

УДК 621.311.6

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАТОРА СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ НА БАЗЕ ИСТОЧНИКА НАПРЯЖЕНИЯ С БЕЗИНЕРЦИОННЫМ ОГРАНИЧЕНИЕМ ТОКА**

**В. Ф. Шостак, Т. В. Горлова, М. Г. Когдась**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

Предложен имитатор солнечной батареи на базе источника напряжения с безинерционным ограничением тока, который позволил бы проводить исследования и экспериментальную обработку как стационарных, так и мобильных систем электропитания, в которых в качестве первичного источника энергии используется солнечная батарея. Для построения имитатора солнечной батареи проведена классификация моделей солнечных элементов. Сделан выбор адекватной модели солнечного элемента как нелинейной цепи. Использование данного имитатора солнечной батареи позволяет расширить область исследований и настройки систем электропитания, сократить время испытаний и повысить надежность солнечных станций.

**Ключевые слова:** имитатор солнечной батареи, система электропитания, нелинейный элемент.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ІМІТАТОРА СОЛЯНОЇ БАТАРЕЇ НА БАЗІ ДЖЕРЕЛА НАПРУГИ З БЕЗІНЕРЦІЙНИМ ОБМЕЖУВАЧЕМ СТРУМУ**

**В. Ф. Шостак, Т. В. Горлова, М. Г. Когдась**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

Запропоновано імітатор сонячної батареї на базі джерела напруги з безінерційним обмеженням струму, який дозволив би проводити дослідження і експериментальну обробку як стаціонарних, так і мобільних систем електроживлення, в яких первинним джерелом енергії є сонячна батарея. Для побудови імітатора сонячної батареї проведена класифікація моделей сонячних елементів. Зроблений вибір адекватної моделі сонячного елемента, як нелінійної ланцюга. Використання цього імітатора сонячної батареї дозволяє розширити область досліджень і налаштування систем електроживлення, скоротити час випробувань і підвищити надійність сонячних станцій.

**Ключові слова:** імітатор сонячної батареї, система електроживлення, нелінійний елемент.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** Преобразование солнечной энергетики в электрическую в наше время является наиболее перспективным и активно развивающимся направлением альтернативной энергетики. Солнечная энергетика является широкодоступной, обладает практически безграничными ресурсами, и при фотоэлектрическом преобразовании не происходит загрязнения окружающей среды. Для прямого преобразования солнечной энергии в электрическую используются солнечные элементы (СЭ).

Первое практическое использование солнечных батарей (СБ) для энергетических целей имело место в околоземном космическом пространстве. Солнечные батареи и на сегодня остаются основным источником электроэнергии для 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. Работа в космосе предъявляет к СЭ очень жесткие и подчас противоречивые требования. Сокращение сроков разработки и улучшение эксплуатационных характеристик систем электроснабжения космических аппаратов выдвигает на первый план необходимость создания эффективных методов проектирования подобных систем, в частности, предсказания и анализа работы солнечных батарей под действием разнообразных факторов окружающего пространства в статическом и динамическом режимах нагрузки [1].

Учитывая вышеперечисленные трудности, для исследования, экспериментальной отработки и испытания систем электропитания (СЭП), в которых первичным источником является СБ, используются имитаторы солнечных батарей (ИБС). Данные устройства питаются от промышленной сети, и воспроиз-

водят на своих выходных шинах статические и динамические характеристики СБ.

Существующие на сегодняшний день ИБС можно классифицировать по типу воспроизводимой вольт – амперной характеристики (рис. 1).

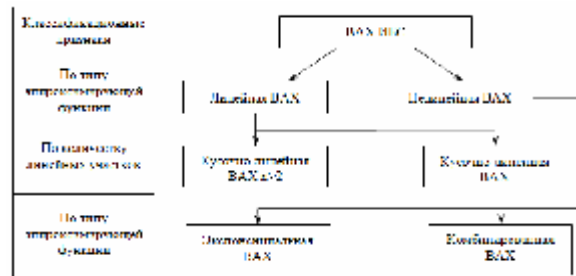


Рисунок 1 – Классификация вольтамперных характеристик ИБС

ИБС должны удовлетворять ряду требований, основными из них являются соответствие выходного импеданса ИБС импедансу реальной СБ, т.е. статическая и динамическая характеристики ИБС и СБ должны максимально соответствовать друг другу. Кроме того, ИБС должен иметь возможность имитировать работу СБ, иметь возможность имитации режимов "вход в тень" и "выход из тени" с изменением длительности данных режимов.

