

УДК. 621.311.6

Ю.А. Андреев, О.В. Бубнов, Ю.А. Шурыгин

## Нелинейный элемент для имитатора солнечных батарей

Предлагается схемное и конструктивное решение задачи масштабирования по току и напряжению нелинейного элемента для имитатора солнечных батарей с меньшими габаритами и улучшенными характеристиками по температурной стабильности.

**Ключевые слова:** солнечная батарея, фотоэлемент, нелинейный элемент, вольт-амперная характеристика, схема замещения, термостатирование, масштабирование.

**doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-135-138

Солнечная батарея (СБ) является основным источником энергии большинства космических аппаратов, поскольку необычные эксплуатационные условия (невесомость, глубокий вакуум, контрастные изменения температуры) не позволяют широко использовать в условиях космоса известные на Земле традиционные методы получения электричества. Для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую в СБ используется явление фотоэффекта в солнечных элементах на основе полупроводниковой кремниевой структуры с  $p-n$ -переходом, упрощенная эквивалентная схема замещения которой приведена на рис. 1, что определяет вид ее вольт-амперной характеристики (ВАХ) рис. 2 [1].

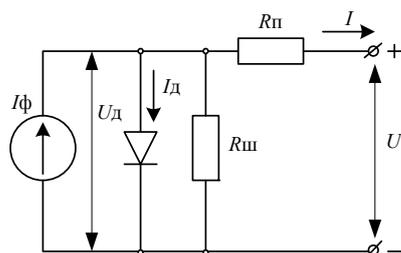


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения солнечной батареи:  $I_{\phi}$  – ток, генерируемый ячейкой фотоэлемента;  $U_d, I_d$  – напряжение и ток на диоде внутренней структуры СБ;  $R_n, R_{ш}$  – последовательное и шунтирующее сопротивление внутренней структуры СБ;  $I, U$  – выходной ток и напряжение ячейки СБ под нагрузкой

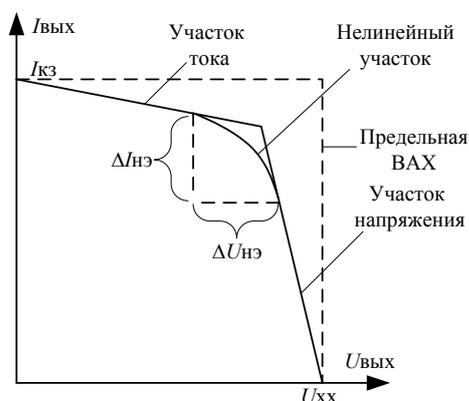


Рис. 2. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи

При проведении наземных испытаний систем электропитания космических аппаратов [2] используются имитаторы СБ (ИБС) для моделирования

влияния на ВАХ СБ различных параметров – типа и количества ячеек и блоков СБ, освещенности и направления света, частичного затенения, температуры и других условий, в которых может находиться космический аппарат. Нагрузка СБ, как правило, является динамической, что требует моделирования изменения нагрузки и ее типа (активная и реактивная), работы в режиме так называемого сброса-наброса нагрузки с заданной частотой. Таким образом в ИБС должны меняться многие параметры – ток, напряжение,  $R_n, R_{ш}$ , сопротивление и емкость нагрузки, частота и диапазон по току и напряжению сброса-наброса нагрузки.

ВАХ реальной СБ характеризуется существенной нелинейностью, но может хорошо аппроксимироваться с достаточной точностью линейными источниками на участках тока и напряжения, как показано на рис. 2; для реализации полной ВАХ, адекватной характеристике реальной СБ, на переходе от токового участка к участку напряжения обычно используется нелинейный элемент (НЭ), состоящий из параллельно-последовательно включенных диодов, резисторов и переключателя, управляющего числом диодов, включенных в цепь в зависимости от задаваемых режимов работы СБ – различных диапазонов работы его по току и напряжению. Подобные нелинейные элементы описываются в работе [3], патентах и полезных моделях [4–7]. На рис. 3 показан пример реализации такого блока из ячеек нелинейных элементов со ступенчатым масштабированием тока и напряжения в реальном ИБС, разработанном в НИИАЭМ ТУСУРа, г. Томска.

