

УДК 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.62

НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ

М. В. Бураков^а, канд. техн. наук, доцент

В. Ф. Шишлаков^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: солнечная батарея является одним из основных инструментов для создания возобновляемых источников энергии. Нелинейные характеристики солнечной батареи как объекта управления требуют совершенствования алгоритмов управления для эффективной выработки энергии в условиях меняющейся внешней среды. **Цель исследования:** разработка имитационной модели солнечной батареи для синтеза и исследования нечеткого алгоритма управления точкой максимальной мощности. **Результаты:** рассмотрены варианты моделирования солнечной батареи с помощью библиотеки физического моделирования в Simscape и с помощью графического программирования в Simulink. Модели были использованы при синтезе системы управления точкой максимальной мощности солнечного модуля. Исследованы два варианта управления: алгоритм возмущения и наблюдения и нечеткое логическое управление. Показано, что нелинейный закон управления, обеспечиваемый нечетким регулятором, позволяет сократить время переходного процесса, исключив колебания выходной мощности. **Практическая значимость:** применение нечеткого управления может оказаться полезным при проектировании систем управления широким кругом объектов солнечной энергетики.

Ключевые слова — солнечная батарея, моделирование, метод возмущения и наблюдения, нечеткое управление.

Введение

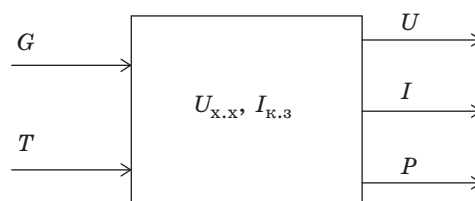
Использование возобновляемых источников электрической энергии является перспективным направлением современной энергетики [1, 2]. В рамках этого направления солнечная энергия занимает ключевые позиции в силу своей практической неисчерпаемости и доступности во всех точках поверхности Земли. Солнечная энергетика стремительно завоевывает позиции на мировом энергетическом рынке. Фотоэлектрические системы способны непосредственно преобразовывать энергию солнечной радиации в электрическую энергию без выброса вредных веществ в атмосферу. Они отличаются высокой надежностью, поскольку не имеют подвижных частей. Солнечные батареи пригодны как для выработки энергии в больших масштабах, так и для решения проблем энергообеспечения отдельных зданий, энергоснабжения автономных подвижных объектов, при создании солнечных холодильных систем и во многих других приложениях [3–5]. Вариации солнечной активности могут быть достаточно точно прогнозируемы, но главный недостаток солнечной энергетике заключается в зависимости от погодных и климатических условий. Для обеспечения стабильной выработки электроэнергии необходимо управлять работой солнечной батареи, поскольку мощность, генерируемая солнечной батареей, зависит от ее напряжения, значение которого на выходе постоянно изменяется в соответствии с освещенностью, временем суток, температурой панели. Контроллер солнечной батареи должен работать в режиме обеспечения максимальной выходной мощности

при вариациях температуры и солнечной радиации.

В настоящее время известны различные методы отслеживания точки максимальной мощности. Наиболее распространенным является метод возмущения и наблюдения [6, 7]. Перспективным для решения этой задачи является использование нечеткой логики [8, 9] и искусственных нейронных сетей [10]. В настоящей работе выполнено сравнение метода возмущения и наблюдения с алгоритмом нечеткого управления точкой максимальной мощности. При анализе методов управления используются имитационные компьютерные модели, разработанные средствами пакета MatLab.

Математическое моделирование солнечной батареи

Фотоэлектрический элемент (ФЭ) может быть представлен в виде функционального блока, имеющего внешние, внутренние и выходные параметры (рис. 1). К внешним параметрам относят освещенность и температуру ФЭ (G и T). К вну-



■ **Рис. 1.** Параметры ФЭ

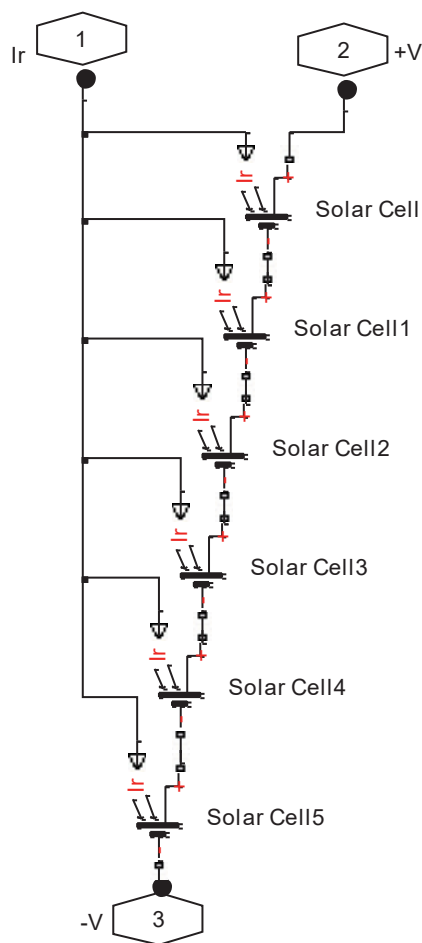
■ **Fig. 1.** Photocell parameters

тренним параметрам относят напряжение холостого хода ($U_{x,x}$) и ток короткого замыкания ($I_{к.з}$). Выходные параметры — выходное напряжение (U), ток нагрузки (I) и выходная мощность (P).

