

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уайт Д.С., Вудсон Г.Х. Электромеханическое преобразование энергии. — М.; Л.: Энергия, 1964.
2. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д., Тюков В.А. Электромагнитные силы в динамических процессах электромеханических систем. — Электротехника, 1998, № 12.
3. Малинин Л.И., Малинин В.И., Макельский В.Д., Тюков В.А. Энергетические соотношения и электромагнитные силы в медленно движущихся средах. — Электричество, 2001, № 11.
4. Тамм И.Е. Основы теории электричества. — М.: Гостехиздат, 1976.
5. Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники. — М.;Л.: Госэнергоиздат, 1961.
6. Поливанов К.М. Теория электромагнитного поля. — М.: Энергия, 1975.

[13.12.09]

\* \* \*

## Моделирование системы слежения за максимумом мощности фотоэлектрической панели

ХЕГАЗИ РЕЗК, ВИССАРИОНОВ В.И.

Приведены результаты исследования по достижению наибольшей эффективности работы фотоэлектрической панели путем отслеживания точки максимальной мощности. Предложена быстрая и точная система отслеживания этой точки, в основу которой положен метод постепенно возрастающей проводимости, эта система смоделирована с помощью программы PSIM.

Ключевые слова: фотоэлектрическая панель, система отслеживания, моделирование, точка максимальной мощности

Мощность, генерируемая фотоэлектрической панелью (ФЭП), зависит от ее напряжения, значение которого на выходе ФЭП постоянно изменяется в зависимости от погодных условий, времени суток, температуры панели. Оптимальное значение напряжения на выходе ФЭП соответствует точке максимума мощности при этих параметрах. Для отслеживания таких уровней напряжения на выходе ФЭП, при которых ее эффективность максимальна, применяются системы отслеживания точки максимальной мощности (англ. maximum power point tracking — MPPT). Известны различные методы отслеживания MPPT. Наиболее распространенными являются методы CV (constant voltage), P&O (perturb and observe) и INC (incremental conductance). В качестве систем управления используются различные программно-аппаратные средства, в том числе с использованием искусственных нейронных сетей, нечёткой логики и др. [1, 2].

Эквивалентная схема замещения фотоэлектрического элемента [3—5]. Схема замещения фотоэлек-

Авторы: Малинин Леонид Иванович окончил электромеханический факультет Новосибирского электротехнического института (НЭТИ), ныне НГТУ (НЭТИ). Докторскую диссертацию «Энергетика сервоприводов постоянного тока» защитил в 1993 г. Профессор кафедры ТОЭ (НГТУ).

Кондратьев Владимир Александрович окончил электромеханический факультет НЭТИ в 1968 г. Кандидатскую диссертацию «Моделирование и расчет электродвигателей с полым якорем и внутри-якорным возбуждением» защитил в 1976 г. Доцент кафедры автоматизации НГТУ.

Малинин Вячеслав Леонидович окончил электромеханический факультет НГТУ в 2007 г. Преподаватель по направлению «Автоматизированные информационные системы» НГТУ.

Results obtained from a study aimed at achieving the most efficient operation of a photovoltaic panel by tracking the point of maximal power output are presented. A fast-response and precise system for tracking this point is proposed, which is based on the method of gradually growing conductance. The proposed system is simulated using the PSIM computer program.

Key words: photovoltaic panel, tracking system, simulation, point of maximal power output

трического элемента может быть представлена эквивалентной электрической схемой, показанной на рис. 1.

