

УДК 621.31:629.78

## **Энергетические модели элементов автономных систем электропитания**

**В.И. Иванчура\***,

**А.В. Чубарь, С.С. Пост**

*Институт космических и информационных технологий  
Сибирского федерального университета  
Россия 660074, Красноярск, ул. Киренского 26, б<sup>1</sup>*

Received 4.04.2012, received in revised form 11.04.2012, accepted 18.04.2012

---

*Разработаны энергетические модели элементов автономных систем электропитания: солнечной батареи (СБ), экстремального регулятора мощности СБ, импульсного стабилизатора напряжения (ИСН), аккумуляторной батареи (АБ) и нагрузки. Методика моделирования и исследования энергетических процессов в этих элементах использует информационные системы поддержки автоматизированного проектирования OrCAD 9.2 и MATLAB.*

*Ключевые слова: система электропитания, солнечная батарея, экстремальный регулятор мощности СБ, импульсный стабилизатор напряжения, аккумуляторная батарея.*

---

### **Введение**

При проектировании систем электропитания (СЭП) космических аппаратов и других автономных систем электропитания важное место занимает выбор их рациональной структуры. Она в значительной мере определяет энергетическую эффективность использования источников энергии, режимов их работы и оказывает существенное влияние на выбор номиналов и типоразмеров основных узлов системы.

Перспективным путем развития систем электропитания космических аппаратов, связанным с повышением энергетической вооруженности последних, является модульный принцип их построения, когда требуемый номинал напряжения и тока обеспечивается необходимой топологией соединения типовых модулей. Это позволяет суммировать энергию нескольких источников и накопителей, повысить надежность системы за счет сохранения работоспособности при отказе части модулей и введения минимальной избыточности, унифицировать конструктивные параметры системы электропитания и снизить время ее проектирования.

Недостаточное внимание вопросам электрической увязки источников в общую сеть питания нагрузки, логики управления и ее аппаратурной реализации может приводить к значительным материальным и финансовым потерям. Следовательно, актуальна задача разработки и реализации с помощью современных программно-инструментальных средств имитационной

---

\* Corresponding author E-mail address: ivan43ura@yandex.ru

<sup>1</sup> © Siberian Federal University. All rights reserved

энергетической модели автономной СЭП, позволяющей формировать из типовых модулей источников, накопителей, потребителей, регуляторов и преобразователей электрической энергии систему необходимой топологии, мощности и номинала, производить сравнительный анализ вариантов построения системы, осуществлять оптимизацию параметров и режимов функционирования, обеспечивающих энергетический баланс с учетом особенностей системы, деградации ее отдельных элементов и узлов, прогнозировать работоспособность системы в нестандартных ситуациях.

В современных системах электропитания космических аппаратов в качестве источника энергии используются, в основном, солнечные батареи. В качестве накопителей энергии – аккумуляторные батареи различных электрохимических групп, в качестве согласующих устройств – импульсные регуляторы и стабилизаторы напряжения и тока, которые могут работать в т.ч. в режиме экстремального регулирования. Указанные устройства выступают типовыми элементами, из которых предлагается строить различные модели систем электропитания в целом. В качестве среды реализации используются информационные системы поддержки автоматизированного проектирования OrCAD 9.2 и MATLAB.

### 1. Солнечная батарея

Солнечные батареи состоят из множества отдельных солнечных элементов (СЭ), соединенных параллельно-последовательно с целью обеспечения требуемых выходных тока и напряжения. СЭ представлен в виде функциональной схемы, изображённой на рис. 1.

Вектор выходных значений СЭ  $Y$  определяется исходя из внешних (вектор  $X$ ) и внутренних (вектор  $Z$ ) параметров. К выходным параметрам относятся выходное напряжение, ток нагрузки и выходная мощность, к внешним – освещённость СЭ, температура СЭ и угол падения светового потока, к внутренним – напряжение холостого хода и ток короткого замыкания, определяемые материалом СЭ.

На рисунке 2 изображена эквивалентная электрическая схема замещения СЭ. Она описывается следующим выражением:

$$I_{CЭ} = I_{\phi} \cdot W - I_0 \cdot \left[ \exp \frac{qU_{CЭ}}{kT} - 1 \right] \Leftrightarrow U_{CЭ} = \frac{k \cdot T}{q} \ln \left[ \frac{I_{\phi} \cdot W - I_{CЭ}}{I_0} + 1 \right], \quad (1)$$

где  $I_{CЭ}$  – ток через внешнюю нагрузку,  $I_0$  – обратный ток насыщения,  $q$  – заряд электрона,  $T$  – абсолютная температура,  $k$  – постоянная Больцмана,  $U_{CЭ}$  – напряжение на выходе элемента,  $I_{\phi}$  – ток неосновных носителей, генерированных светом (фототок),  $W$  – относительная интенсивность светового потока СЭ, выражаемая для удобства безразмерной величи-

