

Modelowanie charakterystyk monokrystalicznych ogniw fotowoltaicznych przy różnych warunkach oświetlenia

Streszczenie: W pracy przedstawiono model fotoogniwa dedykowany dla programu SPICE. Model ten uwzględnia zjawiska optyczne, elektryczne i cieplne. W szczególności uwzględniono wpływ na charakterystyki fotoogniwa kąta padania promieni światła na powierzchnię tego fotoogniwa. Zaprezentowano zarówno postać modelu, jak i zastosowane stanowisko pomiarowe. Praktyczną przydatność opracowanego modelu zbadano dla fotoogniwa monokrystalicznego.

Abstract: In the paper the model of the solar cell dedicated for the SPICE software is presented. This model takes into account optical, electrical and thermal phenomena. The influence of the angle of incidence of shafts on its surface on characteristic of solar cells are considered. Both the form of the model and the worked out measuring set-up are presented. The practical usefulness of the worked out model is examined for the monocrystalline solar cell (**Modelling characteristics of mono-crystalline solar cells operating under different luminous conditions**)

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, modelowanie, pomiary, SPICE

Key words: solar cells, modelling, measurements, SPICE

Wprowadzenie

Ogniwa fotowoltaiczne są podstawowym składnikiem systemów fotowoltaicznych, które są coraz częściej wykorzystywane do zasilania budynków [1, 2] i do ładowania urządzeń mobilnych [3]. Przy projektowaniu takich systemów istotne znaczenie odgrywa symulacja komputerowa, która umożliwia oszacowanie wartości energii produkowanej przez rozważany system w różnych porach roku oraz doby [4, 5]. Wiarygodność wyników takiej symulacji jest uzależniona od dokładności zastosowanych modeli wszystkich komponentów.

W literaturze można znaleźć liczne modele ogniw fotowoltaicznych [4, 6-9] o zróżnicowanej dokładności. W grupie modeli rozważanej klasy elementów znajdują się również modele dedykowane dla programu SPICE [4, 6-8]. Typowo modele te uwzględniają jedynie właściwości elektryczne ogniw fotowoltaicznych. We wcześniejszych pracach autorów [5, 8, 10] zaproponowano modele rozważanych ogniw uwzględniające także wpływ zjawisk cieplnych na ich charakterystyki. Modele takie nazywane są modelami elektrotermicznymi.

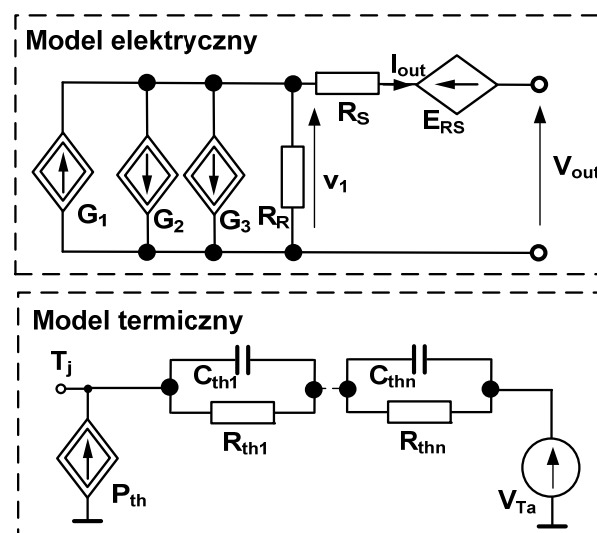
W zastosowaniach praktycznych, o wydajności energetycznej rozważanych elementów decydują warunki oświetlenia [5], które zmieniają się cyklicznie w zależności od pory dnia oraz pory roku. Jedną z przyczyn tych zmian jest zmienna wartość kąta padania promieni słonecznych na powierzchnię fotoogniwa. Intuicyjnie należy oczekiwać, że przy mniejszej wartości kąta padania promieni słonecznych wydajność energetyczna ogniw fotowoltaicznych będzie mniejsza. Jednak autorom nie są znane modele symulacyjne, które uwzględniają to zjawisko. Próbę uwzględnienia tego zjawiska podjęli autorzy w pracy [11] w odniesieniu do fotoogniw polikrystalicznych.