Выходной ток схемы  $I$  представляет собой ток, генерируемый световым потоком  $I_{ph}$  без учета небольшого диодного тока  $I_D$  и тока утечки  $I_{sh}$ . Сопротивление  $R_s$  — это сопротивление фотоэлектрического элемента протекающему току (зависит

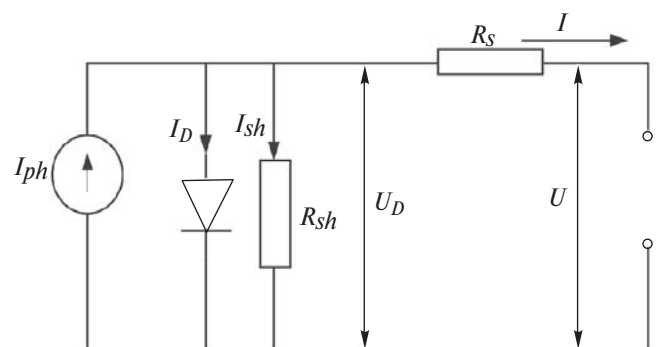


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения фотоэлектрического элемента

от глубины *pn*-перехода, примесей и сопротивления контактов). Сопротивление шунта  $R_{sh}$  обратно пропорционально току утечки на землю. В идеальном фотоэлектрическом элементе  $R_s = 0$  (нет потерь) и  $R_{sh} = \infty$  (нет утечки на землю). Значение КПД ФЭП нечувствительно к изменениям сопротивления  $R_{sh}$ , но чувствительно даже к небольшим изменениям сопротивления  $R_s$ . Незначительное увеличение  $R_s$  может существенно уменьшить выходное напряжение и мощность.

Выражение для определения тока нагрузки имеет вид [3, 5]:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{aU_D}{A}\right) - 1 \right] - \frac{U_D}{R_{sh}}, \quad (1)$$

где

$$U_D = V + IR_s; \quad (2)$$

$$I_{ph} = [I_{кз} + K_i(T - T_r)]; \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{I_{кз}}{\exp\left(\frac{aU_{x,x}}{A}\right) - 1} \exp\left(\frac{aU_D}{A}\right) \exp\left(\frac{e^0 E_G}{kT_r}\right) \frac{1}{KA}; \quad (4)$$

параметр *a* определяется по формуле  $a = \frac{e^0 b}{KTn_{сэ}}$ ;  $I_0$

– ток насыщения диода;  $I_{ph}$  – фототок;  $A$  – безразмерный электрический коэффициент;  $e^0$  – заряд электрона;  $K$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура ФЭП;  $T_r$  – температура ФЭП при стандартных условиях;  $K_i$  – температурный коэффициент тока;  $n_{сэ}$  – число последовательно соединённых элементов ФЭП;  $I_{кз}$  – ток КЗ;  $U_{x,x}$  – напряжение х.х.

**Определение точки максимальной мощности.** Рассматриваемая компьютерная программа, созданная в среде Matlab, была разработана для определения энергетических характеристик ФЭП с учётом вышеуказанных уравнений. Панель установлена в районе Увейната (юго-запад Египта, между 22 и 24° северной широты).

Расчёты проводились при оптимальной точке вольт-амперной характеристики ФЭП и различных напряжениях. Структурная схема алгоритма программы представлена на рис. 2. На рисунке через  $R^b$  обозначено солнечное излучение на наклонную площадку (под углом  $\beta$ ). На рис. 3 и 4 приведены вольт-амперные и энергетические характеристики, полученные ФЭП в январе при усреднённых погодных условиях страны.

Данные таблицы и рис. 5 дают представление о годовой выработке электроэнергии одной ФЭП

