УДК 621.311.6

О.Г. Рекутов, А.Г. Юдинцев

Анализ способов построения имитаторов солнечных батарей для физического моделирования систем электроснабжения космических аппаратов

Приводится классификация имитаторов батареи солнечной. Согласно классификационным признакам проводится анализ различных топологий построения силового модуля и систем управления. В основе описанных топологий силовых модулей лежат линейный или импульсный принципы работы. Описанные системы управления в своей основе имеют аналоговый или цифровой принцип работы. При этом проектирование имитаторов батареи солнечной предполагает возможность комбинировать в различных вариациях принципы работы силовых модулей и систем управления. Освещены тенденции и перспективы развития, базирующиеся на требованиях динамических или мощностных характеристик.

Ключевые слова: система электропитания, имитатор солнечной батареи, силовой модуль, широтно-импульсная модуляция, система управления.

doi: 10.21293/1818-0442-2020-23-2-108-115

Подавляющее большинство спутников в качестве источника электроэнергии для аппаратуры и оборудования используют солнечные батареи (СБ). От работы СБ спутника напрямую зависят его эффективность и срок службы. Важное значение имеют наземные испытания системы электропитания (СЭП) спутника для подтверждения ее эффективности и надежности. Однако использование при наземных испытаниях реальных СБ неэффективно и потому нецелесообразно. Решением данной проблемы является использование имитаторов солнечной батареи (ИСБ). Основной задачей ИСБ является обеспечение питанием каждой подсистемы спутника на протяжении всего периода наземных испытаний [1, 2].

Классификация ИСБ

Мировая космическая и промышленная индустрия предлагает различные варианты построения ИСБ. В целом при разработке ИСБ учитываются три аспекта: принцип работы силового модуля (СМ), тип системы управления по принципу представления информации и структура задающего устройства (ЗУ). С учетом данных аспектов классификацию можно представить в виде блок-схемы, показанной на рис. 1.

СМ по принципу работы главным образом разделяются на линейные и импульсные. ИСБ, выполненные с использованием СМ с линейным принципом работы, имеют отличные динамические характеристики. Однако линейная топология СМ имеет ограничения, связанные со сложностью реализации высоких показателей мощности, малым КПД, большим тепловыделением и большими размерами, в связи с чем не подходит для использования в создаваемых на ее основе ИСБ большой мощности. Для создания ИСБ большей мощности используется топология на основе импульсного принципа работы.



Рис. 1. Классификация ИСБ

По типу обработки информации системы управления классифицируются на аналоговые и цифровые. ИСБ с аналоговой системой управления, изображенной на рис. 2, отличаются простотой и относительно невысокой стоимостью. Такая система управления имеет два контура регулирования: внутренний (токовый) и внешний (задающий уставку). Внутренний контур, как правило, регулирует ток выхода ИСБ. В ИСБ с аналоговой системой управления в качестве ЗУ во внешнем контуре регулирования могут применяться:

- небольшая ячейка СБ с источником света;
- фотодиод в паре со светодиодом;
- аналоговая модель СБ.

Такой подход позволяет осуществлять имитацию работы СБ в реальном времени (с минимальными задержками). Следовательно, увеличивается точность воспроизведения ВАХ в сравнении с другими методами. Уставка от аналогового контура регулирования хорошо контролируема. Следовательно, можно эффективно и достаточно гибко имитировать ВАХ СБ при изменении окружающих условий, таких как солнечное излучение и температура.

Альтернативой аналоговой системы управления является цифровая. Использование цифровой системы управления для построения ВАХ ИСБ придает большую гибкость управления и надежность, также цифровая система меньше подвержена влиянию высокочастотных помех. Недостатком цифровой системы управления является цифровая задержка, связанная с таким недостатком, как ограничение частоты квантования. На рис. 3 показана структурная схема типовой цифровой системы управления ИСБ.

Цифровые системы управления, применяемые в ИСБ, строятся двумя способами.



В качестве первого способа применяется так называемый метод справочных таблиц. Данный метод предполагает использование большого массива данных измеренных значений тока и напряжения ВАХ конкретной СБ, хранимого в модуле памяти цифровой системы управления. Чем больше объем этих данных, тем выше точность воспроизведения ВАХ СБ.

