

Аналитические методы определения параметров режима максимальной выходной мощности солнечных батарей

Imad Elzein, Петренко Ю.Н.,

Учреждение образования «Беларусский национальный технический университет»,

Минск, Республика Беларусь, ypetrenko@bntu.by

РЕФЕРАТ

В последние годы наблюдается все большее внимание к использованию возобновляемых источников энергии. Среди них солнечная энергия является одним из наиболее перспективных зеленых энергетических ресурсов из-за его экологической устойчивости и неисчерпаемости. Однако фотоэлектрические системы (ФЭС) характеризуются большой стоимостью оборудования и низкой эффективностью. Кроме того, характеристика солнечной батареи $V - I$ нелинейна и изменяется в зависимости от интенсивности солнечного излучения и температуры. Существует единственная точка работы ФЭС, называемая точкой максимальной выходной мощности (МВМ), в которой фотоэлектрическая станция работает с максимальной эффективностью и производит максимальную выходную мощность. Расположение МВМ не известно заранее, но может быть определено либо с помощью расчетных моделей или с помощью алгоритмов поиска. Известно большое разнообразие методов поиска точки МВМ, которые широко обсуждаются в многочисленных публикациях. В настоящей работе предлагается аналитический подход к нахождению координат МВМ с использованием современных вычислительных методов, что позволяет вести управление ФЭС в реальном времени.

ВВЕДЕНИЕ

Ныне никого не удивит мысль об актуальности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ), среди которых особое положение занимает солнечная энергетика (СЭ) благодаря своим уникальным свойствам неисчерпаемости (в пределах существования солнечной системы) и общедоступности (в пределах географических характеристик данной местности). Более того,

СЭ является практически единственным источником энергии для космических аппаратов в пределах земного притяжения и за его пределами. (Преобразование СЭ в тепловую здесь не рассматривается).

Тем не менее, использование СЭ имеет ряд непреодолимых проблем, которые условно можно сформулировать следующим образом: высокая стоимость солнечных элементов (СЭ) и низкий КПД преобразования. И первое и второе является мощным стимулом к повышенному вниманию вопроса максимального использования возможностей (выходной мощности) СБ.

Различные аспекты использования солнечной энергии рассматриваются в цитируемых источниках [1].

Эффективность преобразования зависит от технологии изготовления СЭ.

Наиболее известны три технологии изготовления солнечных элементов и СБ на их основе: монокристалльная, поликристалльная и тонкопленочная. Первые два вида основаны на технологии производства полупроводников и имеют КПД в пределах (9–15)%. Примерно такие же показатели имеют тонкопленочные элементы. Время от времени в печати появляются сообщения о достижении КПД до 30% и даже свыше 40%, но в промышленном масштабе такие элементы неизвестны. На этом фоне менее значима эффективность (КПД) электрических преобразователей (инверторов) в составе СЭС (более 95%), повышение которой требует новой элементной базы, что нереально в ближайшей перспективе. Посмотрим на эту проблему иначе — а что доступно проектировщику фотоэлектрической станции на основе имеющихся на рынке солнечных элементов и полупроводниковых устройств? Здесь появляется важнейший фактор-поиск наиболее эффективного алгоритма управления ФЭС при изменяющихся атмосферных условиях (величина солнечной радиации и температура окружающей среды), эффективность которого может достигать 98%.

Фотоэлектрический модуль, как набор фотоэлектрических элементов, соединенных последовательно-параллельно, имеет нелинейную внешнюю характеристику, вид которой зависит от атмосферных условий, с уникальной характерной точкой максимума выходной мощности (МВМ), Рис.1.

(справа налево 273, 300, 325, 350, 375 и 400К для различных уровнях давления АМ0 и АМ1) [2].

Таким образом, для получения максимальной энергии фотоэлектрической станции (ФЭС), алгоритм управления должен обеспечить такие параметры внешней характеристики при изменяющихся условиях эксплуатации, которые удерживают текущую точку работы в точке максимума. Такой подход является наиболее эффективным независимо от типа ФЭС и структуры преобразовательных устройств [3]-[8].

