

УДК 681.333 (088.8)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ОСНОВНЫХ УСТРОЙСТВ И ВНЕШНИХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА СТАТИЧЕСКУЮ ТОЧНОСТЬ ИМИТАТОРОВ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Е. А. Мизрах, Н. В. Штабель

Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М. Ф. Решетнева  
Россия, 660014, Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31  
E-mail: shtabnik@gmail.com

*Проводится анализ статической точности имитаторов солнечных батарей двух структур: на основе стабилизатора тока с функциональной обратной связью по напряжению и на основе стабилизатора напряжения с функциональной обратной связью по току. Рассмотрено влияние вариаций параметров устройств на статические ошибки имитаторов, предложены способы повышения точности. Даны рекомендации по оптимальному выбору структуры имитатора с точки зрения минимальной ошибки. Проанализирован вклад вариации параметров каждого из устройств имитаторов в общую ошибку и рассмотрены устройства, к точности которых предъявляются повышенные требования, такие как функциональный преобразователь и измеритель тока. Проведено сравнение влияния методической и вариационной ошибок на точность имитаторов.*

*Ключевые слова:* имитатор солнечных батарей, точность, первичный источник электроэнергии, испытание, функциональный преобразователь.

## RESEARCH OF PARAMETERS VARIATIONS IMPACT ON THE STATIC ACCURACY OF SOLAR ARRAY SIMULATOR

E. A. Mizrah, N. V. Shtabel

Siberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev  
31 "Krasnoyarskiy Rabochiy" prosp., Krasnoyarsk, 660014, Russia. E-mail: shtabnik@gmail.com

*The authors analyze the static accuracy of two types of solar array simulators: based on voltage regulator with current functional feedback and based on current regulator with voltage functional feedback. Parameters and signals variations impact on the static error of simulators is considered as well. The authors suggested the methods of improving the simulator accuracy and give recommendations for optimal selection of solar array simulator structure to achieve minimal error. The impact of parameter variations of solar array simulator devices on the entire error is shown. Along with it the authors consider the devices which meet the exclusive demands for accuracy, such as functional generator and current sensor. The comparison between the impact of systematic error and random error on the solar array simulator accuracy is drawn as well.*

*Keywords:* solar array simulator, accuracy, primary power source, testing, functional generator.

При испытаниях энергопреобразующей аппаратуры космических аппаратов в настоящее время широко применяются имитаторы солнечных батарей (ИБС). При этом качество воспроизведения ВАХ и переходных процессов солнечной батареи является одной из наиболее важных характеристик ИБС, напрямую влияющих на качество испытаний. Точность воспроизведения ВАХ определяется статической точностью ИБС.

Статические ошибки могут быть обусловлены конкретной реализацией ИБС (схемой, примененными техническими решениями), а также видом воспроизводимой ВАХ, эти ошибки называются методическими [1]. Значительное влияние на погрешность воспроизведения ВАХ оказывают вариации параметров устройств, а также погрешности внешних воздействий (опорных напряжений, напряжений источников

питания и т. п.), такие ошибки называют вариационными.

ИБС могут быть выполнены [1] на основе стабилизатора тока с функциональной обратной связью по напряжению нагрузки (СТФОН) и стабилизатора напряжения с функциональной обратной связью по току (СНФОТ). Целью данной работы является анализ и сравнение статической точности ИБС структур СТФОН и СНФОТ.

Рассмотрим вначале структуру СТФОН, где усилитель мощности выполнен в виде эквивалентного генератора тока (ЭГТ), при этом приведенная вариационная ошибка представляется в виде:

$$\delta_{\text{прв}}(U) = \varepsilon_{\text{IP}}(U) + \varepsilon_{\text{YP}}(U) \quad (1)$$

