



**DARIUSZ SOBCZYŃSKI<sup>1</sup>, JACEK BARTMAN<sup>2</sup>**

## **Wyznaczanie charakterystyk wyjściowych modułów fotowoltaicznych z wykorzystaniem sztucznego źródła światła**

### **Determining the Output Characteristics of Photovoltaic Modules Using an Artificial Light Source**

<sup>1</sup> Doktor inżynier, Politechnika Rzeszowska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, Polska

<sup>2</sup> Doktor inżynier, Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Matematyczno-przyrodniczy, Polska

#### **Streszczenie**

W kształceniu inżynierów na kierunku energetyka realizowanym na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej istotną rolę odgrywa znajomości odnawialnych nośników energii. W artykule przeanalizowano wyznaczanie charakterystyk wyjściowych modułów fotowoltaicznych z wykorzystaniem sztucznego źródła światła. Ważne jest, jaką charakterystykę widmową posiada moduł fotowoltaiczny i jak ta charakterystyka jest pokrywana przez źródło światła. Istotne jest więc zapoznanie studentów ze zjawiskami, jakie zachodzą podczas pracy wymienionych modułów. Normy dotyczące określania parametrów modułów fotowoltaicznych determinują natężenie promieniowania oraz temperatury modułu w tzw. standardowych warunkach pomiarów.

**Słowa kluczowe:** panele fotowoltaiczne, energia słońca, charakterystyki widmowe

#### **Abstract**

In the education of engineers during the course of Power Engineering being carried out by the Faculty of Electrical and Computer Engineering of the Rzeszow University of Technology, knowledge of renewable energy sources retrieve an important role. In this article, the determination of the output characteristics of photovoltaic modules employing an artificial light source was analysed. It is important what the spectral characteristics of photovoltaic module look like and how this characteristic is covered by the light source. Therefore, it is important to familiarize students with the phenomena that occur during the work of the photovoltaic modules. The standards for measure the parameters of solar modules determine the irradiation intensity and module temperature in so-called standard measurement conditions.

**Keywords:** photovoltaic panels, solar energy, spectrum characteristics

#### **Wstęp**

Studenci kierunku energetyka Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej na II roku studiów na semestrze trzecim realizują moduł „Odnawialne źródła energii”. Zagadnienia prezentowane w artykule dotyczą

treści prezentowanych w ramach wymienionego przedmiotu. Pomiar paneli fotowoltaicznych (PV) w warunkach zewnętrznych są najbardziej zbliżone do rzeczywistych warunków użytkowania. Jednakże ze względu na możliwość regulacji wartości natężenia promieniowania, kontroli temperatury modułów oraz zmienne warunki środowiskowe związane z porami dnia i roku korzystniejsze jest prowadzenie zajęć w laboratorium. Wiąże się to z koniecznością naświetlania paneli za pomocą sztucznego źródła światła. Ze względów ekonomicznych najczęściej są to źródła halogenowe. W celu weryfikacji różnych typów dostępnych PV zostały opracowane akty normatywne ustalające warunki pomiarów (Standard Test Conditions – STC), pozwalające na porównanie parametrów wyjściowych badanych ogniw PV. Dla warunków STC temperatura określona została na poziomie  $T = 25^{\circ}\text{C}$ , natomiast natężenie promieniowania na poziomie  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ , przy określonej gęstości powietrza AM1,5G (Dirnberger i in., 2015). Moc i zakres widmowy użytego w badaniach źródła światła jest bardzo istotny. Oczywiście jest, że zakres widmowy sztucznego źródła światła używanego podczas zajęć ćwiczeniowych nigdy nie będzie się pokrywał z promieniowaniem słonecznym (Ghitas, 2012).

### **Motywacja**

Pomiary realizowane podczas ćwiczeń laboratoryjnych z wykorzystaniem halogenowego źródła światła wskazują, że otrzymane wartości mocy wyjściowej paneli PV zarówno mono-, jak i polikrystalicznych, znacznie różnią się od zadeklarowanych przez producenta wartości (dla warunków STC przy oświetleniu naturalnym światłem słonecznym). Różnice te są widoczne mimo utrzymywania stałej temperatury powierzchni modułu wynoszącej  $25^{\circ}\text{C}$  i wymaganego poziomu promieniowania wynoszącego  $1000 \text{ W/m}^2$ . To stało się motywacją do poznania i przekazania studentom wiedzy związanej z wpływem widma promieniowania na pracę systemów fotowoltaicznych (Ghosh i in., 2017).