Для исключения влияния человеческого фактора и различного рода ошибок при испытаниях ИБС должен быть автоматизирован, т.е. используя специализированную программу для тестирования и отладки, иметь возможность задавать программу исследования, по которой ИБС будет работать в течение необходимого времени, с непрерывным ведением протокола результатов испытаний и постоянным контролем аварийных ситуаций [2].

Таким образом, исследование и разработка ИБС обеспечивающего работу со всеми структурами солнечных станций актуальна и имеет практическую ценность.

Целью работы является решение задачи создания имитатора солнечной батареи на базе источника напряжения с безинерционным ограничением тока, который позволил бы проводить исследования и экспериментальную обработку как стационарных, так и мобильных систем электропитания, в которых в качестве первичного источника энергии используется солнечная батарея.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Солнечные батареи современных статических или мобильных солнечных станций состоят из десятков и сотен отдельных фотопреобразователей (солнечных элементов), соединенных параллельно – последовательно с целью обеспечения требуемых от СБ значений тока и напряжения.

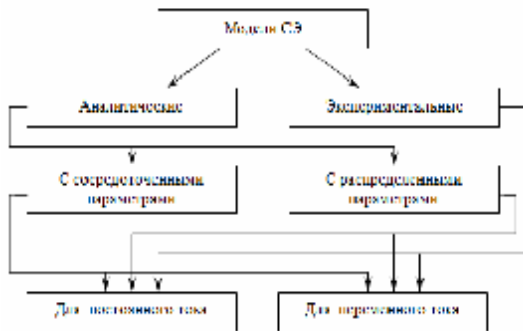


Рисунок 2 – Классификация моделей солнечных элементов

Модель СЭ (рис. 2) можно описать аналитически, либо множеством экспериментально снятых точек вольтамперной характеристики. Эти множества точек можно экстраполировать для условий работы солнечного элемента (температура, освещенность и др.), для которых отсутствуют экспериментальные данные. Модели с распределенными параметрами, не пригодны для практического анализа работы СЭ, т.к. параметры СЭ изменяются с изменением температуры, освещенности, деградации, что затрудняет измерение параметров во всех диапазонах представляющих интерес. Модели с сосредоточенными параметрами нашли наибольшее распространение в инженерных расчетах. Отмечено, что при проектировании ИБС необходимо учитывать эквивалентную схему СЭ как для переменного тока, так и для постоянного [3].

Принцип действия ИБС основан на преобразовании электроэнергии переменного тока питающей сети с помощью промежуточных звеньев повышенной частоты в энергию постоянного тока на выходе ИБС и параметрическом формировании его ВАХ с улучшенными динамическими характеристиками в зоне участка максимального отбора мощности.

ИБС обеспечивает формирование двух типов ВАХ (рис. 3):

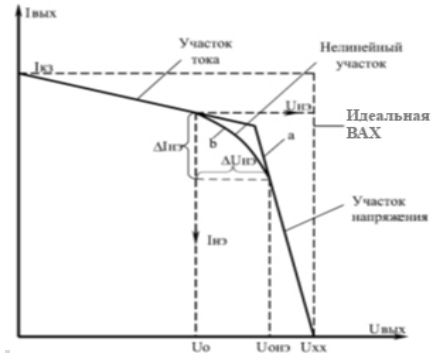


Рисунок 3 – ВАХ ИБС при  $R_n=0, R_{ш} \rightarrow \infty, U_{нз}=0, U_0=U_{кх}$

– линейной, образованной в координатах ( $U_{\text{вых}}, I_{\text{вых}}$ ) ломаной линией из токового участка и участка напряжения;

– нелинейной, с нелинейным сопряжением участков тока и напряжения.

Конфигурация нелинейного сопротивления участков тока и напряжения ВАХ ИБС задается соответствующим последовательно-параллельным соединением диодов нелинейного элемента (НЭ). При необходимости формирования ВАХ в виде ломаной линии диоды НЭ закорачиваются.

