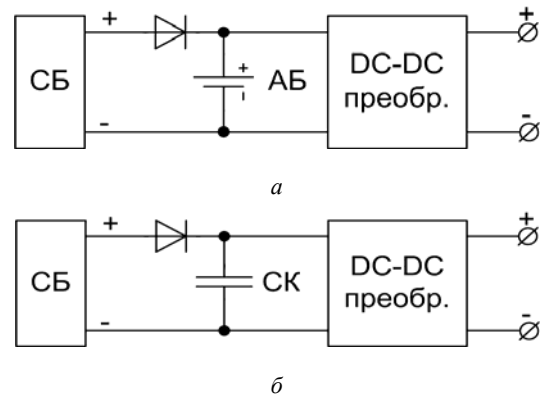


Рис 2. Структуры СЭП АНСС:  
 DC-DC преобр. – импульсный преобразователь напряжения

В [4–6] для повышения эффективности вместо диода используется еще один DC-DC-преобразователь напряжения с экстремальным регулированием мощности СБ (на основе инвертирующего преобразователя), что, с одной стороны, усложняет систему, с другой – повышает ее эффективность, так как от СБ всегда забирается максимальная мощность (рис. 3). Однако возникает проблема с контролем заряда АБ (СК). При изменении параметров ВАХ СБ и длительности дневного времени суток, напряжение на АБ и СК не должно превышать максимально допустимого. Так как DC-DC-преобразователь с экстремальным отбором мощности питает еще преобразователь для нагрузки, то необходимо отключение АБ и СК от выходной шины преобразователя DC-DC экстрем. При этом при последующем подключении СК к шине могут происходить броски тока вследствие заряда емкостей DC-DC-преобразователя и нагрузки, что может привести к выходу из строя ключей и снижает срок службы АБ (СК). Поэтому данная структура имеет ограничение при работе при изменяющихся параметрах окружающей среды.

В [7] для повышения надежности и живучести предлагается структура, в которой используется два накопителя энергии – АБ и СК (рис. 4). Однако в суровых климатических условиях использование АБ становится крайне неэффективным.

Таким образом, имеющиеся структуры СЭП не подходят для использования в АНСС в климатических условиях России. На рис. 5 представлена новая структура СЭП. Отличием новой структуры СЭП от имеющихся является то, что питание нагрузки (Н) и заряд/разряд СК осуществляют разные преобразователи. При этом управление состоянием СК осуществляется за счет непосредственного управления сигналом ШИМ преобразователей. Номинальное выходное напряжение СЭП +12 В (напряжения питания терминалов системы «Гонец-Д1М» [1]), максимальное напряжение СК – +16 В (суперконденсатор VMOD0500 V01 емкостью 500 Ф, запасаемой энергией 17,8 Вт·ч, током саморазряда 5,2 мА [3]).

Преобр. СБ-Н предназначен для питания нагрузки стабильным напряжением +12 В от солнечной батареи. Строится данный преобразователь на основе преобразователя понижающего типа.

Преобразователь СБ-СК является зарядным устройством, работающим по алгоритму максимального отбора мощности от СБ (шаговая экстремальная система). С учетом того, что часть мощности СБ забирает преобразователь СБ-Н, преобразователь СБ-СК забирает разницу между максимальной мощностью СБ и мощностью, потребляемой преобразователем СБ-Н. Строится данный преобразователь на основе полумостового преобразователя, где СК является частью выходного фильтра.

Преобразователь СК-Н предназначен для питания нагрузки от СК при отсутствии энергии от СБ. Строится данный преобразователь на основе инвертирующего преобразователя, так как по мере разряда СК его напряжение уменьшается. Граничным коэффициентом заполнения инвертирующего преобразователя, при котором сохраняется приемлемый КПД, является 0,75 [8], поэтому при выходном напряжении 12 В, СК

должен разряжаться до остаточного напряжения  $U_{ост} = 4$  В. Также данное остаточное напряжение необходимо для работы системы управления СЭП.

Преобразователи СБ-Н и СК-Н имеют общую обратную связь, но разные опорные напряжения. Преобразователь СБ-Н стабилизирует напряжение 12,2 В, а преобразователь СК-Н – 11,8 В. Таким образом, между двумя преобразователями происходит автоматическое переключение при появлении энергии от солнца и при наступлении темного времени суток.

Алгоритм работы системы электропитания следующий:

1. На первом этапе, когда СК разряжен и от СБ энергия не поступает, СЭП находится в выключенном состоянии. Система управления СЭП также не работает, и выход СЭП отключен.