Основной характеристикой ФЭ является вольт-амперная характеристика — зависимость между током нагрузки и напряжением при постоянных значениях температуры и интенсивности поступающего солнечного излучения.

Имитационное моделирование солнечных батарей необходимо для синтеза систем управления, позволяющих эффективно вырабатывать энергию в условиях меняющейся внешней среды. Пакет MatLab обладает широкими возможностями для моделирования систем солнечной энергетики. Решить поставленную задачу можно двумя способами: с использованием Simulink MatLab или с помощью Simscape MatLab [11, 12].

Simulink MatLab является графическим языком программирования, который позволяет представить динамическую систему в виде набора блоков, описываемых определенными математическими зависимостями. Библиотека Simscape



■ **Рис. 2.** Объединение ФЭ в Simscape
 ■ **Fig. 2.** Combining photocells in Simscape

позволяет использовать физический язык моделирования, в котором имитационная модель объекта формируется с помощью библиотеки физических компонентов, которые взаимодействуют друг с другом путем обмена энергией через двунаправленные порты связи. Одновременное использование Simulink и Simscape позволяет выполнить верификацию имитационной модели солнечной батареи.

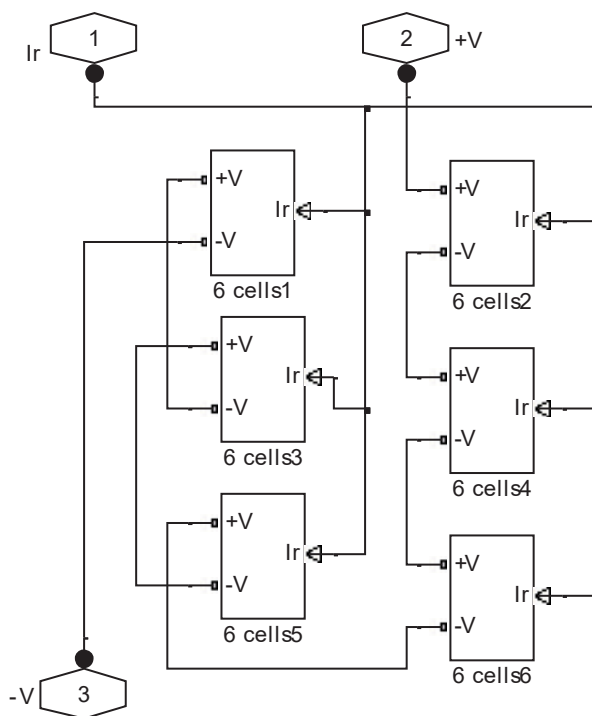
Для получения большого выходного напряжения ФЭ подключаются последовательно, а для достижения большого выходного тока ячейки соединяются параллельно. Модель ФЭ в библиотеке Simscape имеет три контакта: уровень солнечной радиации и токовые вход и выход. Последовательное соединение шести ФЭ показано на рис. 2.

Аналогично можно сформировать массив из 36 ФЭ, входящих в состав стандартного солнечного модуля (рис. 3).

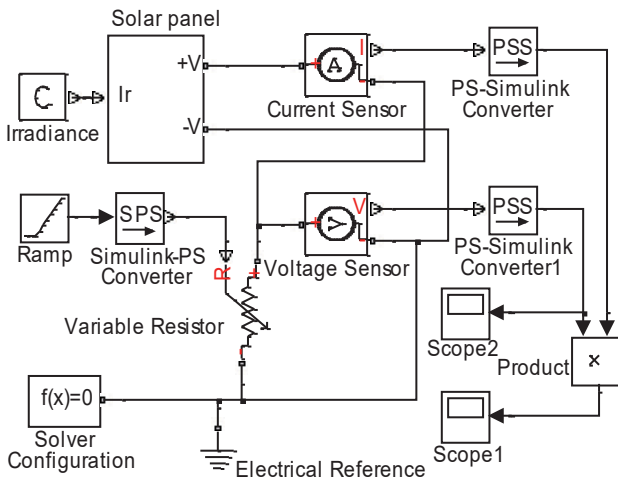
Схема исследования солнечной батареи в Simscape, с помощью которой можно получить вольт-амперную и мощностную характеристики солнечного модуля, представлена на рис. 4.

Полученные в результате вычислительного эксперимента зависимости показаны на рис. 5, а и б.

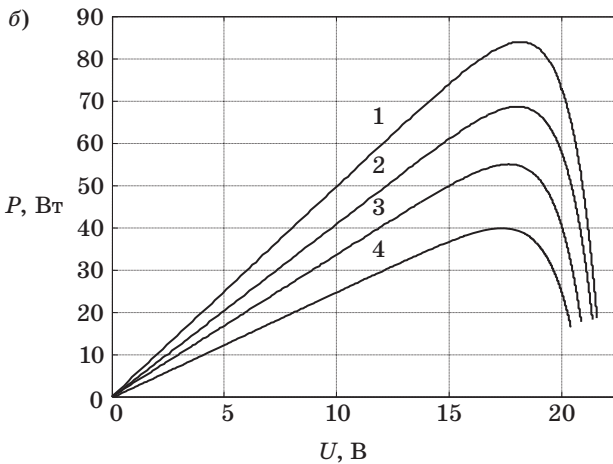
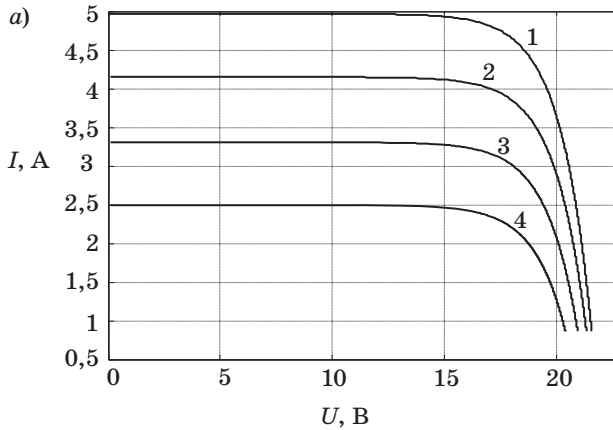
Полученные характеристики являются основными для солнечного модуля, однако могут представлять интерес также температурные зависимости, которые нельзя получить, используя мо-



