

УДК 621.311.6

О.Г. Рекутов, В.М. Рулевский, А.Г. Юдинцев, А.М. Малышенко

Сравнительный анализ систем управления имитатора вольт-амперной характеристики солнечной батареи

Приводится анализ современного состояния имитаторов солнечной батареи (ИБС) для испытаний систем электропитания космических аппаратов. Предлагается модель имитатора солнечной батареи с введением дополнительной обратной связи в систему управления. Модифицированная таким образом система управления позволяет существенно улучшить динамические характеристики имитатора. Проведенный анализ динамических режимов работы имитатора показывает перспективность его применения для испытаний систем электропитания космических аппаратов.

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

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-89-95

Космические аппараты (КА) являются сложными и дорогостоящими электромеханическими устройствами. Критически важным звеном КА является система электропитания (СЭП), обеспечивающая электроэнергией бортовую аппаратуру и оборудование. Солнечная батарея (СБ) является одним из ключевых элементов СЭП, выполняя роль первичного источника электрической энергии. От работы СБ КА зависят его эффективность и срок службы. В связи с этим встает вопрос проверки СЭП КА с целью оценки ее соответствия техническому заданию и надежности, прежде чем КА отправится в космос. При наземных испытаниях нецелесообразно использовать штатные СБ. Это обусловлено тем, что в зоне испытаний на земле невозможно добиться той интенсивности солнечного излучения, что и в космосе. Но даже при возможности реализации такого излучения в связи с низким КПД СБ экономически это будет крайне дорогостоящим предприятием. Помимо этого, в процессе испытаний необходимо моделировать изменение окружающих условий, таких как изменение температуры, затенение, затмение в различных режимах работы СБ. Решением данной проблемы является использование имитаторов солнечной батареи (ИБС) [1, 2].

К ИБС, применяемым для испытаний СЭП КА, прежде всего предъявляются высокие требования к динамическим характеристикам и относительно невысокие требования к характеристикам мощности. С учетом этого преобладают топология с линейным принципом работы силовых модулей (СМ) и естественным образом адаптированная к ней аналоговая или комбинированная системы управления (СУ). Во внешнем контуре управления СУ выполнена по принципу справочной таблицы [3–5]. Топологии СМ, работающих в линейном режиме, представляют собой последовательное или параллельное соединение различных видов транзисторов. Ток транзисторных каскадов стабилизируется пропорционально-интегрирующим регулятором, выполненным на операционных усилителях (ОУ). Мощность рассеивания на MOSFET транзисторах силового блока про-

порциональна контролируемому току. Количество токовых каналов зависит от максимальной требуемой мощности ИБС. Большое количество каналов может привести к несогласованности между ними и как следствие неустойчивости системы и колебаниям, в силу чего мощность представленных ИБС ограничивается значением 510 Вт [6, 7].

Комбинированный СМ с использованием импульсного и линейного принципов работы силовых каналов позволяет создать ИБС достаточно большой мощности (2 кВт и более) [8, 9]. Структурно данный ИБС можно разделить на две части: блок многоуровневого переключения напряжений (БМПН) и линейный блок (ЛБ). Принцип работы ЛБ в целом соответствует описанному выше. Работа БМПН основана на так называемом пошагово-волновом принципе (Step-Wave Approach). В литературе [10] дано его подробное описание. Использование данного способа управления позволяет минимизировать падение напряжения на транзисторах ЛБ, что позволяет увеличить мощность ИБС.

Параллельно описанной выше тенденции проектирования ИБС развивается подход к построению ИБС с импульсным принципом работы СМ [11–13]. Применять данный ряд ИБС в космической промышленности во многом позволяет идеология построения СМ, благодаря которой ток короткого замыкания (КЗ) постоянно присутствует во внутреннем контуре ИБС, 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.

ИБС с импульсным принципом работы СМ

В основе проектирования ИБС с импульсным принципом работы СМ лежит метод аппроксимации ВАХ СБ. Обобщенная функциональная схема данных ИБС может быть представлена в виде рис. 1.