2. При появлении энергии от солнечной батареи включается система управления СЭП и происходит запуск преобразователя СБ-СК, отвечающего за заряд СК. Преобразователи СБ-Н и СК-Н находятся в выключенном состоянии. Происходит заряд СК до его максимального напряжения.

3. При достижении напряжения на СК максимального значения система управления СЭП отключает преобразователь СБ-СК. При наличии энергии от СБ система управления СЭП сначала включает преобразователь СБ-Н, а затем преобразователь СК-Н. При отсутствии энергии от СБ система управления СЭП сначала включает преобразователь СК-Н, а затем преобразователь СБ-Н. После этого подключается к выходу СЭП полезная нагрузка.

4. При снижении напряжения на конденсаторе на величину напряжения саморазряда за сутки и наличии энергии от СБ, включается преобразователь СБ-СК, при этом преобразователь СК-Н при появлении энергии от солнца не потребляет никакой энергии от СК.

5. При снижении напряжения на СК до некоторого остаточного напряжения  $U_{ост}$  система управления СЭП отключает нагрузку от выхода СЭП.

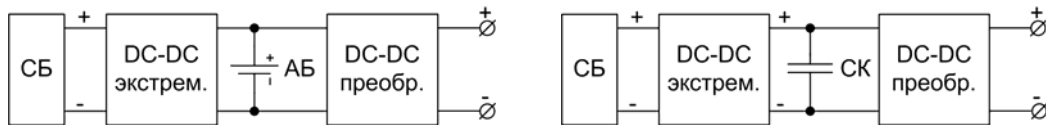


Рис. 3. Структуры СЭП АНСС: DC-DC экстрем. – импульсный преобразователь напряжения с экстремальным регулированием мощности СБ; DC-DC преобр. – импульсный преобразователь напряжения

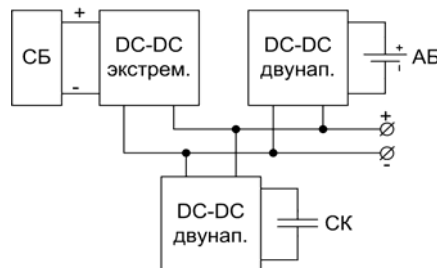


Рис. 4. Структура СЭП АНСС: DC-DC экстрем. – импульсный преобразователь напряжения с экстремальным регулированием мощности СБ; DC-DC двунап. – двунаправленный импульсный преобразователь напряжения

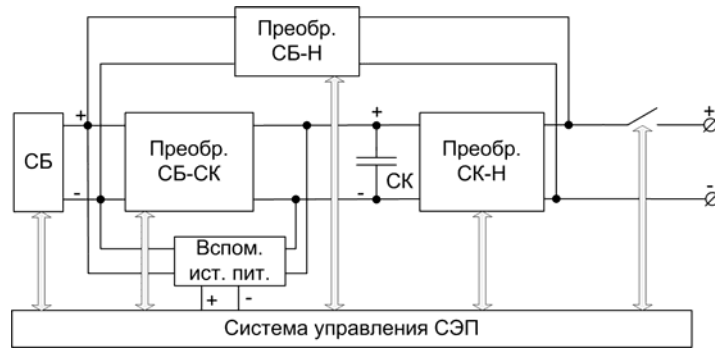


Рис. 5. Новая структура СПЭП:  
СБ – солнечная батарея; СК – суперконденсатор; Н – нагрузка

Для бесперебойной работы СПЭП АНСС необходим правильный расчет мощности СБ  $P_{СБ}$  и энергии, запасаемой СК,  $W_{СК}$ . Определение требований к СБ и СК производится на основе решения уравнения энергобаланса, т. е. равенства мощности, поступающей от СБ, и потребляемой нагрузкой и СК. Естественно, что расчет  $P_{СБ}$  и  $W_{СК}$  происходит для того дня в году, когда длительность темного времени суток имеет наибольшее значение.

В темное время суток, когда  $P_{СБ} = 0$ , нагрузка работает за счет энергии, отдаваемой СК. Необходимую энергию суперконденсатора можно определить из следующего выражения

$$W_{СК} = \frac{P_{Н}}{n_{ру}} \tau_{Н}, \quad (1)$$

где  $P_{Н}$  – средняя мощность нагрузки за один час, Вт;  $n_{ру}$  – КПД разрядного устройства (преобразователя СК-Н);  $\tau_{Н}$  – длительность темного времени суток, ч,  $W_{СК}$  – энергия СК, Вт·ч.