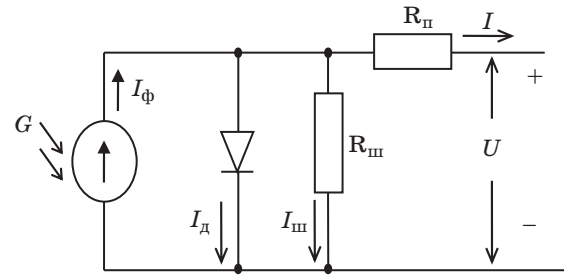
■ **Рис. 3.** Солнечный модуль
 ■ **Fig. 3.** The solar module



■ **Рис. 4.** Блок-схема эксперимента в Simscape
 ■ **Fig. 4.** Block diagram of the experiment in Simscape



■ **Рис. 5.** Вольт-амперная (а) и мощностная (б) характеристика солнечного модуля при различных значениях освещенности: 1 — 1200 Вт/м²; 2 — 1000 Вт/м²; 3 — 800 Вт/м²; 4 — 600 Вт/м²
 ■ **Fig. 5.** Volt-ampere (a) and power (б) characteristic of the solar module for various values of illumination: 1 — 1200 W/m²; 2 — 1000 W/m²; 3 — 800 W/m²; 4 — 600 W/m²



■ **Рис. 6.** Электрическая схема замещения ФЭ: G — солнечное излучение; R_s и $R_{ш}$ — последовательное и параллельное (шунтирующее) сопротивление (паразитные параметры ФЭ)
 ■ **Fig. 6.** Electrical circuit of photocell replacement: G — Solar radiation; R_s , $R_{ш}$ — series and shunt resistance

дель ФЭ в Simscape. Для исследования влияния температуры на параметры солнечного модуля можно использовать язык графического моделирования, опирающийся на аналитическое описание системы.

Математическая модель ФЭ [13, 14] основана на анализе структуры, представленной на рис. 6.

В соответствии с первым законом Кирхгофа можно записать

$$I = I_{\Phi} - I_d - I_{ш}, \quad (1)$$

где I_{Φ} — фототок; I_d — ток диода; $I_{ш}$ — ток шунтирующего сопротивления.

По второму закону Кирхгофа

$$I_{ш} = \frac{U + IR_s}{R_{ш}}. \quad (2)$$

Величина тока, протекающего через $p-n$ -переход (через диод), зависит от приложенного к нему напряжения согласно формуле

$$I_d = I_0 \left(\exp \left(\frac{q(U + IR_s)}{AkT} \right) - 1 \right), \quad (3)$$

где I_0 — обратный ток насыщения; q — заряд электрона; U — выходное напряжение; A — диодный фактор (константа идеальности); I — выходной ток; k — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура ФЭ, К.

Величина фототока описывается формулой

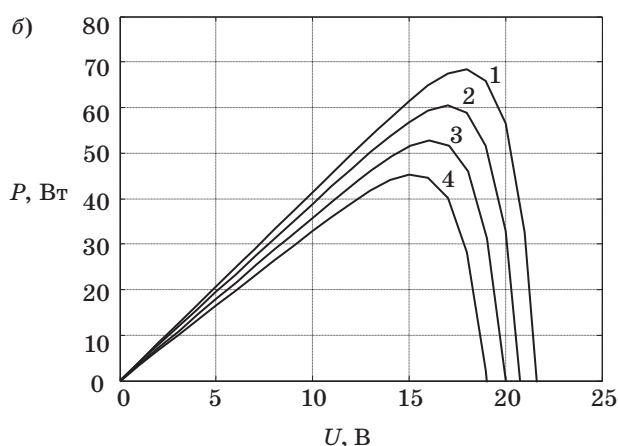
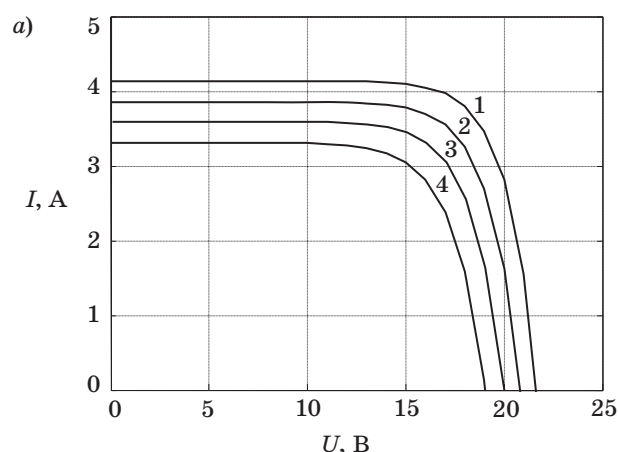
$$I_{\Phi}(T_H) = \frac{G}{G_H} I_{к.э}(T_H);$$

$$I_{\Phi}(T) = I_{\Phi}(T_H) (1 + T_k (T_H - T)), \quad (4)$$

где T_H — номинальная температура, 25 °С; G — освещенность солнечного элемента, Вт/м²; G_H —

