

УДК 621.311

А.С. Романенко, В.Д. Семенов

Модель автономной системы электроснабжения с секционированной солнечной батареей в пакете MatLab

Представлена имитационная модель автономной системы электроснабжения с секционированной солнечной батареей, реализованная в программном пакете MatLab. Модель позволяет устанавливать энергетические параметры аккумуляторов, солнечной батареи, орбиты, циклограммы нагрузки, логический алгоритм работы системы управления и исследовать поведение системы электроснабжения в основном и аварийном режимах работы.

Ключевые слова: система электроснабжения, модель солнечной батареи, модель аккумулятора.

Европейское космическое агентство широко применяет в системах электроснабжения (СЭС) космических аппаратов S3R-структуру, позволяющую уменьшить массу комплекса управления системой электроснабжения (КУСЭС) и энергетические потери в канале «солнечная батарея – нагрузка» [1]. Регулирование мощности солнечной батареи (СБ) осуществляется по принципу коммутации её секций на общую шину аккумуляторной батареи (АБ) и нагрузки. Но в S3R-структуре подключение любой секции СБ к резервной АБ невозможно, что сказывается на живучести СЭС. В НПЦ «Полнос» широко используется структура СЭС с экстремальным регулятором. Однако для малых космических аппаратов (массой 100–500 кг) этот подход в силу ряда причин может оказаться неуместным [2]. Вместе с тем известна структура СЭС [3], позволяющая обойтись без использования импульсных преобразователей в основном энергетическом канале. Концепция её топологии предусматривает применение нескольких АБ, нескольких секций СБ и возможность работы всей системы при отказе одного из элементов.

Данная СЭС (рис. 1) включает в себя две никель-металл-гидридных АБ – АБ1 и АБ2, 16 секций СБ и КУСЭС. Последний, в свою очередь, имеет резервированные ключи солнечной батареи К1–К32, ключи коммутации нагрузки ККН1 и ККН2, резервированную микроконтроллерную систему управления (СУ), модуль управления ключами солнечных батарей МУКСБ, устройство управления ККН–УУККН, датчики токов секций СБ и токов АБ, напряжений АБ, блок-измеритель БИ и резервированный источник питания РИП, содержащий преобразователи напряжения и схему включения аварийного режима. СУ имеет информационную шину обмена с бортовым комплексом управления БКУ.