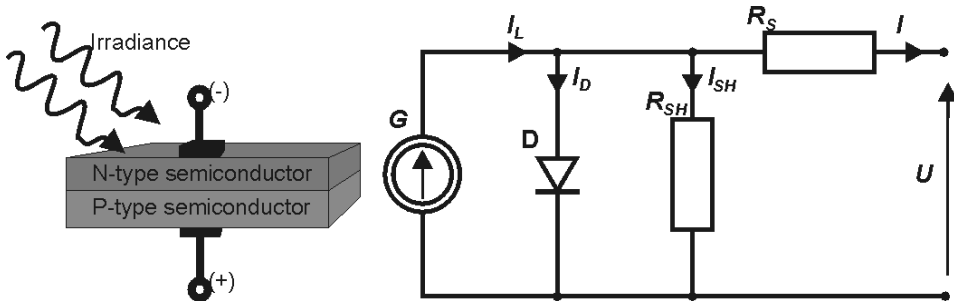
### **Ogniwo fotowoltaiczne**

Efekt fotowoltaiczny polega na bezpośredniej konwersji energii światła słonecznego na energię prądu elektrycznego na poziomie atomowym. Ogniwo PV jest złączem p-n podobnym do diody prostowniczej, z tym że złącze PV ma znacznie większą powierzchnię. Absorbowane promieniowanie powoduje, że ogniwo PV staje się źródłem prądu. Napięcie obwodu otwartego  $U_{OC}$  nie przekracza  $0,7 \text{ V}$ . Z tego powodu ogniwa PV są łączone szeregowo lub równolegle, aby uzyskać wymagane wartości napięć i prądów. Tak połączone ogniwa PV tworzą tzw. moduły fotowoltaiczne (Granek, Sdanowicz, 2004).

### **Model matematyczny ogniwa fotowoltaicznego**

Model matematyczny fotoogniwa jest reprezentowany przez źródło prądu równolegle połączone z diodą. Dodatkowo rezystancja bocznikowa  $R_{SH}$  repre-

zentruje straty związane z upływem prądu, natomiast rezystancja szeregową  $R_s$  reprezentuje rezystancję połączeń oraz inne rezystancje poszczególnych warstw ogniwa (rys. 1) (Huld, Amillo, 2015).



**Rysunek 1. Konstrukcja ogniwa fotowoltaicznego i jego obwód zastępczy**

$G$  – natężenie promieniowania,  $I_L$  – prąd fotowoltaiczny,  $I_D$  – prąd diody,  $I_{SH}$  – prąd upływu płynący przez rezystancję boczną  $R_{SH}$ ,  $I$  – prąd rezystancji szeregowej  $R_s$  (prąd wyjściowy fotoogniwa),  $U$  – napięcie wyjściowe fotoogniwa

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Huld, Amillo (2015).

Prąd wyjściowy fotoogniwa:

$$I = I_L - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(U + IR_s)}{nKT} \right) - 1 \right) - \left( \frac{U + IR_s}{R_{SH}} \right).$$

Prąd fotowoltaiczny zależny od temperatury:

$$I_L = I_L(T_1) (1 + k_0(T - T_1)).$$

Współczynnik temperaturowy:

$$k_0 = \frac{I_{SC}(T_2) - I_{SC}(T_1)}{(T_2 - T_1)}.$$

Prąd zwarciaowy:

$$I_{SC} = K_G G.$$

Prąd wsteczny diody:

$$I_0 = I_0(T_1) \left( \frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} \left( \exp \left( \frac{qU_g(T_1)}{nK \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)} \right) \right)$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{sc}(T_1)}{\left( \exp\left( \frac{qU_{oc}(T_1)}{nkT_1} \right) - 1 \right)},$$

gdzie:

$I, I_{MAX}$  – odpowiednio prąd wyjściowy i prąd maksymalny ogniwa PV,

$I_L$  – prąd fotowoltaiczny,

$I_0$  – prąd wsteczny diody,

$I_{RS}$  – prąd upływu,

$U, U_{MAX}$  – napięcie wyjściowe i napięcie maksymalne ogniwa PV,

$R_s, R_{sh}$  – rezystancja szeregową i rezystancja bocznikowa,

$q$  – ładunek elektronu,

$n$  – współczynnik jakości diody,

$K$  – stała Boltzmanna,

$K_G$  – współczynnik dla prądu zwarciovego,

$G$  – natężenie promieniowania,

$T, T_1$  – temperatura ogniwa, temperatura referencyjna.