W pracy przedstawiono elektrotermiczny model fotoogniwa uwzględniający zarówno zjawiska elektryczne i cieplne zachodzące w tym ogniwie, jak również wydajność źródła światła i kąt padania światła oświetlającego to fotoogniwo. W kolejnych rozdziałach przedstawiono postać opracowanego modelu fotoogniwa, opisano sposób pomiaru charakterystyk fotoogniwa przy regulowanym kącie padania promieni świetlnych i stanowisko do realizacji tego pomiaru, a także wyniki weryfikacji poprawności opracowanego modelu dla ogniwa fotowoltaicznego wykonanego z krzemu monokrystalicznego.

Postać modelu

Prezentowany model fotoogniwa jest rozwinięciem elektrotermicznego modelu tego elementu przedstawionego

przez autorów w pracy [8, 10]. Model ten jest dedykowany dla programu SPICE i ma formę podukładu, którego schemat pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa modelu fotoogniwa

Opracowany model zawiera dwa komponenty – model elektryczny oraz model termiczny. Model elektryczny opisuje charakterystyki prądowo-napięciowe fotoogniwa z uwzględnieniem wpływu temperatury na ich kształt. Z kolei, model termiczny umożliwia obliczenie wartości temperatury wnętrza fotoogniwa T_j stanowiącej sumę temperatury otoczenia oraz jej przyrostu wynikającego ze zjawiska samonagrzewania.

W modelu elektrycznym sterowane źródło prądowe G_1 reprezentuje fotoprąd, którego wartość zależy m.in. od gęstości mocy promieniowania optycznego padającego na powierzchnię fotoogniwa. Z kolei, sterowane źródło prądowe G_2 reprezentuje składową dyfuzyjną prądu złącza p-n, a sterowane źródło prądowe G_3 – składową generacyjno-rekombinacyjną prądu tego złącza. Rezystor R_R modeluje upływność fotoogniwa, a rezystor R_S wraz ze sterowanym źródłem napięciowym E_{RS} – rezystancję szeregową fotoogniwa.

W modelu termicznym sterowane źródło prądowe P_{th} reprezentuje sumę mocy cieplnej wydzielanej w fotoogniwie oraz mocy promieniowania cieplnego pochłanianego przez fotoogniwo, natomiast elementy R_{th1} , ..., R_{thn} i C_{th1} , ..., C_{thn}

modelują przejściową impedancję termiczną fotoogniwa. Źródło napięciowe V_{Ta} reprezentuje temperaturę otoczenia. Prąd źródła G_1 opisany jest następującym wzorem:

$$(1) \quad I_1 = P \cdot S \cdot \eta \cdot x \cdot [1 + \alpha_T \cdot (T_j - T_0)] \cdot f(\varphi)$$

gdzie P oznacza gęstość mocy promieniowania optycznego, S – powierzchnię aktywną fotoogniwa, η – sprawność konwersji fotoelektrycznej, x – współczynnik skalujący wyrażony w $[V^{-1}]$, α_T – temperaturowy współczynnik zmian fotoprądu, T_0 – temperaturę odniesienia, natomiast $f(\varphi)$ jest dobraną doświadczalnie funkcją kąta φ o postaci:

$$(2) \quad f(\varphi) = w_3 \cdot \varphi^3 + w_2 \cdot \varphi^2 + w_1 \cdot \varphi + w_0$$

gdzie w_3 , w_2 , w_1 oraz w_0 są współczynnikami wielomianu aproksymującego funkcję $f(\varphi)$, natomiast φ jest kątem padania promieni optycznych na powierzchnię fotoogniwa wyrażonym w stopniach.

Pozostałe równania opisujące wydajności źródeł sterowanych zawartych w rozważanym modelu przedstawiono w pracy [8].

Prezentowany model opisany jest przy wykorzystaniu 16 parametrów. Wartości tych parametrów dla fotoogniwa monokrystalicznego zebrano w Tabeli 1.