Таким образом, чем ближе сопротивление нагрузки ИБС к бесконечности, тем ближе сумма токов НЭ.

Для снятия экспериментальной зависимости полного выходного сопротивления от частоты использован метод вольтметра – амперметра. Этот метод является косвенным, т. к. сводится к измерению тока и напряжения в цепи с измеряемым объектом и последующим расчетом его параметров по закону Ома.

На рис. 4 приведена схема для экспериментального измерения полного сопротивления ИБС.

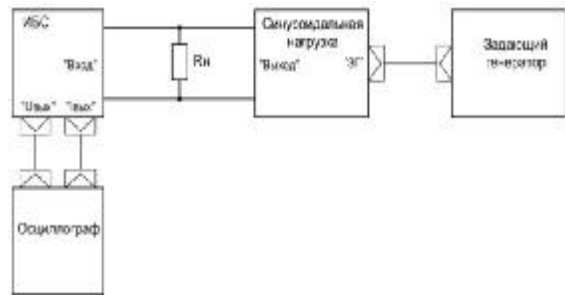


Рисунок 4 – Схема для экспериментального измерения полного сопротивления ИБС

В зависимости от выбранной рабочей точки в статическом режиме ИБС работает на одном из трех участков ВАХ (тока, напряжения, нелинейного переходного). Каждый участок описывается своей статической характеристикой и имеет эквивалентную схему для переменного тока [2].

Статическая характеристика ИБС участка тока описывается уравнением:

$$U_{HI} = R_{ш} (I_{кз} - I_n) - U_{VD\text{вых}} - I_n R_{VD\text{вых}},$$

где  $U_{HI}$  – напряжение на нагрузке ИБС на участке тока;  $I_n$  – ток нагрузки ИБС;  $U_{VD\text{вых}}$  – падение напря-

ження на виходному діоді;  $R_{VD_{вых}}$  – дифференціальне опір вихідного діода, визначене по касательній до ВАХ діода в точці з координатами  $I_n$ .

На рис. 5 представлена еквівалентна схема участка тока для переменного тока.

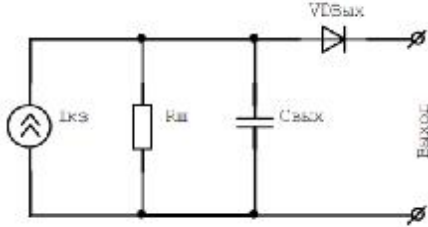


Рисунок 5 – Эквивалентная схема участка тока для переменного тока

Комплексное сопротивление  $Z_i$  выхода ИБС на участке тока равно

$$Z_i = R_{VD_{De}} + \frac{R_{ш} X_{C_{вых}}}{R_{ш} + X_{C_{вых}}},$$

где  $X_{C_{вых}} = \frac{1}{j\omega C_{вых}}$  – емкостное сопротивление

$C_{вых}$  на круговой частоте  $\omega=2\pi f$  переменной составляющей тока нагрузки ИБС;  $C_{вых}$  – емкость выходного фильтра ИБС, выбранная в диапазоне от 0,39 до 3,47 мкФ.

Модуль комплексного сопротивления равен

$$Z = |Z| = \frac{U}{I} = \sqrt{R_z^2 + X_z^2},$$

На рис. 6 приведены зависимости полного выходного сопротивления (модуля комплексного сопротивления)  $Z_{вых}$  ИБС на участке тока при  $U_{ХХ}=50$  В;  $I_{кз}=5$  А;  $\Delta U_{HЭ}=10$  В;  $\Delta I_{HЭ}=2,1$  А;  $R_{ш}=5$  Ом;  $1/R_{ш}=0,025$  А/В;  $C_{вых}=0,39$  мкФ.

Статическая характеристика ИБС участка нелинейного элемента описывается выражением

$$U_{HЭ} = \frac{(I_{кз} - I_n)R_{ш} + U_0 + U_{HЭ} + U_{VD1}}{1 + \frac{R_{ш}}{R_{ш}}},$$

где  $U_0$  – расчетная величина напряжения конденсатора фильтра  $C_0$ ,  $U_{HЭ}=F(i_{HЭ})$  – координата ВАХ заданного нелинейного элемента, соответствующая координатам расчетной точки ВАХ ИБС.

