



Yevgen A. Baganov
Баганов
Євген
Олександрович

УДК 621.383.51
Б14

DETERMINATION OF ANALYTICAL DEPENDENCE OF PHOTOVOLTAIC CONVERTER MAXIMUM POWER POINT PARAMETERS TO PREDICT ITS YIELD BY DIRECT INTEGRATION

ВИЗНАЧЕННЯ АНАЛІТИЧНОЇ ЗАЛЕЖНОСТІ ПАРАМЕТРІВ ТОЧКИ МАКСИМАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЙОГО ВИРОБІТКУ ПРЯМИМ ІНТЕГРУВАННЯМ

DOI 10.15589/SMI. 2018.01.11

Yevgen A. Baganov

Є. О. Баганов, канд. техн. наук, доц.
ye.baganov@gmail.com
ORC ID: 0000-0001-8771-5735

Kostiantyn V. Tymofeev

К. В. Тимофеев, канд. техн. наук, доц.
kvtimofeev2013@gmail.com
ORC ID: 0000-0002-8668-6159



Kostiantyn V. Tymofeev
Тимофеев
Костянтин
Васильович

Kherson State Maritime Academy, Kherson

Херсонська державна морська академія, м. Херсон

Abstract. In the paper, the five-parameter model of the photovoltaic (PV) converter is analyzed. Based on the Lambert W function, an analytical dependence of the maximum power point of PV converter on the parameters of solar irradiation and ambient temperature is obtained. It is shown that obtained dependence allows predicting the PV converter energy yield by direct integration without step-by-step simulation, if analytical descriptions of the parameters of solar radiation and the ambient temperature are present

Keywords: photovoltaic converter; maximum power point; analytical dependence; prediction; Lambert W function.

Анотація. В роботі проведено аналіз п'ятипараметричної моделі фотоелектричного перетворювача (ФЕП). На основі функції Ламберта отримано аналітичну функціональну залежність точки максимальної потужності ФЕП від параметрів сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища. Показано, що дана залежність дозволяє при наявності аналітичних описів параметрів сонячного випромінювання та навколишньої температури прогнозувати кількість виробленої ФЕП енергії прямим інтегруванням без покрокового моделювання.

Ключові слова: фотоелектричний перетворювач; точка максимальної потужності; аналітична залежність; прогнозування; функція Ламберта.

Аннотация. В работе проведен анализ пятипараметрической модели фотоэлектрического преобразователя (ФЭП). На основе функции Ламберта получена аналитическая функциональная зависимость точки максимальной мощности ФЭП от параметров солнечного излучения и температуры окружающей среды. Показано, что данная зависимость позволяет при наличии аналитических описаний параметров солнечного излучения и окружающей температуры прогнозировать количество произведенной ФЭП энергии прямым интегрированием без пошагового моделирования..

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь; точка максимальной мощности; аналитическая зависимость; прогнозирование; функция Ламберта.

References

Design and Simulation of a Sustainable Photovoltaic Electric Plug-In Boat/ A. Cancela at all. // European Journal of Sustainable Development. – 2016. – 5(3). – P. 325 – 334.

Salem A. A. Techno-Economic Approach to Solar Energy Systems Onboard Marine Vehicles /A. A. Salem, I. S. Seddiek // Polish Maritime Research. – 2016. – 3(91). – P. 64-71.

Kurniawan A. Review of Solar-Powered Boat Development/ A. Kurniawan// IPTEK, The Journal for Technology and Science. – 2016. – 27(1). – P. 1-8.

Nasirudin A. Solar Powered Boat Design Optimization / A. Nasirudin, R-M. Chao, I.K.A.P. Utama // Procedia Engineering. – 2017. – 194. – P. 260 – 267.

Kobougias I. PV Systems Installed in Marine Vessels: Technologies and Specifications / I. Kobougias, E. Tatakis, J. Prousalidis // Hindawi Publishing Corporation, Advances in Power Electronics. – 2013. – Art. ID 831560. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/831560>.