Во втором способе используется ЗУ на основе аналитического расчета ВАХ СБ, использующая логарифмические вычисления. Наиболее часто встречающиеся модели с экспоненциальной формулой – это параметрическая модель СБ и модель СБ на основе интерполяции. Для параметрической модели при расчетах используются параметри ячеек СБ из их документации. При использовании модели СБ на основе интерполяции необходимо знать напряжение холостого хода (XX), ток короткого замыкания (K3), напряжение и ток точки максимального отбора мощности или оптимальной рабочей точки (OPT) (U_{opt} и I_{opt}) [3]. Данный способ также может применяться для построения аналоговых систем управления за исключением параметрического метода.

ИСБ с импульсным принципом работы СМ

В литературе [4–6] приводятся ИСБ с импульсной топологией СМ и цифровой системой управления с ЗУ по типу справочной таблицы. На рис. 4 изображена функциональная схема подобного ИСБ.



Рис. 4. Функциональная схема ИСБ с импульсной топологией СМ и цифровой системой управления

СМ ИСБ включает в себя трехфазный мостовой выпрямитель и понижающий преобразователь. ЦСУ состоит из DSP-микроконтроллера и периферии, включающей в себя схемы управления силовой частью (драйверы с гальванической развязкой), АЦП, модули интерфейса. В качестве эквивалентной схемы солнечного элемента (СЭ) принята однодиодная идеализированная модель (рис. 5), описываемая уравнением (1) [7]:

$$I_{\rm H} = I_{\rm K3} - I_{\rm I},$$

$$I_{\rm I} = I_S \cdot (\exp^{eU/kT} - 1), \qquad (1)$$

$$I_{\rm H} = I_{\rm K3} - I_S \cdot (\exp^{eU/kT} - 1),$$

где $I_{\rm H}$ — ток нагрузки солнечного элемента; $I_{\rm K3}$ — фототок или ток короткого замыкания солнечного элемента; $I_{\rm Д}$ — ток, протекающий через идеализированный *p*–*n*-переход; I_S – обратный ток насыщения; e – заряд электрона, равный 1,6·10⁻¹⁹ Кл; U – напряжение на нагрузке солнечного элемента; k – постоянная Больцмана, равная 1,38·10⁻²³ Дж/К; T – рабочая температура в градусах Кельвина.



Рис. 5. Эквивалентная идеализированная модель солнечного элемента

Для имитации ВАХ СБ имитатор должен работать в определенной точке, в которой напряжение и ток выхода понижающего преобразователя должны соответствовать пересечению нагрузочной характеристики и ВАХ СБ. Данная точка является рабочей точкой. Для реализации данного условия используется метод справочных таблиц, согласно которому в память микроконтроллера заносятся значения напряжения и тока конкретной ВАХ СБ. Хранимые значения представляют собой массив данных, структурированных определенным образом, при котором каждому значению напряжения соответствует определенное значение тока.

На рис. 6 изображена типичная ВАХ СБ. Имитатор работает в точке пересечения имитируемой ВАХ СБ и нагрузочной характеристики. В качестве примера рассмотрена резистивная нагрузка, изменяющаяся от значения R_1 до R_2 и от R_2 до R_3 . Вслед за изменением нагрузки меняет свое положение и рабочая точка, следуя из положений от $l \kappa 2$ и от $2 \kappa 3$.



Рис. 6. ВАХ СБ и нагрузочные характеристики

В некоторых случаях, в контексте данного способа управления, применяют принципы управления (регулирования) только по напряжению или только по току.

Принцип регулирования по напряжению работает следующим образом.

Измеряется величина выходного тока ИСБ, по таблице данных определяется соответствующее значение уставки напряжения, далее регулятор меняет величину скважности ШИМ, чтобы получить заданное напряжение выхода ИСБ.

Аналогично работает принцип регулирования по току. Измеряется величина выходного напряжения ИСБ, по таблице данных определяется соответствующее значение уставки тока, далее регулятор меняет величину скважности ШИМ, чтобы получить заданный ток выхода ИСБ.

Однако СБ представляет собой нелинейный источник энергии, который может быть представлен как источник тока и источник напряжения, где в каждом случае величины тока и напряжения меняются в относительно небольшом диапазоне для соответствующих участков ВАХ. Как показано на рис. 6, напряжение на участке тока меняется в диапазоне 0-160 В, в то время как ток меняется в диапазоне всего лишь 1,5 А. В случае использования только принципа управления по напряжению на практике будет сложно измерить значение тока выхода таким образом, чтобы достаточно точно получить значение уставки по напряжению из справочной таблицы. Предсказуемо подобная проблема возникнет на участке напряжения в случае использования только принципа управления по току. Как следствие, применение только одного из принципов управления не может дать достаточно точной имитации работы СБ. С учетом данного обстоятельства применяются два принципа в зависимости от участка ВАХ.