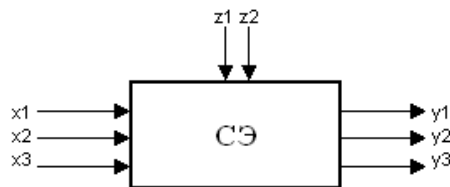


Рис. 1. Функциональная схема солнечного элемента

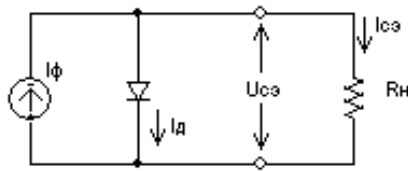


Рис. 2. Схема замещения солнечного элемента

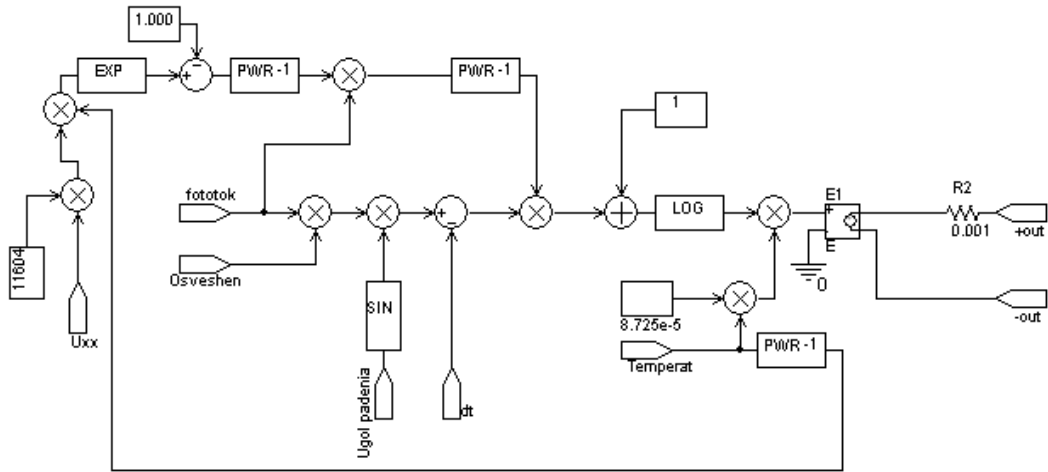


Рис. 3. Математическая модель СЭ

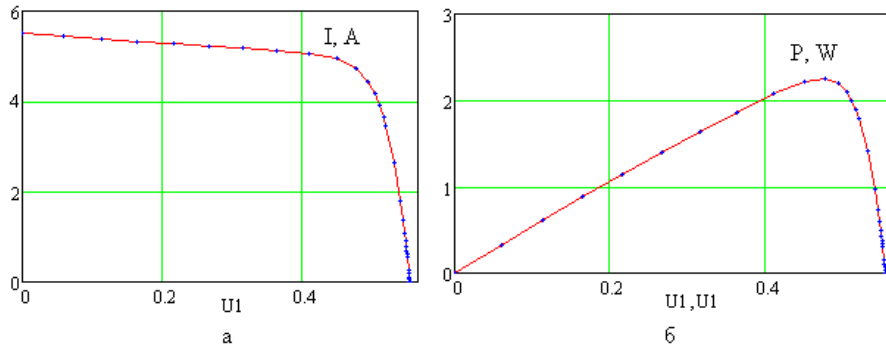


Рис. 4. Характеристики СЭ, описываемого уравнением (1): а – вольтамперная характеристика, б – вольтваттная характеристика

ной, принимающей значения  $[0;1]$ , величине 1 соответствует максимальная освещённость 1360 кВт/м<sup>2</sup> [1–3].

Схема, реализующая ВАХ солнечного элемента со следующими параметрами: напряжение холостого хода  $U_{cx} = 0,55$  В, ток короткого замыкания  $I_{kz} = 5,5$  А, описываемого выражением (1), приведена на рис. 3. Она позволяет оценить влияние на работу СЭ таких характеристик, как уровень освещённости СЭ (номинальное значение  $W=1$ ), температура окружающей среды (но-

минальное значение  $T=298$  К), а также угол падения светового потока (номинальное значение  $\alpha=90^\circ = \pi/2$  рад). Полученные характеристики модели СЭ представлены на рис. 4.

Рассмотрим модель солнечной батареи, состоящей из шести солнечных элементов, соединённых последовательно-параллельно.

Протестируем модель в двух режимах:

- 1) номинальный режим;
- 2) относительная интенсивность светового потока  $W = 0,5$ .

Как видно из рис. 6, ток короткого замыкания СБ в 2 раза больше тока короткого замыкания СЭ; напряжение холостого хода СБ в 3 раза больше напряжения холостого хода СЭ (см. рис. 3). При уменьшении интенсивности светового потока в 2 раза ток короткого замыкания СБ