Jain A. Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function/ A. Jain, A. Kapoor // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2004. – 81. – P. 269 – 277.

Savitha, P.B. Modelling of Photovoltaic Cell/Module under Environmental Disturbances using MATLAB/Simulink / Savitha P.B., Shashikala M.S., Puttabuddhi K.L. // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2014. – 9(1). – P. 48-55.

Gonzalez A. Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic–wind–biomass power system / Gonzalez A., Riba J.-R., Rius A. // Sustainability. – 2015. – 7. – P. 12787 – 12806.

Analytical determination of the photovoltaic module maximum power point parameters based on the manufacturer's datasheet/ Ye. A. Baganov, V.V. Kurak, E.V. Andronova, V.O. Gramov. – Visnyk of Kherson National Technical University. – 2016. – N4 (59). – P.185 – 194.

Esrat T. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques/ T. Esrat, P.L. Chapman // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – 22(2). – P. 439 – 449.

De Soto, W. Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance/ W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman // Sol. Energy. – 2006. – 80. – P. 78 – 88.

Trazouei S. L. Optimal Design of a Hybrid Solar-Wind-Diesel Power System for Rural Electrification Using Imperialist Competitive Algorithm / S. L. Trazouei, F. L. Tarazouei, M. Ghiamy // International Journal of Renewable Energy Research. – 2013. – 2. – P. 403-411.

Duffie J. A. Solar Engineering of Thermal Processes – 4th ed./ J. A. Duffie and W. A. Beckman – John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2013. – 910 p.

Samsung LPC235SM (235W) Solar Panel [електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.solar-design-tool.com/components/module-panel-solar/Samsung/779/LPC235SM/specification-data-sheet.html>

Вступ. Зростання цін на традиційні джерела енергії та їх негативний вплив на екологічний стан планети призвели до стрімкого розвитку систем поновлюваної та альтернативної енергетики, у тому числі, і на транспорті [1]. Застосування більшості відновлюваних джерел енергії на морському транспорті становить значну проблему, але серед різних їх видів використання саме сонячної енергії має перевагу на судах [2]. Фотоелектричні системи можуть служити ідеальними резервними та аварійними джерелами енергії, незалежними від суднової електроенергетичної системи [3]. Такі системи живлення можуть виробляти електроенергію без додаткового споживання палива, вони не мають побічних продуктів, таких як викиди газу або шум, мають низькі витрати на технічне обслуговування, та тривалий термін роботи з гарантованою виробниками вихідною потужністю фотоелектричної панелі [4, 5].

Основні проблеми використання фотоелектричних систем полягають у невисокому коефіцієнт корисної дії (ККД) та щільності енергії, залежності потужності від погоди та часу доби, обмеженості вільного простору на судні та відносно високій вартості компонентів [2]. Тому такі системи потребують оптимізації складу для зменшення їх вартості та можливості органічної інтеграції у склад енергосистеми [4]. Така оптимізація базується на математичному моделюванні роботи фотоелектричної

системи в якості автономної або складової частини енергетичної системи [1, 4, 5].

Актуальність досліджень. Складність математичного моделювання фотоелектричної системи пов'язана з особливостями вольт-амперної характеристики (ВАХ) фотоелектричного перетворювача (ФЕП). Нелінійність ВАХ ФЕП не дозволяє отримати в елементарних функціях явну залежність струму від напруги, а можливе представлення тільки через функцію Ламберта [6]. Нелінійність ВАХ також призводить до того, що вольт-ватна характеристика має точку максимальної потужності (ТМП). Зазвичай фотоелектрична система оснащується контролером ТМП, який забезпечує умови роботи ФЕП саме в цій точці. Моделювання фотоелектричних систем проводиться для ТМП, яку внаслідок особливості ВАХ ФЕП не можна отримати через елементарні функції і яка може бути знайдена тільки чисельно. Це призводить до того, що навіть при наявності аналітичних часових залежностей для інтенсивності складових сонячного випромінювання, температури навколишнього середовища та положення ФЕП відносно сонця, визначення кількості енергії від фотоелектричної системи робиться покроковим її моделюванням і не може бути проведене прямим інтегруванням [7, 8].

