

УДК 621.3.078.4

А.В. Шкуратов, А.В. Петровский

Формирователь аналоговых вольт-амперных характеристик для имитатора солнечной батареи

Предлагается формирователь опорных вольт-амперных характеристик для имитаторов солнечных батарей на основе аппроксимации прямой ветви $p-n$ -перехода. Приведены результаты моделирования, представлены доверительные интервалы переменных, при которых обеспечивается оптимальная погрешность воспроизведения вольт-амперной характеристики. Приведенный метод позволяет создавать надежные имитаторы солнечных батарей с погрешностью воспроизведения точки максимального отбора мощности не более 10%.

Ключевые слова: имитатор, солнечная батарея, вольт-амперная характеристика.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-93-97

Современные тенденции увеличения мощности бортового электрооборудования (до 12–15 кВт) и срока активного существования (до 10–15 лет) космических аппаратов привели к повышению требований, предъявляемых к системам электропитания [1, 2]. Исходя из этого, необходим комплекс решений при проектировании и отработке энергопреобразующей аппаратуры. Для достижения поставленных задач используется специализированное оборудование, которое обладает высокой надежностью и удовлетворяет современным требованиям по эффективности и электромагнитной совместимости. Вместе с тем для полной физической имитации технических характеристик бортовых источников энергии нужны большие затраты средств. Например, применение солнечных панелей в качестве первичных генераторов электрической энергии в наземных условиях требует наличия больших помещений и специальных стендовых устройств, обеспечивающих имитацию заданных условий освещенности и температур.

В связи с этим наряду с физическим моделированием применяется имитационно-физическое моделирование, при котором отдельные компоненты заменяются эквивалентами (имитаторами). При наземных испытаниях системы электропитания космических аппаратов применяются имитаторы солнечных батарей (ИСБ). Для повышения качества наземных испытаний они должны с требуемой точностью воспроизводить вольт-амперные характеристики (ВАХ) реальных солнечных батарей (СБ). Основным элементом ИСБ является формирователь, который предназначен для синтеза опорных ВАХ при заданных значениях температуры, освещенности и т.д.

Различают две техники генерирования опорных ВАХ: аналоговую [3–5] и цифровую [6–8]. Имитаторы с цифровым синтезом позволяют воспроизводить ВАХ с высокой точностью; также они обладают хорошей температурной стабильностью и гибкостью управления. Основным недостатком цифрового синтеза опорных ВАХ являются необходимость использования больших вычислительных ресурсов.

Имитаторы на аналоговой основе известны простотой и низким ценовым исполнением. Их ВАХ могут быть получены несколькими способами:

– с помощью фотопреобразователей малой мощности с источником света [9]. Данный метод позволяет имитировать солнечные батареи в реальном времени, самый точный из других методов, что обусловлено применением реальных солнечных панелей. Влияние внешних факторов (освещенность, температура) формируется с помощью стендов. Несмотря на это, он наиболее затратный и труднореализуемый;

– использованием светодиода и фотодиода [10, 11]. Данный метод гибок и служит для имитирования состояния затенения, однако его реализация связана с трудностями, вызванными стабильностью генерирования ВАХ и ее управлением;

– применением параметрических уравнений полупроводниковых компонентов [12–14]. ИСБ, основанные на параметрических уравнениях полупроводниковых компонентов, позволяют создавать относительно простые генераторы опорных ВАХ с ограниченным набором кривых.

Предложен формирователь опорных ВАХ для ИСБ, основанный на аппроксимации прямых ветвей $p-n$ -переходов матрицы полупроводниковых диодов, позволяющий формировать ВАХ при широком диапазоне изменения их параметров.

Описание и модель управления

ВАХ СБ можно разделить на три участка (рис. 1): режим стабилизации тока (AB), нелинейный участок (BC), режим стабилизации напряжения (CD). Предлагаемая структура формирователя ВАХ СБ (рис. 2) состоит из масштабирующего усилителя, диодной матрицы, формирователя наклона для участка CD (коэффициент наклона K_2) и устройства токовой отсечки. Формирователь ВАХ рассчитан для работы по схеме стабилизатора тока с функциональной связью по напряжению. Выходное напряжение ИСБ поступает на масштабирующий усилитель с коэффициентом усиления K_1 . Формирователь наклона предназначен для имитации последовательного сопротивления СБ. Устройство токовой отсечки разделяет режимы работы формирователя и имеет связь с диодной матрицей. На выходе формирователя ВАХ происходит вычитание сигнала с выходов диодной матрицы (с коэффициентом K_3) и выходного сигнала устройства токовой отсечки из опорного сигнала $I_{к.з.}$, пропорционального току короткого замыкания.