Исследование алгоритмов обеспечения МВМ является одной из главных тем, которые обсуждаются в многочисленных источниках. Глобальные исследования на эту тему на основе анализа 90 публикаций выполнили Т. Esram и Р. Charman [12], которые отметили рост числа публикаций с 1968 по 2005

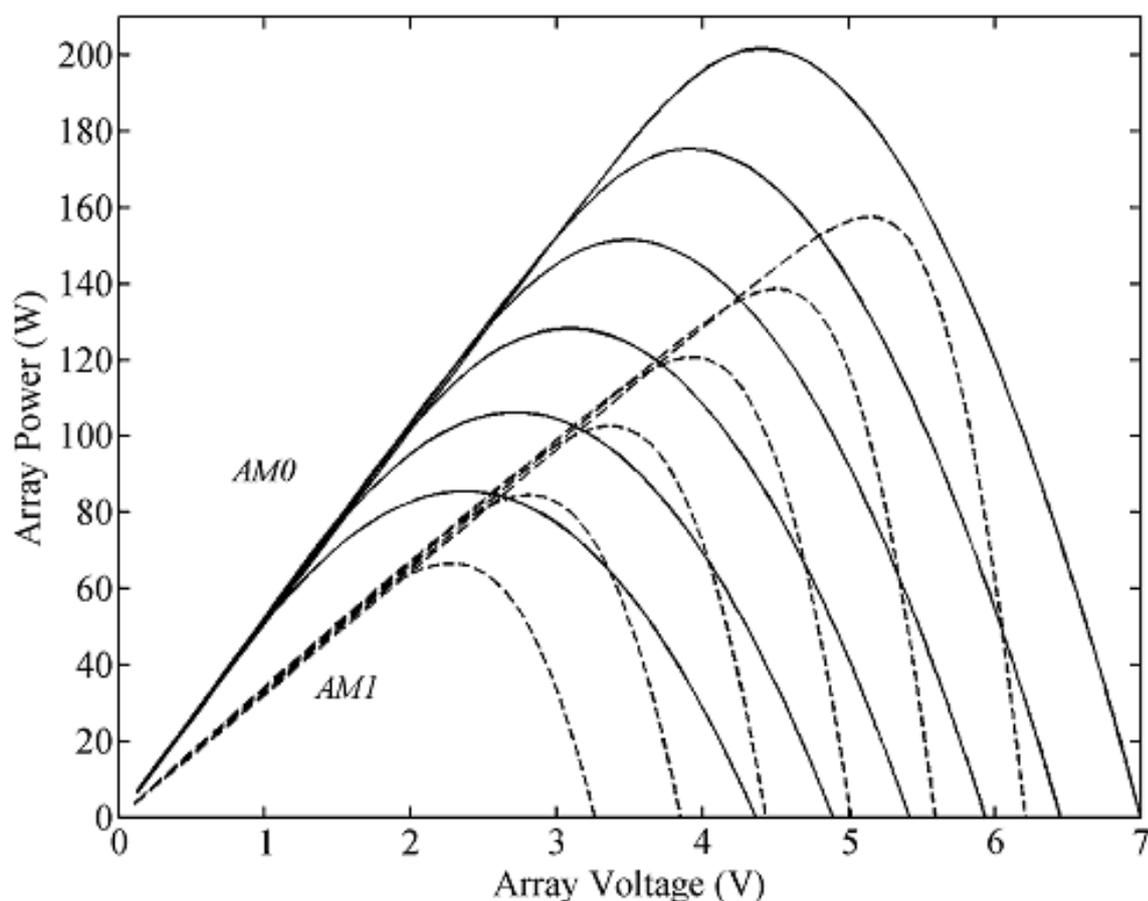


Рис. 1: Зависимость мощности СБ от напряжения при различной температуре

год. Визуальное впечатление подсказывает экспоненциальную зависимость. С той поры, если брать за точку отсчета 2005 г., темпы роста числа публикаций не уменьшились. Более того, наряду с усовершенствованием известных алгоритмов появляются новые, как правило основанные на принципах искусственного интеллекта. В данной статье делается попытка обобщения работ по данной тематике и выявление (обнаружение) новых тенденций развития способов и алгоритмов обеспечения максимальной выходной мощности (МВМ). Другой работой, которую следует отметить не умаляя достоинств, не перечисленных в списке литературы работ, является [3].

ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ ЗАМЕЩЕНИЯ

Фотоэлектрический элемент ФЭ (ячейка) является не чем иным как полупроводниковым $p-n$ переходом, который генерирует электрический ток под воздействием солнечного излучения (радиации) и величина которого пропорциональна его интенсивности.