где  $\varepsilon_{\text{IP}}$  – приведенная ошибка по току, определяется выражением:

$$\varepsilon_{IP} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial I_P}{\partial \ln a_j} \right)_0 \delta a_j + \sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial I_P}{\partial \ln x_i} \right)_0 \delta x_i \right\} \frac{1}{I_{K3}} \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{IP}$  – приведенная ошибка по проводимости, определяется выражением:

$$\varepsilon_{IP} = \left\{ \sum_{j=1}^m \left( \frac{\partial Y_P}{\partial \ln a_j} \right)_0 \Delta U \delta a_j + \sum_{i=1}^k \left( \frac{\partial Y_P}{\partial \ln x_i} \right)_0 \Delta U \delta x_i \right\} \frac{1}{I_{K3}}, \quad (3)$$

Для вычисления вариационных ошибок необходимо задать относительные изменения параметров  $\delta a_j$  и переменных  $\delta x_i$ . Исходя из паспортных данных доступных на рынке устройств, можно задать следующие погрешности: погрешность источника опорного напряжения (ИОН)  $\delta U_{оп} = 0,1 \%$ , нестабильность напряжения источника питания усилителя мощности (УМ)  $\delta f_2 = 20 \%$ .

Рассмотрим вариационные ошибки в ИБС, выполненном по схеме СТФОН. Для определения влияния каждого из параметров на ошибку, воспользуемся выражениями для реального тока и реальной проводимости ИБС [2]:

$$I_p(U_p) = \frac{[U_{оп} - U_{fp}(U_p)] \cdot W_{кз} - I_{yp}(U_p) + f_2 \cdot W_{f2}}{1 + K_{ит} \cdot W_{кз}}$$

$$Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{fl}(U_p) \cdot W_{кз}}{1 + K_{ит} \cdot W_{кз}} \quad (4)$$

В соответствии с (2) вариационная ошибка по току имеет вид

$$\varepsilon_{IP}(U_T) := F_1(U_T) + F_2(U_T) + F_3(U_T) + F_4(U_T). \quad (5)$$

Запишем выражения слагаемых приведенной вариационной ошибки по току:

$$F_1(U_T) := \left| \frac{U_{оп}}{I_{K3}} \frac{W_{кз}}{1 + K_{ит}W_{кз}} \delta U_{оп} \right|$$

$$F_2(U_T) := \left| \frac{U_{fp}(U_T)}{I_{K3}} \frac{W_{кз}}{1 + K_{ит}W_{кз}} \delta U_{fp}(U_T) \right|$$

$$F_3(U_T) := \left| \frac{W_{кз}}{I_{K3}} \frac{U_{оп} - U_{fp}(U_T) - K_{ит}I_{y0}(U_T) + K_{ит}f_2W_{f2}}{(1 + K_{ит}W_{кз})^2} \delta W_{кз} \right|$$

$$F_4(U_T) := \left| \frac{I_{y0}(U_T)}{I_{K3}} \frac{1}{1 + K_{ит}W_{кз}} \delta I_{y0}(U_T) \right|$$

$$F_5(U_T) := \left| \frac{f_2}{I_{K3}} \frac{W_{f2}}{1 + K_{ит}W_{кз}} \delta f_2 \right| \quad (6)$$

$$F_6(U_T) := \left| \frac{K_{ит}}{I_{K3}} \left[ \frac{-(U_{оп} - U_{fp}(U_T))W_{кз} - I_{y0}(U_T) + f_2W_{f2}}{(1 + K_{ит}W_{кз})^2} W_{кз} \right] \delta K_{ит} \right|$$

Для обеспечения требуемой статической точности ИБС выполняется условие  $K_{ит}W_{кз} \gg 1$ . При этом из анализа выражений (6) следует:

а) вариации нелинейных потерь тока  $I_{y0}$ , напряжения питания  $f_2$  слабо влияют на ошибку и, поэтому допуск на их изменение может быть весьма большим;

б) наиболее сильно влияющими на точность имитатора составляющими являются отклонения  $\delta W_{кз}$  коэффициента передачи прямого пути, погрешность  $\delta U_{fp}$  воспроизведения ФП требуемой нелинейной функции, погрешность  $\delta K_{ит}$  ИТ.