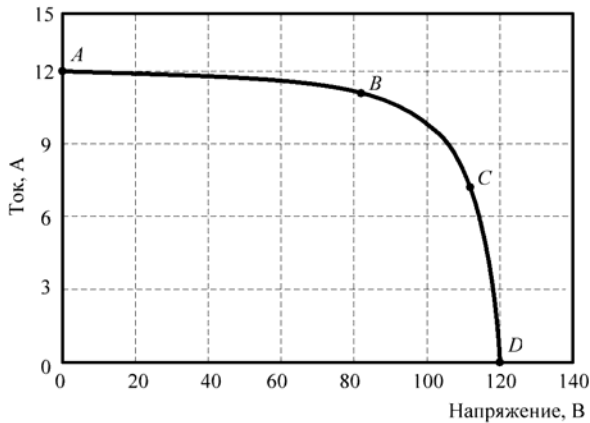


Рис. 1. Вольт-амперная характеристика солнечной батареи

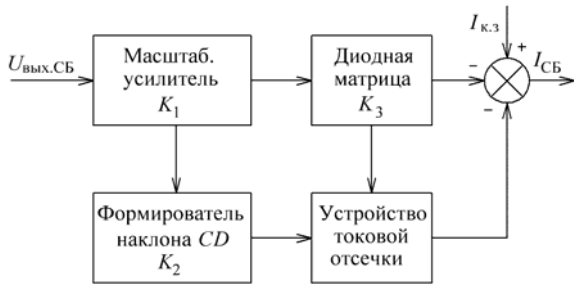


Рис. 2. Структурная схема предложенного формирователя ВАХ

Согласно рис. 2 выходной ток СБ можно определить по выражению

$$I_{СБ} = I_{к.з} - K_2 K_1 U_{\text{вых.СБ}} - K_3 (K_1 U_{\text{вых.СБ}} - I_{sh}), \quad (1)$$

где I_{sh} – ток через полупроводниковую диодную матрицу, определяемый из уравнения Шокли для идеального диода.

Приведенная формула неудобна для расчета получившейся ВАХ СБ. Реально для задания ВАХ СБ используются три параметра:

- ток короткого замыкания $I_{к.з.}$;
- напряжение холостого хода $U_{х.х.}$;
- максимальная мощность СБ ($I_{\text{опт.}}$, $U_{\text{опт.}}$).

Кроме этого, реальная ВАХ прямо смещенного перехода полупроводникового диода может отличаться от теоретической, а параметры диодов даже одной партии могут быть различными, при использовании диодной матрицы количество $p-n$ -переходов возрастает и увеличивается ошибка общего характеристического уравнения.

Результаты моделирования (рис. 3) показали, что ВАХ с равными наклонами (коэффициентами K_2 , K_3) при использовании равного количества диодов в схеме диодной матрицы на участке источника тока и участке источника напряжения лежат на одной прямой с коэффициентами, пропорциональными K_2 и K_3 .

Таким образом, точки максимальной мощности для серий ВАХ лежат на прямой a (рис. 3), описанной выражением

$$I = \frac{K_3 \Delta I_{к.з} - K_2 K_3 \Delta U_{х.х}}{K_3 \Delta U_{х.х} - \Delta I_{к.з}} U + I_{к.з.1} - K_2 \frac{I_{к.з.1} - K_3 U_{х.х.1}}{K_2 - K_3}$$

$$\frac{I_{к.з.1} - K_3 U_{х.х.1}}{K_2 - K_3}, \quad (2)$$

где $\Delta I_{к.з} = I_{к.з.2} - I_{к.з.1}$, $\Delta U_{х.х} = U_{х.х.2} - U_{х.х.1}$, $I_{к.з.1}$, $I_{к.з.2}$, $U_{х.х.1}$, $U_{х.х.2}$ – токи короткого замыкания и напряжения холостого хода калибровочных кривых 1 и 2 соответственно.