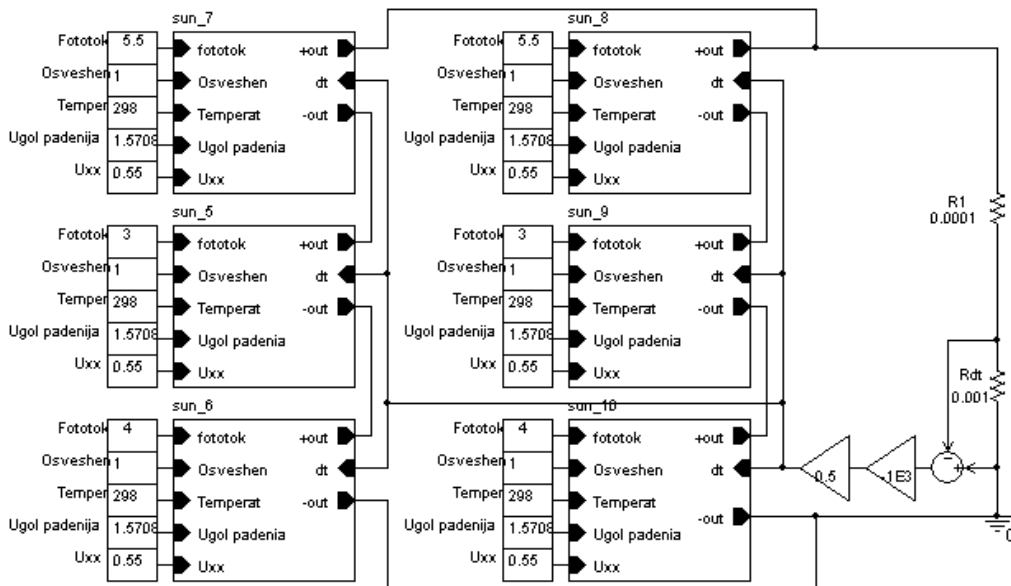


Рис. 5. Модель солнечной батареи, состоящей из шести солнечных элементов

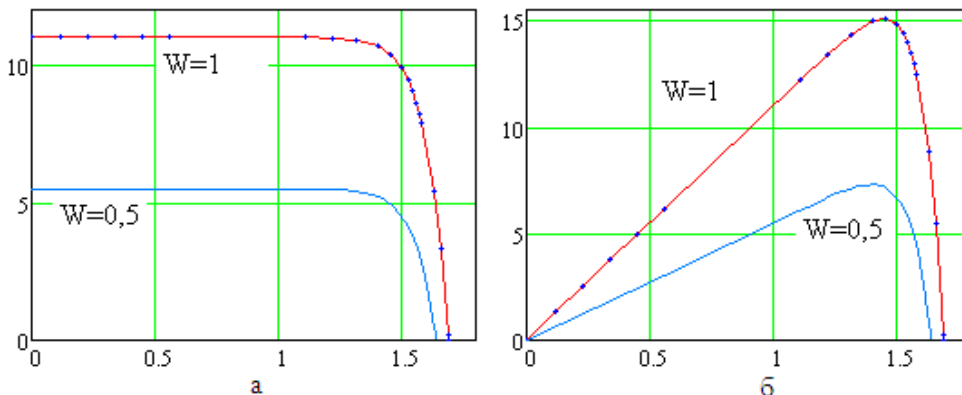


Рис. 6. Характеристики схемы, приведённой на рис. 5, функционирующей в двух различных режимах: а – вольтамперная характеристика, б – вольтваттная характеристика

уменьшается в 2 раза, напряжение холостого хода меняется незначительно, что соответствует логике функционирования СБ.

## 2. Экстремальный регулятор мощности солнечной батареи

На рисунке 7 приведена модель СБ с устройством отбора максимальной мощности. Структура и принцип действия блока Solar array полностью соответствует схеме на рис. 3. Рассмотрим более подробно блок *Otbor\_moshnosti* (рис. 8).

Блоки *Constant7* и *Integrator* имитируют изменение тока нагрузки от 0 до величины  $I_{kz}$ . С порта  $U_{nagr}$  поступает выходное напряжение СБ, меняющееся в соответствии с током нагрузки. Блок *Tapped Delay* хранит все расчетные значения выходной мощности СБ, а блок *MinMax* выбирает максимальное значение выходной мощности.

Блок *Relational Operator* сравнивает все значения рассчитанной мощности с максимальным, а блок *Switch* из всех значений выходной мощности выбирает значение  $U_{opt}$ , которое соответствует максимальной мощности. С помощью блока *Divide3* определяется величина  $I_{opt}$  тока нагрузки.

Как уже было сказано, структура блока *Solar array* соответствует структуре, приведённой на рис. 3. Результаты тестирования схемы отображены на рис. 9.