Energia pojedynczego fotonu w odniesieniu do długości fali:

$$E = \frac{1,24}{\lambda} (\mu\text{m})$$

Natężenie promieniowania zależne od długości fali (energii fotonu):

$$S(\lambda) = \frac{q\phi E^2}{1,24},$$

gdzie:

$S(\lambda)$  – natężenie widma promieniowania, którego jednostką jest ( $\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}$ ),

$\phi$  – strumień fotonów wyrażony w liczbie fotonów na ( $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),

$E$  – energia fotonu w (eV),

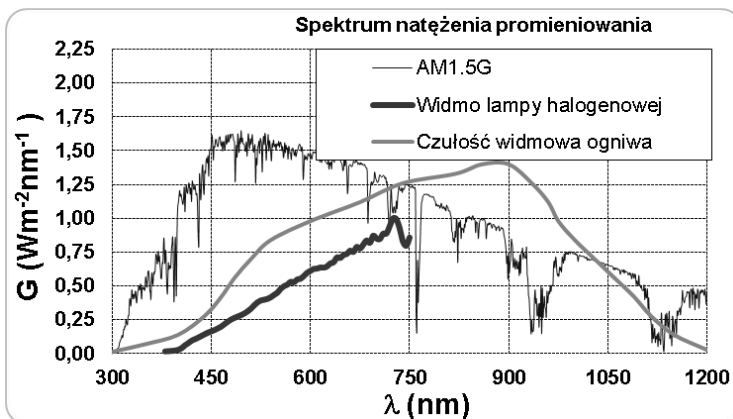
$\lambda$  – długość fali w ( $\mu\text{m}$ ).

W przypadku krzemu wartość energii wynosi  $E = 1,1$  eV, dla standardowych warunków pomiaru AM1,5G (Masters, 2004). Biorąc pod uwagę efekt widmowego rozkładu promieniowania przy wyliczaniu mocy wyjściowej modułów, należy stwierdzić, że natężenie promieniowania  $G$  jest zastąpione przez  $S(\lambda)$ , które zależy od długości fali. Sprawność modułów fotowoltaicznych zależy od natężenia promieniowania. Norma IEC-6090-3 określa warunki pomiaru przy ustalonej temperaturze, natężeniu promieniowania światła słonecznego i gęstości powietrza (warunki STC). Zakres widmowy promieniowania słonecznego  $G$  różni się od zakresów widmowych innych rodzajów źródeł światła nawet przy zachowaniu warunków STC (Standards, 2016). Z przedstawionych zależności

matematycznych wynika, że zmiany natężenia promieniowania znacząco wpływają na prąd zwarcia, który bezpośrednio jest zależny od natężenia promieniowania.

### Rozkład widmowy promieniowania lampy halogenowej

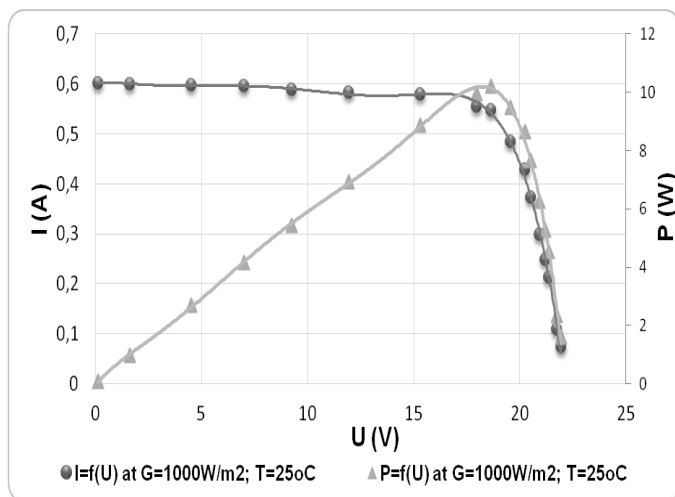
W laboratorium wykorzystywane są naświetlacze halogenowe o mocy 500 W. Całkowite natężenie promieniowania  $G$  równe jest całkowitej energii poszczególnych widm promieniowania przypadających na jednostkę powierzchni przy określonej długości fali  $\lambda$ . Niestety całkowite natężenie promieniowania  $G$  mierzone przez pirometry podczas pomiarów paneli PV nie daje informacji o energii poszczególnych zakresów widma promieniowania świetlnego. Dlatego potrzebna jest informacja o charakterystyce widmowej źródła światła w odniesieniu do zadeklarowanych w normach warunków STC. Również w zależności od typu ogniwa jego czułość jest różna dla różnych długości fali promieniowania. Stąd operowanie tylko wartością sumaryczną natężenia promieniowania pomimo dochowania warunków STC powoduje, że panele fotowoltaiczne nie osiągają znamionowych wartości parametrów wyjściowych. Dlatego konieczne jest znalezienie użytecznego zakresu widma promieniowania sztucznych źródeł światła. Wyznaczony zakres widmowy wykorzystywanego w laboratorium dydaktycznym źródła światła został zaprezentowany na rys. 2. Zmierzone widmo promieniowania (w zakresie 380 nm do 750 nm) dla lampy halogenowej o mocy 500 W zostało zestawione z referencyjnym zakresem widmowym promieniowania słonecznego dla warunków AM1,5G. Dodatkowo przedstawiono również spektrum czułości monokrystalicznego panelu fotowoltaicznego.