Девять ячеек НЭ представляют собой матрицу. Контакты реле  $K1 \dots K3$  подключают столбцы матрицы для кратного увеличения тока, а контакты реле  $K4, K5$  подключают строки матрицы для кратного увеличения напряжения. На рис. 4 показано выполнение элементарной ячейки нелинейного элемента, входящего в матрицу, представленную на рис. 3. Как правило, такие ячейки выполняются на напряжение 0–5 В и ток 0–0,5 А. Представленная матрица позволяет при моделировании изменять ток от 0,5 до 1,5 А и напряжение от 5 до 15 В.

Недостатком такой конструкции из параллельного и последовательного соединения множества ячеек нелинейных элементов является существенное увеличение габаритов прибора, когда для реализа-

ции ИБС требуется матрица НЭ с большей размерностью и большим количеством плат. Некоторое уменьшение габаритов возможно при применении диодов в планарном исполнении.

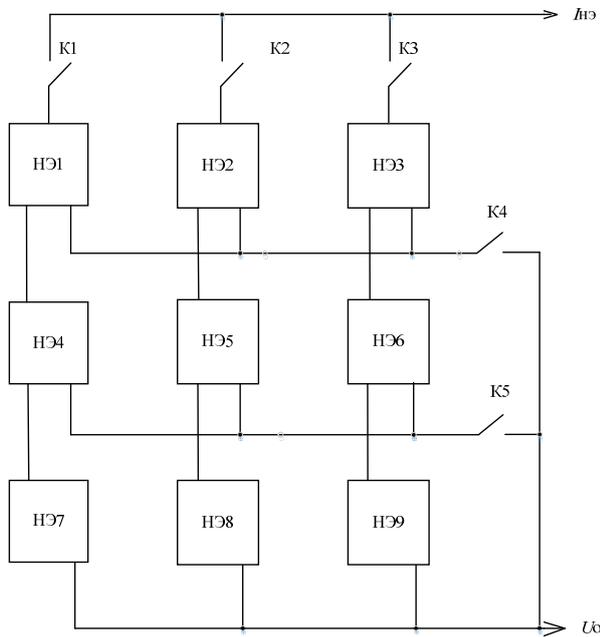


Рис. 3. Пример реализации матрицы из ячеек нелинейных элементов

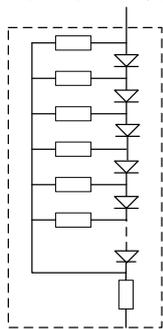


Рис. 4. Ячейка нелинейного элемента

Однако уменьшению габаритов препятствует неконтролируемая зависимость ВАХ диодов от температуры, что заставляет разработчиков снабжать каждый диод площадкой на печатной плате для отвода тепла от саморазогрева протекающим через диод током. Однако при этом все равно остается влияние температуры окружающей среды. У самых лучших диодов зависимость тока от температуры составляет не менее (0,5–1)% на градус Цельсия, что недопустимо много для точного прибора. Термостатирование же довольно большой части прибора с матрицей таких нелинейных элементов приводит к его существенному удорожанию и дальнейшему увеличению массогабаритных показателей.

Данная работа посвящена решению проблемы масштабирования по току и напряжению с использованием всего лишь одной ячейки НЭ для уменьшения массы и габаритов результирующего НЭ, применяемого при реализации ИБС. Блок-схема такого НЭ показана на рис. 5.

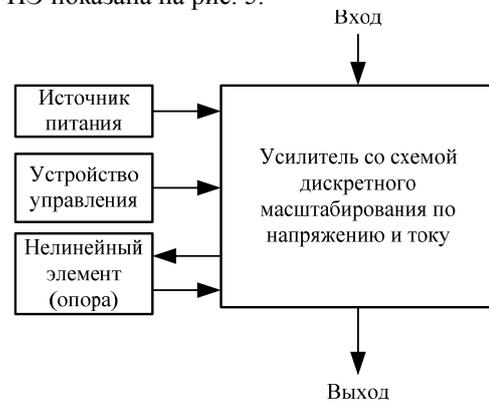


Рис. 5. Блок-схема нелинейного элемента

Кроме того, вследствие уменьшения габаритов попутно решается задача исключения зависимости ВАХ НЭ от температуры. Упрощенная электрическая схема НЭ приведена на рис. 6.