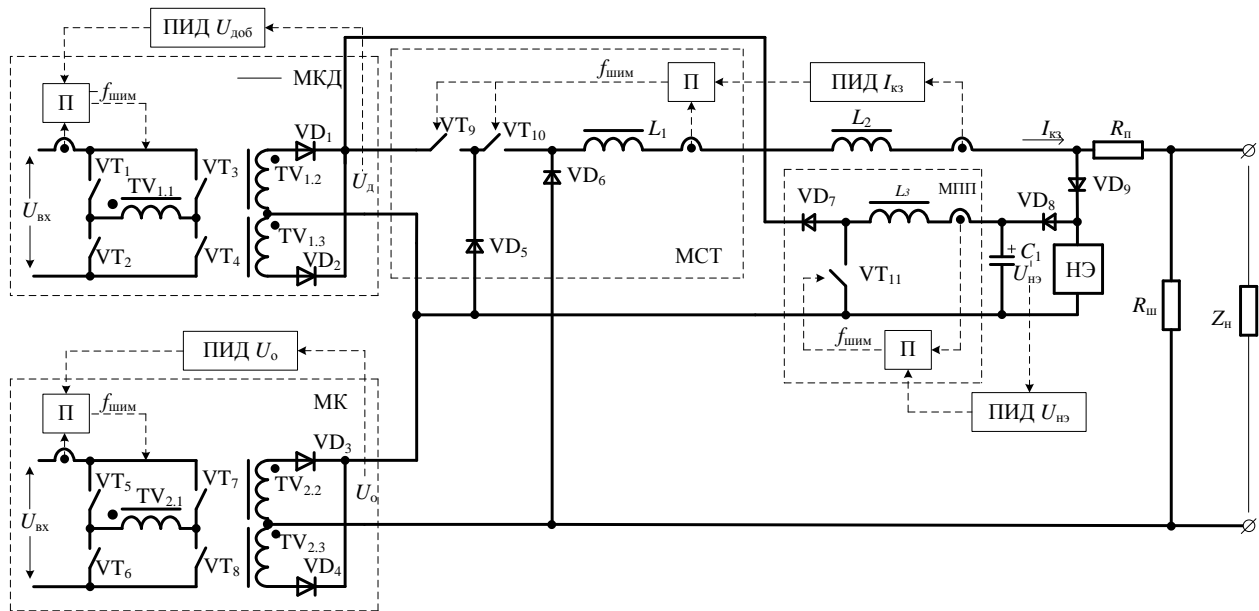


Рис. 1. Функциональная схема ИБС с импульсным принципом работы СМ и аналоговой СУ

Силовые блоки, представленные на схеме, имеют определенное назначение в соответствии с однодиодной эквивалентной схемой солнечного элемента (СЭ) [11]. Модуль стабилизатора тока (МСТ) имитирует источник тока $I_{кз}$ СБ. Нелинейный элемент (НЭ) имитирует диод VD. Модуль конвертора (МК) и модуль конвертора добавки (МКД) предназначены для задания напряжения холостого хода (ХХ) ВАХ в зависимости от участка работы ИБС. Модуль повышающего преобразователя (МПП) стабилизирует заданное напряжение на нелинейном участке ВАХ ИБС. Каждый силовой блок имеет СУ, состоящую из внутреннего и внешнего контуров. Управляющим звеном внутреннего контура является пропорциональный (П) регулятор тока, выполненный на основе ШИМ-контроллера uc2846 (фирмы Texas Instruments (TI)) [14]. Управляющим звеном внешнего контура является пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор напряжения или тока, выполненный на ОУ. Структурные схемы соответствующих регуляторов представлены на рис. 2.

Предложенная архитектура построения СМ ИБС позволяет создать максимально адекватную физическую модель СБ, благодаря тому, что заданный ток короткого замыкания $I_{кз}$ постоянно течет в контуре СМ, а ток нагрузки рабочей точки определяется только величиной нагрузки. Задачей регулятора тока является лишь стабилизация заданного тока $I_{кз}$. Наличие возможности регулирования напряжения выхода в модулях МК и МКД позволяет имитировать величину напряжения ХХ в широком диапазоне напряжения.

Другим преимуществом данного ИБС является малый объем входных данных. Для имитации ВАХ СБ достаточно задать напряжение ХХ, ток КЗ и характеристику изгиба нелинейного участка в виде величин напряжения $\Delta U_{нэ}$ и тока $\Delta I_{нэ}$ (при необходимости имитации нелинейного участка). ИБС, по-

строенные по описанному принципу, могут достигать мощности нескольких киловатт.