Погрешность ФП в результате линейризации распадается на две: погрешность  $\delta U_{fp}$  по напряжению и погрешность  $\delta K_{fl}$  по коэффициенту передачи. Но в формуле расчета  $\varepsilon_{IP}$  участвует только погрешность  $\delta U_{fp}$ . Анализ аналоговых схем ФП позволяет сделать вывод о том, что минимальная погрешность ФП может быть обеспечена порядка 1 %, для современных цифровых схем погрешность не превышает 0,5 % [3]. Статическая погрешность резистивного измерителя тока (ИТ) зависит от материала резистивного элемента, конструктивных особенностей и может быть обеспечена порядка 0,1 %. Вариация  $\delta W_{кз}$  коэффициента передачи прямого пути в основном определяется нелинейностью УМ и на основании экспериментальных данных принята 20 %.

Степень влияния каждого слагаемого можно оценить по рис. 1. Величины относительных отклонений выбраны исходя из реальных практических условий. Из рис. 1 видно, что в области холостого хода наибольшее влияние оказывает погрешность ФП. Погрешность ИОН, ИТ стопроцентно входят в  $\varepsilon_{IP}$ , вариации  $W_{кз}$  ослаблены, причем коэффициент ослабления тем больше, чем больше величина  $K_{ит}$  при выполнении условия  $K_{ит}W_{кз} > 1$ .

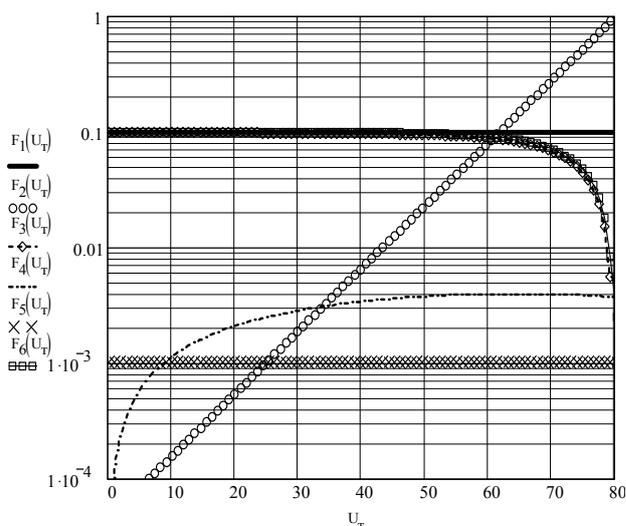


Рис. 1 Слагаемые вариационной ошибки по току для СТФОН:  
 $\delta U_{оп} = 0,1 \%$ ;  $\delta U_{fp} = 1 \%$ ;  $\delta W_{кз} = 5 \%$ ;  $\delta I_{y0} = 10 \%$ ;  
 $\delta f_2 = 20 \%$ ;  $\delta K_{ит} = 0,1 \%$

Рассмотрим влияние вариаций параметров на приведенную ошибку  $\varepsilon_{Yp}$  по проводимости

$$\varepsilon_{Yp}(U_T) := A_1(U_T) + A_2(U_T) + A_3(U_T) + A_4(U_T). \quad (7)$$

Выражение реальной проводимости для структуры СТФОН имеет вид:

$$Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{fl}(U_p) \cdot W_{кз}}{1 + K_{ит} \cdot W_{кз}} \quad (8)$$

где  $Y_0(U_p)$  – проводимость нелинейного элемента в силовой цепи;  $K_{fl}(U_p)$  – коэффициент передачи ФП в цепи обратной связи.