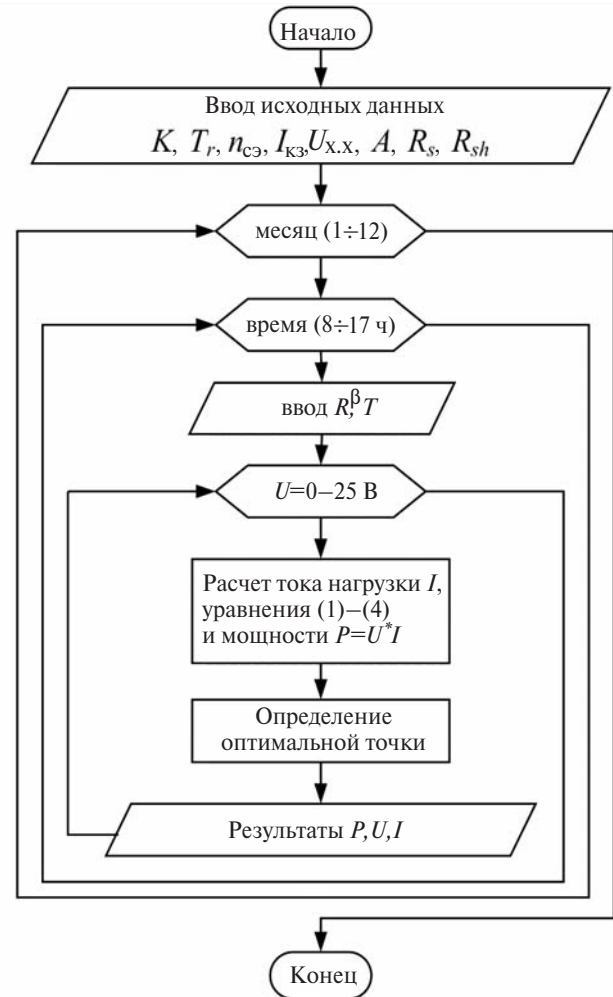


Рис. 2. Структурная схема алгоритма программы

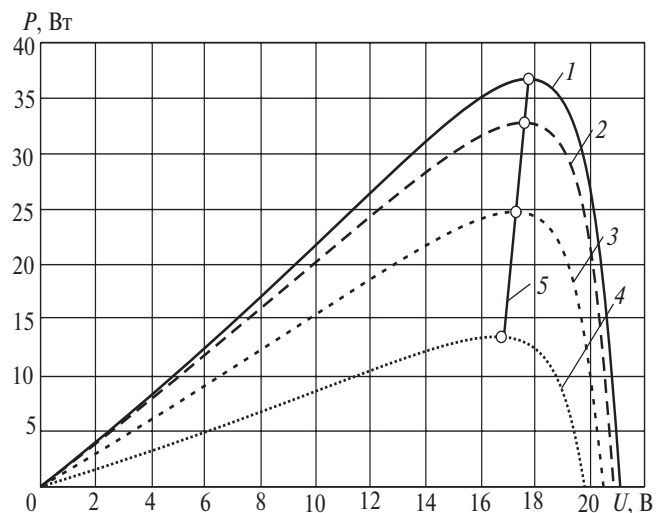


Рис. 3. Вольт-энергетические характеристики: 1 –  $t = 14$  ч; 2 –  $t = 15$  ч; 3 –  $t = 16$  ч; 4 –  $t = 17$  ч; 5 – MPP

при различных её выходных напряжениях. В таблице также указан объем увеличения годовой выработки за счет работы ФЭП при точке максимума мощности. Средний прирост выработки ( $D$ , %) составил 22,26%.

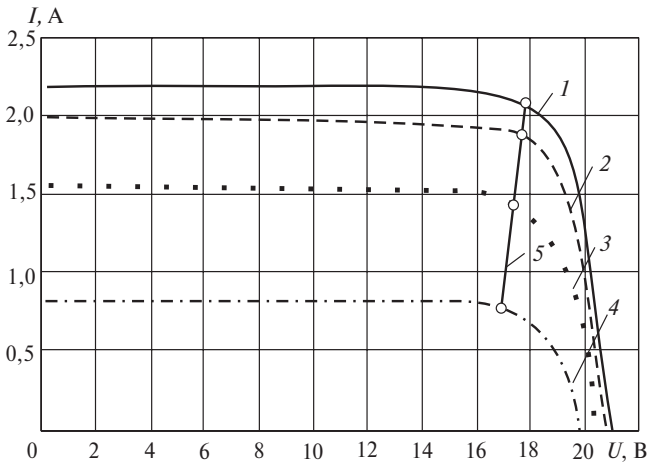


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики: 1 –  $t = 14$  ч; 2 –  $t = 15$  ч; 3 –  $t = 16$  ч; 4 –  $t = 17$  ч; 5 – МРР