Аналітичну залежність ТМП ФЕП на основі функції Ламберта з використанням чотирьохпараметричної однодіодної моделі ФЕП при нескінченному шунтуючому опорі запропонува-

но у [9]. Наведена залежність може бути використана для прямого інтегрування в таких системах, як Maple або Mathematica, де функція Ламберта визначена. Проте припущення нескінченного шунтуючого опору не є цілком коректним для багатьох ФЕП у широкому інтервалі температур та інтенсивності сонячного випромінювання.

Постановка задачі. Метою даної роботи є отримання явної аналітичної функціональної залежності ТМП ФЕП з урахуванням скінченної величини шунтуючого опору для забезпечення прогнозування виробітку фотоелектричної електростанції прямим інтегруванням.

Результати досліджень. Схема заміщення однодіодної п'ятипараметричної моделі ФЕП з коефіцієнтом ідеальності A відповідає еквівалентній схемі, яку наведено на рис. 1.

Струм навантаження може бути визначений як

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh}, \quad (1)$$

де I_{ph} — фотострум носіїв заряду;

I_d — струм діода у прямому змищенні;

I_{sh} — шунтуючий струм ФЕП.

Струми I_d і I_{sh} отримаємо з виразів:

$$I_d = I_0 \left(e^{\left(\frac{U_1}{AV_t} \right)} - 1 \right) = I_0 e^{\left(\frac{U_1}{AV_t} \right)} - I_0, \quad (2)$$

$$I_{sh} = \frac{U_1}{R_{sh}}. \quad (3)$$

де $V_t = kT_c/q_e$; $q_e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл — заряд електрона; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — стала Больцмана; T_c — абсолютна температура ФЕП; I_0 — зворотний струм насичення діода; U_1 — напруга, прикладена до р-п переходу; R_{sh} — шунтуючий опір ФЕП.

Тоді

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\left(\frac{U_1}{AV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{U_1}{R_{sh}}. \quad (4)$$

Напруга на навантаженні

$$U = U_1 - IR_s, \quad (5)$$

де R_s — послідовний опір ФЕП.

Приймаючи до уваги, що передачу максимальної потужності до навантаження R_L можна замінити передачею максимальної потужності на R_L та R_s (коректність підходу показана у [9]):

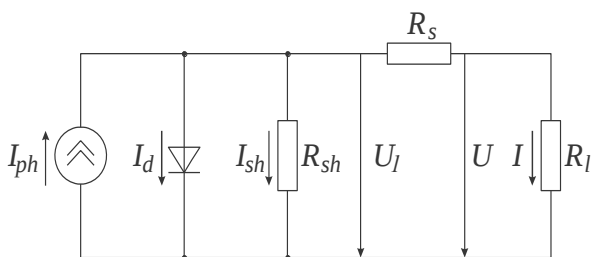


Рис. 1. Схема заміщення однодіодної п'ятипараметричної моделі ФЕП

$$P = U_1 I = \left(I_{ph} - \left(I_0 e^{\left(\frac{U_1}{AV_t} \right)} - 1 \right) - \frac{U_1}{R_{sh}} \right) U_1, \quad (6)$$

то умовою ТМП буде

$$\frac{\partial P}{\partial U_1} = I_{ph} + I_0 - I_0 e^{\left(\frac{U_1}{AV_t} \right)} \left(1 + \frac{U_1}{AV_t} \right) - \frac{2U_1}{R_{sh}}, \quad (7)$$