Rysunek 2. Porównanie rozkładu widmowego testowanej 500 W lampy halogenowej z widmem słonecznym dla AM1,5G oraz spektrum monokrystalicznego ogniwa fotowoltaicznego

Źródło: opracowanie własne.

Na rys. 3 z kolei przedstawiono wyniki pomiarów parametrów wyjściowych panelu 20WMAXX o danych znamionowych:  $U_{MAX} - 18,82 \text{ V}$ ,  $I_{MAX} - 1,08 \text{ A}$ ,  $P_{MAX} - 20 \text{ Wp}$ ,  $U_{OC} - 22,58 \text{ V}$ ,  $I_{SC} - 1,19 \text{ A}$ .



**Rysunek 3.** Zmierzone napięcie i moc wyjściowa panelu 20WMAXX dla znamionowych wartości natężenia promieniowania  $G = 1000 \text{ Wm}^{-2}$ , temperatury  $T = 25^\circ\text{C}$ , przy naświetlaniu lampą halogenową o mocy  $P = 500 \text{ W}$

Źródło: opracowanie własne.

### Podsumowanie

W artykule omówiono istotne z punktu widzenia dydaktyki przedmiotu „Odnawialne źródła energii” zagadnienia związane z wykorzystaniem lampy halogenowej jako symulatora promieniowania słonecznego. Ze względu na różnice energii poszczególnych długości fali dla promieniowania słonecznego i sztucznego, a także charakterystykę czułości krzemowych modułów fotowoltaicznych, moc wyjściowa paneli PV różni się. Dzieje się tak mimo zachowania sumarycznej wartości natężenia promieniowania (suma energii dla poszczególnych długości fal widma), zarówno w przypadku światła naturalnego, jak i sztucznego adekwatnych do wymagań odpowiednich norm. Konkluzją do przeprowadzonych rozważań jest konieczność używania symulatorów naturalnego światła słonecznego o charakterystykach widmowych możliwie najlepiej odwzorowujących promieniowanie słoneczne oraz podawanie znaczenia tego faktu w trakcie realizacji zajęć dydaktycznych.

Zaprezentowane zagadnienia mają na celu umożliwienie absolwentom kierunku energetyka swobodnego operowania na rynku pracy poprzez podejmowanie samodzielnych decyzji w zakresie efektywnego wykorzystania źródeł OZE.

## Literatura

- Dirnberger, D. i in. (2015). On the Impact of Solar Spectral Irradiance on the Yield of Different PV Technologies. *Solar Energy Mater. Solar Cells*, 132, 431–442.
- Ghitas, A.E. (2012). Studying the Effect of Spectral Variations Intensity of the Incident Solar Radiation on the Si Solar Cells Performance. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 1, 165–171.
- Ghosh, P. i in. (2017). Modelling and Simulation of Solar Cell Using Embedded Matlab-Simulink Tool. *International Journal of Electronics, Electrical and Computational System IJEECS*, 6, 101–114.
- Granek, F., Sdanowicz, T. (2004). Advanced System for Calibration and Character of Solar Cells. *Optoelectronics Review*, 12 (1), 57–67.
- Huld, T., Amillo, A.M.G. (2015). Estimating PV Module Performance Over Large Geographical Energies: The Role of Irradiance, Air Temperature, Wind Speed and Solar Spectrum. *Energies*, 8 (6), 5159–5181.
- Masters, G.M. (2004). *Renewable and Efficient Electric Power Systems*. Hoboken: John Wiley & Sons.
- Standards series*. (2016). International Standards IEC 61853, part 2. International Electrotechnical Commission.