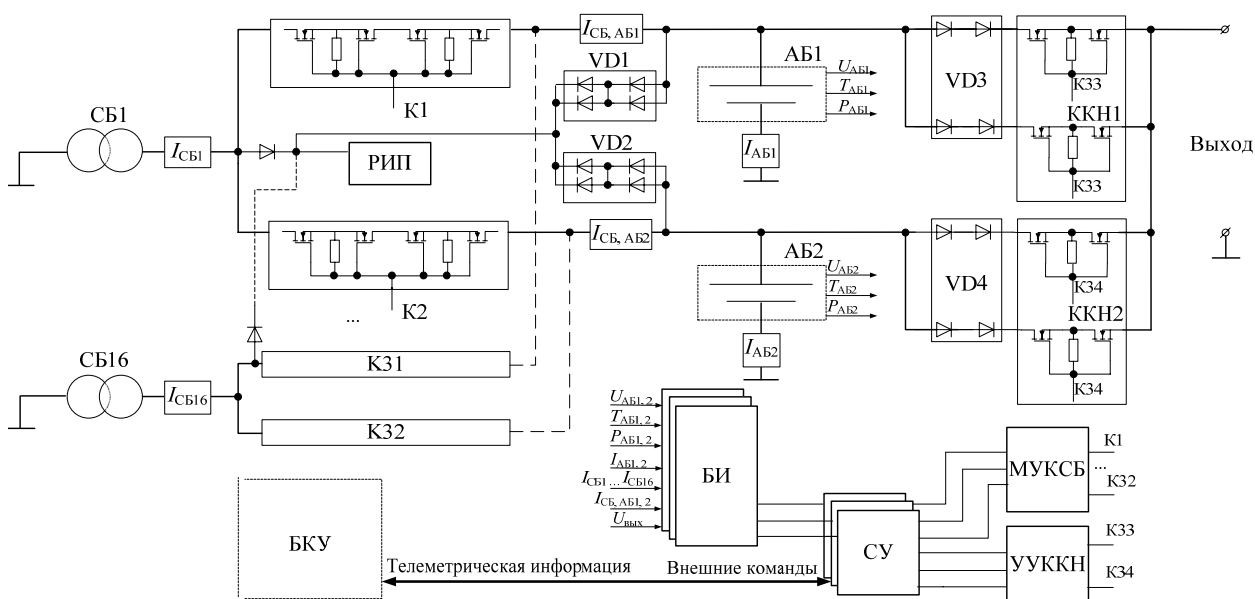


Рис. 1. Структура системы электроснабжения с секционированной СБ

СУ осуществляет управление силовыми ключами с помощью оптронных драйверов, расположенных в МУКСБ и УУККН. Коммутация ключей К1–К32 осуществляется таким образом, что каждая секция СБ может быть одновременно подключена только на АБ1 или на АБ2. В свою очередь ККН1 и ККН2 коммутируют шины АБ1 и АБ2 на выходную шину так, что в нормальном режиме одна из АБ обязательно подключена к нагрузке, а в аварийном режиме обе отключены. Сигнал аварийного режима формируется при снижении напряжения АБ до минимального значения и поступает в СУ, которая до момента снятия аварийного сигнала изменяет алгоритм управления ключами К1–К32. РИП подключен ко всем секциям СБ, обеим АБ и через развязывающие диоды запитывает узлы КУСЭС.

В нормальном режиме работы принцип действия СЭС основан на поддержании достаточного уровня мощности на шинах аккумуляторов путем коммутации секций СБ. Управление ключами организовано по принципу подчиненного регулирования напряжения АБ, структурная схема которого представлена на рис. 2.

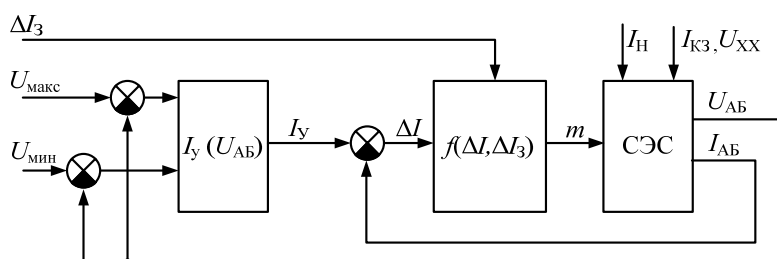


Рис. 2. Структурная схема подчиненного регулирования напряжения АБ

Главный контур – регулирование напряжения на АБ. Исходя из уровня напряжения АБ регулятор $I_y(U_{AB})$ вырабатывает сигнал I_y , который является током-задатчиком для подчиненного контура регулирования. Регулятор $I_y(U_{AB})$ стремится поддерживать напряжение АБ в диапазоне заданных значений $U_{мин} < U_{AB} < U_{макс}$. Когда U_{AB} достигает максимального значения $U_{макс}$, сигнал I_y устанавливается в нуль. Такой режим работы назван «Поддержание заряда в АБ» (рис. 3, б). При снижении U_{AB} до значения $U_{мин}$ сигнал I_y устанавливается в значение, количественно равно максимально допустимому зарядному току АБ. Этот режим работы назван «Заряд АБ».

В процессе работы СЭС возмущения в виде тока нагрузки I_H или параметров вольт-амперной характеристики (ВАХ) СБ ($I_{КЗ}$, $U_{ХХ}$) приводят к изменению тока АБ на величину ΔI относительно тока уставки I_y . Регулятор тока стремится подавить это отклонение так, чтобы оно не превышало максимально допустимой величины ΔI_3 (рис. 3, а) и выдает соответствующий сигнал m на коммутацию ключей К1–К32.