Напряжение панели $U$ , В	Энергия, кВт·ч	$D$ , %
10	71,1995	60,37
11	78,3017	45,82
12	85,3736	33,74
13	92,3670	23,62
14	99,1591	15,15
15	105,4359	8,30
16	110,3986	3,43
17	112,0201	1,93
18	105,1699	8,57
19	76,8898	48,50
$U_{mpp}$	114,1828	0

Из рис. 5 следует, что оптимальные результаты получены в точке максимальной мощности, где средняя вырабатываемая энергия ФЭП увеличивается на 22,26 % по сравнению со случаем работы без использования системы отслеживания максимальной мощности ФЭП.

**Моделирование системы INC MPPT.** Пусть панель работает при выходном напряжении  $U$  и токе  $I$ , тогда отдаваемая мощность равна  $P = UI$ . При перемещении рабочей точки от начального положения новые значения тока и напряжения будут равны  $I + DI$  и  $U + DU$ , а генерируемая мощность

$$P + DP = (I + DI)(U + DU)$$

или, если пренебречь членом  $(D^2IU)$ ,

$$DP = UDI + IDU.$$

Значение  $DP$  равно нулю в точке максимума мощности и в ее окрестности. Следовательно,

$$dU / dI + U / I = 0.$$

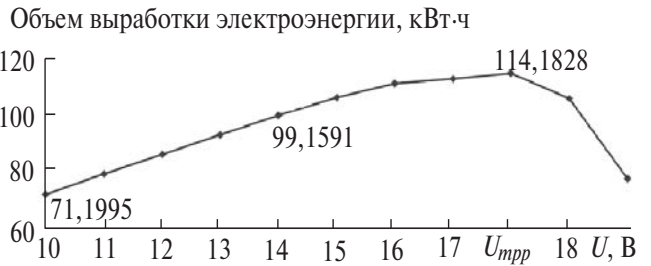


Рис. 5. Годовая выработка электроэнергии одной ФЭП при различных напряжениях

На рис. 6 представлены структурная система отслеживания точки максимальной мощности (рис. 6,а) и её алгоритм работы (рис. 6,б).