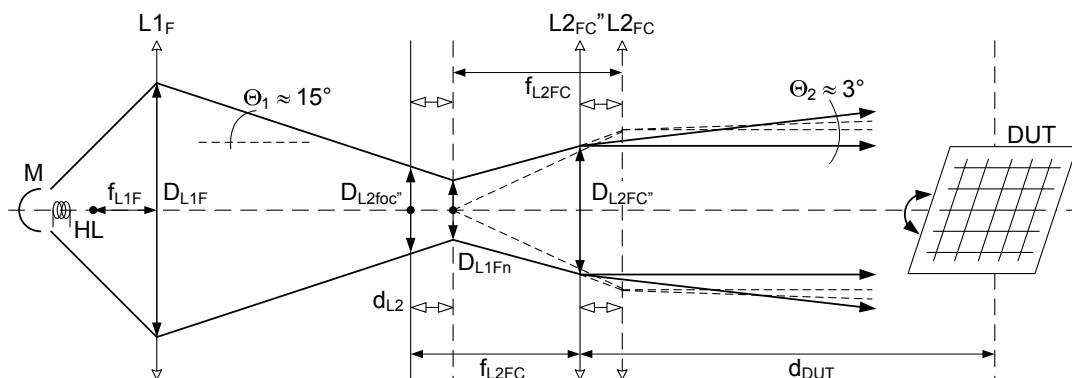
Tabela 1. Wartości parametrów modelu fotoogniwa monokrystalicznego

parametr	S [m ²]	S ₁ [m ²]	η	P [W/m ²]	T ₀ [K]	α _T [1/K]	x [V ⁻¹]	R _R [kΩ]
wartość	22,7 · 10 ⁻³	23,6 · 10 ⁻³	0,21	57,5	298	1,9 · 10 ⁻³	2,657	10
parametr	J ₀ [A/m ²]	J ₀₂ [A/m ²]	n	n ₁	R _S [mΩ]	α _{RS} [1/K]	a [m ²]	R _{th} [K/W]
wartość	8 · 10 ⁹	5,6 · 10 ³	1,33	3,65	8,3	0,003	0,8	3

Metoda pomiaru

Na rys. 2 przedstawiono układ optyczny, który zastosowano do wykonania pomiarów charakterystyk elektrycznych badanych ogniw fotowoltaicznych (DUT). W

rozważanym układzie źródłem promieniowania optycznego, o rozkładzie spektralnym zbliżonym do promieniowania słonecznego jest żarówka halogenowa HL o mocy elektrycznej równej 400 W.



Rys. 2. Schemat układu optycznego

W celu integracji i skupienia emitowanego promieniowania optycznego wykorzystano sferyczne zwierciadło wklęsłe M oraz soczewkę Fresnela $L1_F$ z przesłoną o średnicy $D_{L1F} = 22$ cm. Nachylenie wyjściowych skrajnych promieni względem osi optycznej jest równe w przybliżeniu około 15° . W płaszczyźnie przewężenia promieniowania średnica D_{L1Fn} jest równa około 2 cm. W celu kolimacji promieniowania pobudzającego badane ogniwo użyto soczewkę Fresnela $L2_{FC}$ o ogniskowej $f_{L2FC} = 28$ cm, pozycjonując ją tak, aby ognisko soczewki znalazło się w płaszczyźnie przewężenia. Dla skończonych wymiarów przewężenia uzyskuje się optymalny maksymalny kąt rozbieżności skolimowanego promieniowania na poziomie 2° (promienie zaznaczone linią przerywaną).