В соответствии с выражением (3) и, учитывая выражение (8) реальной проводимости для СТФОН, запишем выражения для слагаемых  $\varepsilon_{Yp}$ :

$$A_1(U_T) := \left| \frac{Y_0(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{\Delta U(U_T)}{1 + K_{ит} \cdot W_{кз}} \cdot \delta Y_0(U_T) \right|$$

$$A_2(U_T) := \left| \frac{K_{fl}(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{кз} \cdot \Delta U(U_T)}{1 + K_{ит} \cdot W_{кз}} \cdot \delta K_{fl}(U_T) \right|$$

$$A_3(U_T) := \left| \frac{W_{кз} \cdot (K_{fl}(U_T) - K_{ит} \cdot Y_0(U_T)) \cdot \Delta U(U_T)}{I_{кз} \cdot (1 + K_{ит} \cdot W_{кз})^2} \delta W_{кз} \right|$$

$$A_4(U_T) := \left| \frac{K_{ит}}{I_{кз}} \cdot \left[ \frac{-(Y_0(U_T) + K_{fl}(U_T) \cdot W_{кз})}{(1 + K_{ит} \cdot W_{кз})^2} \cdot W_{кз} \cdot \Delta U(U_T) \right] \cdot \delta K_{ит} \right| \quad (9)$$

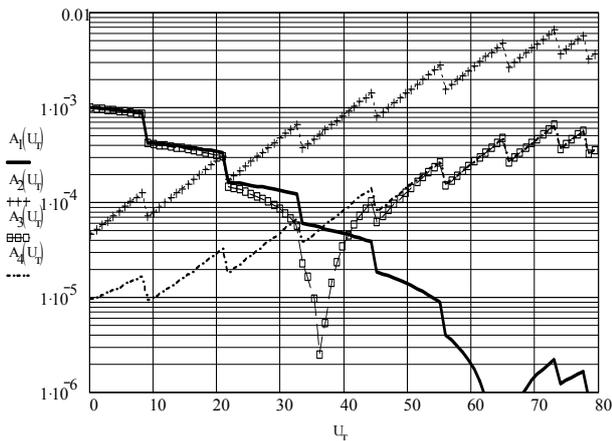


Рис. 2. Слагаемые вариационной ошибки по проводимости СТФОН,  $\delta Y_0 = 20\%$ ;  $\delta K_{fl} = 1\%$

Из рис. 2 видно, что наибольший вклад вносит также погрешность ФП, в целом же, слагаемые  $\varepsilon_{Yp}$  по величине намного меньше слагаемых  $\varepsilon_{Ip}$ .

На рис. 3 показаны приведенные ошибки, вычисленные при тех же исходных данных. Из рисунка видно, что полная ошибка  $\delta_{прв}(U)$  определяется, глав-

ным образом, ошибкой по току  $\varepsilon_{Ip}$  и возрастает в области холостого хода.

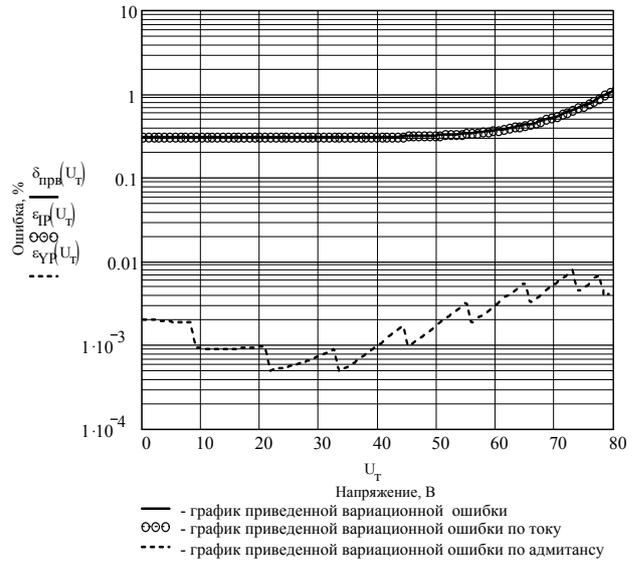


Рис. 3. Приведенные вариационные ошибки СТФОН

Максимальная ошибка  $\delta_{прмак}$  (рис. 4) представляет собой сумму приведенных методической и вариационной ошибок и возрастает в области холостого хода. При выбранных параметрах звеньев и заданных отклонениях величина максимальной ошибки в области рабочей точки составляет 1%, и не превышает 1,2% в области холостого хода.