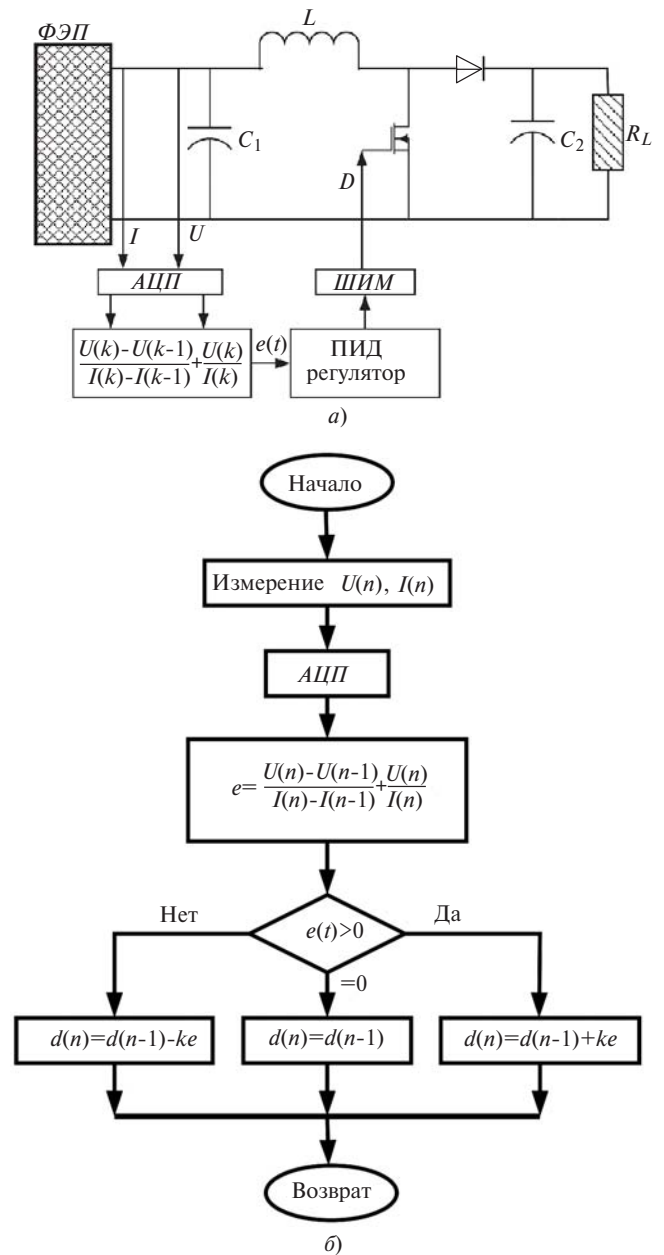


Рис. 6. Структурная схема системы (а) и её алгоритм (б):  $e(t)$  — сигнал рассогласования;  $D$  — коэффициент заполнения; ШИМ — широтно-импульсная модуляция; АЦП — аналого-цифровой преобразователь