■ **Таблица 1.** Параметры фотоэлектрического модуля
 ■ **Table 1.** Parameters of the photoelectric module

Параметр	Значение
Последовательное сопротивление R_{Π}	0,001 Ом
Заряд электрона q	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Больцмана k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Фактор идеальности диода A	1,6
Температурный коэффициент T_k	0,68 мА
Параллельное сопротивление $R_{\text{ш}}$	1 Ом
Номинальная освещенность $G_{\text{н}}$	1000 Вт/м ²
Номинальная температура $T_{\text{н}}$	25 °С
Количество последовательно соединенных ячеек N	36



■ **Рис. 7.** Вольт-амперная характеристика (а) и изменение мощности (б) солнечной батареи при различных значениях температуры: 1 — 25 °С; 2 — 35 °С; 3 — 45 °С; 4 — 55 °С

■ **Fig. 7.** Volt-ampere characteristic (a) and change in the power (b) of a solar battery for different temperature values: 1 — 25 °С; 2 — 35 °С; 3 — 45 °С; 4 — 55 °С

номинальная освещенность, Вт/м²; T — температура окружающей среды; T_k — температурный коэффициент фототока.

Температурный коэффициент вычисляется по формуле

$$T_k = \frac{I_{\text{к.з}}(T_2) - I_{\text{к.з}}(T_1)}{T_2 - T_1}$$

Подставляя (2)–(4) в (1), получаем выражение для описания тока солнечного элемента

$$I = I_{\text{к.з}} \frac{G}{G_{\text{н}}} (1 + T_k(T - T_{\text{н}})) - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(U + IR_{\Pi})}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_{\Pi}}{R_{\text{ш}}} \quad (5)$$

Можно считать, что $R_{\text{ш}}$ стремится к бесконечности, тогда в (5) можно пренебречь последним слагаемым:

$$I = I_{\text{к.з}} \frac{G}{G_{\text{н}}} (1 + T_k(T - T_{\text{н}})) - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(U + IR_{\Pi})}{AkT} \right) - 1 \right), \quad (6)$$

где I_0 — обратный ток насыщения, описываемый формулой

$$I_0 = I_0(T_{\text{н}}) \left(\frac{T}{T_{\text{н}}} \right)^3 \exp \left(\left(\frac{qE_g}{Ak} \right) \left(\frac{1}{T_{\text{н}}} - \frac{1}{T} \right) \right), \quad (7)$$

где E_g — полоса пропускания диода.

Обратный ток насыщения при номинальной температуре рассчитывается по формуле

$$I_0(T_{\text{н}}) = \frac{I_{\text{к.з}}(T_{\text{н}})}{\exp \left(\frac{qU_{\text{х.х}}(T_{\text{н}})}{AkT_{\text{н}}} \right) - 1} \quad (8)$$

При моделировании были приняты параметры, соответствующие солнечному модулю NP65GK (табл. 1).

Формулы (1)–(8) позволяют собрать в Simulink модель солнечного модуля и выполнить вычислительные эксперименты при любых заданных условиях.

Влияние температуры на вольт-амперную и мощностную характеристики солнечной батареи исследовано на рис. 7, а и б.

Результаты моделирования показывают, что характеристики солнечного модуля существенно нелинейны и обнаруживают сильную зависимость от внешних условий — солнечной радиации и температуры окружающей среды.

Управление точкой максимальной мощности

Принцип управления точкой максимальной мощности солнечной батареи иллюстрирует рис. 8.

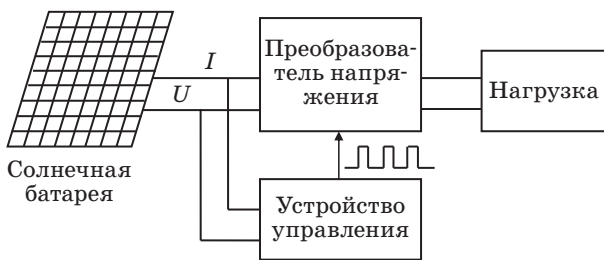
На выходе устройства управления располагается широтно-импульсный модулятор, который изменяет скважность импульсов, поступающих на преобразователь напряжения.

Задача обеспечения максимальной мощности может решаться с помощью метода возмущения и наблюдения, который предполагает уменьшение или увеличение скважности управляющих импульсов D с последующей оценкой изменения выходной мощности [8, 9]. Если в момент времени k мощность $P(k)$ и напряжение $U(k)$ больше, чем в предыдущий момент времени, то D увеличивается на ΔD , иначе уменьшается на ΔD . Величина ΔD подбирается экспериментально.

Закон управления можно описать с помощью правил:

если $\Delta P < 0$ и $U(k) > U(k - 1)$, то $D(k + 1) = D(k) - \Delta D$;

если $\Delta P < 0$ и $U(k) < U(k - 1)$, то $D(k + 1) = D(k) + \Delta D$;



■ Рис. 8. Система управления солнечной батареей
 ■ Fig. 8. Solar battery control system

если $\Delta P > 0$ и $U(k) < U(k - 1)$, то $D(k + 1) = D(k) - \Delta D$;

если $\Delta P > 0$ и $U(k) > U(k - 1)$, то $D(k + 1) = D(k) + \Delta D$.