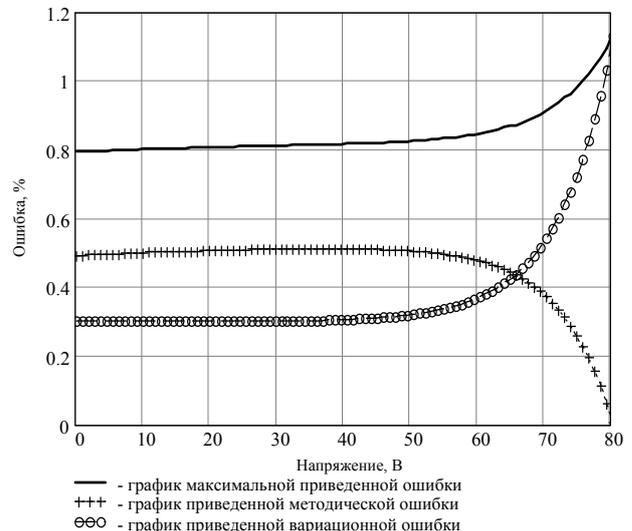


Рис. 4. Приведенные ошибки СТФОН при одном и том же напряжении нагрузки и  $U_{xx} = 80V$

Регулирование ВАХ ИСБ может производиться не только по току, но и по напряжению, например, при имитации изменения температуры панели СБ. Автомами предложено проектировать ИСБ на максимальное значение напряжения холостого хода, а сжатие

ВАХ производить путем увеличения крутизны характеристики ФП с помощью масштабного усилителя [1].

Рассмотрим влияние на максимальную погрешность ИСБ сжатия ВАХ по напряжению до  $U_{xx} = 20$  В. Из рис. 5 видно, что величины погрешностей ИСБ практически не изменились.

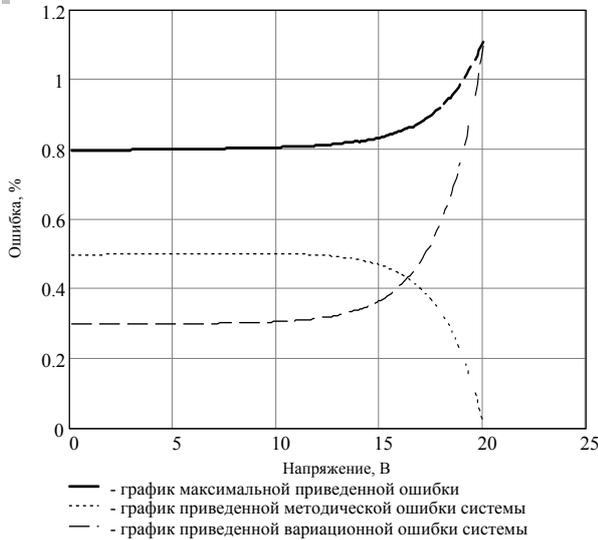


Рис. 5. Приведенные ошибки СТФОН при одном и том же напряжении нагрузки и  $U_{xx} = 20$  В

Аналогичным образом произведем исследование ИБС, выполненного на основе структуры СНФОТ. Выражения для реального тока и проводимости [2] имеют вид:

$$I_p(U_p) = \frac{[U_{оп} - U'_{fp}(I_p)] \cdot W_{кз} - I_{yp}(U_p) + f_2 \cdot W_{f2}}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_p)},$$

$$Y_p(U_p) = \frac{Y_0(U_p) + K_{ин} \cdot W_{кз}}{1 + K_{fu}(I_p) \cdot W_{кз}} \quad (10)$$