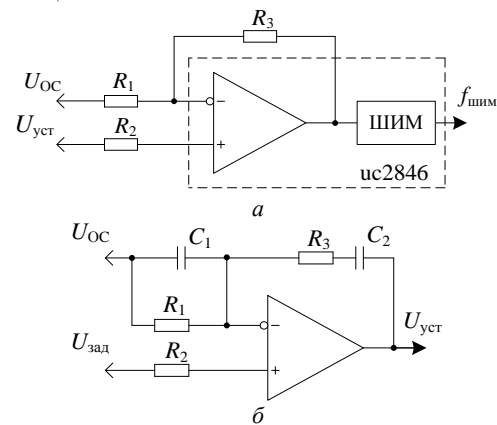


Рис. 2. Структурные схемы: П-регулятора – а; ПИД-регулятора – б

ИБС с модифицированной СУ

Исходя из условий работы в составе испытательного комплекса СЭП КА, ИБС должен стабилизировать заданный ток при динамическом характере нагрузки с частотой от единиц герц до нескольких единиц килогерц. Выполнение данного требования в первую очередь зависит от динамических характеристик СУ.

На рис. 3 показана структурная схема силового модуля стабилизации заданного тока ИБС и СУ (описанной выше) с введением дополнительной обратной связи (ОС), которая позволяет улучшить ее динамические характеристики.

Особенностью данного силового модуля ИБС является его малая инерционность ввиду того, что емкость на выходе практически отсутствует. При скачкообразном изменении величины нагрузки напряжение выхода изменяется практически мгновенно. Таким образом, используя в качестве сигнала ОС напряжение выхода, можно увеличить быстродействие СУ.

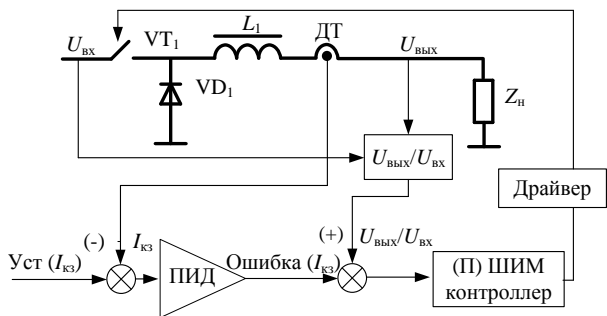


Рис. 3. Структурная схема ИБС с дополнительной ОС ($U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$), введенной в СУ

Аналогичные рассуждения применимы и к сигналу входного напряжения. В приведенной схеме сигнал ОС ($U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$), формируемый блоком деления, заведен непосредственно на задающий вход Прегулятора в обход ПИД-регулятора для того, чтобы минимизировать время задержки образуемого RC-цепями тракта выхода ПИД-регулятора.

Математическое моделирование ИБС

С помощью пакета Simulink Matlab была создана упрощенная модель силовой части ИБС. Модули МК и МКД были заменены блоком источника питания библиотеки Simulink (Voltage Source). Модуль МПП был исключен из схемы. Полученная

модель ИБС позволяет симулировать работу на участке тока ВАХ (рис. 4) при изменении нагрузки от значений R_1 до R_2 для тока уставки 10 А достаточно адекватно относительно полной модели.

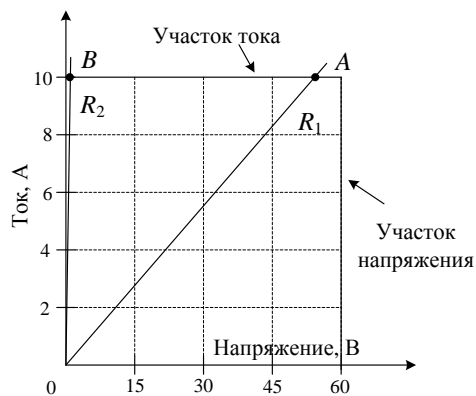


Рис. 4. ВАХ и нагрузочные характеристики ИБС

На рис. 5 показана упрощенная модель ИБС со стандартной СУ и блоком нагрузки частотно-регулируемой (НЧР) (рис. 6). Элементы транзистора VT_1 и диода VD_1 взяты без изменений параметров из библиотеки Simulink. Параметры остальных элементов силовой части и схемы СУ приведены в таблице.

