

Modelowanie ogniw fotowoltaicznych w programie SPICE

Streszczenie. W pracy omówiono wybrane literaturowe modele ogniw fotowoltaicznych oraz autorski elektrotermiczny model fotoogniwa. Omówiony autorski elektrotermiczny model fotoogniwa uwzględnia zarówno zmianę temperatury podczas pracy fotoogniwa oraz zmianę kąta padania promieni światła na to fotoogniwo. Przedstawiono również wyniki weryfikacji doświadczalnej wybranego z prezentowanych modeli.

Abstract. The paper describes selected literature models of photovoltaic cells and the authors' electrothermal model of photovoltaic cell. The discussed electrothermal photovoltaic model takes into account the temperature change during photovoltaic operation and the angle of incidence of light rays on considered photovoltaic cell. The results of experimental verification of one of the presented models were also presented. **(Modelling solar cells in SPICE)**

Słowa kluczowe: ogniwa fotowoltaiczne, modelowanie, pomiary, SPICE.

Keywords: solar cells, modelling, measurements, SPICE.

Wstęp

W ostatnich latach obserwować można dynamiczny wzrost zainteresowania pozyskiwaniem energii ze źródeł odnawialnych (OZE), w tym ze słońca. Sektor fotowoltaiki jest jednym z najszybciej rozwijających się sektorów OZE w Polsce i na świecie. Zgodnie z badaniami przeprowadzonymi przez Instytut Fotowoltaiki w Polsce, tendencja ta utrzymywać się będzie jeszcze w przyszłości [1].

Konwersja promieniowania optycznego na energię elektryczną zachodzi w ogniwach fotowoltaicznych (PV), które połączone ze sobą tworzą panele fotowoltaiczne. Charakterystyki ogniw PV, a w konsekwencji także paneli PV, bardzo silnie zależą od temperatury oraz gęstości mocy oświetlającego je promieniowania, gdzie zarówno temperatura jak i gęstość mocy promieniowania oświetlającego fotoogniwa zmieniają się wraz z porą dnia i porą roku [2].

Tymczasem producenci ogniw fotowoltaicznych podają wartość mocy nominalnej paneli fotowoltaicznych dla standardowych warunków pracy STC (ang. Standard Test Conditions), które zakładają, że gęstość mocy promieniowania oświetlającego panel PV wynosi 1000 W/m^2 i pracuje on w stałej temperaturze równej 25°C [2, 3, 4]. Jednak, podczas pracy ogniw fotowoltaicznych, ze względu na zmienny charakter warunków pogodowych oraz zmianę temperatury wnętrza ogniw PV wynikającą ze zjawiska samonagrzewania, temperatura paneli fotowoltaicznych ulega zmianie. Z badań autorów niniejszej pracy wynika, iż w miesiącach letnich temperatura paneli PV, oświetlanych promieniowaniem równym około 1000 W/m^2 wynosiła nawet 82°C . W miesiącach zimowych temperatura pracy paneli fotowoltaicznych sięgała aż 32°C , podczas gdy w tym czasie ogniwa fotowoltaiczne oświetlone były promieniowaniem o gęstości mocy nieprzekraczającej 400 W/m^2 [5].

Z uwagi na omówione zjawiska staranne zaprojektowanie systemów fotowoltaicznych oraz możliwość poprawnej oceny ich działania w różnych warunkach atmosferycznych wymagają zastosowania, jeszcze na etapie projektu, dokładnego modelu symulacyjnego.

W literaturze znane są modele dedykowane dla różnych programów wspomagających projektowanie instalacji fotowoltaicznych, wśród nich modele dedykowane do programu SPICE. Jest on obecnie powszechnie uważany za jedno z najpopularniejszych narzędzi służących do symulacji układów elektronicznych [6, 7, 8]. Modele prezentowane w literaturze zostały sformułowane przy różnych założeniach upraszczających dla fotoogniw

wykonanych w różnych technologiach. Brakuje jednak w literaturze oceny jakości tych modeli.