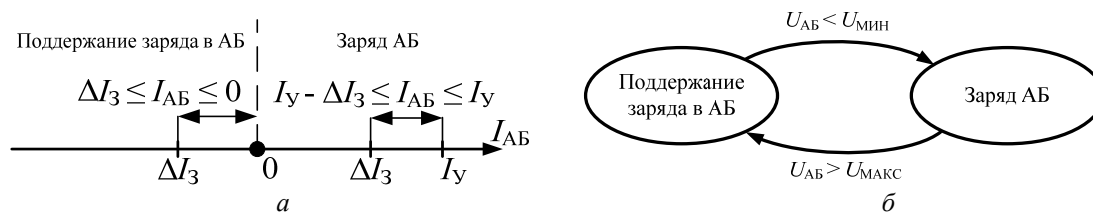


Рис. 3. Принцип работы контуров регулирования параметров СЭС:
а – регулирование тока АБ; б – регулирование напряжения АБ

Такая структура в НПЦ «Полус» ещё не использовалась, поэтому требуется провести ее исследование с помощью имитационной модели, в которой должны изменяться количество ключей СБ, параметры ВАХ секций СБ, циклограмма освещенности и нагрузки, физические параметры аккумуляторов, алгоритм работы микроконтроллерной СУ.

Структура такой модели представлена на рис. 4 и состоит из блока-задатчика параметров орбиты (БЗПО), имитирующего угол освещения солнечной батареи в процессе функционирования СЭС на орбите, блока-задатчика параметров СБ (БЗПСБ), имитирующего ВАХ секции СБ в соответствии с сигналом БЗПО; КУСЭС, имитирующего работу ключей солнечной батареи (КСБ), работу СЭС в нормальном и аварийном режимах (R) и работу системы управления (СУ). В структуре имеются две (в общем случае может быть больше) аккумуляторных батареи АБ1, АБ2, которые образуют общую

шину с нагрузкой R_n , изменяющейся во времени по заданной циклограмме. Система управления имитационной моделью (СУ ИМ СЭС) предназначена для задания параметров названных блоков, монитор – для визуализации контролируемых параметров моделируемых процессов.

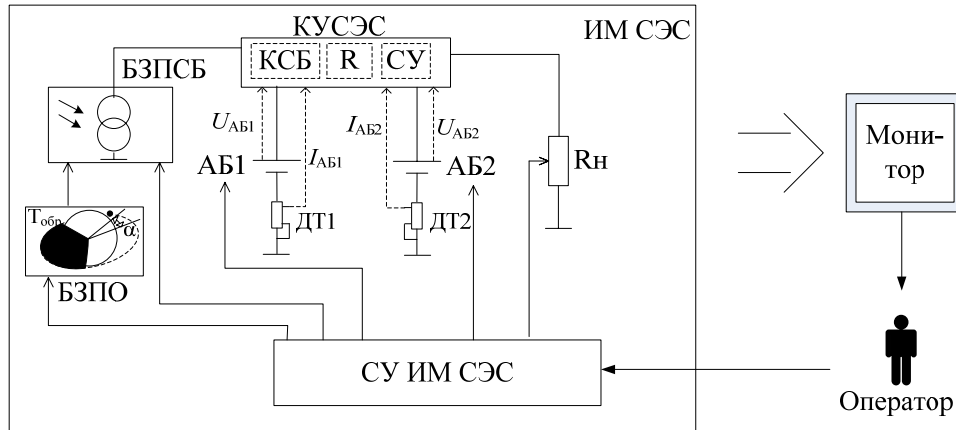


Рис. 4. Структура модели СЭС

Чтобы модель позволяла гибко управлять количеством ключей СБ, предложена схема замещения СЭС (рис. 5), в которой регулируемый источник первичной энергии (РИПЭ) для шин АБ1, АБ2 замещен управляемыми СБ (УСБ1, УСБ2), которые имитируют ступенчатое увеличение или уменьшение токовой составляющей ВАХ одной секции СБ – $i_{СБn}K(t)$ или $i_{СБm}K(t)$ в соответствии с сигналами СУ (m и n) и $K(t)$ – сигналом коэффициента освещенности БЗПО. Таким образом, задавая максимальные значения n и m и предварительно настраивая ВАХ одной секции СБ при полной освещенности, получаем математическое описание модели регулируемого источника первичной энергии (РИПЭ), которое возможно реализовать в пакете MatLab.