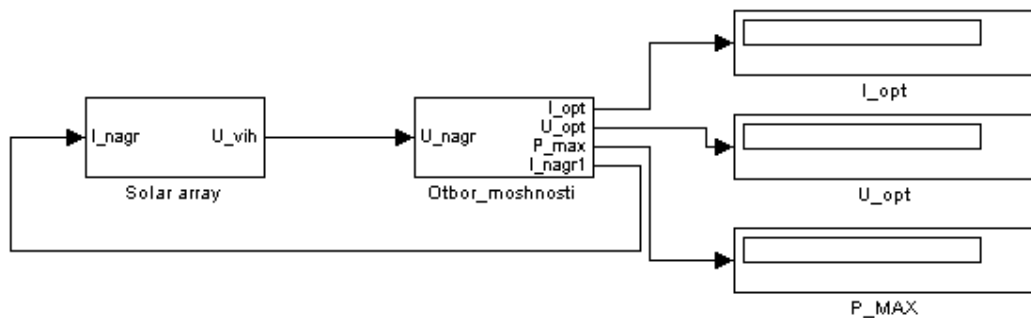


Рис. 7. Модель СБ с устройством отбора максимальной мощности

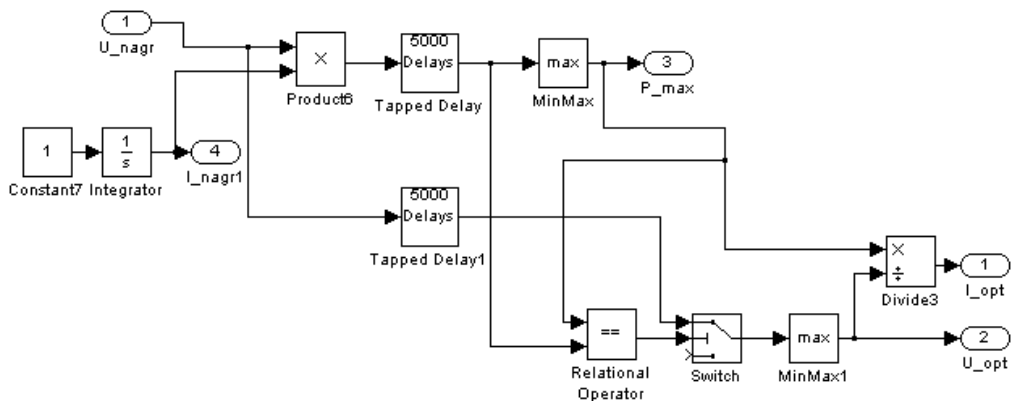


Рис. 8. Иерархическая структура блока *Otbor\_moshnosti*

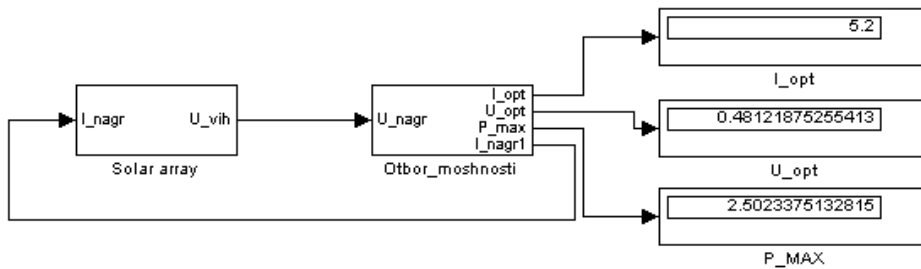


Рис. 9. Тестирование модели СБ с устройством отбора максимальной мощности

Как видно из рис. 9, результаты моделирования соответствуют вольтваттной характеристике, приведённой на рис. 4, б; таким образом, модель правильно отражает функционирование устройства отбора максимальной мощности совместно с солнечной батареей.

### 3. Импульсный стабилизатор напряжения

Импульсный режим работы позволяет значительно уменьшить мощность потерь в регулирующем элементе и тем самым повысить КПД источника питания, уменьшить его массу и габариты. В этом состоит решающее преимущество импульсных стабилизаторов перед непрерывными стабилизаторами [4, 5].

На рисунке 10 изображена структурная схема энергетической модели импульсного стабилизатора напряжения.

Функциональный блок Ф.Б. 2 выполняет две функции:

- 1) обеспечение стабилизации выходного напряжения в номинальных режимах работы;
- 2) прерывание режима стабилизации при снижении входного напряжения ниже уровня напряжения стабилизации.

Если величина входного напряжения превышает значение  $U_{stabil}$  на величину большую, чем на значение, задаваемое блоком  $U_{ust}$ , на выходе блока Ф.Б.2 устанавливается значение 0, а на выходе модели ИСН устанавливается уровень, определяемый блоком  $U_{stabil}$ . В противном случае уровень сигнала на выходе блока Ф.Б.2 будет возрастать, а выходное напряжение будет рассчитываться по формуле  $U_{вых} = U_{вх} - U_{ust}$ .

Функциональный блок Ф.Б.3 предназначен для защиты по току. Если величина выходного тока не превышает величину, задаваемую блоком, на выходе блока Ф.Б.3 устанавливается 0. В противном случае уровень напряжения на выходе Ф.Б. 3 линейно увеличивается, а уровень напряжения на выходе ИСН линейно уменьшается.

Источник напряжения, управляемый напряжением Е1 с коэффициентом передачи 1, обеспечивает требуемое значение напряжения на выходе ИСН. Датчик тока ДТ предназначен для определения тока  $I_n$  в выходной цепи (нагрузка подключается к выходным клеммам модели). Мощность, потребляемая нагрузкой, определяется по формуле  $P_{вых} = U_{вых} \cdot I_n$ . Ток нагрузки может меняться в зависимости от величины  $R_n$ ; соответственно будет меняться мощность  $P_{вых}$ .