Застосовуючи змінну $z = U_{1n}/V_t A$, рівняння (7) може бути переписано у вигляді:

$$e^{\frac{I_{ph} + I_0}{I_0}} - e^{\frac{2V_t A}{R_{sh} I_0}} = (1+z)e^{(1+z)}. \quad (8)$$

Розв'язок рівняння (8) може бути представлений через функцію Ламберта $W_0(x)$:

$$z = W_0 \left(e^{\frac{I_{ph} + I_0}{I_0}} \left[1 - \frac{2V_t A z}{R_{sh}(I_{ph} + I_0)} \right] \right) - 1. \quad (9)$$

Рівняння (9) є трансцендентним. Розкладаючи праву частину у ряд Тейлора навколо $z_0 = 0,75U_{oc}/(V_t A)$ [10], що відповідає середині типового інтервалу знаходження напруги ТМП, де U_{oc} — напруга холостого ходу ФЕП, і утримуючи перші два члени розкладання, знаходимо розв'язок рівняння (9) відносно z (враховуючи, що $I_{ph} \gg I_0$):

$$z = \frac{(c_2 z_0 - 1)(x^2 - 1) - c_2 z_0 x}{(c_2 z_0 - 1)(x + 1) - c_2 x}, \quad (10)$$

де

$$x = W_0(-c_1[c_2 z_0 - 1]); \quad c_1 = eI_{ph}/I_0, \quad c_2 = 2V_t A/(R_{sh} I_{ph}).$$

Отримавши значення z , можна одержати параметри ТМП за виразами (4)–(6).

Залежність z від параметрів освітлення та зовнішньої температури можна описати через опорні параметри (індекс «ref») наступним чином [11, 12]:

$$\frac{AV_t}{A_{ref} V_{t,ref}} = \frac{T}{T_{ref}}; \quad (11)$$

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{ref}} \right)^3 \exp \left(\frac{1}{3} \left(\frac{E_g}{T} \right) \bigg|_{T_{ref}} - \frac{E_g}{T} \bigg|_{T_c} \right); \quad (12)$$

$$R_s = R_{s,ref} = const; \quad (13)$$

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{S_{ref}}{S}; \quad (14)$$

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} \frac{M}{M_{ref}} (I_{L,ref} + \alpha_{ISC} (T_c - T_{ref})); \quad (15)$$

де α_{ISC} — температурний коефіцієнт струму короткого замикання;

E_g — ширина забороненої зони кремнію, температурна залежність якої дається виразом:

$$E_g = E_{g,ref} (1 - 0,0002677(T_c - T_{ref})). \quad (16)$$

Ширина забороненої зони $E_{g,ref}$ визначається при 25 °C і дорівнює 1,121 eV для тонкоплівкових, моно- і полікристалічних ФЕП, а для трьохперехідних

аморфних ФЕП 1,6 еВ. Залежності інтенсивності поглиненої сонячної радіації (S/S_{ref}) та маси атмосфери для сонячного випромінювання (M/M_{ref}), у залежності від взаємного розташування Сонця та площини ФЕП наведені, наприклад, у [13].

Температура фотоелектричного модуля при різних температурах навколишнього середовища (T_a) і різних рівнях інтенсивності сонячного випромінювання (G), може бути визначена з теплового балансу, який призводить до співвідношення [12]:

$$T_c = T_a + \frac{G}{G_{NOCT}}(NOCT - T_{a,NOCT}). \quad (17)$$

де $NOCT$ — номінальна температура експлуатації фотоелектричного модуля, яка також наводиться у специфікаціях виробників;

$T_{a,NOCT} = 20^\circ\text{C}$ — температура навколишнього середовища при номінальних умовах експлуатації;

$G_{NOCT} = 800 \text{ Вт/м}^2$ — інтенсивність сонячного випромінювання при номінальних умовах експлуатації.

