УДК 62-50:681.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОУРОВНЕВОЙ БОРТОВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ

© 2016 С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет

Статья поступила в редакцию 29.11.2106

Статья посвяшена современным информационным технологиям анализа бортовых систем электроснабжения на стадии их проектирования. В качестве практического примера используется система электроснабжения, содержащая несколько совместно работающих фотоэнергетических модулей солнечных батарей, управляемых общей системой автоматического регулирования. Представлена внутренняя структура модуля и раскрыто назначение его элементов. Составлены схема замещения солнечной батареи и её полная математическая модель в аналитическом виде, учитывающем обратный ток *p*-*n*-перехода и внутренние сопротивления фотоэлементов. На основе реальных технических параметров фотоэлементов и солнечной батареи в сборе построены вольтамперные характеристики фотоэлектрических преобразователей, подтверждающие адекватность предложенной модели. Средствами математического пакета MatLab разработана имитационная модель солнечной батареи и получены семейства вольтамперных характеристик по параметрам: плотность светового потока и температура. Составлена имитационная модель многоуровневой системы электроснабжения с тремя модулями солнечных батарей. Описан алгоритм многоуровневого управления системой при совместной работе всех модулей. Исследованы переходные процессы в системе управления в режимах затенения и скачков тока нагрузки. Продемонстрирована работоспособность предложенных моделей и целесообразность их использования при проектировании бортовых систем электроснабжения с фотоэлектрическими преобразователями энергии.

Ключевые слова: бортовые системы, электроснабжение, фотоэлектрические преобразователи, многоуровневое управление

Постановка задачи. Современные информационные технологии проектирования подсистем летательных аппаратов (ЛА) предполагают составление их математических и имитационных моделей с последующим исследованием на этих моделях различных, в том числе и аварийных режимов функционирования. Предлагаемая работа посвящена разработке таких моделей для

Подвальный Семён Леонидович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем. E-mail: spodvalny@yandex.ru

Васильев Евгений Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах. E-mail: vgtu-aits@yandex.ru многоуровневой бортовой системы электроснабжения содержащей несколько совместно работающих фотоэнергетических модулей – солнечных батарей, управляемых общей системой автоматического регулирования.

Общая структура системы. Функциональная схема рассматриваемой системы электроснабжения представлена на рис. 1 (изображён один фотоэнергетический модуль) и включает в себя [1-4]: модуль солнечных батарей; регулятор напряжения в системе; исполнительное устройство в виде электронного ключа, управляемого от широтно-импульсного модулятора; датчик напряжения.



Рис. 1. Функциональная схема управления одного фотоэнергетического модуля

В рассматриваемой системе регулируемой величиной является напряжение $U_{\rm H}$ на нагрузке; задающее воздействие – постоянное опорное напряжение $U_{\rm on}$. Внешними воздействиями на систему приняты: $R_{\rm H}$ – сопротивление нагрузки, Ом; W – плотность светового потока, Вт/м²; T – температура элементов батареи, К.

Описание элементов системы. Эквивалентная электрическая схема одного элемента солнечной батареи представлена на рис. 2, на котором обозначены: I_{ϕ} – фототок (ток идеального источника тока), А; $I_{Д}$ – обратный ток *p*-*n*перехода солнечного элемента, изменяющийся в соответствии с вольтамперной характеристикой эквивалентного диода, А; $R_{пp}$ – сопротивление параллельной цепи утечки тока, Ом; R_{nc} – последовательное сопротивление элемента, Ом; *U* – напряжение на выходных зажимах элемента, В; *I* – ток нагрузки, А. Параметры одного элемента солнечной батареи представлены в табл. 1.



Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема элемента солнечной батареи

Параметр элемента	Обозначение	Значение параметра
номинальный ток короткого замыкания при плот- ности светового потока 1000 Вт/м ² и номинальной температуре элемента (Т _{ном} =273+25 К)	I _{кз.ном}	3,5 A
температурный коэффициент роста фототока	k	0,002 A/K
напряжение холостого хода батареи при плотно- сти светового потока 1000 Вт/м ² и номинальной температуре элементов Т _{ном} =273+25 К	$U_{ m xx.hom}$	80 B
сопротивление параллельной цепи утечки тока	$R_{ m np}$	100000 Ом
последовательное сопротивление	$R_{ m nc}$	0,09 Ом
контактная разность потенциалов <i>p-n</i> -перехода, создающая потенциальный барьер для носителей зарядов при температуре элемента Т _{ном} =273+25 К	Ε	0,4 B
заряд электрона	q	1,602·10 ⁻¹⁹ Кл
постоянная Больцмана	В	1,381·10 ⁻²³ Дж/К
эмпирический коэффициент, корректирующий расчётную форму вольтамперной характеристики элемента	Α	2