Реализация алгоритма возмущения и наблюдения в MatLab представлена на рис. 9.

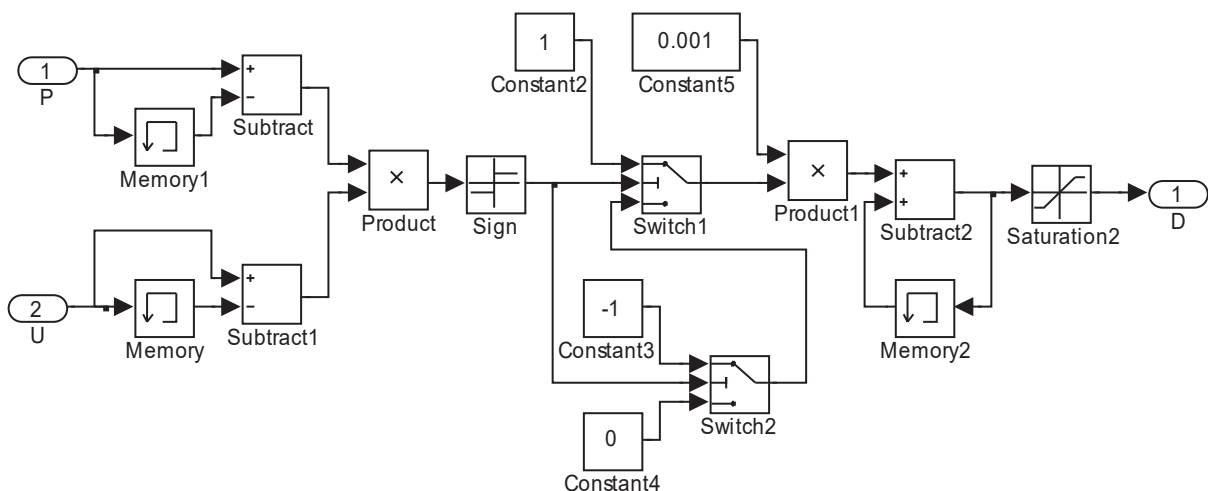
Нетрудно заметить, что метод возмущения и наблюдения является, по существу, разновидностью метода подъема по градиенту. Скважность изменяется дискретно, поэтому выбор ΔD оказывает заметное влияние на переходные процессы. Уменьшение значения ΔD приводит к росту длительности переходного процесса, увеличение ΔD вызывает колебания тока и напряжения (рис. 10).

Добиться переменного шага при изменении скважности импульсов позволяет использование нелинейного закона управления, реализуемого с помощью нечеткого логического регулятора (НЛР).

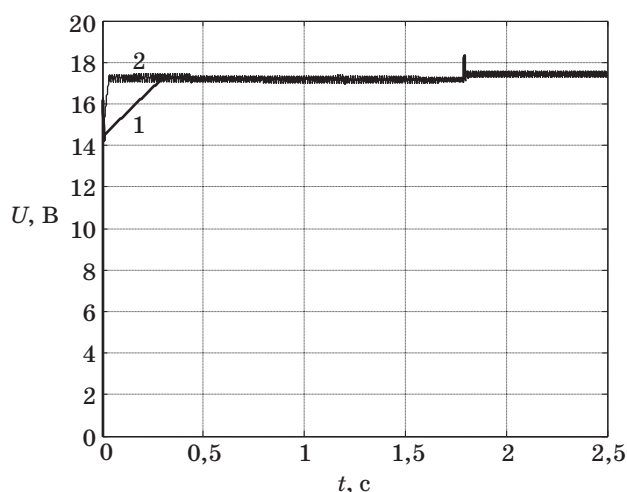
Основой нечеткого логического управления являются продукционные правила, связывающие нечеткие посылки и заключения. Для многих объектов эти правила неочевидны, и для их синтеза требуется применять процедуры обучения [15–17]. Однако в рассматриваемой задаче правила управления могут быть сформулированы эвристически.

В задаче нечеткого управления точкой максимальной мощности солнечной батареи можно выбрать такие же входные и выходные переменные, что и в методе возмущения и наблюдения: входами НЛР являются приращение напряжения $\Delta U(k)$ и приращение мощности $\Delta P(k)$, а выходом — приращение скважности импульсов $\Delta D(k)$.

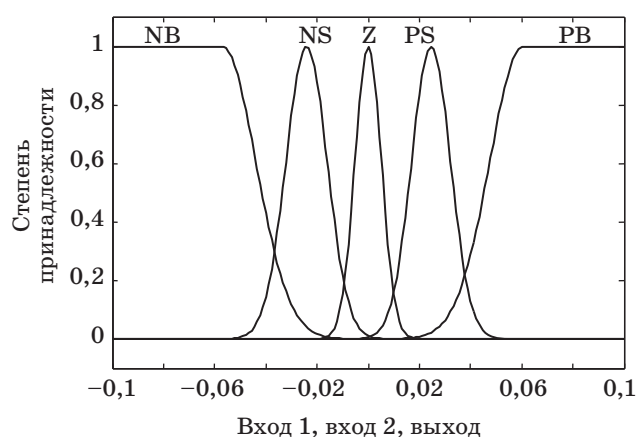
Для описания входов и выходов НЛР будем использовать лингвистические переменные с термами: {NB, NS, Z, PS, PB}, где NB — «negative



■ Рис. 9. Блок-схема алгоритма возмущения и наблюдения в Simulink MatLab
 ■ Fig. 9. Block diagram of the perturb and observe algorithm in Simulink MatLab



■ **Рис. 10.** Изменение выходного напряжения при $\Delta D = 0,01$ (линия 1) и $\Delta D = 0,1$ (линия 2)
 ■ **Fig. 10.** Change in the output voltage at $\Delta D = 0,01$ (line 1) and at $\Delta D = 0,1$ (line 2)



■ **Рис. 11.** Лингвистическое описание входов и выхода НЛП
 ■ **Fig. 11.** Linguistic description of inputs and output of fuzzy logic controller

big», NS — «negative small», Z — «zero», PB — «positive big», PS — «positive small» (рис. 11).