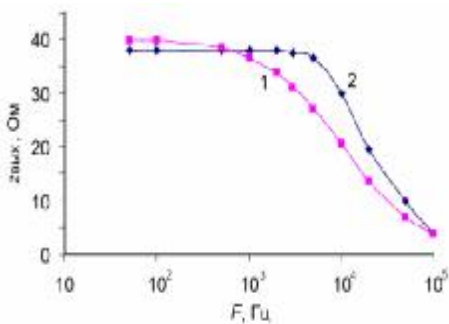


Рисунок 6 – Зависимости полного выходного сопротивления ИБС на токовом участке:  
1) расчетная; 2) экспериментальная

На рис. 7 показана эквивалентная схема нелинейного участка ВАХ для переменного тока.

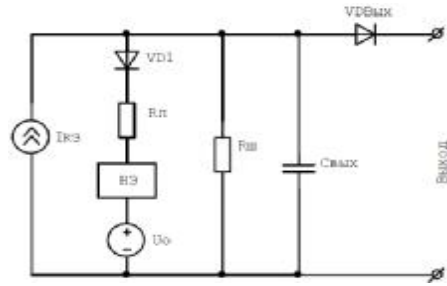


Рисунок 7 – Эквивалентная схема нелинейного участка для переменного тока

Комплексное сопротивление  $Z_{HЭ}$  выхода ИБС на нелинейном участке определяется выражением

$$\frac{1}{Z_{HЭ}} = \frac{1}{R_{ш}} - \frac{1}{X_{C_{вых}}} + \frac{1}{R_{VD_{De}} R_{ш} + R_{ДНЭ}},$$

где  $R_{ДНЭ}$  – дифференциальное сопротивление нелинейного элемента.

На рис. 8 представлены зависимости полного выходного сопротивления  $Z_{вых}$  ИБС на нелинейном участке.

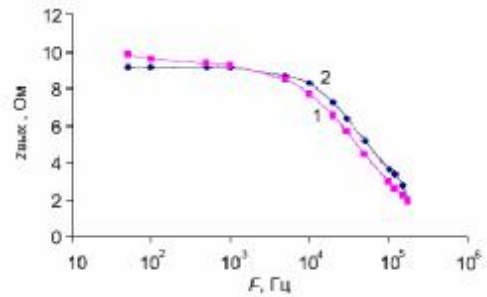


Рисунок 8 – зависимости полного выходного сопротивления ИБС на нелинейном участке:  
1) расчетная; 2) экспериментальная

Статическая характеристика участка напряжения описывается выражением

$$U_{HЭ} = \frac{(I_{кз} - I_n)R_{ш} + U_0 + \Delta U_{HЭ зад} + U_{VD1}}{1 + \frac{R_{ш}}{R_{ш}}},$$

где  $\Delta U_{HЭ зад}$  – заданное значение падения напряжения на нелинейном элементе.

На рис. 9 представлена эквивалентная схема участка напряжения ВАХ ИБС для переменного тока

Комплексное сопротивление  $Z_U$  выхода ИБС на участке напряжения можно найти из уравнения

$$\frac{1}{Z_U} = \frac{1}{R_{ш}} - \frac{1}{X_{C_{вых}}} + \frac{1}{R_{VD1} R_{ш} + R_{ДВД2}}.$$

На рис. 10 представлены зависимости полного выходного сопротивления  $Z_{вых}$  ИБС на участке напряжения.

Данная схема обеспечивает практически полное совпадение с эквивалентной СБ, поскольку в ее составе отсутствуют реактивные элементы, за исключением паразитных параметров, которые проявляются лишь на высоких частотах, что и видно на рис. 6, 8, 10.