Функциональный блок Ф.Б.1 предназначен для расчета коэффициента полезного действия модели ИСН и выходного тока модели. Значение КПД определяется в виде функции  $\eta = f(U_{вых},$

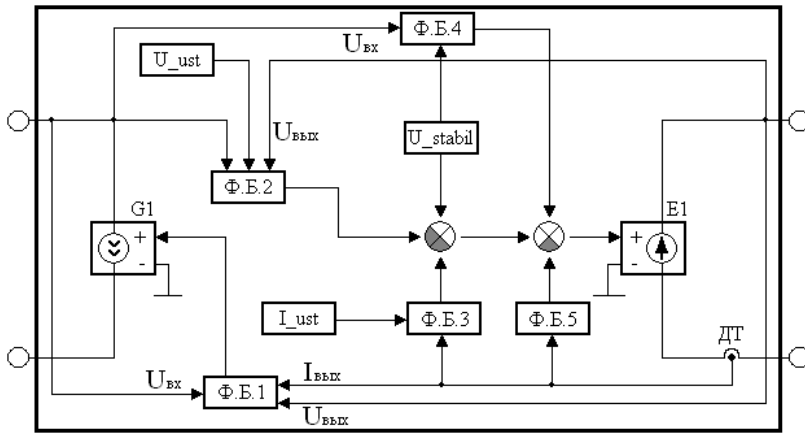


Рис. 10. Структурная схема энергетической модели импульсного стабилизатора напряжения

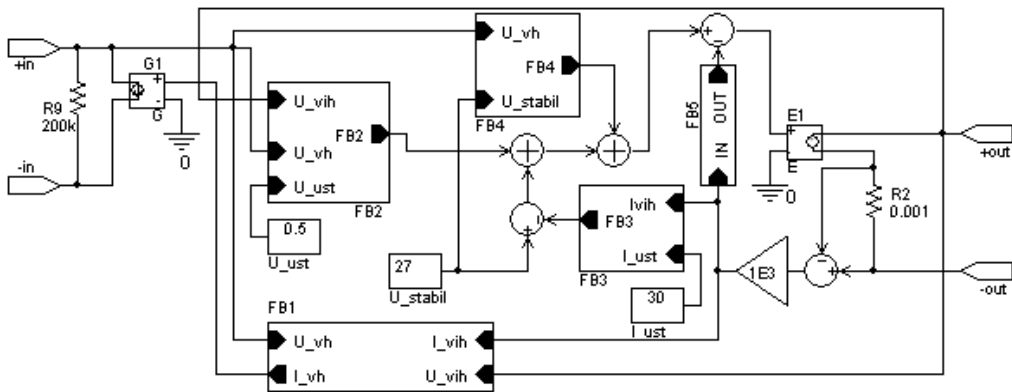


Рис. 11. Модель ИСН ПН

$U_{вх}$ ,  $P_{нагр}$ ). Величина  $P_{вх}$  рассчитывается по формуле  $P_{вх} = P_{вых} / \eta$ . После чего рассчитывается входной ток  $I_{вх} = P_{вх} / U_{вх}$ . Таким образом, мощность, потребляемая нагрузкой  $P_{вых}$ , равна (с учётом КПД) мощности на входе ИСН.

Функциональный блок Ф.Б.4 предназначен для расчета ошибки модели ИСН. В номинальном режиме работы величина ошибки рассчитывается по формуле  $\Delta = (U_{вх} - U_{stabil}) \cdot 0,001$ . При снижении входного напряжения до уровня напряжения стабилизации величина ошибки становится равной нулю.

На рисунке 11 представлена модель ИСН ПН.

Рассмотрим логику функционирования функционального преобразователя КПД. Функциональный преобразователь КПД, входящий в состав блока FB1, предназначен для задания величины КПД модели ИСН. Значение КПД определяется в виде функции  $\eta = f(U_{вх}, U_{вых}, P_{нагр})$ .

Примерный вид зависимости КПД от отношения  $U_{вых} / U_{вх}$ , для ряда значений мощностей нагрузки приведён на рис. 12. На нём заданы пять графиков зависимости  $\eta = f(U_{вых} / U_{вх})$  при следующих значениях мощности:  $P_1 = P_{ном}$ ;  $P_2 = 0,8 \cdot P_{ном}$ ;  $P_3 = 0,6 \cdot P_{ном}$ ;  $P_4 = 0,4 \cdot P_{ном}$ ;  $P_5 = 0,2 \cdot P_{ном}$ , где номинальная мощность на нагрузке  $P_{ном}$  для ИСН ПН = 72,798 Вт.