Напруга холостого ходу може бути отримана з (4):

$$U_{OC} = I_{ph}R_{sh} - AV_t W_0 \left(\frac{I_0 R_{sh}}{AV_t} \exp \left(\frac{I_{ph} R_{sh}}{AV_t} \right) \right). \quad (18)$$

Використовуючи вирази (4, 5) та (10–18) можна отримати явну залежність максимальної потужності ФЕП від зовнішніх параметрів, тобто залежність, яку можна проінтегрувати, як мінімум, чисельно і отримати кількість енергії, що виробляється ФЕП за будь-який період. Опорні параметри зазвичай визначаються на основі каталогів виробників ФЕП, за методикою, яку наведено, наприклад, у [11].

Розрахунок виробітку енергії було проведено для фотоелектричного модуля Samsung LPC235SM (235 Вт) [14] з контролером ТМП методом прямого інтегрування. Модуль було розташовано на судні під кутом 30° до горизонту, яке знаходилося на паралелі 46° п.ш. Розглянуто вплив зміни курсу судна на 30° . У першому випадку зміна азимута модуля Samsung LPC235SM від -15° до $+15^\circ$, а в другому — з $+15^\circ$ до -15° . Зміна курсу прийнята рівномірною і такою, що тривала з 10:00 до 16:00 (12:00 прив'язано до сонячного полудня) у 150-й день року (30 травня). Сонячне випромінювання задавалося прямою (H_b) і розсіяною (H_d) складовими на горизонтальну поверхню за наступними рівняннями (час t — у годинах):

$$H_b = 600 \sin \left(\frac{\pi}{15}(t-5) \right); H_d = 220 \sin \left(\frac{\pi}{15}(t-5) \right). \quad (19)$$

Список литературы

- [1] Design and Simulation of a Sustainable Photovoltaic Electric Plug-In Boat/ A. Cancela et al. // European Journal of Sustainable Development. – 2016. – 5(3). – P. 325–334.
- [2] Salem A. A. Techno-Economic Approach to Solar Energy Systems Onboard Marine Vehicles /A. A. Salem, I. S. Seddiek // Polish Maritime Research. – 2016. – 3(91). – P. 64–71.

Температура навколишнього середовища задавалася залежністю:

$$T_a = 20 + 15 \sin \left(\frac{\pi}{18}(t-7) \right). \quad (20)$$

На рисунку 2 наведено результати розрахунків виробленої енергії за період маневру судна для двох випадків.

Як впливає з результатів моделювання, поворот судна, що призводить до зміни азимута модуля з -15° до $+15^\circ$, виконує роль спостереження за сонцем. Це призводить до практично сталої потужності роботи і практично лінійній залежності виробленої енергії від часу. Протилежний маневр судна призводить до суттєвого погіршення вироблення електроенергії модулем після сонячного полудня.

Висновки. Отримано явну аналітичну функціональну залежність ТМП ФЕП від параметрів сонячного випромінювання та температури навколишнього середовища для одноступінчастої п'ятипараметричної моделі з урахуванням скінченної величини шунтуючого опору. Дана залежність дозволяє при наявності аналітичних описів параметрів сонячного випромінювання та навколишньої температури прогнозувати кількість виробленої ФЕП енергії прямим інтегруванням без покрокового моделювання.

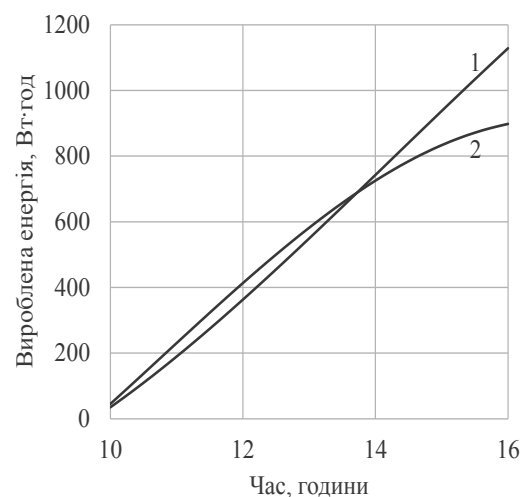


Рис. 2. Залежність виробленої енергії від часу фотоелектричного модуля при зміні азимута: 1) -15° до $+15^\circ$; 2) від $+15^\circ$ до -15°