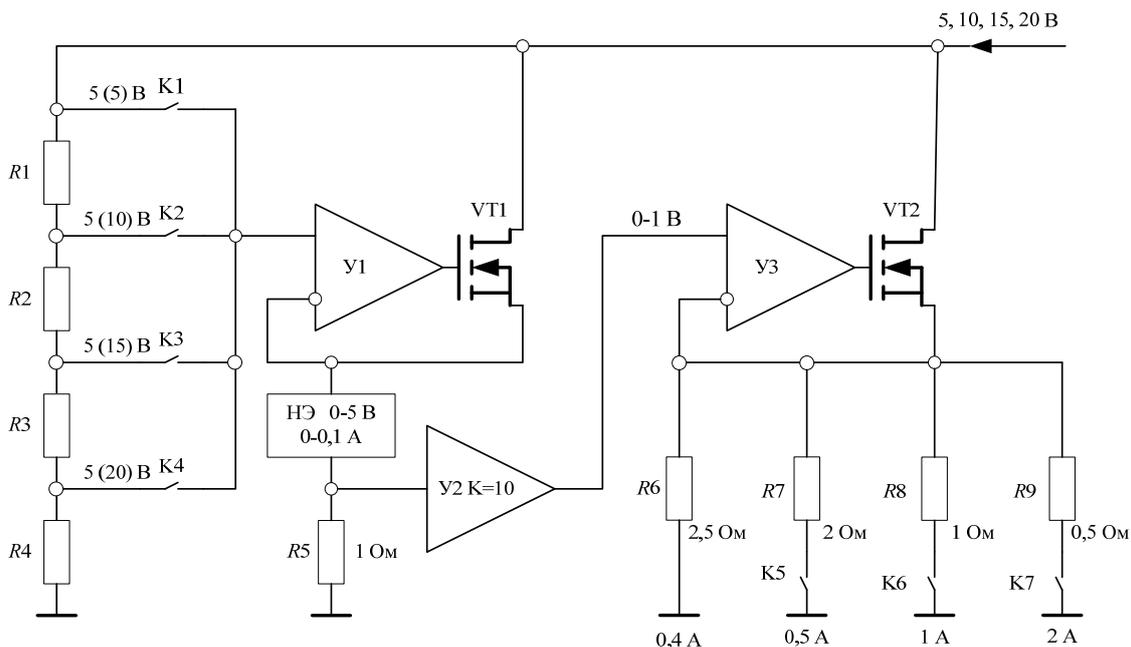


Рис. 6. Упрощенная электрическая схема нелинейного элемента

Масштабирование по напряжению и току производится дискретно так же, как и в схеме, приведенной на рис. 3. Масштабирование по напряжению производится на высокоомном делителе из резисторов  $R1-R4$ . При изменении диапазона напряжения на входе НЭ (от нуля до 5, 10, 15, 20 В), на выходе делителя – прямом входе усилителя У1 (питание У1–У3 производится от отдельного гальванически изолированного источника питания и на схеме не показано), с помощью ключей поддерживается постоянный диапазон от нуля до 5 В. Этот диапазон выбран минимальным с некоторым запасом, необходимым для нормальной работы MOSFET повторителя напряжения-усилителя тока на операционном усилителе (ОУ) У1 и транзисторе VT1.

С выхода усилителя напряжение подается на ячейку НЭ, значение протекающего тока которого снимается в виде напряжения с шунта на резисторе  $R5$ . Такое малое значение тока, соответствующее максимальному напряжению на входе, равное 0,1 А, выбрано из расчета минимального влияния его на саморазогрев диодов, составляющих ячейку НЭ. Далее это напряжение усиливается на ОУ У2 до диапазона 0–1 В и подается на вход усилителя-стабилизатора тока на ОУ У3 и транзисторе VT2. В цепи обратной связи усилителя – на выходе НЭ установлены мощные прецизионные резисторы с низким ТКС, коммутируемые ключами  $K5-K7$ . Резистор  $R6$  добавляет ток, равный 0,4 А, к току ячейки НЭ,

что в сумме составляет 0,5 А, с которого начинается работа НЭ при разомкнутых ключах  $K5-K7$ . Остальные резисторы  $R7-R9$ , сопротивление которых уменьшается кратно два в целой степени, коммутируются ключами, увеличивая последовательно ток НЭ на 0,5 до 4 А при всех замкнутых ключах  $K5-K7$ .