Так как принципы управления аналогичны, будет рассмотрен только принцип управления по напряжению. На рис. 7 в масштабе изображен фрагмент ВАХ ИСБ (линия K_{PV}) и нагрузочной характеристики (линия K_R), изменяющейся от значения R_1 до R_2 . Последовательность перехода рабочей точки при изменении нагрузки показана стрелками.



Рис. 7. Фрагмент ВАХ СБ и нагрузочной характеристики

Предположим, изначально ИСБ работал в точке A при изменении нагрузки от значения R_1 до R_2 , рабочая точка ИСБ переходит в положение A1. Это обусловлено наличием конденсатора C1 на выходе СМ, что не позволяет изменить значение выходного напряжения мгновенно.

В точке A1 в соответствии с принципом управления измеряется значение тока $I_{R2} + \Delta I_1$ и в качестве значения уставки напряжения из справочной таблицы выбирается значение, соответствующее величине напряжения выхода $V_{R2} - \Delta V_2$ (точка *B*). Реальная рабочая точка переместится в точку *B*1. С каждой итерацией рабочая точка будет приближаться к истинному значению – точке *F*. Ход итераций можно условным образом выразить логической последовательностью:

В литературе [5] приводится детальное описание условий сходимости процесса (устойчивости системы) и выбора принципа управления.

При использовании параметрического метода полагают, что все параметры СБ известны. Расчет напряжения выхода ИСБ производится с учетом данных параметров, величины интенсивности солнечного излучения и температуры окружающей среды [3].

В литературе [7, 8] представлены ИСБ с импульсным принципом работы СМ и аналоговой системой управления. В основе проектирования данного ряда ИСБ лежит метод аппроксимации ВАХ СБ. Эквивалентная схема СЭ (рис. 8) описывается уравнением (3).



Рис. 8. Эквивалентная схема солнечного элемента для постоянного тока

$$I_{\rm H} = I_{\rm K3} - I_S \cdot (\exp^{\frac{e \cdot (U + I_{\rm H} \cdot R_{\rm II})}{A \cdot k \cdot T}} - 1) - \frac{U + I_{\rm H} \cdot R_{\rm II}}{R_{\rm III}}, \quad (3)$$

где R_{Π} – последовательное сопротивление солнечного элемента; $R_{\Pi III}$ – шунтирующее сопротивление; A – коэффициент (эмпирический параметр ВАХ), полученный при сравнении теоретических и экспериментальных кривых вольт-амперной характеристики.

Обобщенная функциональная схема данных ИСБ представлена на рис. 9.



Рис. 9. Функциональная схема ИСБ с импульсным принципом работы СМ и аналоговой системой управления

Подробное описание данного ИСБ представлено в литературе [9].

ИСБ с линейной топологией построения СМ

Топологии СМ, работающих в линейном режиме, представляют собой последовательное или параллельное соединение различных видов транзисторов [10, 11].

На рис. 10 представлена структурная схема ИСБ с линейным принципом работы СМ и комбинированной аналого-цифровой системой управления. СМ состоит из *N* включенных параллельно линейных силовых каскадов. Все каскады имеют одинаковые параметры и равные токи, пропорциональные уставке. Отношение уставки и тока ИСБ выражается формулой (4):

$$I_{\text{ИCE}} = N \cdot I_K = N \cdot K_I \cdot U_{\text{yct}I} , \qquad (4)$$

где N – количество каскадов, I_K – ток одного каскада, K_I – масштабирующий коэффициент с учетом напряжения уставки – U_{ycrl} . На рис. 11 показана функциональная схема одного линейного силового каскада,

представляющего собой составной транзистор из одного полевого транзистора VT4 с изолированным затвором (MOSFET) и трех полевых транзисторов с управляющим p-n-переходом (JFET).



Ток каждого каскада стабилизируется ПИ-регулятором. Информация о токе в канале снимается с шунта $R_{\rm III}$. Схема на операционном усилителе (ОУ) DA2 представляет собой усилитель сигнала ОС по

току шунта. Данный сигнал подается на инвертирующий вход ПИ-регулятора, выполненного на ОУ *DA*1. Сигнал выхода ПИ-регулятора подается на схему драйвера силового каскада, выполненного на транзисторах *VT*1 и *VT*2.