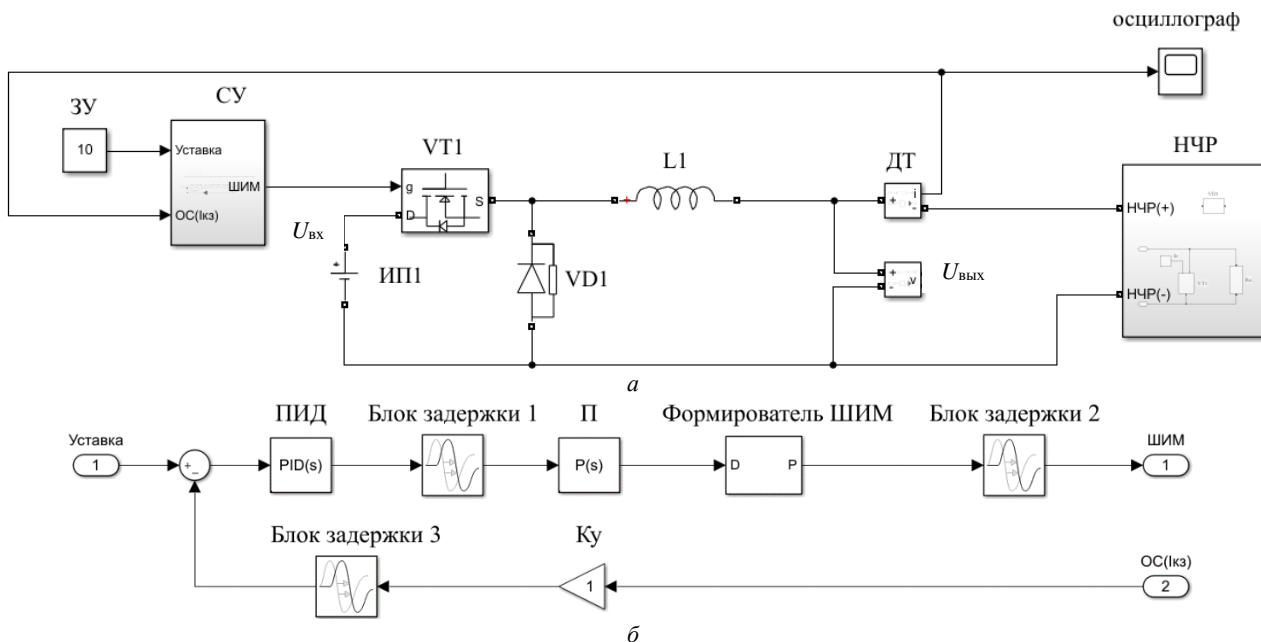


Рис. 5. Упрощенная модель ИБС со стандартной СУ – а. Стандартная СУ – б

Параметры элементов схем силовой части и стандартной СУ

Параметр элемента	Значение
ИП1, напряжение выхода	70 В
L_1 , индуктивность	1 мГн
ПИД-регулятор	$\text{П} = 0,46; \text{И} = 700; \text{Д} = 6,8 \cdot 10^{-5}$
П-регулятор	$\text{К} = 1$
Формирователь ШИМ	100 кГц
Блок задержки 1	5 мкс
Блок задержки 2	450 нс
Блок задержки 3	10 мкс

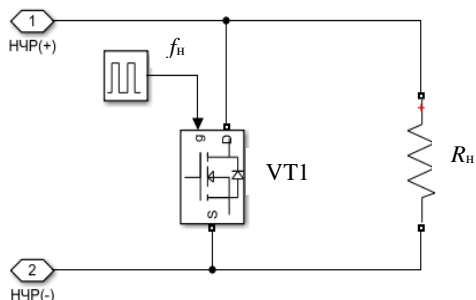


Рис. 6. Модель НЧР

Блок НЧР задает возмущающее воздействие (изменение нагрузки от значений $R_n = 6$ Ом до значения короткого замыкания с частотой $f_n = 500$ Гц).

На рис. 7 показана аналогичная схема ИБС, но с модифицированной СУ. Параметры ПИД-регулятора изменились на следующие: $P = 0,45$; $I = 662$; $D = 6,8 \cdot 10^{-5}$. Для блока задержки 4 параметр времени задержки равен 20 мкс. Все остальные параметры схемы остались неизменны.

