

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕИ

Пост С.С.

Научный руководитель д-р техн. наук Иванчура В.И.

Сибирский федеральный университет

### Введение

*Разработана математическая модель солнечной батареи. Методика моделирования и исследования энергетических процессов в системах электропитания осуществлена при помощи современных средств вычислительного моделирования.*

Фотоэлектрические генераторы для прямого преобразования энергии излучения Солнца в электрическую, собранные из большого числа последовательно соединенных фотопреобразователей солнечных элементов (СЭ), получили название солнечных батарей (СБ). Современные СБ генерируют на свету значительную электрическую мощность и применяются как для питания космических аппаратов (КА), так и для многих наземных автономных устройств различного назначения.

Солнечные батареи состоят из десятков и сотен тысяч отдельных СЭ, соединенных параллельно-последовательно с целью обеспечения требуемых номиналов тока и напряжения.

В данной статье рассмотрена математическая модель СБ. Эта модель, описываемая вольтамперной характеристикой (ВАХ) при заданной освещенности и температуре является базовой для расчета энергии СБ.

### Постановка задачи

Для анализа энергетических процессов в автономных СЭП в настоящее время целесообразно использовать методы компьютерного имитационного моделирования. Это позволяет оценить:

— обеспечение энергобаланса в автономных СЭП при известных энергетических характеристиках основных и буферных источников энергии и временной диаграмме энергопотребления со стороны нагрузки;

— влияние энергетических характеристик СЭП на обеспечение энергобаланса в системе в условиях временных изменений энергетических характеристик источников электропитания;

— влияние на энергетические характеристики СЭП таких параметров, как освещенность солнечной батареи, температура, время года, и т.п.

Для проведения анализа необходимо разработать математическую модель солнечной батареи.

### Модель солнечной батареи

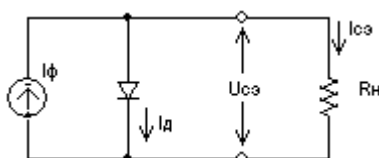


Рисунок 1 – Схема замещения солнечного элемента

На рисунке 1 изображена эквивалентная схема замещения солнечного элемента (СЭ). Она описывается следующим выражением:

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

где  $I_{\bar{N}\bar{Y}}$  - ток через внешнюю нагрузку,  $I_0$  - обратный ток насыщения,  $q$  - заряд электрона,  $T$  - абсолютная температура, °К,  $k$  - постоянная Больцмана,  $U_{\bar{N}\bar{Y}}$  - напряжение на выходе элемента,  $I_{\delta}$  - ток неосновных носителей, генерированных светом (фототок).

Влияние освещённости СЭ на величину  $U_{\bar{N}\bar{Y}}$  выражается формулой

$$I_{\delta}(W) = W \cdot I_{\delta} \quad (2),$$

где  $W$  - освещённость СЭ.

Реализуем математическую модель СЭ. В качестве примера выберем СЭ со следующими характеристиками:  $U_{\text{хх}} = 0,55 \text{ В}$ ,  $I_{\text{кз}} = 5,5 \text{ А}$ .  $\Rightarrow I_0 = 2,061 \cdot 10^{-9} \text{ А}$ .

Схема, реализующая ВАХ солнечного элемента, описываемого выражением (1), приведена на рисунке 2. Она позволяет оценить влияние на работу СЭ таких параметров, как уровень освещённости СЭ (номинальное значение  $W=1360 \text{ кВт/м}^2$ ), температура окружающей среды (номинальное значение  $T=298 \text{ К}$ ), а также угол падения светового потока (номинальное значение  $\alpha=90^\circ = \pi/2 \text{ рад}$ )