Ze względu na aberracje chromatyczne oraz sferyczne (załamywanie promieni w kierunku osi optycznej) skutkujące znaczną nierównomiernością gęstości mocy optycznej w płaszczyźnie badanych ogniw w pobliżu osi optycznej oraz w oddaleniu od niej, soczewkę kolimującą przesunięto 2 cm w kierunku źródła promieniowania optycznego, co pozwoliło uzyskać równomierny rozkład gęstości mocy na powierzchni badanych ogniw

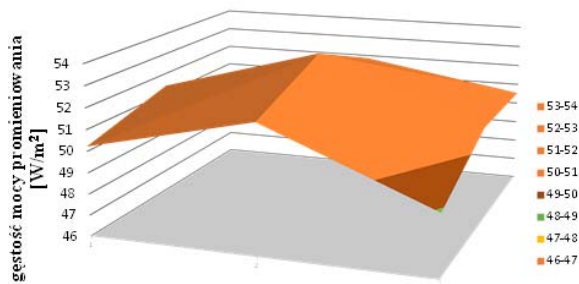
fotowoltaicznych. W płaszczyźnie ogniskowej tak ustawionej soczewki średnica pola promieniowania D_{L2foc} jest równa około 3 cm, natomiast średnica pola w płaszczyźnie soczewki D_{L2FC} jest równa około 15 cm. Maksymalny kąt rozbieżności uzyskanego promieniowania wynosi około 3° .

Wyniki badań

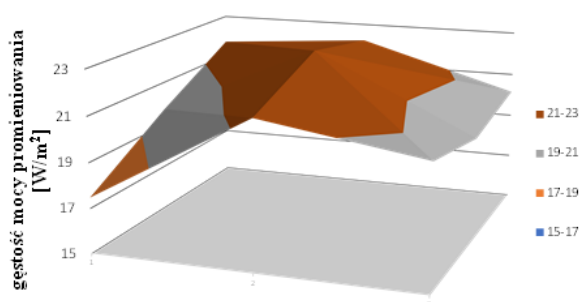
Wykorzystując metodę pomiaru opisaną w rozdziale 3 zmierzono za pomocą radiometru HD2302 firmy Delta Ohm rozkłady gęstości mocy promieniowania optycznego na powierzchni badanego fotoogniwa przy różnych wartościach kąta padania promieni światła na powierzchnię fotoogniwa (pod pojęciem kąta padania należy rozumieć w tym przypadku kąt nachylenia fotoogniwa względem osi optycznej układu pomiarowego). Na rys. 3 przedstawiono taki rozkład uzyskany przy kącie padania promieni optycznych równym 80° , a na rys. 4 – przy kącie równym 30° .

Jak można zauważyć, rozkład gęstości mocy na powierzchni fotoogniwa jest prawie równomierny. Różnice między wartościami tego parametru na rozważanej powierzchni nie przekraczają 10%. Największe odchyłki między wartością średnią gęstości mocy a wartością tego

parametru w konkretnym punkcie, występują na brzegach fotoogniwa. Warto też zwrócić uwagę na fakt, że zmiana wartości kąta padania promieni światła na powierzchnię fotoogniwa z 80° do 30° powoduje ponad dwukrotne zmniejszenie wartości maksymalnej rozważanej gęstości mocy.



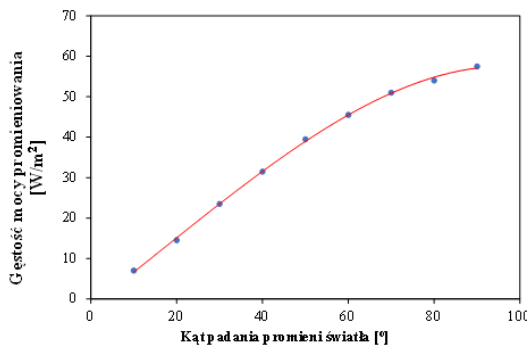
Rys. 3. Zmierzony rozkład gęstości mocy promieniowania optycznego padającego na powierzchnię fotoogniwa pod kątem φ równym 80°



Rys. 4. Zmierzony rozkład gęstości mocy promieniowania optycznego padającego na powierzchnię fotoogniwa pod kątem φ równym 30°