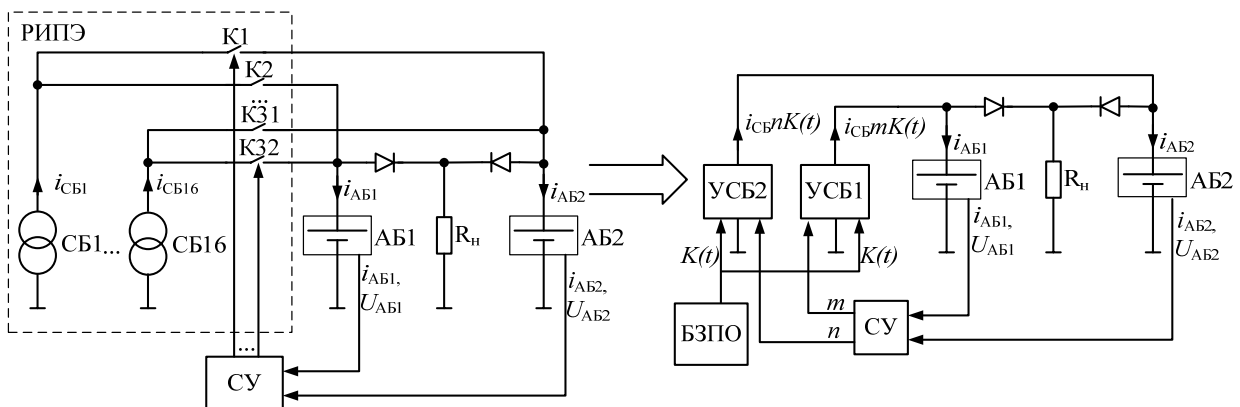


Рис. 5. Схема замещения структуры СЭС

Имитационная модель СЭС, представленная на рис. 6, реализована в программе SimPowerSystems пакета MatLab. УСБ1, УСБ2 в соответствии со схемой замещения представлены здесь как USB1, USB2, которые электрически представляют собой управляемые источники тока с обратной связью по напряжению и имитируют общую ВАХ секций СБ, подключенных к АБ. Функциональная связь тока и напряжения описана на языке С в блоке программы Simulink. Модель задана эмпирической формулой [4] и настраивается по точкам $I_{кз}$, $I_{опт}$, $U_{хх}$, $U_{опт}$ (токи короткого замыкания и экстремальной мощности, напряжения холостого хода и экстремальной мощности). В процессе моделирования USB1, USB2 имитируют электрические параметры СБ на орбите в соответствии с задающими сигналами $K(t)$, m , n .

Модели аккумуляторов АБ1 и АБ2 взяты из программы SimPowerSystems, адаптированы к модели и позволяют с достаточной точностью настраивать зарядную и разрядную характеристики АБ.

Модель R4_Block имитирует схему включения аварийного режима и реализована из блоков программы Simulink. При моделировании отслеживается напряжение на АБ и в случае достижения на любой из них минимально допустимого уровня вырабатывается сигнал R4Out для отключения

нагрузки и перехода в аварийный режим работы СУ (Control system). При достижении максимально допустимого уровня сигнал снимается и возобновляется штатный режим работы.