- [3] **Kurniawan A.** Review of Solar-Powered Boat Development/ A. Kurniawan// IPTEK, The Journal for Technology and Science. – 2016. – 27(1). – P. 1–8.
- [4] **Nasirudin A.** Solar Powered Boat Design Optimization / A. Nasirudin, R-M. Chao, I.K.A.P. Utama // Procedia Engineering. – 2017. – 194. – P. 260 – 267.
- [5] **Kobougias I.** PV Systems Installed in Marine Vessels: Technologies and Specifications / I. Kobougias, E. Tatakis, J. Prousalidis // Hindawi Publishing Corporation, Advances in Power Electronics. – 2013. – Art. ID 831560. – Режим доступа: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/831560>.
- [6] **Jain A.** Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function/ A. Jain, A. Kapoor // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2004. – 81. – P. 269 – 277.
- [7] **Savitha, P.B.** Modelling of Photovoltaic Cell/Module under Environmental Disturbances using MATLAB/ Simulink / Savitha P.B., Shashikala M.S., Puttabuddhi K.L. // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). – 2014. – 9(1). – P. 48-55.
- [8] **Gonzalez A.** Optimal sizing of a hybrid grid-connected photovoltaic–wind–biomass power system / Gonzalez A., Riba J.-R., Rius A. // Sustainability. – 2015. – 7. – P. 12787 – 12806.
- [9] Analytical determination of the photovoltaic module maximum power point parameters based on the manufacturer's datasheet/ Ye. A. Baganov, V.V. Kurak, E.V. Andronova, V.O. Gramov. – Visnyk of Kherson National Technical University. – 2016. – N4 (59). – P.185 – 194.
- [10] **Esrām T.** Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques/ T. Esrām, P.L. Chapman // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2007. – 22(2). – P. 439 – 449.
- [11] **De Soto, W.** Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance/ W. De Soto, S.A. Klein, W.A. Beckman // Sol. Energy. –2006. – 80. – P. 78 – 88.
- [12] **Trazouei S. L.** Optimal Design of a Hybrid Solar-Wind-Diesel Power System for Rural Electrification Using Imperialist Competitive Algorithm / S. L. Trazouei, F. L. Tarazouei, M. Ghiamy // International Journal of Renewable Energy Research. – 2013. – 2. – P. 403-411.
- [13] **Duffie J. A.** Solar Engineering of Thermal Processes –4th ed./ J. A. Duffie and W. A. Beckman – John Wiley & Sons Inc., Hoboken, New Jersey, 2013. – 910 p.
- [14] Samsung LPC235SM (235W) Solar Panel [электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.solar-design-tool.com/components/module-panel-solar/Samsung/779/LPC235SM/specification-data-sheet.html>

© С. О. Баганов, К. В. Тимофеев
Статью рекомендует до друку
д-р техн. наук, проф. Г. В. Павлов

Одесса

ул. Тенистая, 15
г. Одесса, Украина, 65009
тел.: +380 (482) 34-79-28
факс: +380 (482) 35-60-05
e-mail: office@meb.com.ua
www.meb.com.ua

**Санкт-Петербург**

ул. Мира, 15/1, офис 76Н
г. Санкт-Петербург, Россия, 197101
тел.: +7 (812) 233-64-03 / 232-85-38
факс: +7 (812) 309-59-39
e-mail: meb@peterlink.ru

ПРОЕКТ MPSV07

Многофункциональное аварийно-спасательное судно ледового плавания мощностью 4 МВт типа «Спасатель Карев»
Завод-строитель — Невский Судостроительно-Судоремонтный завод