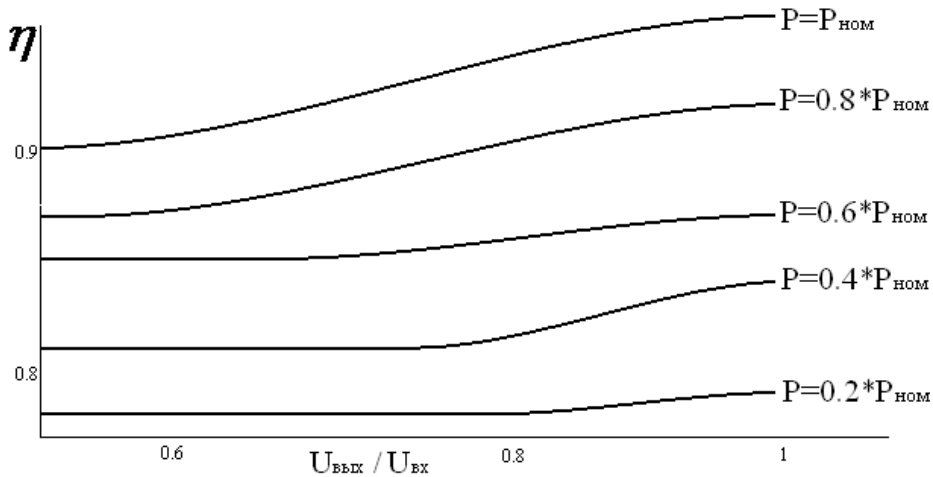


Рис. 12. Зависимость КПД от отношения  $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  для ряда мощностей нагрузки

Линии, приведённые на рис. 12, описываются следующими уравнениями:

$$\eta(P_{\text{нагр}} = P_{\text{ном}}) = -(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^3 + 2.26 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^2 - 1.52 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) + 1.22$$

$$\eta(P_{\text{нагр}} = 0.8 \cdot P_{\text{ном}}) = -(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^3 + 2.3 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^2 - 1.6 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) + 1.22$$

$$\eta(P_{\text{нагр}} = 0.6 \cdot P_{\text{ном}}) = -(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^3 + 2.4868 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^2 - 1.9736 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) + 1.3568$$

$$\eta(P_{\text{нагр}} = 0.4 \cdot P_{\text{ном}}) = -4 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^3 + 10.52 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^2 - 9.04 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) + 3.36$$

$$\eta(P_{\text{нагр}} = 0.2 \cdot P_{\text{ном}}) = -2.5 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^3 + 6.75 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^2 - 6 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) + 2.54$$

Введём промежуточные значения, которым соответствуют  $P_{\text{нагр}} = 0.9 \cdot P_{\text{ном}}$ ,  $P_{\text{нагр}} = 0.7 \cdot P_{\text{ном}}$ ,  $P_{\text{нагр}} = 0.5 \cdot P_{\text{ном}}$  и  $P_{\text{нагр}} = 0.3 \cdot P_{\text{ном}}$ . Уравнение каждой из этих линий рассчитывается как среднее арифметическое между уравнениями двух линий, между которыми располагается данная линия, т.е. линия, соответствующая  $P_{\text{нагр}} = 0.9 \cdot P_{\text{ном}}$ , определяется как  $[\eta(P_{\text{нагр}} = P_{\text{ном}}) + \eta(P_{\text{нагр}} = 0.8 P_{\text{ном}})] / 2$ , и т.д.

Условия, из которых определяется уравнение КПД в зависимости от мощности нагрузки, заданы в табл. 1. В первом столбце указываются диапазоны значений, в состав каждого из которых может входить величина, равная отношению  $P_{\text{нагр}} / P_{\text{ном}}$ . Во втором столбце отражены уравнения линий, соответствующие данным диапазонам.

Тестирование моделей ИСН проведено в двух режимах: в режиме стабилизации выходного напряжения, в режиме стабилизации выходного напряжения с демонстрацией снижения выходного напряжения при уменьшении входного напряжения (рис. 13, 14).

#### 4. Аккумуляторная батарея и устройство её заряда

Для получения требуемых значений напряжений и токов отдельные аккумуляторы соединяют между собой последовательно или параллельно в батарее.

Под отдаваемой емкостью понимают максимальное количество электричества в кулонах (ампер-часах), которое аккумулятор отдает при разряде до выбранного конечного напряжения.



Таблица 1. Зависимость КПД от отношения  $U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$  и мощности нагрузки  $P_{\text{нагр}}$

Диапазон $P_{\text{нагр}}$	Соответствующая линия
$0.95 \cdot P_{\text{ном}} \leq P_{\text{нагр}} \leq P_{\text{ном}}$	$\eta(1) = -(U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^3 + 2.26 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^2 - 1.52 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) + 1.22$
$0.85 \cdot P_{\text{ном}} \leq P_{\text{нагр}} < 0.95 \cdot P_{\text{ном}}$	$\eta(0.9) = [\eta(1) + \eta(0.8)] / 2$
...	...
$0.15 \cdot P_{\text{ном}} \leq P_{\text{нагр}} < 0.25 \cdot P_{\text{ном}}$	$\eta(0.2) = -2.5 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^3 + 6.75 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}})^2 - 6 \cdot (U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}) + 2.54$