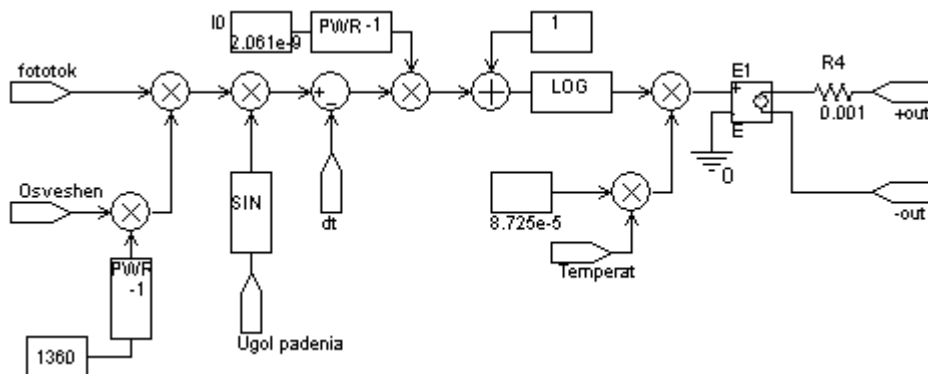
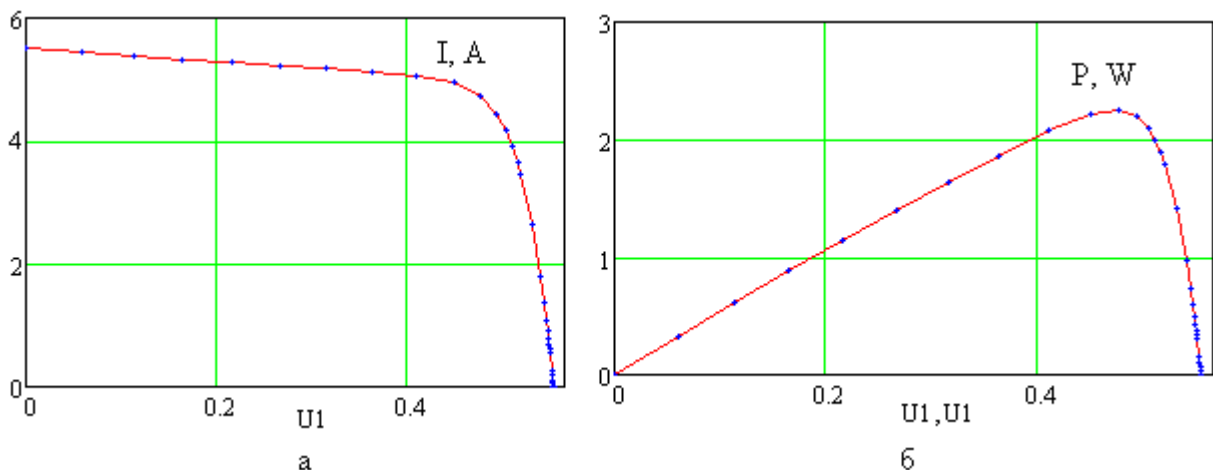


Рисунок 2 – Математическая модель СЭ



а – вольтамперная характеристика, б – вольтваттная характеристика

Рисунок 3 – Характеристики СЭ, описываемого уравнением (2)

Протестируем солнечную батарею, состоящую из 3 элементов соединённых последовательно. В этом случае напряжение на выходе СБ  $U_{\bar{N}\bar{A}}$  определяется по формуле  $U_{\bar{N}\bar{A}} = U_{\bar{Y}\bar{E}\bar{A}} = U_{\bar{N}\bar{Y}} \times N$ , где  $N$  – количество солнечных элементов, соединённых последовательно;  $I_{\bar{N}\bar{A}} = I_{\bar{Y}\bar{E}\bar{A}} = I_{\bar{N}\bar{Y}}$ .

На рисунке 4 изображена модель СБ, состоящая из 3 СЭ, соединённых последовательно.