Для определения количества параллельно включенных СК необходимо учесть следующие параметры:

- 1) ток саморазряда одного СК;
- 2) уменьшение емкости при изменении температуры (наихудший случай) – коэффициент  $n_{кт}$ ;
- 3) уменьшение емкости за счет старения – коэффициент  $n_{ст}$ ;
- 4) остаточное напряжение  $U_{ост} = 4$  В.

За время  $\tau_{Н}$  при разряде током саморазряда  $i_{ср}$  напряжение на суперконденсаторе уменьшится на величину  $\Delta u_{СК}$ , которую можно определить из следующего выражения

$$\Delta u_{СК} = \frac{3600 \tau_{Н} i_{ср}}{C_{СК}},$$

где  $C_{СК}$  – емкость СК, выраженная в Ф.

При этом уменьшение энергии СК  $\Delta W_{СК}$ , выраженной в Вт·ч, можно рассчитать по выражению

$$\Delta W_{СК} = \frac{C_{СК} \Delta u_{СК}^2}{7200}.$$

При остаточном напряжении  $U_{ост} = 4$  В остаточную энергию СК  $W_{ост}$  можно рассчитать по следующему выражению:

$$W_{ост} = 2,22 \cdot 10^{-3} C_{СК}.$$

Таким образом, зная энергию одного суперконденсатора  $W_{СК1}$ , коэффициенты  $n_{кт}$  и  $n_{ст}$ , потери энергии на саморазряд  $\Delta W_{СК}$ , остаточную энергию  $W_{ост}$ , необходимую энергию параллельно включенных суперконденсаторов  $W_{СК}$ , можно рассчитать количество параллельно включенных СК

$$n = \frac{W_{СК}}{n_{СК1} n_{ст} W_{СК1} - \Delta W_{СК} - W_{ост}}.$$

В светлое время суток, когда  $P_{СБ} > 0$ , энергия, вырабатываемая СБ, поступает в нагрузку и на заряд СК. Так как в предложенной СПЭП при заряде СК происходит максимальный отбор мощности от СБ, то величина  $P_{СБ}$  будет характеризовать максимальную мощность СБ. Определить данную мощность можно из следующего выражения

$$P_{СБ} = \frac{W_{СК} + P_{Н}}{n_{зу} \tau_{д}}, \quad (2)$$

где  $P_{Н}$  – средняя мощность нагрузки, Вт;  $n_{зу}$  – КПД зарядного устройства (преобразователя СБ-СК);  $n_{сн}$  – КПД преобразователя СБ-Н;  $\tau_{д} = 24 - \tau_{Н}$  – длительность светлого времени суток, ч;  $W_{СК}$  – энергия СК, Вт·ч, рассчитанная по (1).

Полученное значение мощности СБ является минимально возможным. Для точного расчета площади СБ необходимо учитывать ряд факторов окружающей среды места установки АНСС, таких как диапазон изменения температуры окружающей среды; дневные, месячные и годовые нормы суммарной солнечной радиации; угол наклона панели СБ. Также необходимо учитывать то, что для правильной работы СПЭП оптимальное напряжение СБ не должно быть меньше 14 В. Примеры расчета СБ для наземного применения приведены в [9].

Например, при  $P_{Н} = 12$  Вт,  $\tau_{Н} = 16$  ч, КПД всех преобразователей 90 % получим, что необходимо 19 СК типа ВМ0D0500 В01, а мощность СБ должна быть не меньше 47 Вт.

Для подтверждения работоспособности предложенной СПЭП была разработана имитационная модель в формате Р-Spice в пакете моделирования MicroCAP 7.1. В качестве примера средняя мощность нагрузки была выбрана 12 Вт, в качестве СБ была взята СБ КСМ-90 производства ОАО «НПП «Квант» [2].

В целях упрощения процесса моделирования модель СЭП разбита на две модели:

- модель системы в режиме заряда СК и при питании нагрузки от СБ;
- модель системы в режиме разряда СК и при питании нагрузки от СБ.

На рис. 6 представлены результаты моделирования при работе системы в режиме питания нагрузки и заряда СК от СБ. В процессе моделирования были получены следующие результаты:

1. Среднее напряжение на СБ составляет 18,68 В при оптимальном напряжении (напряжении в точке максимальной мощности) 17,92 В, размах поискового сигнала составляет 0,2 В. Средний ток СБ составляет 5,13 А при оптимальном токе 5,38 А, размах поискового сигнала составляет 0,12 А. Таким образом, из-за наличия статической ошибки система работает в окрестности точки максимальной мощности (абсолютная разница между мощностями составляет 6 Вт).

2. Напряжение на нагрузке составляет 11,9 В, размах пульсаций 20 мВ.