Структура НЛП представлена на рис. 12.

При составлении управляющих правил используется принцип изменения скважности импульсов с переменным шагом: при малых изменениях мощности изменение скважности замедляется, а при больших — растет.

Например:

1. Если напряжение сильно увеличилось и мощность тоже сильно увеличилась, то следует продолжать сильно увеличивать напряжение, т. е. сильно уменьшить скважность.

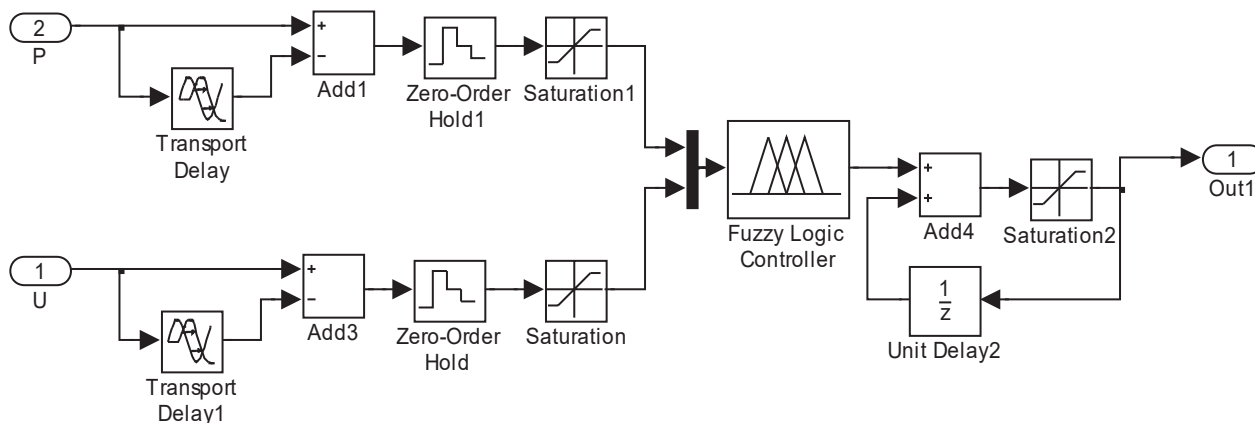
2. Если напряжение сильно увеличилось, а мощность слегка увеличилась, то следует слегка увеличивать напряжение, т. е. слегка уменьшить скважность.

Управляющие правила могут быть сведены в табл. 2.

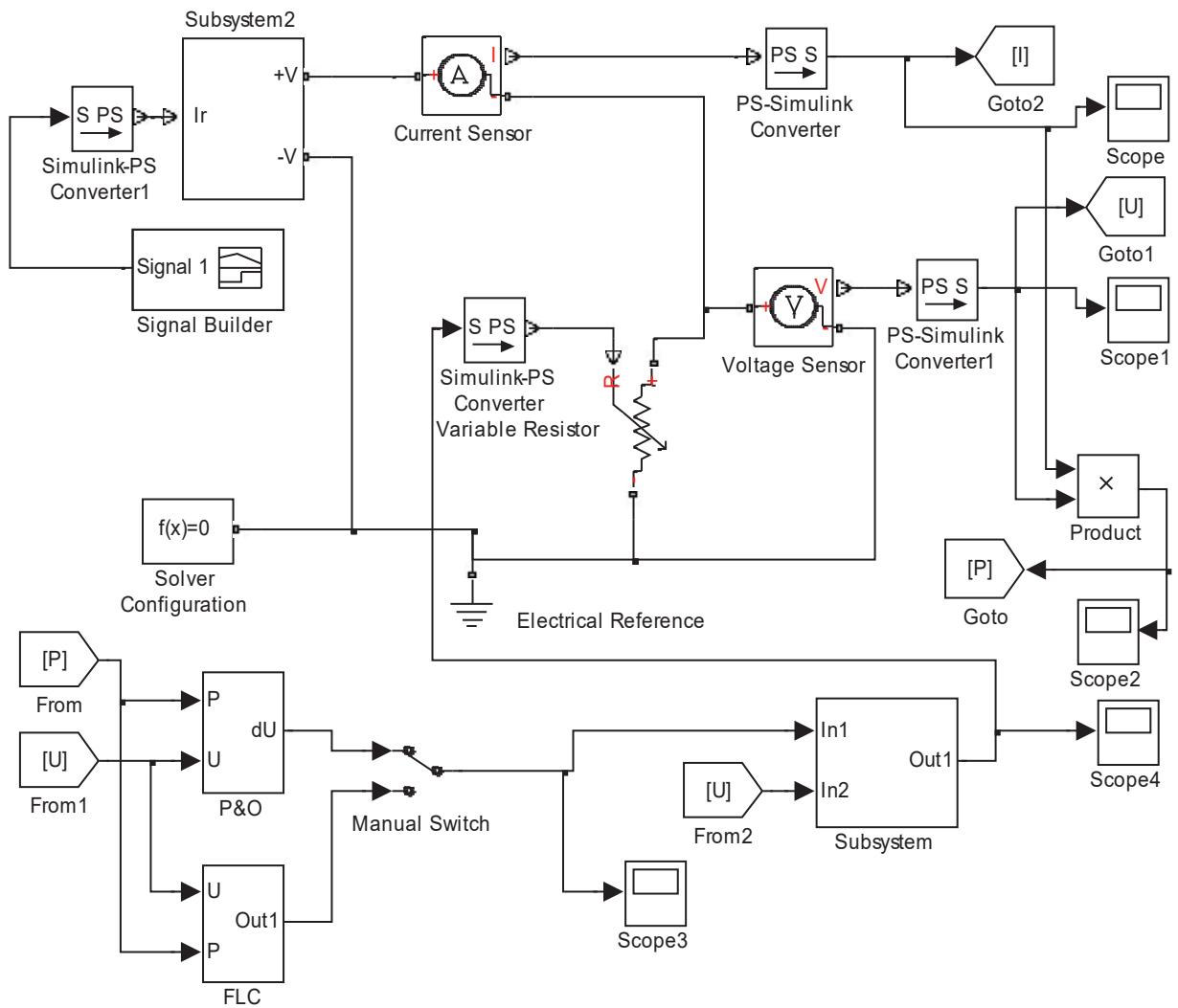
Схема сравнения алгоритмов слежения за точкой максимальной мощности представлена на рис. 13. Будем считать, что время квантования существенно выше периода широтно-импульсной модуляции, тогда преобразователь может быть представлен эквивалентным сопротивлением. Инерционность преобразователя может быть учтена введением аperiodического звена на его выходе.