Параметры ПИД-регулятора в обоих случаях настраивались инструментарием PID TUNER пакета Simulink Matlab в следующей последовательности:

- в окне свойств ПИД-регулятора (Block Parameters), нажатием кнопки Tune... вызывается окно настройки PID Tuner;

- в появившемся окне во вкладке PID TUNER после нажатия кнопки plant во всплывающем меню выбирается пункт Identify New Plant;

- во вкладке PLANT IDENTIFICATION после нажатия кнопки Get I/O Data выбирается пункт Simulate Data;

- во вкладке SIMULATE I/O DATA выбираются параметры единичного ступенчатого воздействия с учетом времени моделирования – 6 мс (Offset (U_o) = 0, Onset Lag ($T\Delta$) = 0, Stop Time (T_f) = 0,006, Signal Type – Step, Amplitude = 1); – запускается процесс симуляции единичного воздействия нажатием кнопки Run Simulation;

- после окончания процесса принимаются полученные данные нажатием кнопки Apply и закрывается текущая вкладка нажатием кнопки Close;

- во вкладке PLANT IDENTIFICATION во всплывающем меню Structure выбирается структура системы Underdamped Pair в соответствии с передаточной функцией понижающего преобразователя [15];

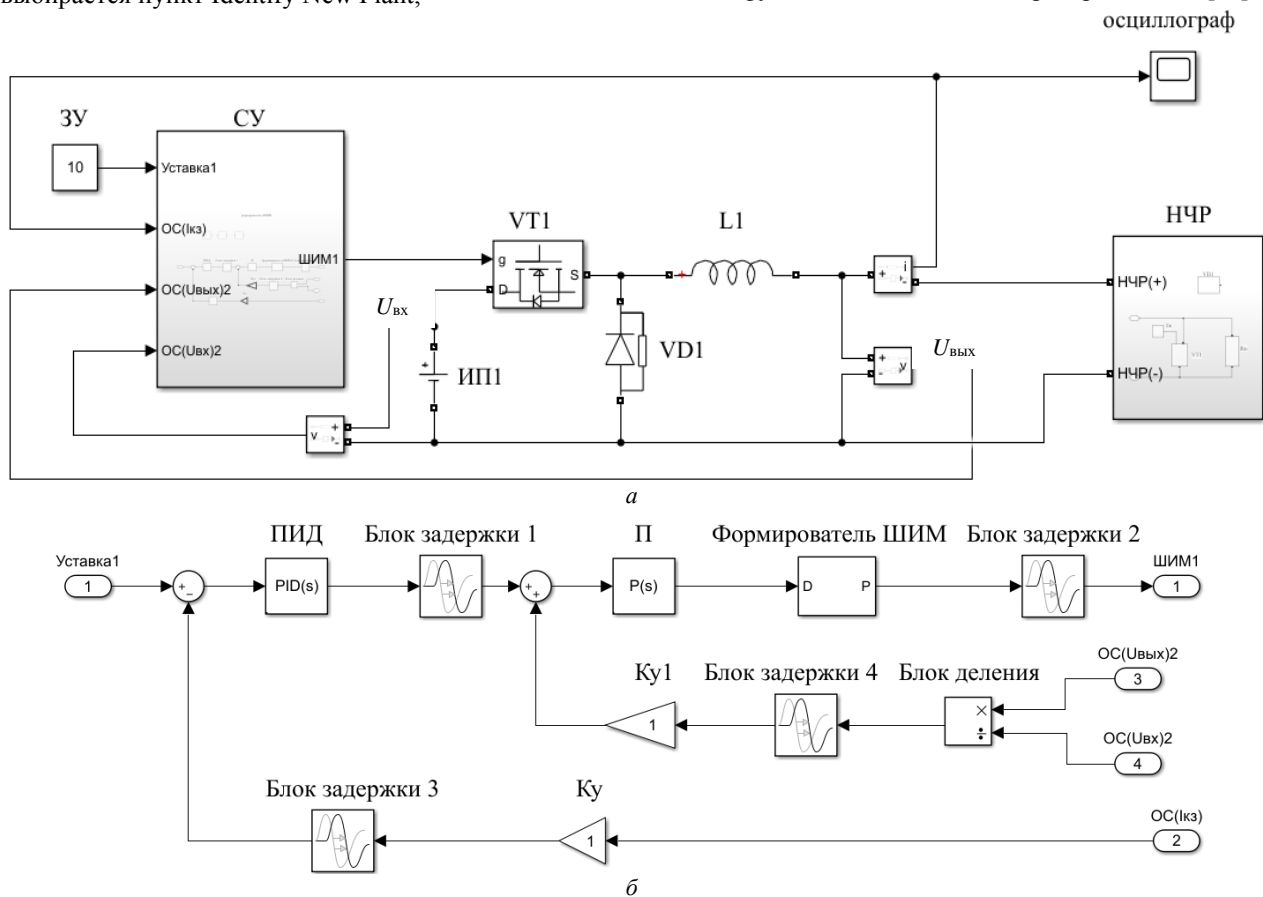


Рис. 7. Упрощенная модель ИБС с модифицированной СУ – а. Модифицированная СУ – б

- нажатием кнопки Auto Estimate запускается процесс идентификации модели в окне Plant Identification Progress, по окончании процесса окно закрывается и нажимается кнопка Apply;

- после перехода в окно Step Plot: Reference tracking становится активной кнопка Update block, нажатие которой обновляет коэффициенты ПИД-регулятора.