В зависимости от степени приближения эквивалентная схема замещения идеального ФЭ [3, 6, 8,9,10] представляется в виде источника фототока I_{pv} с

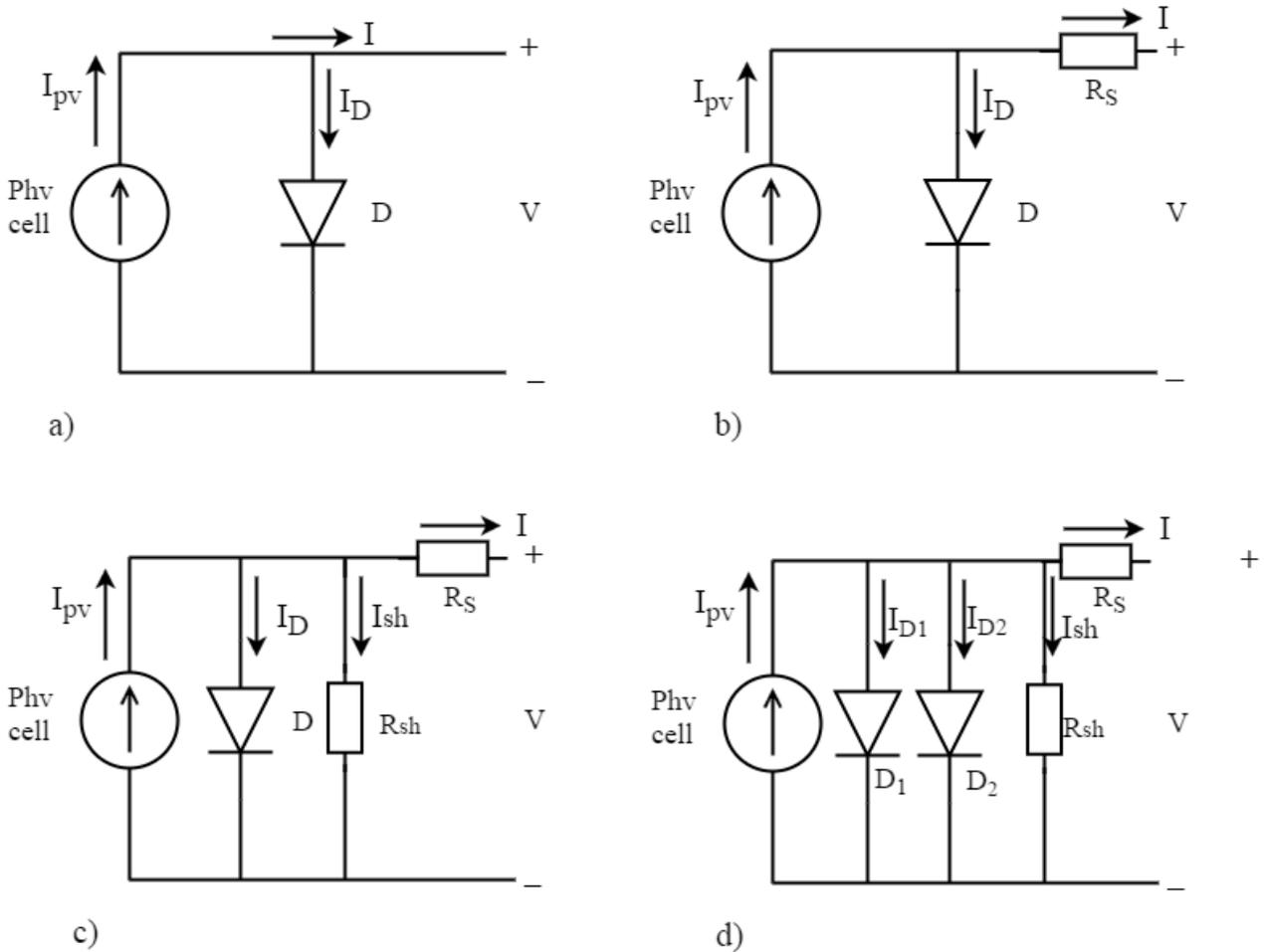


Рис. 2: Схемы замещения фотоэлектрической ячейки

одним диодом (параллельно включенным идеальным переходом D экспоненциального типа (Рис.2,а); источника фототока I_{pv} с одним диодом и одним резистором R_s , включенным последовательно (Рис.2,б); источника фототока I_{pv} с одним параллельно включенными идеальными переходами D экспоненциального типа и двумя резисторами R_{sh} , R_s , (Рис.2,с); тоже, но с двумя переходами $1D$ и $2D$, (Рис.2,д), получившими название модели $1D - 2R$ и $2D - 2R$ соответственно. Последовательное сопротивление R_s связано с препятствием на пути потока электронов от n к $-$ переходу и параллельное сопротивление R_{sh} имитирует токи утечки. Сказанное позволяет записать уравнение для модели $1D - 2R$ в следующем виде:

$$I = I_{pv} - I_D - I_{sh} \quad (1)$$

где I_{pv} -- фототок; I -- выходной ток; I_D -- ток насыщения диода; I_{sh} -- ток утечки, остальные обозначения см. Рис.1. Ток диода I_D обычно выражается уравнением Shockley [4], которое преобразует (1) в алгебраическое уравнение в хорошо известной форме в виде

$$I = I_{pv} - I_0 (\exp A(V + IR_s) - 1) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}, \quad (2)$$