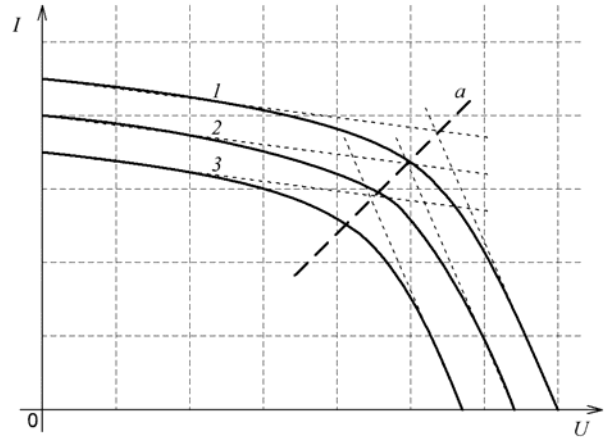


Рис. 3. Семейство ВАХ с $K_{2,1} = K_{2,2} = K_{2,3}$, $K_{3,1} = K_{3,2} = K_{3,3}$

Экспериментальным путем находится положение оптимальной рабочей точки калибровочных ВАХ и, соответственно, исходя из выражения (2), вытекающего из того, что точки лежат на одной прямой, можно найти соотношение коэффициентов K_2 и K_3 из уравнений

$$\begin{cases} \frac{I_{\text{опт(к)}}}{I_{к.з(к)}} = \frac{I_{\text{опт(р)}}}{I_{к.з(р)}}, \\ \frac{U_{\text{опт(к)}}}{U_{х.х(к)}} = \frac{U_{\text{опт(р)}}}{U_{х.х(р)}}, \end{cases}$$

где $X_{(к)}$ – параметры кривых при калибровке; $X_{(р)}$ – заданные параметры ВАХ.

Моделирование

Для подтверждения теоретических расчетов проведено моделирование формирователя ВАХ в статическом режиме по схеме управляемого источника тока с функциональной связью по напряжению [13].

Ошибка воспроизведения серии ВАХ (рис. 4) рассчитывается по формуле

$$SSE = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_{\text{опт.эксп}(i)}}{P_{\text{опт.теор}(i)}} \right)^2}}{n},$$

где $P_{\text{опт.эксп}(i)}$ – экспериментальное значение мощности в оптимальной рабочей точке i -й ВАХ; $P_{\text{опт.теор}(i)}$ – теоретическое значение мощности в оптимальной рабочей точке i -й ВАХ; n – количество экспериментально снятых ВАХ.

Согласно рис. 4 минимальная ошибка воспроизведения набора ВАХ, выраженных математической моделью (3), достигается при точке калибровки с относительными координатами $(U_{\text{опт.}}/U_{х.х.}, I_{\text{опт.}}/I_{к.з.}) = (0,8; 0,85)$ при шагах калибровки по оси тока и оси напряжения не более $0,05 U_{\text{опт.}}/U_{х.х.}$ и $0,05 I_{\text{опт.}}/I_{к.з.}$ соответственно.

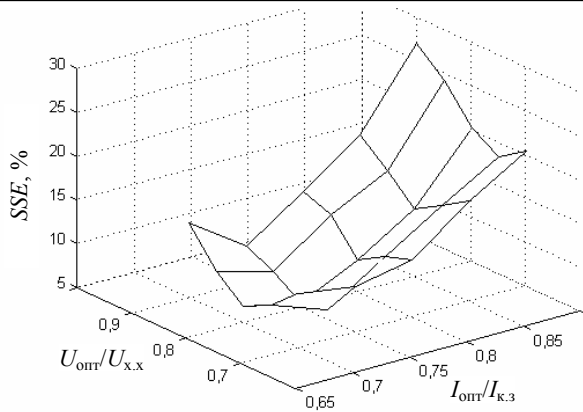


Рис. 4. Среднеквадратичная ошибка воспроизведения серий ВАХ при различных точках калибровки

$$I(U) = I_{к.3}(1 - e^{-A}), \tag{3}$$

где $A = \left(\frac{U}{U_{x.x}} - 1 \right) \ln \left(1 - \frac{I_{опт}}{I_{к.3}} \right) / \left(\frac{U_{опт}}{U_{x.x}} - 1 \right)$;

$$U(I) = U_{x.x} \left(\frac{\left(\frac{U_{опт}}{U_{x.x}} - 1 \right) \cdot \ln \left(1 - \frac{I}{I_{к.3}} \right)}{\ln \left(1 - \frac{I_{опт}}{I_{к.3}} \right)} + 1 \right). \tag{4}$$