3. Происходит заряд СК до необходимого напряжения 16 В.

4. Таким образом, в режиме заряда СК и при питании нагрузки от СБ предложенная СЭП отвечает предъявляемым требованиям.

На рис. 7 представлены результаты моделирования при работе системы в режиме разряда СК и при питании нагрузки от СБ. При входе СБ в тень или наступлении ночного времени суток напряжение на выходе СЭП имеет просадку до 9,2 В относительно номинального напряжения 12 В, при выходе из тени или наступлении светлого времени суток напряжение на выходе СЭП имеет выброс до 14 В относительно номинального напряжения 12 В. Длительность отклонения напряжения составляет около 30 мс. Размах пульсаций составляет 500 мВ. Следует отметить, что главной задачей моделирования являлось подтверждение работоспособности предложенной СЭП, а не обеспечение наилучших показателей качества. Задача улучшения показателей качества переходного процесса должна решаться на этапе разработки опытного образца за счет, например, использования двухконтурного управления (обратная связь по среднему току дросселя) и т. д.

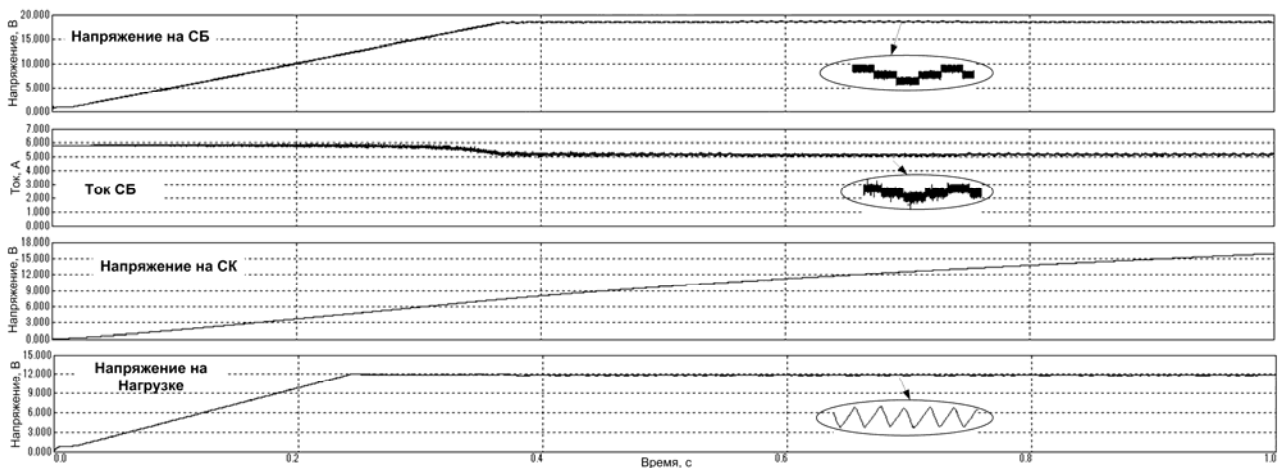


Рис. 6. Переходные процессы в СЭП при питании нагрузки и заряде СК от СБ

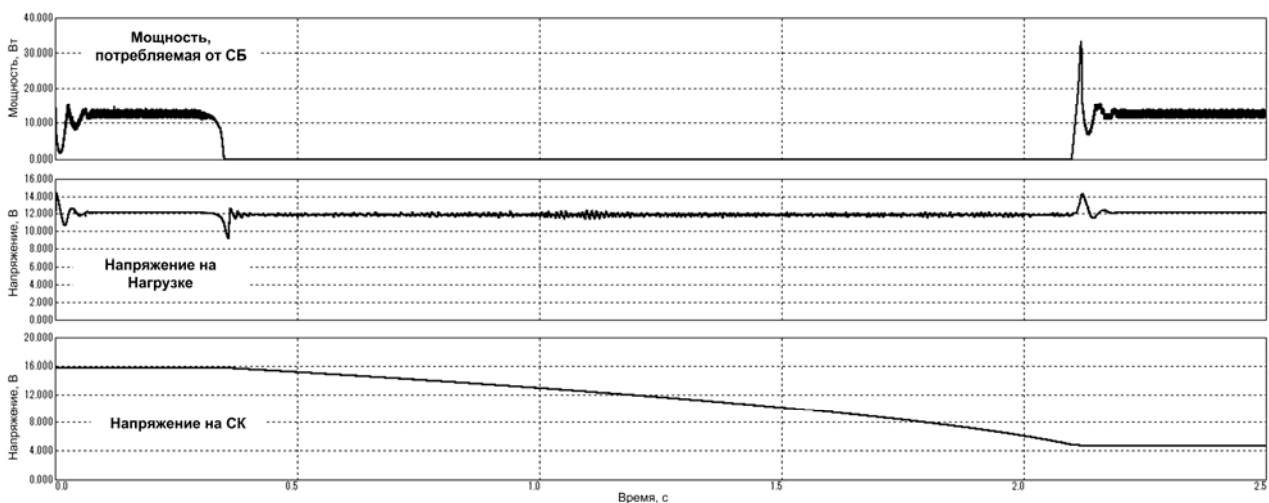


Рис. 7. Переходные процессы в СЭП в режиме разряда СК и при питании нагрузки от СБ

Таким образом, в данной работе была предложена новая структура СЭП без использования аккумуляторных батарей, где накопительным источником электроэнергии являются суперконденсаторы с повышенным ресурсом работы. Выработаны требования к мощности солнечной батареи, энергии, запасаемой суперконденсаторами, и их количеству, исходя из средней мощности нагрузки, параметров окружающей среды, длительности темного и светлого времени суток. Была разработана модель СЭП в формате P-Spice. Проведено ее моделирование в пакете MicroCAP 7.1. Результаты моделирования подтвердили работоспособность предложенной СЭП.

#### Библиографические ссылки

1. Спутниковая система «Гонец» [Электронный ресурс]. URL: <http://gonets.ru/>, свободный (дата обращения: 16.09.2013).
2. ОАО «НПП «Квант» : офиц. сайт. URL: <http://www.npp-kvant.ru/>, свободный (дата обращения: 16.09.2013).
3. Maxwell Technologies : офиц. сайт. URL: <http://maxwell.com>, свободный (дата обращения: 16.09.2013).