где $A = q/akT$ — коэффициент, зависящий от параметров ФЭ [6]. Подробнее [3].

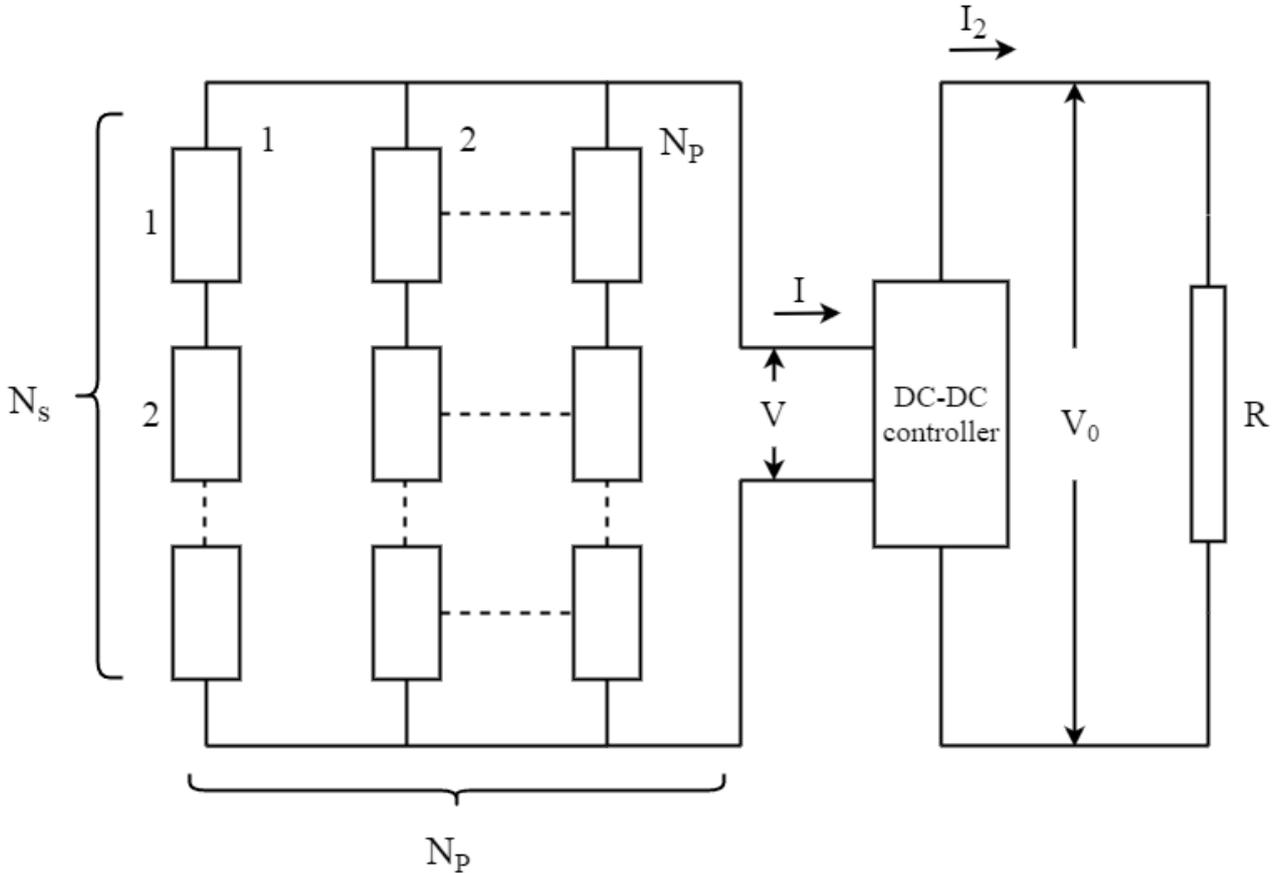


Рис. 3: Последовательное и параллельное соединение фотоэлементов солнечной батареи

Обычно ФЭ генерирует напряжение величиной 0.5 – 0.8 вольта в зависимости от технологии изготовления. Совершенно очевидно, что такое напряжение непригодно для практического использования.