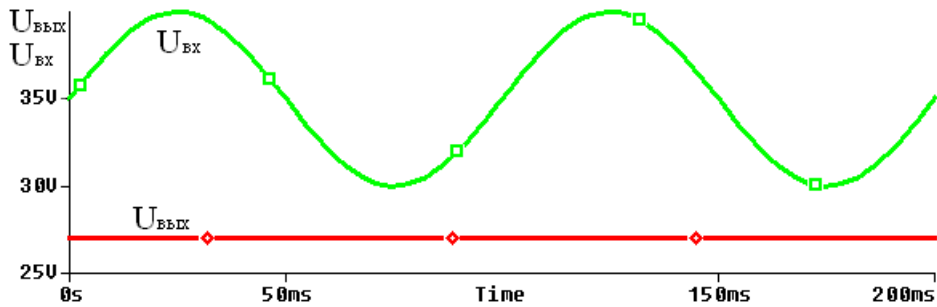


Рис. 13. Временная диаграмма режима стабилизации выходного напряжения

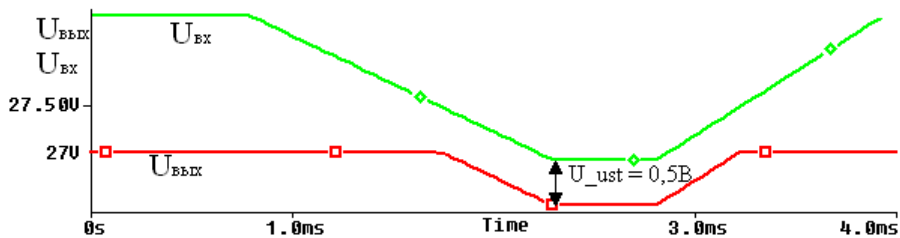


Рис. 14. Временная диаграмма режима прерывания стабилизации выходного напряжения

В условном обозначении типа аккумулятора приводится номинальная емкость, т.е. емкость при нормальных условиях разряда (при разряде номинальным током и обычно при температуре 20 °С).

При параллельном соединении аккумуляторов, т.е. при соединении между собой положительных и отрицательных полюсов всех элементов соответственно, можно составить батарею большой ёмкости с напряжением, равным номинальному напряжению одного аккумулятора, и ёмкостью, равной сумме емкостей составляющих её аккумуляторов.

На рисунке 15 представлена схема замещения АБ. Модель АБ состоит из сопротивления АБ  $R_{\text{акк}}$ , ёмкости АБ  $C_{\text{акк}}$  и сопротивления утечки  $R_{\text{утеч}}$ .

Заряд аккумулятора происходит, если к нему приложено напряжение, превышающее его текущее значение. Ток заряда аккумулятора пропорционален разности приложенного напряжения и напряжения холостого хода.

В зависимости от области применения аккумулятора можно заряжать различными способами.

На рисунке 16 приведена схема устройства заряда АБ методом заряда при постоянном напряжении и токе заряда. Напряжение АБ задаётся блоком  $U_{\text{орз}} = 24$  В. Начальное напряжение АБ = 10 В [6]. На рисунке 17 изображена диаграмма процесса заряда АБ.

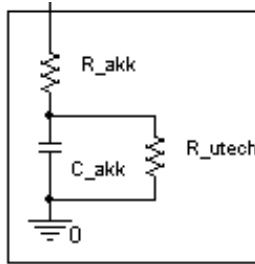


Рис. 15. Схема замещения АБ

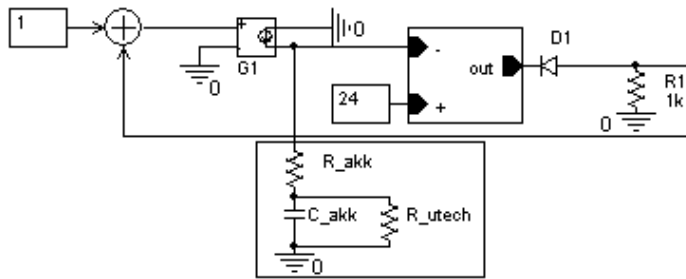


Рис. 16. Устройство заряда АБ

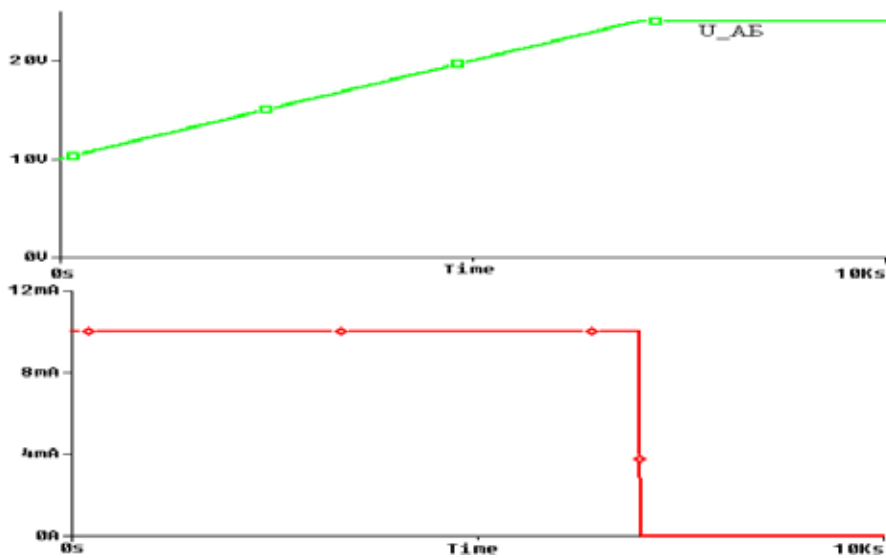


Рис. 17. Процесс заряда АБ

## 5. Нагрузка

Нагрузка СЭП космических аппаратов в общем случае не постоянна и может изменяться во времени. Примером нагрузки может быть модель, изображённая на рис. 18, в которой ключами задаётся временная программа нагрузки, а значениями сопротивлений – коммутируемая мощность. Временная диаграмма нагрузки приведена на рис. 19.