Мощность рассеивания на MOSFET транзисторах силового блока пропорциональна контролируемому току. Количество токовых каналов зависит от максимальной требуемой мощности ИСБ. Но в конечном счете их количество ограничено конструктивными особенностями, учитывающими расстояние между ними. Увеличение данного расстояния может привести к несогласованности между каналами и как следствие неустойчивости системы и колебаниям.

ИСБ с линейным принципом работы СМ и аналоговой системой управления, где в качестве ЗУ используются источники света или ячейки СБ, интегрированные в схему, а также ЗУ с аналоговой моделью СБ, не нашли широкого применения в промышленной и космической индустриях и используются главным образом как лабораторные экспонаты для быстрой приближенной имитации СБ. В литературе [12, 13] можно найти подробное описание подобных ИСБ.



Рис. 11. Функциональная схема линейного силового каскада

ИСБ с комбинированным СМ

Комбинированный СМ с использованием импульсного и линейного силовых каналов позволяет создать ИСБ достаточно большой мощности (2 кВт и более). На рис. 12 изображена структурная схема рассматриваемого ИСБ. Данную схему можно разделить на две части: блок многоуровневого переключения напряжений (БМПН) и линейный блок (ЛБ) [14, 15].

Принцип работы ЛБ в целом соответствует описанному выше.

Работа БМПН основана на так называемом пошагово-волновом принципе (Step-Wave Approach). В литературе [16] дано его подробное описание. На рис. 13 изображена функциональная схема блока. БМПН состоит из гальваноразвязанных последовательно соединенных источников напряжения $Z_{N,}$, имеющих выходные напряжения ΔU и U_{6a3} (напряжение, равное уровню напряжения насыщения линейного каскада). В результате сравнения напряжения $OC(U_{\rm H})$ с опорным напряжением $U_{\rm ypN}$ компараторов DA_N происходит формирование сигналов включения U_3 ключей на транзисторах K_N . В итоге уровень $U_{\rm III}$ формируется таким образом, чтобы при условии работы ИСБ в заданной рабочей точке падение напряжения на ЛБ было минимальным.

Заключение

С учетом особенностей описанных типов ИСБ можно выделить тенденции проектирования с учетом их использования и круга решаемых задач.



Рис. 12. Структурная схема ИСБ с комбинированным СМ



Рис. 13. Функциональная схема блока многоуровневого переключения напряжений

В промышленной индустрии, как правило, используются ИСБ с импульсным принципом работы СМ и цифровой системой управления. Это обусловлено требованиями к повышенной мощности, широкими функциональными возможностями и условно невысокими требованиями к скорости реакции системы ИСБ на возмущающие воздействия.

В космической индустрии, прежде всего, предъявляются высокие требования к скорости реакции системы ИСБ на возмущающие воздействия и относительно невысокие требования к характеристикам мощности. С учетом этого превалирует линейная топология СМ и естественным образом адаптированная к ней аналоговая или комбинированная система управления. Параллельно данной тенденции развивается подход к проектированию ИСБ с импульсным принципом работы СМ. Применять данный ряд ИСБ в космической промышленности во многом позволяет идеология построения СМ, благодаря которой ток короткого замыкания постоянно присутствует во внутреннем контуре ИСБ, за счет чего уменьшается время реакции системы на возмущающее воздействие. В то же время отсюда вытекает недостаток, заключающийся в избыточной мощности, необходимой для поддержания тока КЗ. С другой стороны, импульсный принцип работы СМ способствует увеличению КПД и в определенной степени компенсирует

упомянутый недостаток. В перспективе увеличение производительности микроконтроллеров, составляющих основу ЦСУ, должно привести к замещению аналоговых систем управления на цифровые в ИСБ для космической индустрии.

Работа выполнена в рамках государственного заказа «Фундаментальные аспекты исследований в области микро- и оптоэлектронных систем на основе Si, SiGe и A₃B₅, интеллектуальных средств преобразования электроэнергии для создания ресурсосберегающих распределенных комплексов электроснабжения с использованием технологий промышленного интернета вещей и радиофотоники».

Литература

1. Гущин В.Н. Основы устройства космических аппаратов: учеб. издание. – М.: Машиностроение, 2003. – 272 с.

2. Keysight Technologies. Решение проблем имитации солнечных батарей. Помощь в выборе оптимального источника питания для наземных испытаний спутников [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docplayer.ru/ 68230076-Keysight-technologies-reshenie-problem-imitacii-solnechnyh-batarey.html (дата обращения: 13.04.2020).