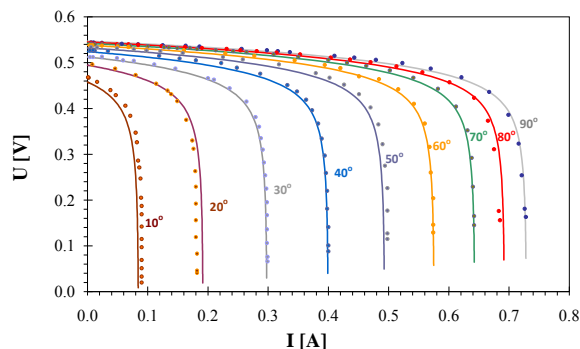
Rozkłady gęstości mocy na powierzchni fotoogniwa zmierzono dla wielu wartości kąta padania promieni światła. Na rys. 5 pokazano zależność wartości średniej gęstości mocy promieniowania od kąta padania promieni światła. Punkty oznaczają wyniki pomiarów, a linie wyniki aproksymacji rozważanej zależności za pomocą funkcji danej wzorem (2).

Wartości współczynników aproksymujących występujących we wzorze (2) wynoszą: $w_3 = -0,8 \cdot 10^{-6} \text{ deg}^{-3}$, $w_2 = 3,93 \cdot 10^{-5} \text{ deg}^{-2}$, $w_1 = 0,0141 \text{ deg}^{-1}$, $w_0 = -4,9 \cdot 10^{-4}$. Jak widać uzyskano dobrą zgodność między zależnością zmierzoną i obliczoną. Warto zauważyć, że wraz ze zmianą wartości kąta φ w zakresie od 0 do 90° średnia wartość gęstości mocy promieniowania zmienia się od 0 do 57,5 W/m².



Rys. 5. Zmierzona (punkty) i aproksymowana (linia) zależność średniej gęstości mocy optycznej promieniowania padającego na powierzchnię fotoogniwa od kąta φ

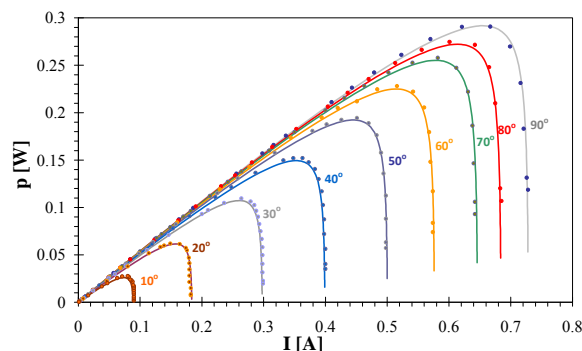
Wykorzystując model fotoogniwa przedstawiony w rozdziale drugim obliczono za pomocą programu SPICE charakterystyki napięciowo-prądowe fotoogniwa monokrystalicznego i pokazano je na rys. 6, a na rys. 7 – odpowiadające im zależności mocy uzyskiwanej z fotoogniwa od jego prądu. Obliczenia wykonano dla różnych wartości kąta padania promieni świetlnych przy gęstości mocy w płaszczyźnie fotoogniwa równej 57,5 W/m². Na rysunkach tych linie oznaczają wyniki obliczeń, a punkty – wyniki pomiarów.



Rys. 6. Zmierzone (punkty) i obliczone (linie) charakterystyki prądowo-napięciowe fotoogniwa dla wybranych wartości kąta φ

Jak można zauważyć na rys. 6, dla wszystkich rozważanych wartości kąta φ uzyskano dobrą zgodność między wynikami obliczeń i pomiarów. Przy zmniejszaniu wartości kąta φ następuje spadek wartości napięcia na panelu oraz spadek wartości prądu zwartego obwodu. Dla rozważanej wartości gęstości mocy przy zmianach tego kąta w zakresie od 90° do 10° prąd zwartego obwodu maleje z 0,73 A do zaledwie 85 mA. Warto zauważyć, że wpływ zmian kąta φ na rozważane charakterystyki jest najsilniejszy w zakresie małych wartości tego kąta.

Na rys. 7 widać, że spadek wartości kąta φ powoduje istotne obniżenie maksymalnej wartości mocy dostarczanej przez ogniwo fotowoltaiczne. Przy rozważanych wartościach parametrów źródła promieniowania moc maksymalna maleje z 0,29 W przy $\varphi = 90^\circ$ do zaledwie 0,03 W przy $\varphi = 10^\circ$.