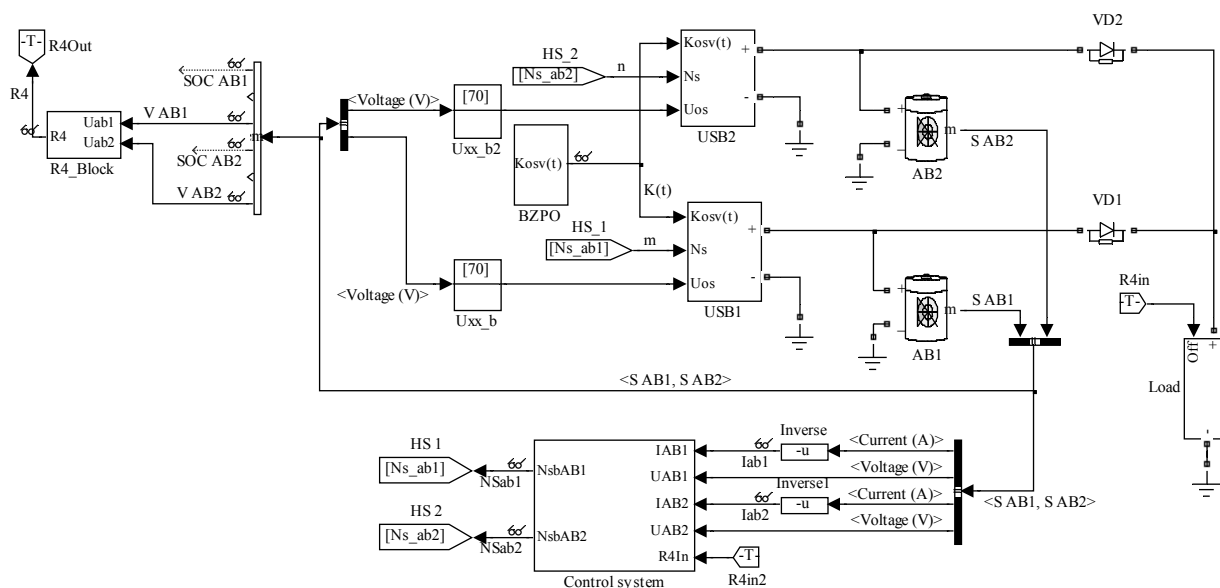


Рис. 6. Имитационная модель СЭС в программном пакете MatLab

Модель циклограммы нагрузки Load состоит из блоков программы Simulink и PowerSystems и представляет собой зависимый источник тока, реализующий функцию $I(t) = R4OutP(t)/U(t)$. Функция мощности $P(t)$ задана в виде прямоугольных импульсов, а напряжение $U(t)$ поступает с датчика напряжения выходной шины. Сигнал коэффициента R4Out поступает с модели R4_Block и в штатном режиме равен 1, а в аварийном режиме равен 0, что позволяет имитировать работу ККН как в штатной, так и в аварийной ситуациях.

Модель коэффициента освещенности VZPO реализована из блоков программы Simulink и отражает изменение угла наклона плоскости СБ к лучу солнечного освещения и нахождение космического аппарата в тени Земли по разрывной функции $K(t)$:

$$K(t) = |\sin(\omega t)| \cdot [A(\omega t) + B(\omega t)],$$

где $A(\omega t)$ и $B(\omega t)$ – единичные разрывные функции, которые равны нулю при отсутствии освещенности СБ.

Выходной сигнал $K(t)$ модели VZPO представлен на рис. 7.

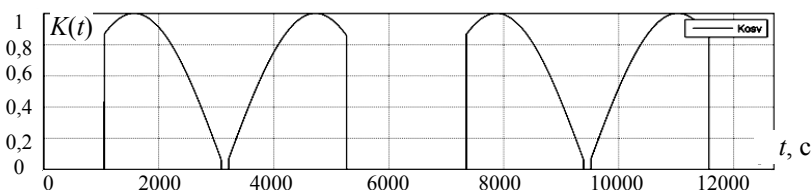


Рис. 7. Осциллограмма модели циклограммы освещенности секции СБ на орбите

Модель СУ Controlsystem содержит блоки программы Simulink, которые имитируют мажоритарные элементы, и модели резервированных микроконтроллеров (ММК), которые выполнены в программе Stateflow. Модели МК построены по принципу разделения алгоритма работы на логические блоки и представления их работы на языке UML [5, 6].

Структурно ММК разделена на две группы программных блоков (ПБ), которые представлены на рис. 8, а. В один моделируемый такт поочередно вызываются все ПБ, т.е. работают параллельно друг с другом и каждый из них составляет различные режимы работы основного алгоритма, называемые состояниями. Между состояниями происходят переходы в ответ на инициирующие условия. В результате переходов производятся необходимые операции, а также могут выдаваться сигналы для других ПБ, которые принято называть событиями.

ПБ управления АБ (на рис. 8, а блоки УАБ1, УАБ2) идентичны друг другу и имитируют работу контуров регулирования токов и напряжений АБ. В моменты переходов между их состояниями в

каждый моделируемый такт времени формируются события на подключение или отключение секций СБ ($m \pm 1, n \pm 1$) для ПБ управления УСБ (УУСБ1, УУСБ2 на рис. 8, а). На рис. 8, б для примера приведено состояние УУСБ1, реализованное в программе Stateflow. УУСБ1 в соответствии с событием $m \pm 1$ производит «холостые» переходы между одним состоянием Out, выполняя при этом вызов одной из функций на поочередное подключение секции (событие ON), отключение секции (событие OFF) или подключение секций в аварийном режиме работы (событие R4). Вызываемые функции логической обработки AddBS, SubBS и KeyR4 описаны на языке MatLab и в свою очередь формируют вектор $[m]$, обозначающий количество секций СБ, подключенных к АБ1. Представление данных в виде вектора $[m]$ позволяет корректно имитировать работу мажоритарных элементов, сравнивающих значения параллельно работающих микроконтроллеров резервированной СУ.