■ **Таблица 2.** Управление скважностью импульсов
 ■ **Table 2.** Pulse width control

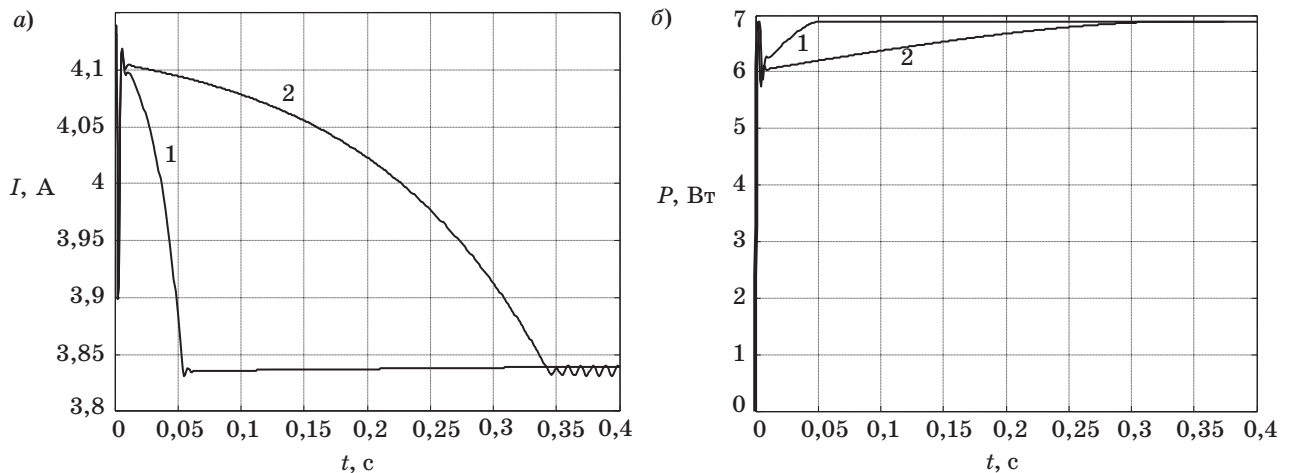
$\Delta P/\Delta U$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PS	NS	NS	NB
NS	PS	PS	PS	NS	NS
Z	PS	PS	Z	NS	NS
PS	NS	NS	PS	PS	PB
PB	NB	NS	NS	PS	PB



■ **Рис. 12.** Блок-схема НЛП в Simulink MatLab
 ■ **Fig. 12.** Block diagram of the fuzzy logic controller in Simulink MatLab



■ **Рис. 13.** Схема сравнения алгоритмов управления точкой максимальной мощности
 ■ **Fig. 13.** Comparison of control algorithms for the maximum power point tracking



■ **Рис. 14.** Изменение тока нагрузки (а) и мощности (б) при управлении с помощью НЛР (линия 1) и с помощью алгоритма возмущения и наблюдения (линия 2)
 ■ **Fig. 14.** Change of the load (a) and power (б) current during control by means of fuzzy logic controller (line 1) and with the help of the perturb and observe algorithm (line 2)

Переходные процессы при скачкообразном изменении освещенности солнечной батареи при разных вариантах реализации алгоритма управления показаны на рис. 14, а и б. Из анализа сравнения графиков видно, что использование НЛР обеспечивает значительное преимущество по сравнению с алгоритмом возмущения и наблюдения, позволяя сократить время переходного процесса, избежав при этом колебаний выходной мощности.