### Выводы

Разработаны и протестированы энергетические модели отдельных элементов систем электропитания космических аппаратов в средах OrCAD и MATLAB для использования их в составе более сложных имитационных моделей таких систем. Модели позволяют контролировать текущие значения токов и напряжений отдельных источников, преобразователей и потребителей электроэнергии в функции времени, измерять энергию, преобразуемую источниками, потоки энергии преобразователей с учётом потерь энергии внутри элементов и изменения внешних возмущений. Полученные результаты позволяют более обоснованно осуществлять выбор структуры параметров систем электропитания перспективных космических аппаратов с повышенным сроком активного существования, таких как аппараты Экспресс: АМ 5, АМ 8, АТ 1, АТ 2 с учётом условий их эксплуатации.

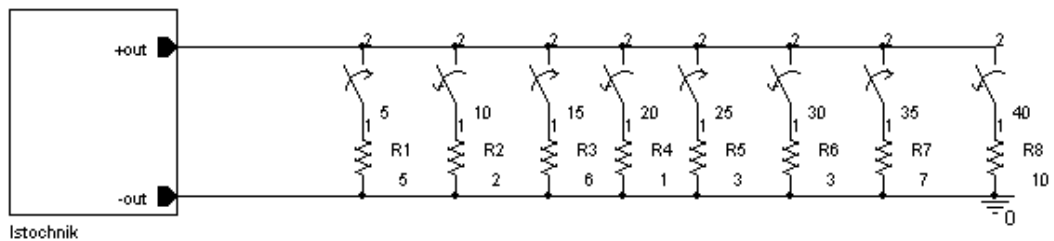


Рис. 18. Схема, имитирующая коммутацию нагрузки

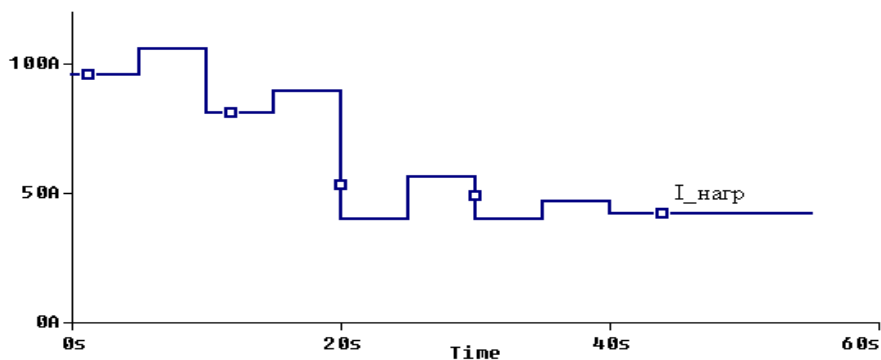


Рис. 19. Временная диаграмма нагрузки

### Список литературы

- [1] Лукьяненко М.В. и др. Источники энергии систем электроснабжения космических аппаратов/ Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2008. 176 с.
- [2] Раушенбах, Г. Справочник по проектированию солнечных батарей: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
- [3] Алатов И.М. // Информатика и системы управления: межвуз. сб. науч. тр. 2003. Вып 9. С. 182.
- [4] Найвельт Г.С., Мазель К.Б., Хусаинов Ч.И. Источники электропитания радиоэлектронной аппаратуры: Справочник. М.: Радио и связь, 1986. 576 с.
- [5] Пост С.С., Краснобаев Ю.В., Чубарь А.В. // Вестник Сибирского государственного университета им. акад. М.Ф. Решетнёва. 2012. Вып. 41. С. 48.
- [6] Клунникова Ю.В., Лукьяненко Е.Б., Кальсков В.В., Кальсков А.В. // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. №3. С. 12.

## Energy Prototypes of Units in Autonomous Power Supply Systems

**Vladimir I. Ivanchura,  
Alexey V. Chubar and Sergei S. Post**  
*Institute of Space and Information Technologies  
of Siberian Federal University  
26 Kirenskogo Str., Krasnoyarsk, 660074 Russia*

---

*There are developed energetic models of elements of autonomous systems of power supply: the solar cell, the extreme power governor of the solar cell, the switching converter with a pulse-width modulation, the storage battery and the load. Technique of simulation and investigation of energetic processes in power supply structures was developed with the help of modern CAD systems. Researches of models of elements of autonomous systems of power supply were made with the help of OrCAD 9.2 and MATLAB.*

*Keywords: power system, solar cell, extreme power governor, switching converter with a pulse-width modulation, storage battery.*

---