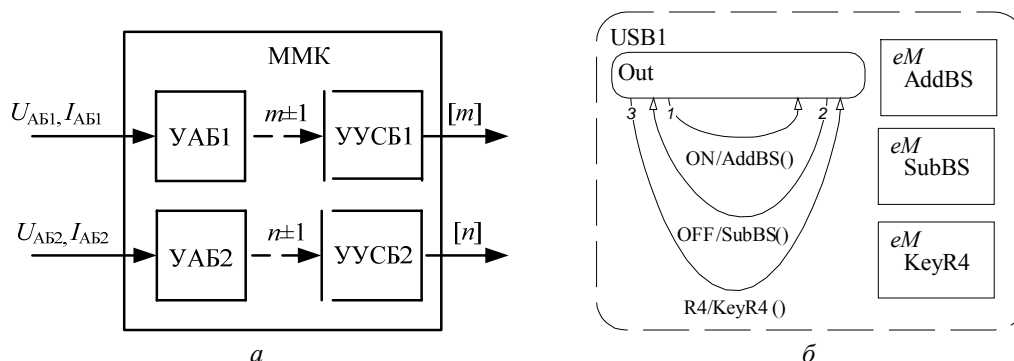


Рис. 8. Программное обеспечение модели СУ на языке UML: а – структура ПО; б – диаграмма состояний программного блока УУСБ1 в MatLab

Для оценки адекватности работы СУ модель СЭС испытывалась при положительном и отрицательном энергобалансе. Результаты моделирования при положительном энергобалансе приведены на рис. 9, а, при отрицательном – на рис. 9, б. В верхнем ряду диаграмм приведены осциллограммы напряжений на АБ, в среднем – осциллограммы потребляемой мощности и соответствующего тока в нагрузке. В нижнем ряду диаграмм приведены режимы работы УАБ1, УАБ2, на которых обозначены цифрами 1 – режим «Поддержание заряда», 2 – режим «Заряд», 3 – аварийный режим работы.

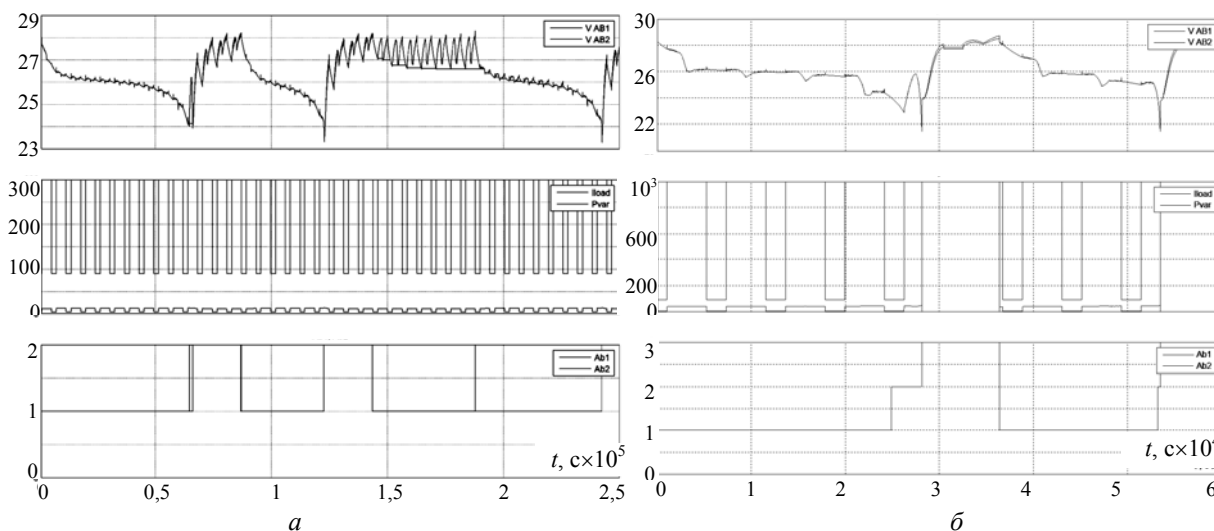


Рис. 9. Диаграммы напряжений АБ1, АБ2, режимов работы СУ, мощности и тока нагрузки: а – положительный энергобаланс; б – отрицательный энергобаланс

Моделирование показывает, что при положительном энергобалансе напряжения на АБ1 и АБ2 находятся в заданном диапазоне 24–28 В, и при этом обеспечивается полное функционирование нагрузки. При отрицательном энергобалансе функционирование нагрузки прекращается в момент достижения минимально допустимого значения напряжения на АБ1 или АБ2, при этом СЭС переходит в аварийный режим работы и заряжает аккумуляторы.