Поэтому на практике соединяют несколько элементов (до 72) последовательно (для увеличения напряжения), которые образуют модуль, и несколько модулей параллельно (для увеличения тока), образуя таким образом солнечную батарею (СБ), Рис.2.

МЕТОДЫ АППРОКСИМАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Как следует из (2), ток СБ зависит от ряда параметров и выражается экспоненциальной функцией, что затрудняет получение значения мощности в

реальном времени. По этой причине для получения решения в замкнутом виде и ускорения арифметических расчетов мощности с целью управления в реальном времени предлагаются [4,6,7] подходы, которые можно обобщить следующим образом:

1. *Параметрическая аппроксимация* — упрощение выражения (2) за счет пренебрежения рядом параметров;
2. *Аналитическая аппроксимация* — применение аппроксимирующих выражений (например, метода Newton-Raphson для решения трансцендентных уравнений);
3. *Использование специальных функций.*

Для пояснения **параметрической** аппроксимации обратимся к $I-V$ уравнению (2) фотоэлектрической ячейки (ФЯ) под воздействием солнечного излучения при условии схемы замещения с сосредоточенными параметрами, что является общепринятой практикой (Рис.2,с), (модель 1D-2R).

Как это следует из (2), параметры I_{pv} , I_0 , R_s , R_{sh} и a должны быть определены для исследования ФЯ и фотоэлектрической станции ФЭС в целом.

Модель (2), в зависимости от принимаемых во внимание приближений, может принимать вид: а) идеальной модели, б) R_s -модели, с) $R_s h$ -модели.

Более точные $2D - 2R$ и $3D$ -модели здесь не рассматриваются из-за трудностей их использования в реальном времени.

В реальных условиях эксплуатации имеет место следующее соотношение параметров: $R_s \ll R_{sh}$, что позволяет пренебречь током через шунтирующий резистор и уравнение (2) приобретает вид

$$I = I_{pv} - I_0 (\exp(A(V + R_s I)) - 1) \quad (3)$$

В литературе [3,4,11,12,13] уравнение (3) известно, как R_s -модель. Последовательное сопротивление R_s (Рис.1, б) которое в основном зависит от контактного сопротивления металлической подложки с p -переходом и n -переходами полупроводникового слоя.

Дальнейшее упрощение схем замещения имеет место при пренебрежении R_s в СА (3). Исключая эффект фототока модуль ведет себя как обычный диод и $I - V$ характеристика идеального фотоэлектрического модуля приобретает вид:

$$I = I_{pv} - I_0 (\exp(AV) - 1) \quad (4)$$

Таким образом, параметрическая аппроксимация упрощает вычислительную процедуру, но оставляет нерешенной проблему экспоненциальной функции. Аналитическая аппроксимация предполагает замену некоторой сложной

функции (типа (1)) $f(x)$, ($x \in [a, b]$) более простой формой $\phi(x; a_0, a_1, \dots, a_n)$, где a_0, a_1, \dots, a_n есть параметры, которые необходимо определить так, чтобы обеспечить соответствующую аппроксимацию $f(x)$. Популярным решением этой проблемы является метод наименьших квадратов, известный в зарубежной литературе как LSA-аппроксимация, применяемая для решения различных нелинейных уравнений. Обычно задача LSA сводится к нахождению коэффициентов a_0, a_1, \dots, a_n , чтобы минимизировать функционал

$$f(x) - \phi(x; a_0, a_1, \dots, a_n) \quad (5)$$

где $\phi(x; a_0, a_1, \dots, a_n)$ есть функция $P_n(x)$ степени n :

$$P_n = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n = \sum_{k=0}^n a_kx^k \quad (6)$$

Результатом аппроксимации является минимизация ошибки, определяемой как

$$M = M(a_0, a_1, \dots, a_n) = \int_b^a (f(x) - P_n(x))^2 dx \quad (7)$$

Производная от (7) определяется

$$\frac{\partial M}{\partial J} = -2 \int_b^a x^j f(x) dx + 2 \sum_{k=0}^n a_k \int_b^a x^{j+k} dx \quad (8)$$

Условия нахождения коэффициентов (8)

$$\frac{\partial M}{\partial J} = 0, \quad j = \overline{0, n} \quad (9)$$

Подставляя (9) в (8) получим линейное уравнение

$$\int_b^a x^j f(x) dx = \sum_{k=0}^n a_k \int_b^a x^{j+k} dx, \quad j = \overline{1, n} \quad (10)$$

Описанный выше процесс аппроксимации относится к области прикладной математики [15,16] и называется CLSA непрерывной аппроксимацией методом наименьших квадратов.