W pracy przedstawiono wyniki modelowania ogniw fotowoltaicznych przy zastosowaniu różnego typu modeli dedykowanych dla programu SPICE. W rozdziale 2 omówiono dwa typy znanych z literatury modeli ogniw fotowoltaicznych dedykowanych dla programu SPICE: stałoprądowe, jednodiodowe SEM (ang. Single Diode Equivalent Model) i stałoprądowe dwudiodowe DEM (ang. Double Diode Equivalent Model). W rozdziale 3 zaprezentowano i omówiono autorski elektrotermiczny model ogniwa fotowoltaicznego, który uwzględnia zmiany temperatury pracy ogniwa oraz zmianę kąta padania promieni światła oświetlającego badane ogniwo PV. W rozdziale 4 zaprezentowano wyniki obliczeń i pomiarów.

Literaturowe modele fotoogniw

Zasady formułowania stałoprądowych modeli elektrycznych ogniw PV dedykowanych dla programu SPICE omówiono m.in. w pracy [6]. Przy modelowaniu elementów elektronicznych niezmiernie istotnym jest poszukanie kompromisu pomiędzy czasem trwania obliczeń przy zastosowaniu danego modelu, a dokładnością wyników obliczeń. Modele takie można podzielić na modele nie uwzględniające zmiany temperatury wnętrza fotoogniw w czasie ich pracy (modele izotermiczne) oraz uwzględniające takie zmiany (modele nieizotermiczne). Do najpopularniejszych modeli izotermicznych należą modele jednodiodowe, dwu- i wielodiodowe. Modele takie omówiono m.in. w pracach [9-15].

Izotermiczne modele jednodiodowe ogniwa fotowoltaicznego charakteryzuje krótki czas przeprowadzanych obliczeń. Jednak modele te nie uwzględniają zmian temperatury wnętrza fotoogniw spowodowanych zjawiskiem samonagrzewania, czy absorpcją ciepła ze źródła promieniowania. W cytowanych pracach [9-15] we wzorach opisujących poszczególne elementy modelu uwzględniono temperaturę, jednak rozumiana jest ona jako temperatura otoczenia. Ponadto modele te nie uwzględniają składowej generacyjno-rekombinacyjnej prądu złącza p-n.

Z kolei, w modelach dwudiodowych wprowadzono dodatkową diodę, która reprezentuje składową generacyjno-rekombinacyjną prądu złącza p-n. Model ten w dalszym ciągu zapewnia krótki czas trwania obliczeń, ale również nie uwzględnia zmian temperatury wnętrza ogniwa fotowoltaicznego ani zmian kąta padania oświetlającego go promieniowania.

W pracy [9] zaproponowano sposób modelowania paneli fotowoltaicznych uwzględniając parametry panelu PV

podane przez producenta. Wprawdzie w cytowanej pracy wskazano na konieczność uwzględnienia zmienności warunków środowiskowych w modelach paneli PV, jednak zaproponowany w tej pracy model z jedną diodą uwzględnia jedynie możliwość pracy paneli PV dla z góry określonych warunków napromienienia i temperatury. Dodatkowo, omówiony w cytowanej pracy model z jedną diodą nie uwzględnia składowej generacyjno-rekombinacyjnej prądu złącza p-n, ani zmiany kąta padania promieni oświetlających ogniwa PV.

Zaproponowany w pracy [10] model ogniwa PV, zawiera sterowane źródło prądowe reprezentujące fotoprąd I_{ph} , rezystor R_s reprezentujący sumę rezystancji pasożytniczych złącza p-n oraz rezystor R_p reprezentującą prąd upływu złącza p-n. Autorzy cytowanej pracy wskazują, że prąd zwarcia ogniwa PV zależy od różnych wartości napromieniania, zaś napięcie w obwodzie otwartym ogniwa PV zależy od temperatury. Dodatkowo w pracy [10] zaprezentowano i omówiono uzyskane zależności $I(U)$ oraz $P(U)$ dla ogniw ustawionych pod różnym kątem. Zabieg ten powoduje zmianę skuteczności chłodzenia badanego ogniwa fotowoltaicznego. Wadą zaproponowanego modelu jest fakt, że temperatura złącza ogniwa PV jest stała, i aby utrzymać stałą temperaturę ogniwa PV, badane fotoogniwo podczas badań było chłodzone za pomocą wentylatorów.