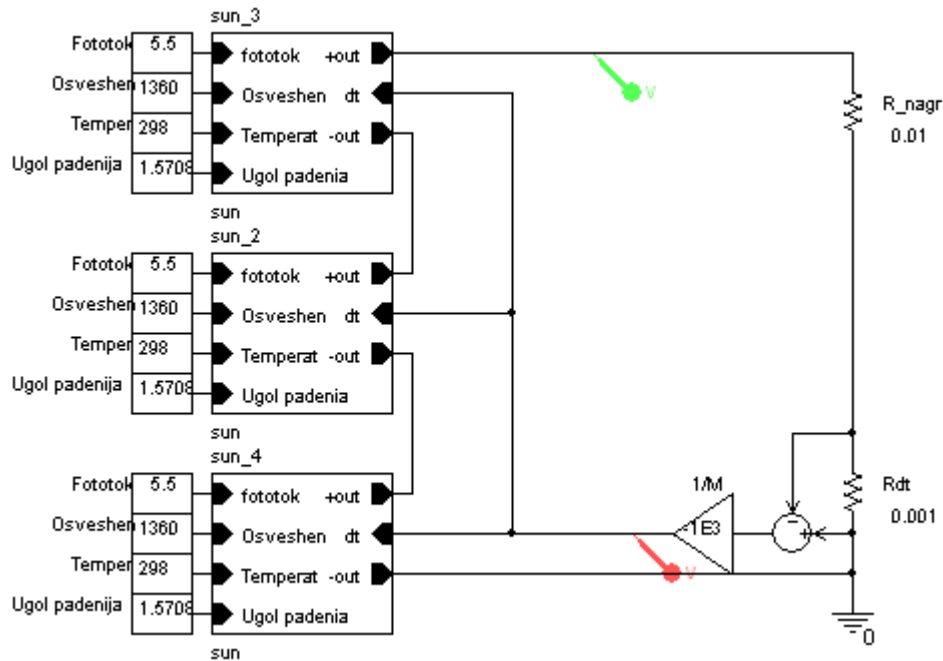
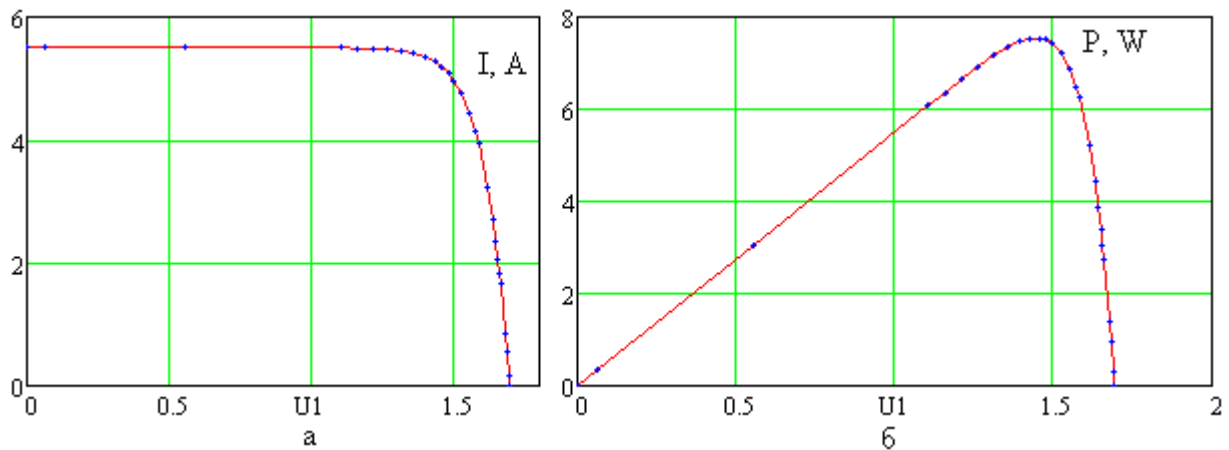


Рисунок 4 – Модель солнечной батареи, состоящей из 3 солнечных элементов, соединённых последовательно

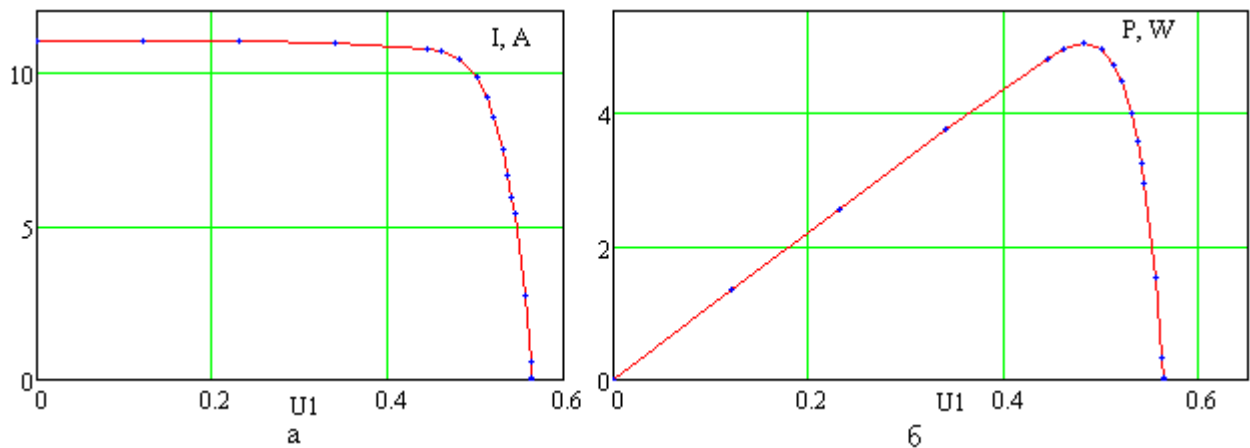


а – вольтамперная характеристика, б – вольтваттная характеристика

Рисунок 5 – Характеристики схемы, приведённой на рисунке 4

Как видно из рисунка 5, напряжение холостого хода СБ в 3 раза больше напряжения холостого хода СЭ (см. рисунок 3) => модель составлена верно.