Заключение

Приведенные результаты вычислительных экспериментов соответствуют техническим характеристикам солнечного модуля NP65GK, па-

раметры которого использовались при моделировании. Модель, полученная с помощью физического моделирования в Simscape, показала параметры, практически идентичные параметрам модели, собранной с помощью графического программирования Simulink. Обе модели были использованы при проектировании системы управления точкой максимальной мощности солнечного модуля. Были исследованы два варианта управления: алгоритм возмущения и наблюдения и нечеткое логическое управление. Показано, что нелинейный закон управления, обеспечиваемый НЛР, позволяет значительно улучшить качество переходных процессов. Применение нечеткого управления может оказаться полезным при проектировании систем управления широким кругом объектов солнечной энергетики.

Литература

- Messenger R. A., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. — CRC PRESS, 2004. — 435 p.
- Markvart T. Solar Electricity. — Wiley, 2000. — 280 p.
- Winter C. J., Sizmann R. L., Vant-Hull L. L. Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics. — Springer-Verlag, 1991. — 425 p.
- Garg H. P. Solar Energy: Fundamentals and Applications. — Tata McGraw-Hill Education, 2000. — 434 p.
- Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. — Academic Press, 2013. — 840 p.
- Ropp M. E., Hohm D. P. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2003. Vol. 11(1). P. 47–62.
- Esrām T., Chapman P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques // IEEE Trans. Energy Convers. 2007. Vol. 22. N 2. P. 439–449.
- Cheikh M. S., Larbes C., Tchoketch G. F. Maximum Power Point Tracking using a Fuzzy Logic Control Scheme // Revue des Energies Renouvelables. 2007. Vol. 10. N 3. P. 387–395.
- Aredes M. A., França B. W., Aredes M. Fuzzy Adaptive P&O Control for MPPT of a Photovoltaic Module // Journal of Power and Energy Engineering. 2014. N 2. P. 120–129.
- Hadjab M., Berrah S., Abid H. Neural Network for Modeling Solar Panel // International Journal of Energy. 2012. Iss. 1. Vol. 6. P. 9–16.
- Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс, 2008. — 288 с.
- Дьяконов В. П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 976 с.
- Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. — М.: Сов. радио, 1976. — 246 с.
- Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 360 с.
- Бураков М. В., Кирпичников А. П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 4. С. 242–244.
- Бураков М. В., Яковец О. Б. Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 10. С. 157–166.
- Бураков М. В., Коновалов А. С., Яковец О. Б. Эволюционный синтез нечетких регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 28–33. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28

UDC 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.62

Fuzzy Control of Solar Power Plant

Burakov M. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, bmv@sknt.ruShishlakov V. F.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, svfmail@yandex.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: A solar battery is one of the main tools for the creation of renewable energy sources. Nonlinear characteristics of a solar battery as a control object require the improvement of control algorithms for the efficient generation of energy in a changing environment. **Purpose:** Our goal is to develop a simulation model of a solar battery for the synthesis and study of a fuzzy algorithm for the control of the maximum power point. **Results:** Some options have been considered for modeling a solar battery using a physical modeling library in Simscape, and using graphical programming in Simulink. These models were used in the synthesis of a system for the control of the maximum power point of a solar module. Two control options were studied: perturb and observe algorithm, and fuzzy logic control. It is shown that the nonlinear control law provided by the fuzzy controller allows you to reduce the time of the transient process by eliminating the oscillations of the output power. **Practical relevance:** The application of fuzzy control can be useful in the design of control systems for a wide range of solar energy facilities.

Keywords — Photovoltaic Module, Simulation, Perturb and Observe Method, Fuzzy Control.

References

- Messenger R. A., Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC PRESS, 2004. 435 p.
- Markvart T. *Solar Electricity*. Wiley, 2000. 280 p.
- Winter C. J., Sizmann R. L., Vant-Hull L. L. *Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics*. Springer-Verlag, 1991. 425 p.
- Garg H. P. *Solar Energy: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2000. 434 p.
- Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2013. 840 p.
- Ropp M. E., Hohm D. P. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2003, vol. 11(1), pp. 47–62.
- Esrām T., Chapman P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 439–449.
- Cheikh M. S., Larbes C., Tehoketch G. F. Maximum Power Point Tracking using a Fuzzy Logic Control Scheme. *Revue des Energies Renouvelables*, 2007, vol. 10(3), pp. 387–395.
- Aredes M. A., França B. W., Aredes M. Fuzzy Adaptive P&O Control for MPPT of a Photovoltaic Module. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, no. 2, pp. 120–129.
- Hadjab M., Berrah S., Abid H. Neural Network for Modeling Solar Panel. *International Journal of Energy*, 2012, iss. 1, vol. 6, pp. 9–16.
- Chernykh I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of Electrical Devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p. (In Russian).
- Dyakonov V. P. *MATLAB R2007/2008/2009 dlia radioinzhenerov* [MATLAB R2007/2008/2009 for Radio Engineers]. Moscow, DMK Press Publ., 2010. 976 p. (In Russian).
- Vasilyev A. M., Landsman A. P. *Poluprovodnikovye fotopreobrazovateli* [Semiconductor Photovoltaics]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976. 246 p. (In Russian).
- Raushenbakh G. *Spravochnik po proektirovaniu solnechnykh batarei* [Guide to the Design of Solar Panels]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 360 p. (In Russian).
- Burakov M. V., Kirpichnikov A. P. Fuzzy PID Controller for Nonlinear Plant. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 242–244 (In Russian).
- Burakov M. V., Yakovets O. B. Fuzzy Control of Power Gyroscopic Unit. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 157–166 (In Russian).
- Burakov M. V., Kononov A. S., Yakovets O. B. Evolutionary Synthesis of Fuzzy Controllers. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 28–33 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28