1

Таблица	1.	Парамет	эы	одного	элемента	солнечной	батареи

Вольтамперная характеристика солнечной батареи в неявном виде описывается выражением:

$$I = N_{\rm np} \left(I_{\rm \phi} - I_{\rm A} \right) - \frac{U + I \frac{N_{\rm nc}}{N_{\rm np}} \cdot R_{\rm nc}}{\frac{N_{\rm nc}}{N_{\rm np}} \cdot R_{\rm np}}, \qquad (1)$$

в котором:

$$I_{\phi} = \frac{\left(I_{\rm K3, HOM} + k(T - T_{\rm HOM})\right)W}{1000}; \qquad (2)$$

$$I_{\mathcal{A}} = I_0 \left[e^{\frac{q \left(U + I \frac{N_{\rm nc}}{N_{\rm np}} \cdot R_{\rm nc} \right)}{N_{\rm nc} B \cdot T \cdot A}} - 1 \right];$$
(3)

$$I_0 = I_{\text{Hay}} \left(\frac{T}{T_{\text{HOM}}}\right)^3 e^{\left(\frac{1}{T_{\text{HOM}}} - \frac{1}{T}\right) \cdot \frac{q \cdot E}{B \cdot A}}; \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{U}_{\text{Hav}} = \frac{\boldsymbol{I}_{\text{K3.HOM}}}{\frac{\boldsymbol{q}\boldsymbol{U}_{\text{XX.HOM}}}{N_{\text{ne}}\boldsymbol{B}\cdot\boldsymbol{T}\cdot\boldsymbol{A}}},$$
(5)

где *I*_{нач} – начальное значение обратного тока *p*-*n*-перехода, А; *T* – текущая температура элемента, К.

При моделировании использовались параметры одной многоэлементной батареи в сборе, приведенные в табл. 2. На основе математической модели (1)-(5) и табл.1, 2 получены номинальные вольтамперные характеристики батареи (рис. 3). Для использования модели (1)-(5) в динамических режимах системы электроснабжения составлена имитационная модель солнечной батареи в пакете MatLab (рис. 4). На рис. 5 и 6 представлены полученные с помощью имитационной модели семейства вольтамперных характеристик солнечной батареи по параметрам плотности светового потока и температуре. В системе используется типовой пилообразный ШИМ симметричного типа; датчик напряжения выполнен на резистивном делителе; звено изодрома обеспечивает астатизм системы по напряжению на нагрузке.

Параметр батареи	Обозначение	Значение параметра
ток короткого замыкания при плотности свето- вого потока 1000 Вт/м ² и температуре элемен- тов батареи 273+80 К	$I_{{ m K}3}$	≈35 A
напряжение холостого хода при плотности све- тового потока 1000 Вт/м ² и температуре эле- ментов батареи 273+80 К	U_{x}	≈70 B
значение тока, соответствующее максимуму отдаваемой мощности	I _{опт}	≈30 A
значение рабочего напряжения, соответствую- щее максимуму отдаваемой мощности	$U_{ m ont}$	≈30 B
плотность светового потока	W	01000 Вт/м ²
диапазон температуры элементов батареи	Т	273+(-70+80) K
количество элементов в батарее, включённых последовательно	$N_{ m nc}$	100
количество элементов в батарее, включённых параллельно	$N_{ m np}$	10

Таблица 2. Параметры солнечной батареи



Рис. 3. Характеристики солнечной батаре
и при плотности светового потока *W*=1000 Вт/м² и температуре элемент
а $T_{\rm Hom}$ =273+80 К



Рис. 4. Имитационная модель солнечной батареи. Сопротивление нагрузки 1 Ом



Рис. 5. Вольтамперные характеристики солнечной батареи при температуре *T*=80°С для различных плотностей светового потока *W*

Имитационная модель системы perулирования. Имитационная модель системы с 3 солнечными батареями показана на рис. 7. Модель содержит три параллельно включённых регулятора (на рис. 7 блоки Contr1, Contr2, Contr3), которые отличаются программными устройствами смещения статической характеристики регулятора, вид которых показан на рис. 8.



Рис. 6. Вольтамперные характеристики солнечной батареи при плотности светового потока *W*=1000 Вт/м² для различных температур



Рис. 7. Имитационная модель системы с 3 солнечными батареями



Рис. 8. Статические характеристики регуляторов в блоках SB1, SB2, SB3

Смещение статических характеристик обеспечивает многоуровневый принцип регулирования напряжения на нагрузке [5, 6]: при малых токах нагрузки функционирует только солнечная батарея SB1; с увеличением тока батарея SB1 переходит на нерегулируемый (горизонтальный) участок статической характеристики и отдаёт полный ток 36 А, но при этом в активный режим переходит батарея SB2. При дальнейшем росте тока нагрузки управление будет передано очередной батарее SB3. В результате обеспечивается согласованная работа всех батарей фотоэнергетического модуля, причём запас устойчивости системы управления не зависит от количества нагруженных батарей. Последнее обстоятельство упрощает синтез системы регулирования.