4. Liu K., Kakaran J. Design of a solar powered battery charger // *Proceedings of IEEE Electron Power Energy Conference*, 2009. P. 1–5.
5. Raghunathan V., Kasal A., Hsu J., Friedman J., Srivastava M. Design consideration for solar energy harvesting wireless embedded system // *Proceedings of IEEE International Conference Information Process Sensor Networks*, 2005. P. 457–462.
6. Brunelli D., Moser C., Thiele L., Benini L. Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems // *IEEE Transactions on Circuits Systems*. 2009. Vol. 56, no. 11. P. 2519–2528.
7. Ongaro F., Saggini S., Mattavelli P. Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2012. Vol. 27, no. 9. P. 3944–3951.
8. Дьяконов В. П., Максимчук А. А., Ремнев А. М., Смердов В. Ю. Энциклопедия устройств на полевых транзисторах. М. : Солон-Р, 2002. 512 с.
9. Солнечная энергетика : пособие для вузов / под ред. В. И. Виссарионова. М. : Изд. дом МЭИ, 2008. 317 с.

#### References

1. *Sputnikovaya sistema Gonets* [Gonets LEOSat System]. Available at: <http://gonets.ru/> (accessed 16 September 2013).
2. ОАО «NPP «Kvant» [JSC «NPP «KVANT»]. Available at: <http://www.npp-kvant.ru/> (accessed 16 September 2013).
3. Maxwell Technologies. Available at: <http://maxwell.com> (accessed 16 September 2013).
4. Liu K., Kakaran J. “Design of a solar powered battery charger”, *Proceedings of IEEE Electron Power Energy Conference*, 2009, p. 1–5.
5. Raghunathan V., Kasal A., Hsu J., Friedman J., Srivastava M. “Design consideration for solar energy harvesting wireless embedded system”, *Proceedings of IEEE International Conference Information Process Sensor Networks*, 2005, p. 457–462.
6. Brunelli D., Moser C., Thiele L., Benini L. “Design of a solar-harvesting circuit for batteryless embedded systems”, *IEEE Transactions on Circuits Systems*, 2009, vol. 56, no. 11, p. 2519–2528.
7. Ongaro F., Saggini S., Mattavelli P. “Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012. Vol. 27, No. 9. PP. 3944-3951.
8. D'yakonov V. P., Maksimchuk A. A., Remnev A. M., Smerdov V. Yu. *Entsiklopediya ustroystv na polevykh tranzistorakh* (Encyclopedia devices FET). Moscow, SOLON-R, 2002, 512 p.
9. *Solnechnaya energetika. Posobie dlya vuzov* (Solar Energy: A Guide for Universities), under. Ed. VI Vissarionova. Moscow, Izdatel'skiy dom MEI, 2008, 317 p.

© Сидоров А. С., Горяшин Н. Н., 2013