Блоки задержки введены в схемы СУ в качестве эквивалентов задержек в трактах цепей ОС и управления. Данные задержки обусловлены наличием RC-цепей, а также задержкой в микросхемах логики и драйверов физической модели.

Результаты работы ИБС для обеих СУ представлены на рис. 8. Для ИБС со стандартной СУ значения тока в минимальной и максимальной точках равны соответственно 6,948 и 12,51 А (значение пульсаций тока в размахе равно 5,558 А). Для ИБС с модифицированной СУ аналогичные значения тока равны 8,541 и 11,18 А (значение пульсаций тока в размахе равно 2,644 А). Таким образом, введение $ОС(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})$ в СУ позволяет увеличить скорость реакции СУ на динамическое воздействие, что в данном случае приводит к уменьшению пульсаций тока в 2,1 раза.

Заключение

Проведен анализ современного состояния имитаторов солнечной батареи для испытаний систем электропитания космических аппаратов. Предложена модель имитатора солнечной батареи с введением дополнительной обратной связи в систему управления.

В модифицированной СУ ИБС путем введения ОС($U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$) организуется более эффективное управление, заключающееся в улучшении динами-

ческих характеристик. Концепция проектирования ИБС, элементы структуры которого повторяют элементы однодиодной модели СЭ и импульсным принципом работы СМ в совокупности с предложенной СУ обладает значительным потенциалом в плане увеличения мощности и соответствия требованиям к динамическим характеристикам. Полученные осциллограммы динамического режима работы ИБС подтверждают эффективность предложенной СУ.