Результаты моделирования позволяют заключить, что имитационная модель СЭС построена и функционирует в соответствии с заложенной в неё логикой работы. С помощью этой модели можно наглядно имитировать различные режимы работы СЭС, что позволяет оценивать преимущества и недостатки системы.

Выявлен недостаток основного алгоритма работы КУСЭС – избыточное циклирование АБ при достаточной мощности СБ. При этом частота циклирования связана с глубиной разряда, которая в свою очередь определяется значениями $U_{\text{МИН}}$ и $U_{\text{МАКС}}$ в подчиненном контуре регулирования напряжения АБ. Скорость заряда и разряда АБ зависит от соотношения возмущающих СЭС воздействий $I_{\text{Н}}$, $I_{\text{КЗ}}$, $U_{\text{ХХ}}$, значений тока уставки $I_{\text{У}}$ и допустимого отклонения тока $\Delta I_{\text{З}}$. Нежелательный разряд АБ вызван дискретностью регулируемого тока $I_{\text{АБ}}$ и присутствием разрядного тока АБ в режиме «Поддержание заряда в АБ», что может при «нулевом» энергобалансе привести к аварийной ситуации и что необходимо учесть в дальнейшем.

Литература

1. Power system challenges for small satellite missions [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.clyde-space.com/documents/1502>, свободный (дата обращения: 11.10.2011).
2. Комплекс управления системой электроснабжения малого космического аппарата / В.В. Наркевич, В.В. Омелянчук, А.С. Романенко и др. // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. тр. – Томск: Изд-во НТЛ, 2011. – С. 49–54.
3. Пат. 95 191 РФ, МПК H02J 7/34, H02J 7/35. Автономная система электроснабжения с секционированной солнечной батареей / К.Г. Гордеев, В.В. Наркевич, А.С. Романенко, Я.М. Тевелевич, В.Г. Шевченко (РФ). – № 2 010 106 581 / 22; заявл. 24.02.2010; опубл. 10.06.10. Бюл. № 16.
4. Романенко А.С. Разработка в MatLAB модели солнечной батареи с динамическим освещением / А.С. Романенко, С.С. Какуев // Научная сессия ТУСУР-2010: Матер. докл. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. г. Томск, 4–7 мая, 2010 г. – Томск: В-Спектр, 2010. – Ч. 4. – С. 142–145.
5. Упаев А.Б. Технология разработки программного обеспечения микроконтроллеров с использованием языка UML // Итоги научно-исследовательских работ и курсового проектирования студентов 1–6-х курсов кафедры промышленной электроники: матер. ежегод. науч.-практ. конф. / под ред. канд. техн. наук В.Д. Семенова. – Томск: Том. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники. – 2010. – Вып. 3. – С. 38–46.
6. Stateflow User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/stateflow, свободный (дата обращения: 10.10.2011).

Романенко Алексей Сергеевич

Аспирант каф. промышленной электроники ТУСУРа, научный сотрудник ОАО «НПЦ «Полус», г. Томск
Тел.: 8-923-424-86-54
Эл. почта: alnast@vtomske.ru

Семенов Валерий Дмитриевич

Канд. техн. наук, профессор каф. промышленной электроники ТУСУРа
Эл. почта: svd@ie.tusur.ru

Romanenko A.S., Semenov V.D.

Matlab model of autonomous power supply system with partitioned solar battery

The article presents a simulation model of an autonomous power supply system with partitioned solar battery. The model is implemented in MatLab and it allows to adapt energetic characteristics of accumulators, solar battery, orbit, load profile, logic algorithm of control system and to examine the behavior of power supply system in basic and emergency modes.

Keywords: power supply system, solar battery model, accumulator model.