На графике относительной погрешности воспроизведения оптимальной рабочей точки набора ВАХ (рис. 5, а) при изменении напряжения и тока в

точке максимального отбора мощности в диапазоне $[0,6U_{x.x} - 0,95U_{x.x}]$ и $[0,6I_{к.3} - 0,95I_{к.3}]$ соответственно видно, что погрешность достигает минимума при положении оптимальной рабочей точки вблизи зоны калибровки. В области, удаленной от точки калибровки на шаги $0,05U_{опт}/U_{x.x}$ и $0,05I_{опт}/I_{к.3}$, она не превышает 2%, на шаги $0,1U_{опт}/U_{x.x}$ и $0,1I_{опт}/I_{к.3}$ – 4%, на шаги $0,15U_{опт}/U_{x.x}$ и $0,15I_{опт}/I_{к.3}$ – 7%. Максимальные отклонения тока (рис. 5, б) и напряжения (рис. 5, в) при воспроизведении набора ВАХ относительно идеальной вычисляются по формулам (3) и (4) соответственно.

Минимальная погрешность воспроизведения на участке стабилизации тока достигается на сериях ВАХ с параметром $U_{опт}/U_{x.x} = 0,75$, а минимальная погрешность воспроизведения на участке стабилизации напряжения – в сериях ВАХ с параметром $I_{опт}/I_{к.3} = 0,7$.

На графике зависимости погрешности воспроизведения оптимальной рабочей точки от температуры $p-n$ -перехода в диапазоне от 273 до 333 К (рис. 6) минимальная погрешность достигается в точке калибровки (297 К) и изменяется по параболическому закону при изменении температуры. Уменьшить температурный уход формирователя ВАХ можно несколькими методами: калибровкой на узких температурных диапазонах, термостабилизацией цепи обратной связи либо введением компенсирующих коэффициентов.

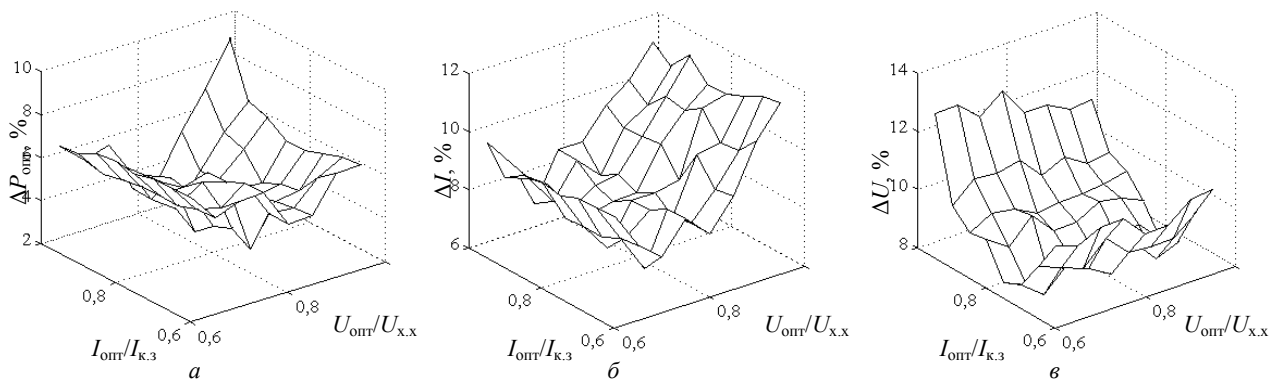


Рис. 5. Относительная погрешность воспроизведения: а – оптимальной мощности; б – тока в режиме максимального отбора мощности; в – напряжения в режиме максимального отбора мощности

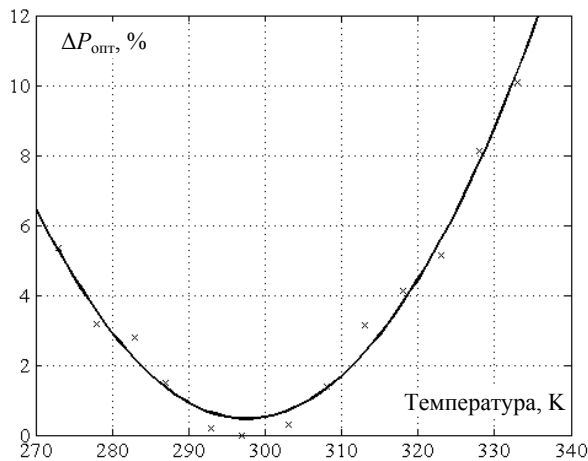


Рис. 6. Погрешность воспроизведения ВАХ СБ при изменении температуры

Заключение

Рассмотрен формирователь вольт-амперных характеристик солнечной батареи на аппроксимации прямых ветвей $p-n$ -переходов матрицы полупроводниковых диодов.