Протестируем солнечную батарею, состоящую из 2 элементов соединённых параллельно. В этом случае напряжение на выходе СБ  $U_{\bar{N}\bar{A}}$  определяется по формуле  $U_{\bar{N}\bar{A}} = U_{\bar{Y}\bar{E}\bar{A}} = U_{\bar{N}\bar{Y}}$ ,  $I_{\bar{N}\bar{A}} = I_{\bar{Y}\bar{E}\bar{A}} = I_{\bar{N}\bar{Y}} \times M$ , где  $M$  – количество солнечных элементов, соединённых параллельно.

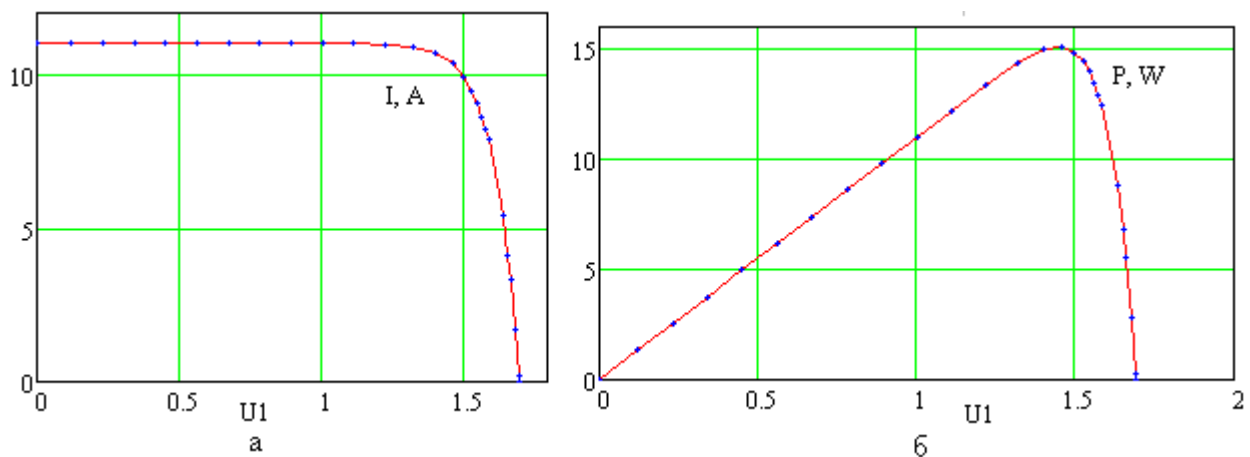


а – вольтамперная характеристика, б – вольтваттная характеристика  
Рисунок 6 – Характеристики схемы, состоящей из 2 солнечных элементов

Как видно из рисунка 6, ток короткого замыкания СБ в 2 раза больше тока короткого замыкания СЭ (см. рисунок 3) => модель составлена верно

Рассмотрим модель солнечной батареи, состоящей из 6 солнечных элементов, соединённых последовательно-параллельно.

В этом случае напряжение на выходе СБ  $U_{\bar{N}\bar{A}}$  определяется по формуле  $U_{\bar{N}\bar{A}} = U_{\bar{Y}\bar{E}\bar{A}} = U_{\bar{N}\bar{Y}} \times N$ , где  $N$  – количество солнечных элементов, соединённых последовательно  $I_{\bar{N}\bar{A}} = I_{\bar{Y}\bar{E}\bar{A}} = I_{\bar{N}\bar{Y}} \times M$ , где  $M$  – количество солнечных элементов, соединённых параллельно.



а – вольтамперная характеристика, б – вольтваттная характеристика  
Рисунок 7 – Характеристики схемы, состоящей из 6 элементов, соединённых последовательно-параллельно

### Заключение

Разработанная математическая модель солнечной батареи позволяет оценить влияние на характеристики СБ как внутренних факторов ( $U_{xx}$ ,  $I_{kz}$ ), так и внешних ( $W$ ,  $T$ ,  $\alpha$ ). Модель предназначена для проектирования СЭП. Результаты тестирования модели подтверждают её работоспособность.