Типичная модель ФЯ, аналитическое выражение которой содержит трансцендентную функцию для вычисления тока I_D , представлена в виде (2).

Полагая параметры в (2) постоянными в определенных условиях эксплуатации величина тока I изменяется в соответствии с изменением напряжения V

$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{mV}{R_s}\right) \exp(ml) - I_0 \quad (11)$$

При этом трансцендентная часть в (11) может быть упрощена применением CLSA в виде полинома первой степени

$$\exp(ml) = a_0 + a_1 I \quad (12)$$

Используя линейное уравнение (12), могут быть определены коэффициенты a_0 и a_1 . Детальная процедура преобразования имеется в [10].

Результирующее решение может быть представлено в виде

$$a_0 = -\frac{2}{mI_{max}^2} \left(\left(I_{max} - \frac{3}{m} \right) \exp(mI_{max}) + \left(2I_{max} + \frac{3}{m} \right) \right), \quad (13)$$

$$a_1 = -\frac{12}{mI_{max}^3} \left(\left(\frac{I_{max}}{2} - \frac{1}{m} \right) \exp(mI_{max}) + \left(\frac{I_{max}}{2} + \frac{1}{m} \right) \right) \quad (14)$$

Представленное рассмотрение предлагает относительно простое и в тоже время достаточно обоснованное решение по аппроксимации модели $1D - 2R$.

Функциональная аппроксимация предлагает решение проблемы, не учитывая применение численных методов, заключавшееся в использовании более компактного подхода, а именно Lambert W -функции, которая определяется следующим образом:

$$Z = W(z) \exp(W(z)) \quad (15)$$

где z – любое комплексное число [17.18]. Общий подход при применении Lambert W -функции при решении экспоненциального уравнения заключается в использовании следующего равенства [19]

$$X = Y(\exp Y) \leftrightarrow Y = W(X) \quad (16)$$

Lambert W -функция поддерживается всеми современными вычислительными платформами такими как MATLAB, Maple, and Mathematica.

Lambert W -*функция* определяется решением следующего уравнения

$$W \exp(W) = X \quad (17)$$

Можно констатировать, что Lambert W -*функция* используется достаточно редко.

Как было показано, соотношение ток-напряжение ФТЯ (ФЭС) содержит трансцендентную функцию в своей природе и не может быть решено для напряжения в функции тока или наоборот в точном выражении.

Представленный материал основан на достаточно редких публикациях [15]-[18], описывающих использование Lambert W -*функции*. Тем не менее решение в замкнутой форме для нахождения тока и напряжения имеет следующий вид:

$$I = -\frac{V}{R_{ss}} - \frac{W \left(R_s I_0 R_{sh} \exp \left(\frac{AR_{ss}(R_s I_{ph} + R_s I_0 + V)}{R_{sh}} \right) \right)}{AR_s} + \frac{R_{sh}(I_0 + I_{ph})}{R_{ss}} \quad (18)$$

где $R_{ss} = R_s + R_{sh}$.

$$V = -IR_s - R_{sh}(I + I_{ph}) - \frac{1}{A}W (AI_0 R_{sh} \exp(R_{sh}(-I + I_0 + I_{ph})A)) + IR_{sh} \quad (19)$$

Необходимо отметить, что аргументы в выражениях (18) и (19) содержат только соответствующие переменные и параметры модели и не содержат экспоненциальных функций.

Используя (18) и (19) можно также определить характерные точки зависимости $I - V$. Для получения тока короткого замыкания в (18) полагаем $V = 0$, тогда

$$I_{sc} = -\frac{W \left(R_s I_0 R_{sh} A \exp \left(\frac{AR_{ss}(R_s I_{ph} + R_s I_0)}{R_{sh}} \right) \right)}{AR_s} + \frac{R_{sh}(I_0 + I_{ph})}{R_{ss}} \quad (20)$$

Для решения режима холостого хода, напряжение V_{oc} в терминах W -*функции* может быть получено полагая $I = 0$ в (19) т.е.

$$V_{oc} = I_{ph} R_{sh} - \frac{1}{A}W (AI_0 R_{sh} \exp(R_{sh}(I_0 + I_{ph})A)) + I_0 R_{sh} \quad (21)$$

Напряжение в точке МВМ можно определить итеративным методом с помощью пакета Instrument fsolve in MatLab [18]:

$$V_p = \frac{I_p \left(1 + AI_0 R_s \exp(A(V_p + R_s I_p)) + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)}{AI_0 \exp \left(A(V_p + R_s I_p) + \frac{1}{R_{sh}} \right)} \quad (22)$$

В (22) коэффициент должен быть скорректирован с учетом отклонения температуры от стандартной STCs [4].