Rys. 7. Zmierzone (punkty) i obliczone (linie) charakterystyki zależności mocy wytwarzanej przez fotoogniwo od jego prądu dla wybranych wartości kąta φ

Podsumowanie

W pracy przedstawiono model fotoogniwa dla programu SPICE, pozwalający na uwzględnienie wpływu kąta padania promieni słonecznych na wydajność prądową rozważanego elementu. Zbudowane przez autorów stanowisko badawcze pozwoliło na uzyskanie prawie równoległego biegu promieni świetlnych i niemalże równomiernego rozkładu gęstości mocy promieniowania na powierzchni fotoogniwa, co odpowiada warunkom oświetlenia ogniw fotowoltaicznych

promieniowaniem słonecznym. Sformułowany przez autorów wzór opisujący zależność wydajności prądowej fotoogniwa od kąta padania promieni świetlnych dobrze opisuje rzeczywiste właściwości fotoogniwa. Zastosowanie zaproponowanej zależności pozwoliło na uzyskanie dobrej zgodności między obliczonymi i zmierzonymi charakterystykami rozważanego ogniwa monokrystalicznego.

W dalszych pracach autorzy podejmą prace zmierzające do uwzględnienia wpływu zmian kąta padania promieni słonecznych na wydajność rzeczywistej instalacji fotowoltaicznej zawierającej fotoogniwa monokrystaliczne.

Autorzy: mgr inż. Ewa Krac, Katedra Elektroniki Morskiej, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, dr inż. Jacek Dąbrowski, Katedra Elektroniki Morskiej, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki Katedra Elektroniki Morskiej, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, prof. dr hab. inż. Janusz Zarębski, Katedra Elektroniki Morskiej, Wydział Elektryczny, Akademia Morska w Gdyni, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia

LITERATURA

- [1] M. H. Rashid, Power Electronic Handbook. Academic Press, Elsevier, 2007.
- [2] D. Mulvaney, Solar's Green Dilemma, IEEE Spectrum, No. 9, 2014, pp. 26-29.
- [3] P. Górecki, Voltage Regulators for the Laptop's Power Supply Station with Photovoltaic Modules. Proc. of 22nd Int. Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES, Toruń, 2015, pp. 571-575.
- [4] L. Castaner, and S. Silvestre, Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice, John Wiley&Sons, 2002.
- [5] K. Górecki, J. Dąbrowski, E. Krac, J. Zarębski: Modelling the influence of weather conditions on properties of the photovoltaic installation. Proc. of the 24th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems Mixdes 2017, Bydgoszcz 2017, pp. 366-371.
- [6] Md. N.I. Sarkar: Effect of various model parameter on solar photovoltaic cell simulation: a SPICE analysis. Renevables: Wind, Water, and Solar, Vol. 3, no. 13, 2016, doi: 10.1186/s40807-016-0035-3.
- [7] E. Gadjeva, M. Hristov: Behavioral Parametrized SPICE Models of Photovoltaic Modules, Proc. of the 20th Int. Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems MIXDES, Gdynia, 2013, pp. 355-359.
- [8] K. Górecki, P. Górecki, K. Paduch, Modelling solar cells with thermal phenomena taken into account, Journal of Physics: Conference Series, Vol. 494, 2014, 012007, doi:10.1088/1742-6596/494/1/012007.
- [9] A. Gontean, S. Lica, S. Bularka, R. Szabo, D. Lascu: A Novel High Accuracy PV Cell Model Including Self Heating and Parameter Variation. Energies, Vol. 11, No. 36, 2018, doi:10.3390/en11010036.
- [10] E. Krac, K. Górecki: Modelling characteristics of photovoltaic panels with thermal phenomena taken into account. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Vol. 104, 2016, 39th Int. Microel. and Packaging IMAPS Poland 2015 Conference, 012013, pp. 1-7, doi:10.1088/1757-899X/104/1/012013.
- [11] J. Dąbrowski, E. Krac, K. Górecki: New model of solar cells for SPICE. Artykuł zgłoszony na konferencję MIXDES 2018.