На основе этих данных запишем выражения для слагаемых ошибки  $\varepsilon_{IP}$ :

$$F_1(U_T) := \left| \frac{U_{оп}}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{кз}}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T)} \cdot \delta U_{оп} \right|$$

$$F_2(U_T) := \left| \frac{U_{fp}(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{кз}}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T)} \cdot \delta U_{fp}(U_T) \right|$$

$$F_3(U_T) = \left| \frac{W_{кз} (U_{оп} - U_{fp}(U_T) + K_{ин} \cdot Z_H(U_T) \cdot I_{y0}(U_T) - K_{ин} \cdot Z_H(U_T) \cdot f_2 \cdot W_{f2})}{I_{кз} (1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T))^2} \cdot \delta W_{кз} \right|$$

$$F_4(U_T) := \left| \frac{I_{y0}(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{1}{1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T)} \cdot \delta I_{y0}(U_T) \right| \quad (11)$$

$$F_5(U_T) := \left| \frac{f_2 \cdot W_{f2}}{I_{кз} (1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T))} \cdot \delta f_2 \right|$$

$$F_6(U_T) := \left| \frac{K_{ин}}{I_{кз}} \cdot \frac{[(U_{оп} - U_{fp}(U_T)) \cdot W_{кз} - I_{y0}(U_T) + f_2 \cdot W_{f2}]}{(1 + K_{ин} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T))^2} \cdot W_{кз} \cdot Z_H(U_T) \cdot \delta K_{ин} \right|$$

Также находим выражения слагаемых ошибки  $\varepsilon_{Yp}$ :

$$A_1(U_T) := \left| \frac{Y_0(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{1}{1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз}} \cdot \delta Y_0(U_T) \right|$$

$$A_4(U_T) := \left| \frac{K_{ин}}{I_{кз}} \cdot \frac{W_{кз}}{1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз}} \cdot \delta K_{ин} \right| \quad (12)$$

$$A_2(U_T) := \left| \frac{K_{fu}(U_T)}{I_{кз}} \cdot \frac{[-Y_0(U_T) + K_{ин} \cdot W_{кз} + f_2 \cdot W_{f2}]}{(1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз})^2} \cdot W_{кз} \cdot \delta K_{fu}(U_T) \right|$$

$$A_3(U_T) := \left| \frac{W_{кз} \cdot (-K_{ин} + K_{fu}(U_T) \cdot Y_0(U_T) + K_{fu}(U_T) \cdot f_2 \cdot W_{f2})}{I_{кз} (1 + K_{fu}(U_T) \cdot W_{кз})^2} \cdot \delta W_{кз} \right|$$

Рассуждая аналогично структуре СТФОН, найдем приведенные ошибки по току и проводимости, а также суммарные вариационные и методические ошибки для СНФОТ (рис. 6 и 7).

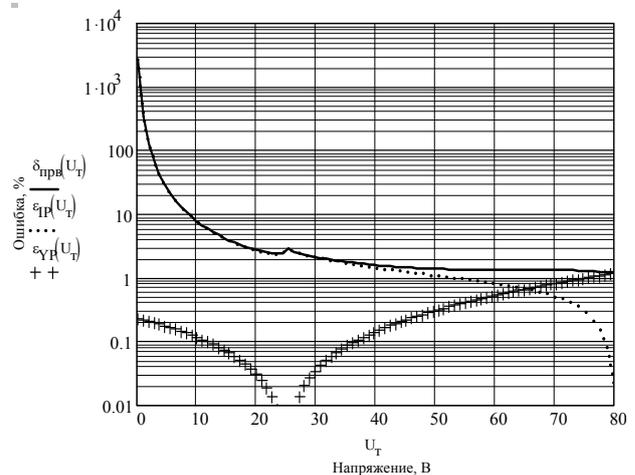


Рис. 6. Приведенные вариационные ошибки СНФОТ

Анализ приведенных ошибок СНФОТ показывает, что максимальная ошибка в основном определяется вариационной ошибкой и намного превышает ошибку СТФОН, особенно в области КЗ. При одних и тех же исходных данных максимальная ошибка структуры СНФОТ намного больше ошибки СТФОН, что определяет выбор структуры имитатора БС. Наибольшее влияние на ошибку ИБС в рассмотренных структурах оказывает ФП, что предъявляет высокие требо-

вания к его точности. Также уменьшить вариационную ошибку ИБС позволяет выбор высокоточных измерителя тока и ИОН.