Характерные точки зависимостей $I - V$ и $P - V$ приведены на Рис.4.

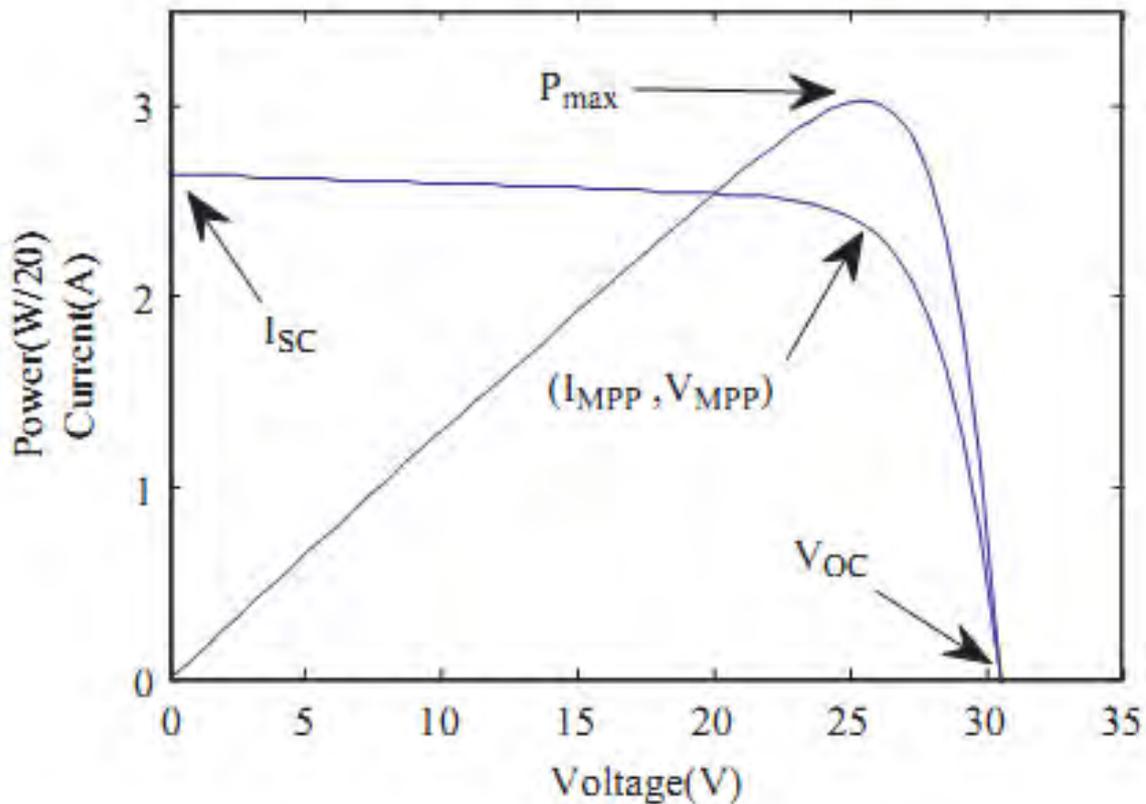


Рис. 4: Характерные точки зависимостей *ток-напряжение* и *мощность-напряжение*

Аналогичным образом могут быть получены выражения dI/dV и dV/dI , необходимые для реализации управления режимом МВМ в реальном времени [2,11,13].

ВЫВОДЫ

В системе обеспечения максимальной выходной мощности солнечной батареи целесообразно аналитическое определение параметров.