С помощью рассмотренного варианта схемы описан общий принцип построения НЭ и выбора параметров элементов. При реализации этого принципа в реальном ИБС, естественно, можно изменить число дискрет делителя по напряжению, шаг и количество дискрет по току. В качестве ключей можно использовать MOSFET-транзисторы с малым значением  $R_{ds(on)}$ , особенно в коммутаторе выходного тока. ОУ необходимо использовать высокочастотные, чтобы получить требуемую частотную характеристику НЭ. В данной схеме использованы ОУ AD826 с частотой единичного усиления 50 МГц. Транзисторы VT1 и VT2 применены типа IRFZ48N с типичным значением  $V_{gs(th)} = 3$  В.

Для исключения влияния саморазогрева и окружающей температуры, с целью повышения точности, ячейка НЭ выполнена на печатной плате с алюминиевым теплоотводящим основанием и расположена на термостате, который выполнен на элементе Пельтье, установленном на радиаторе. Общий принцип конструкции для термостатирования приведен на рис. 7 и пояснений не требует.

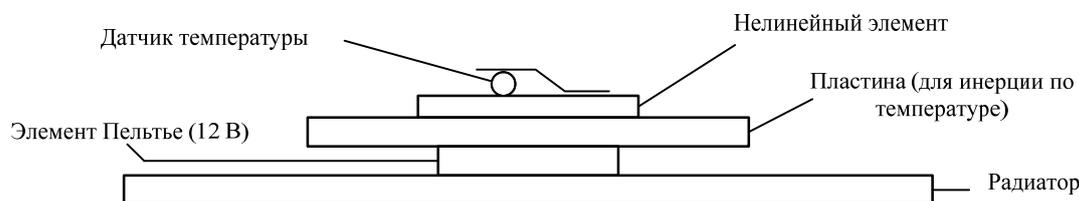


Рис. 7. Общая конструкция для термостатирования ячейки нелинейного элемента

Испытания описанной схемы устройства НЭ в составе имитатора солнечной батареи показали хорошие характеристики температурной стабильности, повторяемости ВАХ при сбросе и набросе нагрузки.

#### Литература

1. Кремзуков Ю.А. Исследование динамических характеристик имитатора солнечной батареи ИБС-300/25 // Сб. тр. Том. политехн. ун-та. – Томск, 2008. – С. 131–135.
2. Бубнов О.В. Автоматизированное рабочее место отработки и испытаний энергопреобразующей аппаратуры системы электропитания космического аппарата / О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, В.А. Пчельников, В.М. Рулевский // Доклады ТУСУР. – 2017. – № 3, т. 20. – С. 35–39.
3. Загаевский Т.Н. Промышленная электроника / Т.Н. Загаевский, С.А. Мальзахер, А.Ю. Квевцинский. – М.: изд. Энергия, 1976. – 158 с.
4. Патент США № US3325723 А, кл. 323.8. VOLTAGE – CURRENT CHARACTERISTIC SIMULATOR / Jerome H Grayson (США). – Заявл. 27.11.1964 г.; опубл. 13.06.1967. – 3 с.
5. Пат. Рос. Федерация № 50014, МПК G05F. Имитатор батареи солнечной для наземной отработки и испытаний систем электропитания космических аппаратов на

основе импульсных преобразователей / В.Н. Мишин, Ю.А. Кремзуков. – Бюл. №34, 2005.

6. Пат. Рос. Федерация № 73102, МПК G06G7/63. Имитатор аккумуляторной батареи для испытания систем электроснабжения космических аппаратов / В.Н. Мишин, О.В. Бубнов, В.А. Пчельников, Г.А. Ракигин, Н.Н. Цебенко. – № 2 008 100 435; заявл. 09.01.08; опубл. 10.05.08. Бюл. № 13. – 2 с.

7. Пат. Рос. Федерация № 77695, МПК G05F. Устройство имитации вольт-амперной характеристики солнечной батареи / В.Н. Мишин, В.А. Пчельников, О.В. Бубнов, Ю.А. Кремзуков, С.А. Кайсанов. – Бюл. №30, 2008.