Według autorów pracy [11] wyniki badań potwierdzają, że model ogniwa fotowoltaicznego z jedną diodą jest odpowiednio dokładnym modelem poli- i monokrystalicznych ogniw fotowoltaicznych. Opisany w pracy [11] model uwzględnia fotoprąd, prąd nasycenia diody, współczynnik nieidealności złącza p-n oraz rezystancję szeregową fotoogniwa. Jednak, jak przyznają autorzy pracy [11], wraz ze wzrostem temperatury pracy ogniwa PV, nie uzyskano satysfakcjonującej zgodności pomiędzy charakterystykami obliczonymi oraz pomierzonymi. Rozbieżność pomiędzy charakterystykami obliczonymi i pomierzonymi wzrastała wraz ze wzrostem mocy dostarczanej do obciążenia. Dlatego w cytowanej pracy zaproponowano zastosowanie modelu z dziewięcioma diodami, który, jednak, jedynie zmniejsza błąd modelowania badanego fotoogniwa przy jego wysokiej temperaturze.

Reprezentację obwodową jednodiodowego modelu ogniwa fotowoltaicznego opisanego w pracy [12] przedstawiono na rysunku 1. Z kolei na rysunku 2 przedstawiono reprezentację obwodową dwudiodowego modelu ogniwa fotowoltaicznego zaproponowaną w tej samej pracy. W modelu jednodiodowym złącze p-n reprezentowane jest przez sterowane źródło prądowe I_{ph} opisane wzorem (1), diodę D_1 reprezentującą prąd nasycenia I_{s1} , współczynnik nieidealności złącza - A, a także rezystancje pasożytnicze reprezentowane za pomocą rezystorów R_{SH} - modelującego upływność złącza p-n oraz R_s modelującego rezystancję szeregową złącza p-n.

$$(1) \quad I_{ph} = -I_{ph} + I_s \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot U}{A \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] + \frac{U_D}{R_{sh}}$$

gdzie I_{ph} oznacza fotoprąd, I_s to prąd nasycenia diody, q - ładunek elektronu, U_D - napięcie dyfuzyjne, k - stała Boltzmanna, T oznacza temperaturę fotoogniwa.

Wartość parametru I_s opisano za pomocą zależności

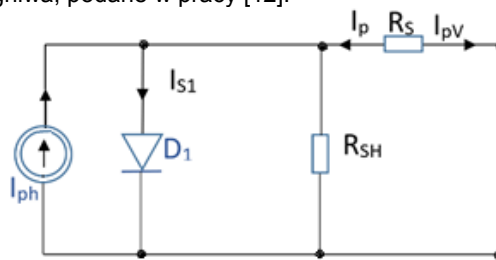
$$(2) \quad I_s = S \cdot q \cdot \left[\frac{D_n \cdot n_{p0}}{L_n} + \frac{D_p \cdot p_{p0}}{L_p} \right]$$

gdzie S oznacza powierzchnię ogniwa, D_n i D_p - stałe dyfuzji elektronów i dziur, L_n i L_p - długość drogi dyfuzji elektronów i dziur, n_{p0} - koncentrację nośników mniejszościowych w półprzewodniku typu p, natomiast p_{p0} oznacza koncentrację nośników mniejszościowych w półprzewodniku typu n.

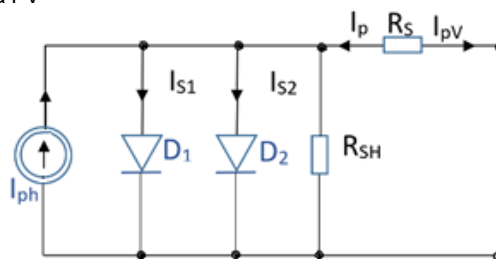
Zależność prądu nasycenia od temperatury T opisana jest zależnością

$$(3) \quad I_s(T) = \sqrt{T} \cdot \left[a \cdot \exp\left(\frac{b}{T}\right) + c \cdot \exp\left(\frac{d}{T}\right) \right]$$

gdzie a , b , c i d to parametry modelu jednodiodowego fotoogniwa, podane w pracy [12].



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa jednodiodowego modelu ogniwa PV



Rys. 2. Reprezentacja obwodowa dwudiodowego modelu ogniwa PV

Rozważany w pracy [12] model jednodiodowy uwzględnia zjawisko fotoelektryczne, rezystancję szeregową złącza p-n, a także składową dyfuzyjną prądu złącza p-n. W opisie modelu uwzględniono temperaturę, która jest rozumiana jako temperatura otoczenia i ma stałą wartość w czasie trwania obliczeń.