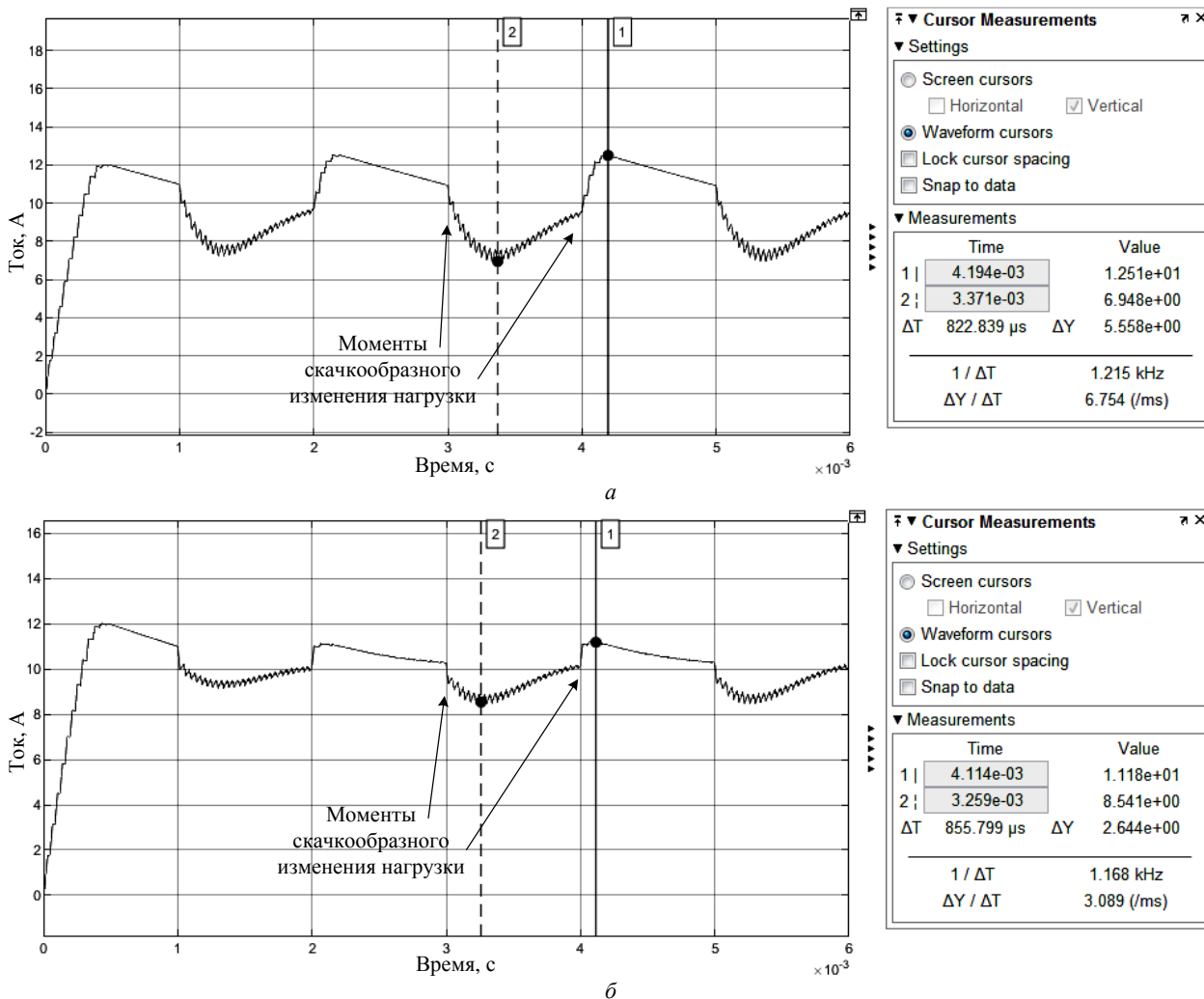


Рис. 8. Осциллограмма тока ИБС со стандартной СУ – а. Осциллограмма тока ИБС с модифицированной СУ – б

Литература

1. Пат. 50014, Российская Федерация, МПК51 G 05 F 1/59. Устройство имитации вольт-амперной характеристики солнечной батареи / В.Н. Мишин, Ю.А. Кремзуков; заявитель и патентообладатель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. – № 2005120575/22; заявл. 01.07.2005; опубл. 10.12.2005. Бюл. № 34.
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: 13.04.2019).

3. 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/1630770> (дата обращения: 24.12.2019).
4. 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 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4802769> (дата обращения: 24.12.2019).
5. 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). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6713209> (дата обращения: 24.12.2019).

6. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang, Yu Gu. 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. – P. 4691–4701.

7. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Zhiyun Bao, Xinjun Liu. High. Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage // *IEEE Trans.* – 2018. Vol. MTT-33, No. 2. – P. 1682–1695.

8. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Lu Qu, Mingyu Liu, Xiaofeng Zhang, Yu Gu. High-power high-dynamic-performance space solar array simulator using step-wave tracking output voltage approach // *IEEE Trans.* – 2018. – Vol. MTT-33, No. 5. – P. 4102–4114.

9. 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. – P. 7178–7192.

10. Qian Jin, Xinbo Ruan, Xiaoyong Ren, Huan Xi. High-efficiency switch-linear-hybrid envelope-tracking power supply with step-wave approach // *IEEE Trans.* – 2015. – Vol. MTT-62, No. 9. – P. 5411–5421.

11. Кремзуков Ю.А., Мишин В.Н., Пчельников В.А., Бубнов О.В., Рулевский В.М., Шиняков Ю.А., Шурыгин Ю.А. Проектирование модульных имитаторов солнечных батарей автоматизированной контрольно-испытательной аппаратуры систем электропитания автоматических космических аппаратов. – Томск: Том. ун-т, 2014. – 86 с.

12. 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.

13. Кремзуков Ю.А. Исследование динамических характеристик имитатора солнечной батареи ИБС-300/25 // *Известия Томского политехнического университета.* – 2008. – № 4. – С. 131–135.

14. UCx846/7 Current Mode PWM Controller [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/gpn/uc3847> (дата обращения: 13.04.2019).