3. Khouzam K. Simulation and real-time modelling of space photovoltaic systems / K. Khouzam, L. Cuong, K. Chen Khoon, Ng. Poo Yong // IEEE Trans. – 1994. – Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion – WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC) (5-9 Dec. 1994). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769 (дата обращения: 13.04.2020).

4. Koutroulis E., Kalaitzakis K., Tzitzilonis V. Development of an FPGA-based System for real-time simulation of photovoltaic modules // IEEE Trans. – 2006. – Seventeenth IEEE International Workshop on Rapid System Prototyping (RSP'06) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/520770 (дата обращения: 13.04.2020).

5. Yuan Li, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator // IEEE Trans. – 2009. – Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/docu-ment/4802769 (дата обращения: 13.04.2020).

6. Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho. A study on the PV simulator using equivalent circuit model and look-up table hybrid method // IEEE Trans. – 2013. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS–2013) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/6713209 (дата обращения: 13.04.2020).

7. Кремзуков Ю.А., Мишин В.Н., Пчельников В.А. и др. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов. – Томск: Том. ун-т, 2014. – 86 с.

8. Кремзуков Ю.А. Имитатор батареи солнечной для наземной отработки и испытаний систем электропитания космических аппаратов на основе импульсных преобразователей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 2011. – 28 с.

9. Сравнительный анализ систем управления имитатора вольт-амперной характеристики солнечной батареи / О.Г. Рекутов, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев, А.М. Малышенко // Доклады ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 89–95.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

10. Shanshan Jin. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs / J. Shanshan, Z. Donglai, W. Chao, G. Yu // IEEE Trans. – 2018. – Vol. MTT-65, No. 6. – P. 4691–4701.

11. Shanshan J. Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage / J. Shanshan, Z. Donglai, B. Zhiyun, L.H. Xinjun // IEEE Trans. - 2018. - Vol. MTT-33, No. 2. - P. 1682-1695.

12. Ole-Morten Midtgard. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics // IEEE Trans. – 2007. – European Conference on Power Electronics and Applications. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/4417450 (дата обращения: 13.04.2020).

13. Ollila J. A medium power PV-array simulator with a robust control strategy // IEEE Trans. – 1995. – Proceedings of International Conference on Control Applications [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ieeex-plore.ieee.org/ document/555638 (дата обращения: 13.04.2020).

14. Shanshan J. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave tracking output voltage approach / J. Shanshan, Z. Donglai, Q. Lu, L. Mingyu, Z. Xiaofeng, G. Yu // IEEE Trans. – 2018. – Vol. MTT-33, No. 5. – P. 4102–4114.

15. Shanshan J. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator / J. Shanshan, Z. Donglai, W. Chao // IEEE Trans. – 2018. – Vol. MTT-33, No. 8. – P. 7178–7192.

16. Qian J. High-efficiency switch-linear-hybrid envelope-tracking power supply with step-wave approach / J. Qian, R. Xinbo, R. Xiaoyong, X. Huan // IEEE Trans. – 2015. – Vol. MTT-62, No. 9. – P. 5411–5421.

Рекутов Олег Геннадьевич

Аспирант каф. компьютерных систем в управлении и проектировании (КСУП) Томского государственного ун-та систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР) Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050 Тел.: +7-960-974-71-14 Эл. почта: rekutov@niiaem.tomsk.ru

Юдинцев Антон Геннадьевич

Канд. техн. наук, дир. Научно-исследовательского ин-та автоматики и электромеханики (НИИ АЭМ) ТУСУР Белинского ул., д. 53, г. Томск, Россия, 634034 Тел.: +7-960-973-03-03 Эл. почта: yag@niiaem.tomsk.ru

Rekutov O.G., Yudintsev A.G. Analysis of solar array simulators constructing methods for spacecraft power supply system's physical modeling

The classification of solar array simulators is given. An analysis of various topologies of building a power module and control systems is carried out, according to the classification criteria. The trends and prospects for development are highlighted. **Keywords:** power supply system, solar array simulator, power module, pulse-width modulation, control system. **doi:** 10.21293/1818-0442-2020-23-2-108-115

References

1. Gushchin V.N. *Osnovy ustroistva kosmicheskikh apparatov: uchebnoe izdanie* [Bases of the device of spacecrafts]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 2003, 272 p.