Zaproponowany w pracy [12] model dwudiodowy dodatkowo uwzględnia składową generacyjno-rekombinacyjną prądu złącza p-n. Składową tą reprezentuje prąd diody D_2 .

W rozważanym modelu źródło prądowe I_{ph} opisane jest zależnością (4), wartość parametrów I_{s1} oraz I_{s2} opisano kolejno zależnościami (2) i (5) natomiast zależność składowej dyfuzyjnej od temperatury oddaje zależność (6).

$$(4) \quad I_{pv} = -I_{pv} + I_{s1} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot U_D}{k \cdot T}\right) - 1 \right] + I_{s2} \cdot \left[\exp\left(\frac{q \cdot U_D}{2 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right] + \frac{U_D}{R_{sh}}$$

$$(5) \quad I_{s2} = S \cdot q \cdot \frac{n_i}{2} \cdot W \cdot v_{th} \cdot \sigma \cdot N_t$$

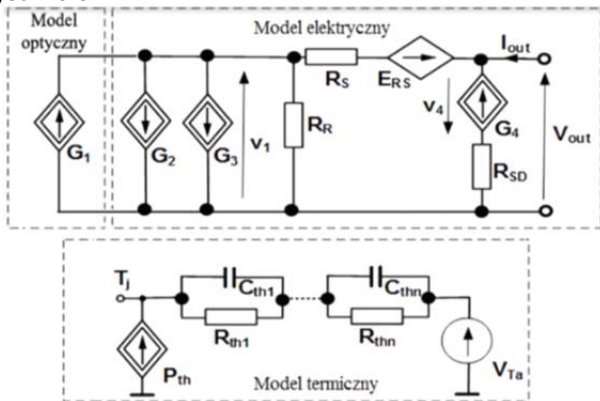
$$(6) \quad I_{s2}(T) = e \cdot \sqrt{T} \cdot \sqrt{\exp\left(\frac{f}{T}\right)} \cdot \sqrt{\ln\left[\frac{g}{\exp\left(\frac{f}{T}\right)}\right]}$$

gdzie σ to konduktywność materiału silnie domieszkowanego natomiast: e , f i g to wartości parametrów modelu dwudiodowego fotoogniwa, podane w pracy [12].

Niestety w modelu tym, ze względu na fakt, iż dla podanych wartości parametrów argument funkcji pierwiastkowej jest liczbą ujemną, nie można wyznaczyć wartości parametru I_{s2} . Ponadto model ten, podobnie jak model jednodiodowy, nie uwzględnia zmian temperatury spowodowanych zjawiskiem samonagrzewania oraz pochłaniania ciepła ze źródeł promieniowania ani zmian wartości kąta padania oświetlającego fotoogniwo promieniowania.

Elektrotermiczny model fotoogniwa

Prezentowany w niniejszym rozdziale autorski model ogniwa fotowoltaicznego należy do grupy modeli elektrotermicznych tj. modeli uwzględniających wpływ zjawiska samonagrzewania na właściwości ogniwa PV. Dodatkowo model ten uwzględnia zmianę kąta padania światła oświetlającego ogniwo PV. Model taki sformułowany dla ogniwa monokrystalicznego autorzy opisali w pracy [16] natomiast w pracy [17] autorzy zaprezentowali elektrotermiczny model ogniwa polikrystalicznego. Reprezentację obwodową tego modelu pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Reprezentacja obwodowa elektrotermicznego modelu ogniwa fotowoltaicznego

Zawiera on trzy moduły: model optyczny, model elektryczny oraz model termiczny. Model optyczny zawiera sterowane źródło prądowe G_1 , które opisuje konwersję promieniowania optycznego na energię elektryczną. W opisie tego źródła danego wzorem (7) dodatkowo uwzględniono dobraną doświadczalnie funkcję φ opisującą zmianę kąta padania promieni słonecznych na powierzchnię fotoogniwa. Funkcja ta ma postać wielomianu danego wzorem (8). Pozostałe równania opisujące wydajność źródeł sterowanych przedstawiono w pracy [18].