Результаты моделирования показали ошибку воспроизведения точки максимального отбора мощности не более 10% при изменении положения точки максимального отбора мощности на 30% по шкале тока и напряжения от точки калибровки. К недостаткам данной структуры относятся большие отклонения воспроизводимой ВАХ на участках стабилизации тока и напряжения.

Литература

1. Кудряшов В.С. Современное состояние и перспективы развития бортовых СЭП связанных ИСЗ / В.С. Куд-

ряшов, В.В. Хартов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов НПЦ «Полус». – Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь», 2001. – С. 17–27.

2. Чечин А.В. Анализ технических требований к системам электропитания автоматических космических аппаратов / А.В. Чечин, В.И. Пушкин, А.С. Гуртов, А.Н. Филатов // Электронные и электромеханические системы и устройства: сб. науч. трудов НПЦ «Полус». – Томск: МГП «РАСКО» при изд-ве «Радио и связь», 2001. – С. 59–66.

3. Design and implementation of a solar array simulator / W. Kui, L. Yongdong, R. Jianye, S. Min // Proc. ICEMS Int. Conf. – 2008. – P. 2633–2636.

4. Wandhare R.G. A low cost light weight and accurate photovoltaic emulator / R.G. Wandhare, V. Agarwal // 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference. – 2011. – P. 1887–1892.

5. Koran A. High Efficiency photovoltaic source simulator with fast response time for solar power conditioning system evaluation / A. Koran, T. LaBella, J. Lai // Power Electronics IEEE Transactions. – 2014. – Vol. 29, № 3. – P. 1285–1297.

6. Koutroulis E. Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules / E. Koutroulis, K. Kalaitzakis, V. Tzitzilonis // Proc. IEEE RSP Conf. – 2006. – P. 200–208.

7. Singh A. Design and implementation of a programmable solar photovoltaic simulator / A. Singh, A.R. Hota, A. Patra // Proc. IEEE ICPES Conf. – 2010. – P. 1–5.

8. Park M. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS / M. Park, I. Yu // IEEE Trans. Energy Convers. – 2004. – Vol. 19. – P. 164–169.

9. Midtgard O.M. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics // Proc. Eur. Conf. Power Electron Appl. – 2007. – P. 1–10.

10. Nagayoshi H. Characterization of the module/array simulator using I-V magnifier circuit of a pn photo-sensor // Proc. 3rd World Conf. on Photovolt. Energy Conv. – 2003. – Vol. 2. – P. 2023–2026.

11. Esen V. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review / V. Esen, S. Saglam, B. Oral // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 77. – P. 1024–1250.

12. Design of a photovoltaic simulator with a novel reference signal generator and two-stage LC output filter / A. Koran, K. Sano, R. Kim, J. Lai // Power Electronics IEEE Transactions. – 2010. – Vol. 25, № 5. – P. 1331–1338.

13. Nagayoshi H. Partial shading effect emulation using multismall scale module simulator units / H. Nagayoshi, M. Atesh // Proc. 31st IEEE Photovolt. Spec. Conf. – 2005. – P. 1710–1713.

14. Ldloyd S. Design and construction of a modular electronic photovoltaic simulator / S. Ldloyd, G. Smith, D. Infield // Proc. Inst. Electr. Eng. Power Electr. Variable Speed Drives Conf. – 2000. – P. 120–123.

15. Мизрах Е.А. О синтезе адмитансных частотных характеристик имитатора солнечной батареи / Е.А. Мизрах, А.С. Сидоров, Р.Б. Балакирев // Вестн. Сиб. гос. аэрокосмич. ун-та им. М.Ф. Решетнева. – Красноярск, 2008. – Вып. 6. – С. 24–28.