15. Межаков О.Г. ПИД-регулятор понижающего преобразователя напряжения / О.Г. Межаков, А.А. Скляров // *Молодой ученый.* – 2015. – № 10. – С. 257–260.

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: ogrek82@yandex.ru

Рулевский Виктор Михайлович

Канд. техн. наук, ректор ТУСУРа
Ленина пр-т, 40, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30
Эл. почта: rector@tusur.ru

Юдинцев Антон Геннадьевич

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

Малышенко Александр Максимович

Д-р техн. наук, профессор отделения автоматизации и робототехники Национального исследовательского Томского политехнического университета
Ленина, пр-т 30, г. Томск, Россия, 634050
Тел.: +7 (382-2) 70-18-37
Эл. почта: mam@tpu.ru

Rekutov O.G., Rulevskiy V.M.,
Yudintsev A.G., Malysenko A.M.

Comparative analysis of I-V curve solar array simulator

The analysis of the current state of solar array simulators for testing spacecraft power systems is given. A model of a solar array simulator with the introduction of additional feedback into the control system is proposed. The control system modified in such a way allows to significantly improve the dynamic characteristics of the simulator. The analysis of the dynamic operating modes of the simulator shows the prospects of its application for testing power systems of spacecraft.

Keywords: power supply system, solar battery simulator, power module, pulse-width system, control system.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-4-89-95

References

1. Mishin V.N., Kremzukov Yu.A. *Ustroystvo imitatsii vol't-ampernoy kharakteristiki solnechnoy batarei* [Device for simulating the current-voltage characteristics of the solar array]. Patent RF, no. 2005120575/22, 2005 (in Russ.).
2. Keysight Technologies. *Reshenie problem imitatsii solnechnykh batarei. Pomoshch' v vybore optimal'nogo istochnika pitaniya dlya nazemnykh ispytaniy sputnikov* [Keysight Technologies. Solving the challenges of solar array simulation. Hints to selecting the optimal power solution for satellite ground testing]. Available at: <https://docplayer.ru/68230076-Keysight-technologies-reshenie-problem-imitatsii-solnechnykh-batarey.html> (accessed: April 13, 2019).
3. 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: December 24, 2019).
4. 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: December 24, 2019).
5. 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: December 24, 2019).
6. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Chao Wang, Yu Gu. 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.

7. Shanshan Jin, Donglai Zhang, Zhiyun Bao, Xinjun Liu. Dynamic performance solar array simulator based on a SiC MOSFET linear power stage. *IEEE Trans.*, 2018, vol. MTT-33, no. 2, pp. 1682–1695.

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

9. 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.

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

11. Kremzukov Yu.A., Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Rulevskii V.M., Shinyakov Yu.A., Shurygin Yu.A. *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.).

12. 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.).

13. Kremzukov Yu.A. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik imitatora solnechnoy batarei IBS-300/25 [The study of the dynamic characteristics of a solar array simulator SAS-300/25]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*, 2008, no 4, pp. 131–135 (in Russ.).

14. UCx846/7 Current Mode PWM Controller. Available at: <http://www.ti.com/lit/gpn/uc3847> (accessed: 13.04.2019).

15. Mezhakov O.G., A.A. Sklyarov. PID-regulyator ponizhayushchego preobrazovaniya napryazheniya [PID-controller of the voltage buck converter]. *Molodoy uchenyy*, 2015, no 10, pp. 257–260 (in Russ.).

Oleg G. Reкутов

Researcher, Research Institute of Automation and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (TUSUR) 53, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: +7 (382-2) 55-61-96
Email: rekutov@niiam.tomsk.ru

Viktor M. Rulevskiy

Candidate of Engineering Sciences, Rector TUSUR 40, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 51-05-30
Email: rector@tusur.ru

Anton G. Yudin

Candidate of Engineering Sciences, Director of the Research Institute of Automation and Electromechanics of TUSUR (NII AEM TUSUR) 34, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034
Phone: +7-960-973-03-03
Email: yag@niiam.tomsk.ru

Alexander M. Malyshechenko

Doctor of Engineering Sciences, Professor Department of Automation and Robotics National Research Tomsk Polytechnic University 30, Lenin pr., Tomsk, Russia, 634050
Phone: +7 (382-2) 70-18-37
Email: mam@tpu.ru