(7)
$$I_1 = P \cdot S \cdot \eta \cdot x [1 + \alpha_T (T_j - T_0)] \cdot f(\varphi)$$

 (8)
$$f(\varphi) = w_3 \cdot \varphi^3 + w_2 \cdot \varphi^2 + w_1 \cdot \varphi^1 + w_0 \cdot \varphi + w_0$$

 gdzie P oznacza gęstość mocy promieniowania optycznego, S – powierzchnię aktywną fotoogniwa, η – sprawność konwersji fotoelektrycznej, x – współczynnik równy 1 V^{-1} , α_T – temperaturowy współczynnik zmian fotoprądu, T_j – temperatura fotoogniwa, T_0 – temperaturę odniesienia, natomiast w_3 , w_2 , w_1 oraz w_0 są współczynnikami wielomianu aproksymującego.

W modelu elektrycznym 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.

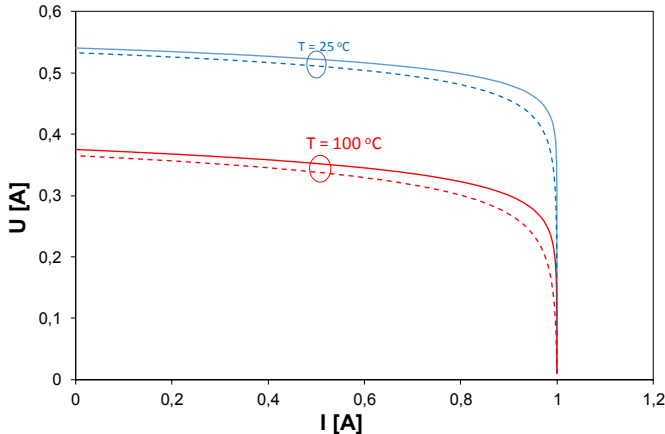
Model termiczny modeluje zmiany temperatury ogniwa PV podczas jego pracy. W modelu tym sterowane źródło prądowe P_{th} reprezentuje sumę mocy cieplnej wydzielanej w fotoogniwie oraz mocy promieniowania pochłanianego przez to fotoogniwo, natomiast elementy R_{th1}, \dots, R_{thn} i C_{th1}, \dots, C_{thn} modelują przejściową impedancję termiczną fotoogniwa. Źródło napięciowe V_{Ta} reprezentuje temperaturę otoczenia [9].

Weryfikacja poprawności modelu

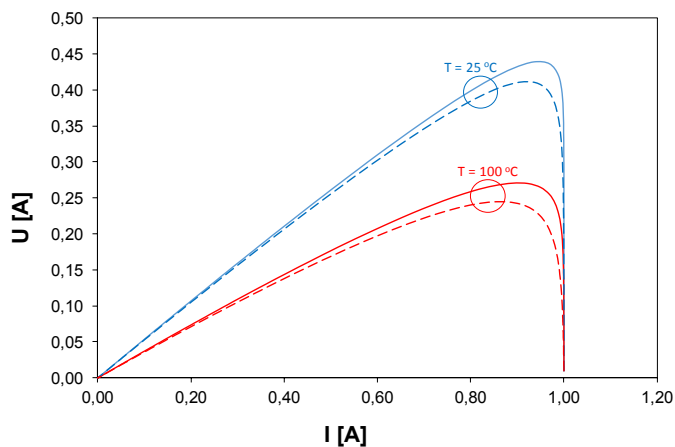
W celu zweryfikowania poprawności omówionych modeli przeprowadzono pomiary i symulacje komputerowe z użyciem modeli literaturowych i opisanego w niniejszej pracy elektrotermicznego modelu ogniwa fotowoltaicznego.

Na rysunku 4 przedstawiono zależności $U(I)$ obliczone za pomocą jedno- i dwudiodowego modelu ogniwa fotowoltaicznego, na rysunku 5 zależności $P(I)$ dla obu rozważanych modeli. Na rysunkach tych linie ciągłe oznaczają wyniki obliczeń wykonanych za pomocą jednodiodowego modelu fotoogniwa, a linie kreskowe wyniki obliczeń wykonanych za pomocą dwudiodowego modelu ogniwa PV. Kolorem czerwonym oznaczono wyniki odpowiadające temperaturze $100 \text{ }^\circ\text{C}$, a kolorem niebieskim – temperaturze $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Modele te należą do grupy, w której temperatura ogniwa PV podczas obliczeń jest stała, nie mniej, jak można zauważyć wartość napięcia otwartego obwodu obliczona przy pomocy tych modeli, w wyższej temperaturze fotoogniwa, maleje. Ponadto, w przypadku obu modeli opisanych w pracy [12] wraz ze wzrostem temperatury zmienia się jedynie wartość napięcia otwartego obwodu, wartość prądu zwarciovego jest taka sama dla obu wartości temperatury co nie oddaje rzeczywistych właściwości ogniwa PV.