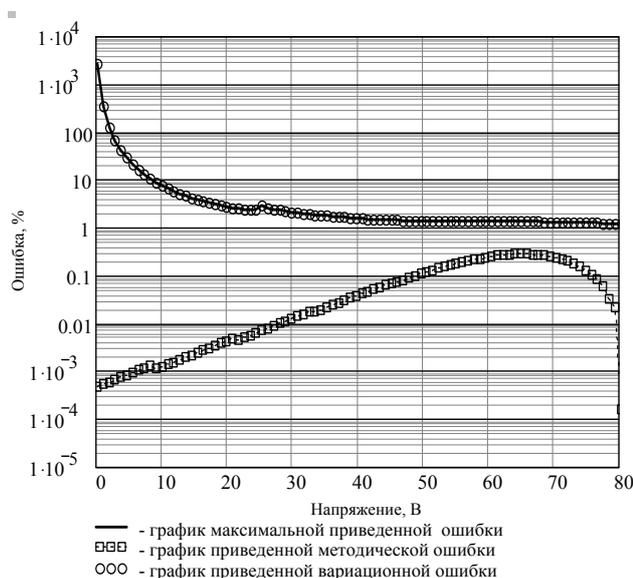


Рис. 7. Приведенные ошибки СНФОТ при одном и том же напряжении нагрузки

### Библиографические ссылки

1. Мизрах Е. А. Исследование статической точности имитаторов солнечных батарей // Вестник СибГАУ. 2005. № 7. С. 24–27.
2. Мизрах Е. А. О выборе структуры имитатора первичного источника электроэнергии космического аппарата // Вестник СибГАУ. 2002. №3. С. 50–54.
3. Штабель Н. В. Исследование цифрового функционального преобразователя для имитатора солнечных батарей. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики : сб. тез. докл. Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых специалистов (6–10 апреля 2009, г. Красноярск) : в 2 т. Т. 1. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2009. 376 с.

### References

1. Mizrakh E. A. *Vestnik SibGAU*. 2005, № 7, p. 24–27.
2. Mizrakh E. A. *Vestnik SibGAU*. 2002, № 3, p. 50–54.
3. Shtabel' N. V. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики : sb. tez. dokl. Vseros. nauch.-prakt. konf. studentov, aspirantov i molodykh spetsialistov. Vol. 1. Tekhnicheskie nauki. Informatsionnye tekhnologii. Soobshcheniya shkol'nikov* (Modern questions of aviation and astronautics) / SibGAU. Krasnoyarsk, 2009. 376 p.

© Мизрах Е. А., Штабель Н. В., 2013

УДК 517.55+517.929.4

## УСТОЙЧИВОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ ЛИНЕЙНЫХ НЕОДНОРОДНЫХ РАЗНОСТНЫХ СХЕМ И АМЕБЫ АЛГЕБРАИЧЕСКИХ ГИПЕРПОВЕРХНОСТЕЙ

М. С. Рогозина

Сибирский федеральный университет  
 Россия, 660041, Красноярск, просп. Свободный, 79  
 E-mail: rogozina.marina@mail.ru

Рассматривается проблема устойчивости полиномиальных разностных операторов, основным источником появления которых является теория разностных схем. В исследовании используется терминология и методы этой теории, а также методы теории амёб алгебраических гиперповерхностей. Понятие амёбы позволяет сформулировать многомерный аналог условия, что все корни характеристического многочлена лежат в единичном круге, то есть условие устойчивости многомерных разностных схем. В терминах теории амёб алгебраических гиперповерхностей доказан критерий устойчивости многослойной линейной неоднородной разностной схемы. Получена формула, выражающая решение задачи Коши через ее фундаментальное решение.

Ключевые слова: разностная схема, устойчивость, амёба алгебраической гиперповерхности.