Из известных аналитических методов следует обратить внимание на применение специализированных функций, позволяющих значительно повысить

скорость вычислений и, тем самым, обеспечить более точное слежение за точкой максимальной выходной мощности солнечной батареи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кундас С.П., Позняк С.С., Шенец Л.В. Возобновляемые источники энергии. Монография. — Минск : МГЭУ им. А.Д. Сахарова, 2009. — 315 с.
2. Лобатый, А.А. Математическое моделирование гибридных электротехнических систем / А. А. Лобатый, Ю. Н. Петренко, А. Эльзейн, А. С. Абуфанас // Наука и техника.-2016.-№4, т.15.-С.322-328.
3. Elzein Imad, Petrenko Yury. A Study of an Analytical Model for a Photovoltaic Station. IV International Internet-Conf.» Information Technologies in Science, Education and Industry», Minsk, BNTU, 2016
4. I. Elzein, Y. N. Petrenko. A Survey on Hybrid Modeling and Control Approach of DC-DC Converters. Information Technologies and Systems, 2016 (ITS 2016). Proceeding of The Int. Conf. (BSUIR, Minsk, Belarus, 26th October 2016), Section «Control systems», pp 34-35
5. Ortiz-Rivera, E. I. Analytical model for a photovoltaic module the electrical characteristics provided by the manufacturer data sheet/ E. I. Ortiz-Rivera, F. Z. Peng // In Proceedings of Power Electron. Spec. Conf.-2005.-P. 2081-2091
6. Imad Elzein, DC-DC power converters modeling: from averaging to hybrid systems // В Сб. “Наука-образованию, производству, экономике”. Мат 13-й МНТК, Т.1, 2015, С. 222.
7. Elzein Imad, Petrenko Yury. An Integration of a Predictive Control Model and MPPT for PV Station. IEEE Region 8, International Conference on Smart Systems and Technologies (SST 2016), Croatia, Proceedings of IEEE explorer to be added in October 2016. Paper accepted and to be presented in person in Croatia IEEE Regional 8 Chapter, Oct. 14, 2016.
8. Imad Elzein, Yury N. Petrenko. Прогнозирующая модель управления системой обеспечения максимальной выходной мощности фотоэлектрической станции. // Системный анализ и прикладная информатика, №4, 2015, С.17-25.
9. Imad Elzein, DC-DC power converters modeling: from averaging to hybrid systems // В Сб. “Наука-образованию, производству, экономике”. Мат 13-й МНТК, Т.1, 2015, С. 222.

10. Jieming Ma, Ka Lok Man, T. O. Ting, Nan Zhang, Sheng-Uei Guan, and P.W. H. Wong. Approximate Single-Diode Photovoltaic Model for Efficient I-V Characteristics Estimation.. Hindawi Publishing Co..The Scientific World Journal, Vol. 2013, Article ID 230471, 7 pages
<http://dx.doi.org/10.1155/2013/230471>
11. Benghanem, M. (2009) Low Cost Management for Photovoltaic Systems in Isolated Site with New IV Characterization Model Proposed. Energy Conversion and Management, 50, 748-755.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2008.09.048>
12. Ma, T., Yang, H.X. and Lu, L. Development of a Model to Simulate the Performance Characteristics of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules/ Strings/ Arrays. Solar Energy, N°100, 2014, pp.31 -
<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.12.003>
13. Villalva, M.G., Gazoli, J.R. and Filho, E.R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronics, 24, 2009, pp. 1198-1208.
<http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2009.2013862>
14. Boyd, M.T., Klein, S.A., Reindl, D.T. and Dougherty, B.P. (2011) Evaluation and Validation of Equivalent Circuit Photovoltaic Solar Cell Performance Models. Journal of Solar Energy Engineering, 133, Article ID: 021005.
<http://dx.doi.org/10.1115/1.4003584>
15. E.I. Batzelis, I.A. Routsolias, S.A. Papathanassiou. An Explicit PV String Model Based on the Lambert Function and Simplified MPP Expressions for Operation Under Partial Shading. IEEE TRANSACTIONS ON SUSTAINABLE ENERGY, Vol5, No.1, JAN. 2016
16. Xiao, W.; Dunford, W.G.; Capel, A. A novel modeling method for photovoltaic cells. In Proceedings of the 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), Aachen, Germany, 20–25 June 2004; pp. 1950–1956.
17. M.A. Hasan, , S.K. Parida An overview of solar photovoltaic panel modeling based on analytical and experimental viewpoint. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 60, July 2016, pp. 75–83
18. Kun Ding, Xin Gao Bian, Hai Hao Liu, and Tao Peng A MATLAB-Simulink-Based PV Module and Its Application Under Conditions of Nonuniform Irradiance. IEEE Trans. On energy conversion, Vol. 27, No.4, Dec.2012,pp.864-773.

19. A.Jain, S.Sharma, A.Kapoor, Solar Cell Array Parameters Using Lambert W-function. Solar Energy Materials& Solar Cells, 90 (2006), p.p. 25-31