Rys. 4. Zależności $U(I)$ obliczone przy pomocy jedno- i dwudiodowego modelu z pracy [4]



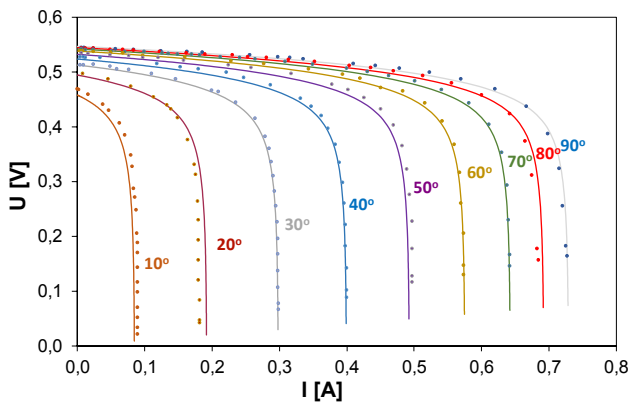
Rys. 5. Zależności mocy oddawanej do obciążenia od prądu – obliczenia przy pomocy jedno- (linie ciągłe) i dwudiodowego (linie kreskowane) modelu opisanego w pracy [4]

Jak można zauważyć na rysunku 5 stosując model jednodiodowy, uzyskano wyższe wartości mocy oddawanej do obciążenia. Wynika to z faktu, że w modelu z dwiema diodami występuje dodatkowa składowa prądu złącza p-n.

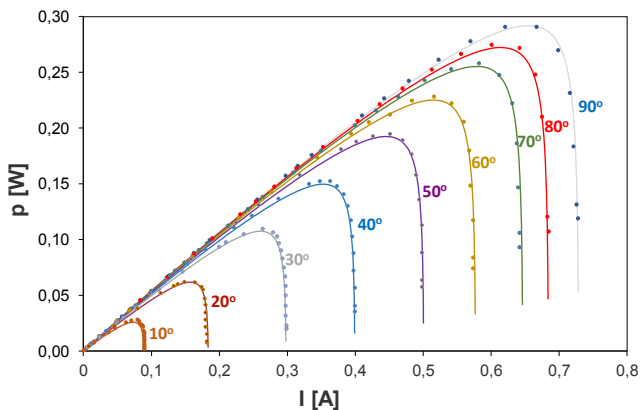
Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono wyniki weryfikacji poprawności autorskiego elektrotermicznego modelu ogniwa fotowoltaicznego. Na rysunkach tych wyniki obliczeń reprezentują linie, natomiast wyniki pomiarów kropki. Jak można zauważyć, dla wszystkich rozważanych wartości kąta φ uzyskano dobrą zgodność między wynikami obliczeń i pomiarów. Zmniejszanie wartości kąta padania

promieni światła na ogniwo PV powoduje zmniejszanie wartości gęstości mocy tego promieniowania i tym samym obserwować można spadek wartości napięcia otwartego obwodu oraz spadek wartości prądu zwarciego.

Analizując rysunek 7 można zauważyć, że spadek wartości kąta φ powoduje również istotne obniżenie maksymalnej wartości mocy dostarczanej przez ogniwo fotowoltaiczne do obciążenia.

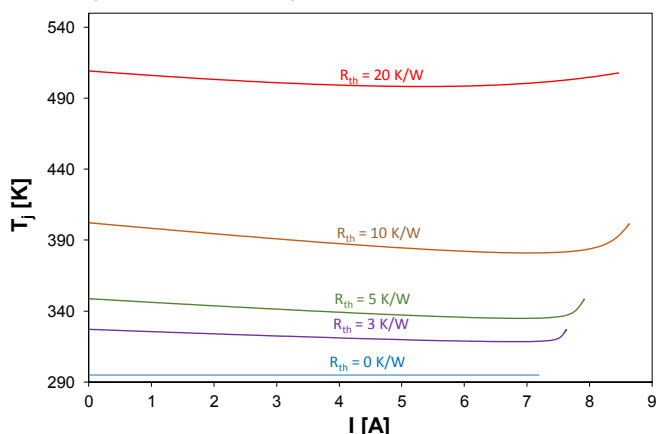


Rys. 6. Zmierzone (punkty) i obliczone (linie) charakterystyki prądowo-napięciowe fotoogniwa dla wybranych wartości kąta φ