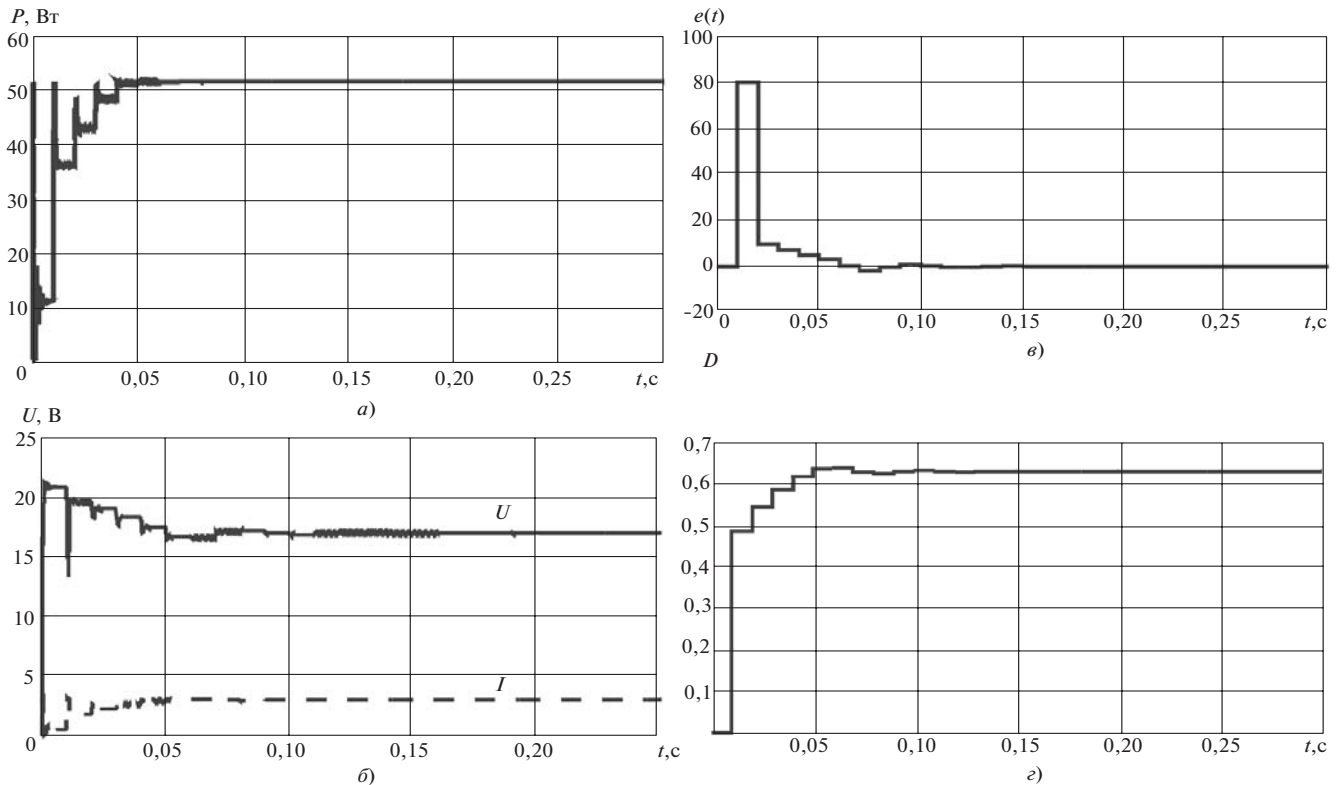


Рис. 7. Динамические характеристики ФЭП: мощности (а), тока и напряжения (б), сигнала рассогласования (в) и график изменения коэффициента заполнения (г)

**Результаты моделирования.** Схема, представленная на рис. 6,а, смоделирована с помощью PSIM [7].

Ниже перечислены все параметры, необходимые для моделирования этой системы:

мощность ФЭП типа LA361K51S при MPP, Вт	51
ток ФЭП при MPP, А	3,02
напряжение ФЭП при MPP, В	16,9
емкость конденсаторов DC/DC преобразователя $C_1 = C_2$ , мкФ	47
индуктивность DC/DC преобразователя L, мГн	1
нагрузка $R_L$ , Ом	40
коэффициенты ПИД-регулятора:	
$K_p$	0,001
$K_i$	0,6
$K_d$	0,01

(здесь  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  — коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих регулятора).

Динамическая характеристика мощности, ток, напряжение панели, сигнал рассогласования и изменение коэффициента заполнения при стандартных условиях (плотность потока солнечного излучения около  $1 \text{ кВт/м}^2$ , температура  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) приведены на рис. 7.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Eltamaly Ali** Modeling of Fuzzy Logic Controller for Photovoltaic Maximum Power Point Tracker. — Proc. Conf. «Solar Future 2010», Istanbul (Turkey), Feb. 2010.

2. **Chee Wei Tan, Green Tim C., Hernandez-Aramburo A. Carlos**, Analysis of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Algorithm for Photovoltaic Applications. — 2th IEEE Intern. Conf. on Power and Energy (PECon' 08), Johor Baharu (Malaysia), 1–3 Dec. 2008.

3. **Huan-Liang Tsai, Ci-Siang Tu, Yi-Jie Su**, Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK. — Proc. of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS 2008), San Francisco (USA), 22 – 24 Oct., 2008.

4. **Виссарионов В.И., Дерюгина Г.В., Кузнецова В.А., Малинин Н.К.** Солнечная энергетика: учебное пос. для вузов/Под ред. В.И. Виссарионова. — М.: Издат. дом МЭИ, 2008.

5. **Ramos Hernanz, Zamora Belver, Zulueta Guerrero**, Modeling of Photovoltaic Module, — Intern. Conf. on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'10), Spain, 23rd to 25th March 2010.

6. **Kim R., Lai J., York B., Koran A.** Analysis and Design of Maximum Power Point Tracking Scheme for Thermoelectric Battery Energy Storage System. — IEEE Trans. Ind. Electron., Sept. 2009, vol. 56, no.9,

[01.06.2011]

*Хегази Резк в 2006 г. окончил магистратуру электротехнического факультета университета Аэль-Мения (Египет). Аспирант кафедры нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Московского энергетического института МЭИ (ТУ).*

*Виссарионов Владимир Иванович окончил Ленинградский политехнический институт в 1962 г. В 1981 г. защитил докторскую диссертацию «Методика оптимизации параметров крупных насосных станций». Профессор кафедры «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» МЭИ (ТУ).*