Проверка показателей качества регулирования на имитационной модели. Исследование системы с тремя солнечными батареями предусматривало: анализ работы регуляторов при набросе и сбросе нагрузки, требующих поочерёдной коммутации солнечных батарей; анализ режимов переключений солнечных батарей при затенении одной из них - SB2; изменение опорного напряжения в одном регуляторе Contr1 на (-0,01) В. Результаты исследования представлены на рис. 9. Анализ рис. 9 подтверждает ожидаемое поведение системы: при увеличении или уменьшении тока нагрузки происходит поочерёдное, соответственно, подключение или отключение батарей SB1, SB2, SB3 в указанном порядке (моменты времени 0,03;0,11;013;0,16 с); при затенении батареи SB2 (интервал времени 0,06...0,08 с) недостающий ток в систему доставляет автоматически подключающаяся на длительность этого интервала батарея SB3; скачок опорного напряжения на интервале времени

0,18...0,22 с монотонно отрабатывается системой за счёт соответствующих изменений токов батарей.



Рис. 9. Изменение токов и напряжения на нагрузке в системе управления с 3 солнечными батареями

Выводы: предложенные математическая и имитационная модели бортовой системы электроснабжения с фотоэлектрическими преобразователями обеспечивает адекватное воспроизведение переходных процессов, происходящих в системе в режимах изменения нагрузки, затенения и скачков задающего воздействия. Реализация модели в среде MatLab открывает возможность домакетного исследования свойств системы на начальных этапах её проектирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

- Петровичев, М.А. Система энергоснабжения бортового комплекса космических аппаратов. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. университета, 2007. 88 с.
- Тищенко, А.К. Унифицированная система энергоснабжения для космических аппаратов / А.К. Тищенко, П.Т. Ганкевич, Г.Д. Лившин // Энергия. Научно-практический вестник.1999. №3. С. 34-51.
- Тищенко, А.К. Автономная система электропитания / А.К. Тищенко, П.Т. Ганкевич, В.В. Савенков, Г.Д. Лившин // пат. 2211479 Рос. Федерация: МПК G05F1/66, H02J7/34; заявитель и патентообладатель ООО «Орбита».- №2001100777/09; заявл. 09.01.2001; опубл. 27.08.2003, Бюл. № 24 (Ш ч.). С. 796.
- Тищенко, А.К. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции / А.К. Тищенко, Е.М. Васильев, А.О. Тищенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11, №2. С. 101-106.
- Подвальный С.Л. Многоальтернативные системы: обзор и классификация // Системы управления и информационные технологии. 2012. Т.48, №2. С. 4-13.
- 6. Подвальный, С.Л. Многоальтернативное управление открытыми системами: концепция, состояние и перспективы / С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев // Управление большими системами: сборник трудов. – М.: ИПУ РАН. 2014. № 48. С. 6-58.

SIMULATION OF MULTI-LEVEL ON-BOARD POWER SUPPLY SYSTEMS ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERTER

© 2016 S.L. Podvalniy, E.M. Vasilyev Voronezh State Technical University

The article is devoted to the analysis of modern information technologies on-board power supply systems at the design stage. As a practical example of using power supply system comprising a plurality of cooperating photovoltaic solar modules, controls the overall automatic control system. Presented internal module structure and revealed the appointment of its members. Charting the replacement solar cell and its complete mathematical model of a closed form that takes into account the reverse current p-n junction and the internal resistance of solar cells. On the basis of the real technical parameters of solar cells and solar cell assembly constructed current-voltage characteristics of photovoltaic cells, confirming the adequacy of the proposed model. In order to study the dynamic properties of the module in a variety of transients means MatLab mathematical package designed simulation model of the solar cell and the family of current-voltage characteristics are obtained for the parameters: the density of the luminous flux and temperature. Compiled simulation model of a multi-level power supply system with three modules of solar cells. The algorithm of multi-level control system in co-operation of all the modules. Transients were studied in the control modes of shading and load current surges. It demonstrated efficiency of the proposed models and the feasibility of their use in the design of on-board electrical systems with photovoltaic energy converters.

Key words: onboard power systems, photovoltaic converters, multi-level control

Semyon Podvalniy, Doctor of Technical Sciences, Professor. E-mail: spodvalny@yandex.ru; Evgeniy Vasilyev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. E-mail: vgtu-aits@yandex.ru