#### Андреев Юрий Александрович

Зав. отд. 18 Научно-исследовательского института автоматики и электромеханики  
Томского государственного ун-та систем управления  
и радиоэлектроники (НИИАЭМ ТУСУРа)  
Белинского ул., д. 35, г. Томск, Россия, 634034  
Тел. +7-903-914-93-44  
Эл. почта: niaem18@yandex.ru

**Бубнов Олег Викторович**

Зав. отд. 14 НИИАЭМ ТУСУР  
Белинского ул., д.35, г. Томск, Россия, 634034  
Тел.: +7 (382-2) 56-00-59  
Эл. почта: bubnov@niiam.tomsk.ru

**Шурыгин Юрий Алексеевич**

Д-р техн. наук, профессор, первый проректор ТУСУР  
Ленина пр-т, д. 40, г. Томск, Россия, 634050  
Тел.: +7 (382-2) 51-05-30  
Эл. почта: office@tusur.ru

Andreev Y.A., Bubnov O.V., Shurygin Y.A.

**Nonlinear element for solar cell simulator**

A schematic and constructive solution to the problem of current and voltage scaling of a nonlinear element for a simulator of solar cells with smaller dimensions and improved characteristics in terms of temperature stability is proposed.

**Keywords:** photocell, solar cells, nonlinear element, current-voltage characteristic, thermostating, substitution circuit, scaling.

**Doi:** 10.21293/1818-0442-2018-21-1-135-138

*References*

1. Kremzukov Yu.A. *Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik imitatora solnechnoi batarei IBS-300/25* [The study of the dynamic characteristics of a solar battery simulator IBS-300/25] // Collection of works of Tomsk Polytechnic University. Tomsk, 2008, pp. 131–135.

2. Bubnov O.V. Avtomatizirovannoe rabochee mesto otrabotki i ispytaniy energopreobrazuiushchei apparatury sistemy elektropitanii kosmicheskogo apparata [Automated Control System of Power-conditioning Equipment] / O.V. Bubnov, Y.A. Kremzukov, V.A. Pchel'nikov, Y.A. Shurygin // *Trudy TUSUR* [Proceedings of TUSUR University], 2017, vol. 20, no. 3, pp. 35–39

3. Zagaevskii T.N. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial Electronics] / T.N. Zagaevskii, S.A. Malzacher, A.Y. Kvecinskii. M., Energiya, 1976, p. 158.

4. Jerome H. Grayson (USA). Voltage-current characteristic simulator. Patent USA US3325723 A, kl. 323.8., 1967. 3 p.

5. Mishin V.N., Kremzukov Yu.A. *Imitator batarei solnechnoi dlia nazemnoi otrabotki i ispytaniy sistem elektropitanii kosmicheskikh apparatov na osnove impulsnykh preobrazovatelei* [Simulator of a solar battery for ground testing and testing of spacecraft power supply systems based on pulse converters]. Patent RF no. 50014, IPC G05F. 2005.

6. Mishin V.N., Bubnov O.V., Pchel'nikov V.A., Rakitin G.A., Chebenko N.N. *Imitator akkumuliruyemykh batarei dlia ispytaniy sistem elektrosnabzheniya kosmicheskikh apparatov* [Simulator of a solar battery for ground testing and testing of spacecraft power supply systems based on pulse converters]. Patent RF no. 73102, IPC G06G7/63, 2008. 2 p.

7. *Ustroistvo imitatsii voltamperno kharakteristiki solnechnoi batarei* [Device for simulating the volt-ampere characteristics of a solar battery] / Mishin V.N., Pchel'nikov V.A., Bubnov O.V., Kremzukov Yu.A., Kaisanov S.A. Patent RF, no. 77695, IPC G05F. 2008.

**Yury A. Andreev**

Head of department 18 Research Institute of Automation and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NIIAEM TUSUR)  
34, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone.: +7-903-914-9344  
Email: niiam18@yandex.ru

**Oleg V. Bubnov**

Head of department 14 Research Institute of Automation and Electromechanics of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (NIIAEM TUSUR)  
34, Belinsky st., Tomsk, Russia, 634034  
Phone.: +7 (382-2) 56-00-59  
Email: bubnov@niiam.tomsk.ru

**Yury A. Shurygin**

First Vice-Rector TUSUR  
40, Lenin Av., Tomsk, Russia, 634050  
Phone: +7 (382-2) 51-05-30  
Email: office@tusur.ru