2. Keysight Technologies. *Reshenie problem imitatsii* solnechnykh batarei. Pomoshch' v vybore optimal'nogo istochnika pitaniya dlya nazemnykh ispytanii sputnikov [Keysight Technologies. Solving the challenges of solar array simulation. helping you select the optimal power solution for satellite ground testing]. Available at: https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problem-imitacii-solnechnyhbatarey.html (Accessed: April 13, 2019).

3. Khouzam K., Cuong Ly, Chen Khoon Koh, Poo Yong Ng. Simulation and real-time modelling of space photovoltaic systems, *IEEE Trans.*, 1994, Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion – WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC) (5-9 Dec. 1994).

4. Koutroulis E., Kalaitzakis K., Tzitzilonis V. Development of an FPGA-based System for real-time simulation of photovoltaic modules. IEEE Trans., 2006, Seventeenth IEEE International Workshop on Rapid System Prototyping (RSP'06). Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/ 1630770 (Accessed: April 13, 2019).

5. Yuan Li, Taewon Lee, Fang. Z. Peng, Dichen Liu. A hybrid control strategy for photovoltaic simulator, *IEEE Trans.*, 2009, 2009 Twenty-Fourth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769 (Accessed: April 13, 2019).

6. Zheng Guo Piao, Shu Juan Gong, Yue Heng An, Geum Bae Cho. A study on the PV simulator using equivalent circuit model and look-up table hybrid method. *IEEE Trans.*, 2013, 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Available at: https://ieeexplore.ieee.org/ document/6713209 (Accessed: April 13, 2019).

7. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchel'nikov V.A et al. Proektirovanie modul'nykh imitatorov solnechnykh batarei avtomatizirovannoi kontrol'no-ispytatel'noi apparatury sistem elektropitaniya avtomaticheskikh kosmicheskikh apparatov: Monografiya [Design of modular solar array simulators of the automated control test apparatus of electric power supply systems of automatic spacecrafts]. Tomsk, Tomskii universitet Publ., 2014. 86 p. (in Russ.).

8. Kremzukov Yu.A. *Imitator batarei solnechnoi dlya nazemnoi otrabotki i ispytanii sistem elektropitaniya kosmicheskikh apparatov na osnove impul'snykh preobrazovatelei* [The solar array simulator for ground working off and tests of electric power supply systems of spacecrafts on the basis of pulse converters]. Cand. Diss. Thesis]. Tomsk, 2011, 28 p. (in Russ.).

9. Sravnitel'nyy analiz sistem upravleniya imitatora vol'tampernoy kharakteristiki solnechnoy batarei [Comparative analysis of I-V curve solar array simulator]. O.G. Rekutov, V.M. Rulevskiy, A.G. Yudintsev, A.M. Malyshenko. Doklady TUSUR, 2019, vol. 22, no 4, pp. 89–95 (in Russ.).

10. Shanshan J., Donglai Z., Chao W., Yu G. Optimized design of space solar array simulator with novel three-port linear power composite transistor based on multiple cascaded SiC-JFETs. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT–65, no. 6, pp. 4691–4701.

11. Shanshan J., Donglai Z., Zhiyun B., Xinjun L.H. Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 2, pp. 1682–1695.

12. Ole-Morten Midtgard. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics, *IEEE Trans.*, 2007, 2007 European Conference on Power Electronics and Applications.

115

13. Ollila J. A medium power PV-array simulator with a robust control strategy, *IEEE Trans.*, 1995, Proceedings of International Conference on Control Applications. Available at: https://ieeexplore.ieee.org/document/555638 (Accessed: April 13, 2019).

14. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Lu Qu, Mingyu Liu, Xiaofeng Zhang, Yu Gu. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave track-ing output voltage approach. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 5, pp. 4102–4114.

15. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang. UI-RI hybrid lookup table method with high linearity and high-speed convergence performance for FPGA-based space solar array simulator. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT–33, no. 8, pp. 7178–7192.

16. Qian Jin, Xinbo Ruan, Xiaoyong Ren, Huan Xi. Highefficiency switch-linear hybrid envelope-tracking power supply with step-wave approach. *IEEE Trans.*, 2015, vol. MTT–62, no. 9, pp. 5411–5421.

Oleg G. Rekutov

Postgraduate student, Department of Computer Control and Design Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634034 Phone: +7-960-974-71-14 Email: rekutov@niiaem.tomsk.ru

Anton G. Yudintsev

Doctor of Engineering Sciences, Director NII AEM TUSUR 53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034 Phone: +7-960-973-03-03 Email: yag@niiaem.tomsk.ru