Шкуратов Антон Валерьевич

Инженер-конструктор АО «НПЦ «Полус»
Кирова пр., д. 56в, г. Томск, Россия, 634041
Тел.: +7-923-415-42-61
Эл. почта: kft_veritas@mail.ru

Петровский Андрей Валерьевич

Инженер-программист АО «НПЦ «Полус»
Кирова пр., д. 56в, г. Томск, Россия, 634041
Тел.: +7-913-889-96-80
Эл. почта: avp168@mail.ru

Shkuratov A.V., Petrovsky A.V.

Analog base IV-former for Solar Array Simulator

A shaper of the reference volt-ampere characteristics for solar cell simulators based on the approximation of the direct branch of the p – n junction is proposed. The simulation results are presented, the confidence intervals of the variables are presented, at which the optimum error of reproduction of the current-voltage characteristic is ensured. Proposed method allows creating reliable solar array simulators with maximum power point error less than 10%.

Keywords: simulator, solar battery, current-voltage characteristic.

doi: 10.21293/1818-0442-2018-21-3-93-97

References

1. Kudryashov V.S., Khartov V.V. Current state and development prospects airborne SPS grid connected AES. *Electronic and electromechanical systems and devices*: Proc. of scient. papers SRC «Polus», Tomsk, 2001, pp. 17–27 (In Russ.).

2. Chechin A.V., Pushkin V.I., Gurtov A.S., Filatov A.N. Technical requirements analysis by spacecrafts power systems *Electronic and electromechanical systems and devices*: Proc. of scient. papers SRC «Polus», Tomsk, 2001, pp. 59–66 (In Russ.).

3. Kui W., Yongdong L., Jianye R., Min S. Design and implementation of a solar array simulator. Proc. ICEMS Int. Conf., 2008, pp. 2633–2636.

4. Wandhare R.G., Agarwal V. A low cost light weight and accurate photovoltaic emulator. 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2011, pp. 1887–1892.

5. Koran A., LaBella T., Lai J. High Efficiency photovoltaic source simulator with fast response time for solar power conditioning system evaluation. *Power Electronics IEEE Transactions*, 2014, vol. 29, no. 3, pp. 1285–1297.

6. Koutroulis E., Kalaitzakis K., Tzitzilonis V. Development of an FPGA-based system for real-time simulation of photovoltaic modules. Proc. IEEE RSP Conf., 2006, pp. 200–208.

7. Singh A., Hota A. R., Patra A. Design and implementation of a programmable solar photovoltaic simulator. Proc. IEEE ICPES Conf., 2010, pp. 1–5.

8. Park M., Yu I. A novel real-time simulation technique of photovoltaic generation systems using RTDS. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2004, vol. 19, pp. 164–169.

9. Midtgard O. M. A simple photovoltaic simulator for testing of power electronics. Proc. Eur. Conf. Power Electron Appl., 2007, pp. 1–10.

10. Nagayoshi H. Characterization of the module/array simulator using I-V magnifier circuit of a pn photo-sensor. Proc. 3rd World Conf. on Photovolt. Energy Conv., 2003, vol. 2, pp. 2023–2026.

11. Esen V., Saglam S., Oral B. Light sources of solar simulators for photovoltaic devices: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 77, pp. 1024–1250.

12. Koran A., Sano K., Kim R., Lai J. Design of a photovoltaic simulator with a novel reference signal generator and two-stage LC output filter. *Power Electronics IEEE Transactions*, 2010, vol. 25, no. 5, pp. 1331–1338.

13. Nagayoshi H., Atesh M. Partial shading effect emulation using multismall scale module simulator units. Proc. 31st IEEE Photovolt. Spec. Conf., 2005, pp. 1710–1713.

14. Ldloyd S., Smith G., Infield D. Design and construction of a modular electronic photovoltaic simulator. Proc. Inst. Electr. Eng. Power Electr. Variable Speed Drives Conf., 2000, pp. 120–123.

15. Mizrakh E.A., Sidorov A.S., Balakirev R.B. Upon the photovoltaic array simulator admittance-frequency response synthesis. *Scientific Journal of Science and Technology*. Krasnoyarsk, 2008, vol. 6, pp. 24–28 (In Russ.).

Anton V. Shkuratov

Engineer, SRC «Polus»

56v, Kirova pr., Tomsk, Russia, 634041

Phone: +7-923-415-42-61

Email: kft_veritas@mail.ru

Andrew V. Petrovsky

Engineer, SRC «Polus»

56v, Kirova pr., Tomsk, Russia, 634041

Phone: +7-913-889-96-80

Email: avp168@mail.ru