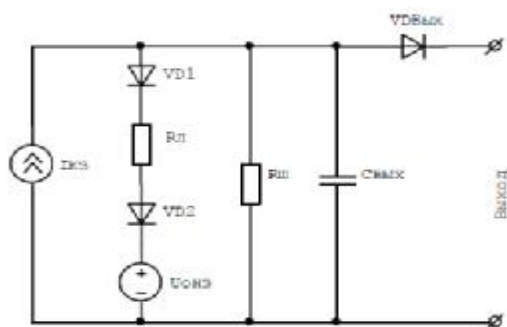


Рисунок 9 – Эквивалентная схема участка напряжения для переменного тока

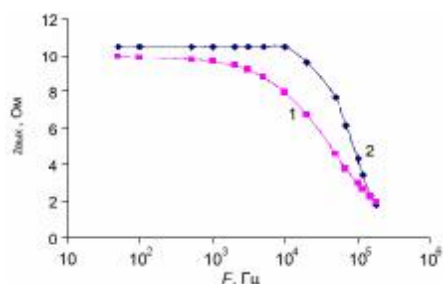


Рисунок 10 – Зависимости полного выходного сопротивления ИБС на участке напряжения:  
1) расчетная; 2) экспериментальная

**ВЫВОДЫ.** Проведено сравнение основных принципов реализации имитаторов солнечных батарей и классификация имитаторов по способу аппроксимации воспроизводимой статической вольт-амперной характеристики

Для построения имитаторов СБ проведена классификация моделей солнечных элементов. Сделан выбор адекватной модели солнечного элемента, как нелинейной цепи.

### STUDY OF SIMULATOR OF SOLAR BATTERIES ON THE BASIS OF THE VOLTAGE SOURCE WITH INERTIALESS CURRENT LIMITING

V. Shostak, T. Gorlova, M. Kogdas

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: kogdasMax@yahoo.com

A solar battery simulator on the basis of the inertialess current limiting voltage source has been brought forward in order to do research and to process data of both stationary and mobile power supply systems, where a solar battery is used as a primary voltage source. The divisibility of solar cells' models has been accomplished to construct the solar battery simulator. An adequate model has been selected, as a nonlinear circuit. An appropriate use of the present solar battery simulator enables to expand the field of study and the range of adjustments of power-supply systems and to reduce the testing time as well as to improve the reliability of solar stations.

**Key words:** a solar battery simulator, power system, nonlinear element.

#### REFERENCES

1. Microprocessor control system output characteristics of the formation of the solar battery / I.V. Abramenkova, O.A. Frolkov, N.O. Frolkova, A.O. Shiryayev // *Devices and systems. Management, control diagnostics.* – 2008. – № 1. – PP. 8–10. [in Russian]

2. Kremzucov Y.U. Investigation of dynamic characteristics of the solar simulator IBS-300/25 // *Izvestia of Tomsk Polytechnic University.* – 2008. – Т. 312, № 4. [in Russian]

ИБС, реализованные с использованием источников напряжения с безинерционным ограничением тока, имеют следующие преимущества:

- идеальная частотная характеристика, т.е. совпадение статической и динамической ВАХ ИБС с СБ вплоть до частот в сотни кГц;
- простота регулирования (изменения) характеристик ВАХ СБ с запасом, перекрывающим область реального изменения ВАХ вследствие технологического разброса, деградации СБ на орбите в течение срока активного существования и т.д.;
- принцип работы источников напряжения с безинерционным ограничением тока не предполагает каких-то трудностей при их создании, так как здесь не требуется наличия в схемах управления сверхбыстродействующих регуляторов, широкополосных датчиков тока и т.д.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Микропроцессорная система управления формированием выходных характеристик солнечной батареи / И.В. Абраменкова, О.А. Фролков, Н.О. Фролкова, А.О. Ширяев // *Приборы и системы. Управление, контроль диагностика.* – 2008. – № 1. – С. 8–10.

2. Кремзуков Ю.А. Исследование динамических характеристик имитатора солнечной батареи ИБС-300/25 // *Известия Томского политехнического университета.* – 2008. – Т. 312, № 4.

3. Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 327 с.

4. Системы электропитания космических аппаратов / Б.П. Соустин, В.И. Иванчура, А.И. Чернешев. – Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма, 1994. – 318 с.

3. Rauschenbach G. *Guide to designing solar cells.* – М.: Energoatomizdat, 1983. – 327 p. [in Russian]

4. *Systems of power spacecraft* / B.P. Soustin, A.I. Ivanchura, I.I. Chernishov. – Novosibirsk: Nauka. Siberian publishing firm, 1994. – 318 p. [in Russian]

Стаття надійшла 15.05.2012.

Рекомендовано до друку д.т.н., проф. Сінчуком О.М.