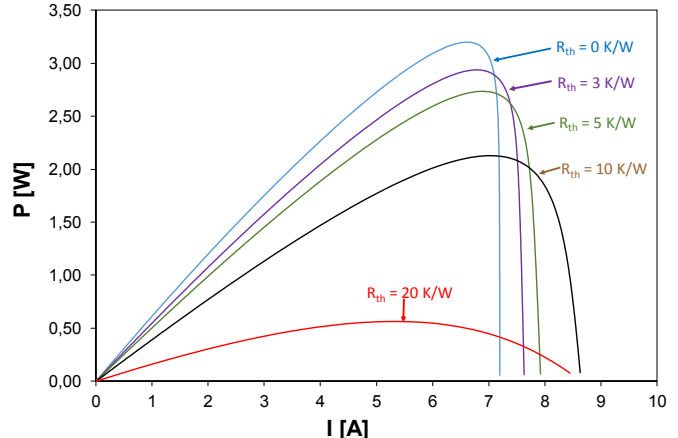
Rys. 7. Zmierzone (punkty) i obliczone (linie) zależności mocy wytwarzanej przez fotoogniwo od jego prądu dla wybranych wartości kąta φ

Na rysunku 8 przedstawiono obliczone zależności temperatury wnętrza fotoogniwa od prądu, a na rysunku 9 – zależności mocy w obciążeniu od prądu. Do obliczeń użyto model autorski przyjmując pięć wartości R_{th} – dla obliczeń izotermicznych R_{th} wynosiło 0, natomiast dla obliczeń nieizotermicznych przyjęto wartości $R_{th} = 3$ K/W, $R_{th} = 5$ K/W, $R_{th} = 10$ K/W oraz $R_{th} = 20$ K/W.



Rys. 8. Zależności temperatury wnętrza fotoogniwa w funkcji prądu

Dla warunków izotermicznych ($R_{th} = 0$) temperatura wnętrza jest stała i odpowiada temperaturze otoczenia, natomiast dla modelu nieizotermicznego uzyskano nieliniową zależność temperatury wnętrza fotoogniwa od prądu. Przyrost temperatury wnętrza fotoogniwa podczas konwersji promieniowania optycznego na energię elektryczną wynosi nawet 200 K (przy $R_{th} = 20$ K/W). Podczas symulacji wykazano, że im większa wartość R_{th} , tym większy jest przyrost temperatury wnętrza ogniwa fotowoltaicznego. Nie uwzględniając tego omówione w niniejszej pracy modele literaturowe. W konsekwencji, przeprowadzając analizę izotermiczną fotoogniwa uzyskuje się zawyżone wartości mocy oddawanej do obciążenia.



Rys. 9. Zależności mocy w obciążeniu od prądu

Podsumowanie

W pracy omówiono literaturowe izotermiczne jedno- i dwudiodowe modele fotoogniw dedykowane dla programu SPICE oraz zaprezentowano elektrotermiczny model fotoogniwa. Zaprezentowane w pracy wyniki weryfikacji doświadczalnej modelu elektrotermicznego dowodzą, iż model ten z dużą dokładnością opisuje zjawiska zachodzące w mono- i polikrystalicznych ogniwach fotowoltaicznych.

Zaproponowana przez autorów funkcja opisująca zależność pomiędzy wydajnością fotoogniwa, a zmianą wartości kąta padania promieni światła na to ogniwo z dużą dokładnością oddaje właściwości ogniwa PV. W pracy wykazano również, iż z uwagi na silną zależność właściwości fotoogniw od temperatury, w wyniku obliczeń przeprowadzanych przy użyciu prezentowanych w literaturze modeli izotermicznych uzyskuje się zawyżone wartości mocy oddawanej do obciążenia.

Autorzy: mgr inż. Ewa Krac, prof. dr hab. inż. Krzysztof Górecki, Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Elektryczny, ul. Morska 81-87, 81-225 Gdynia, E-mail: e.krac@we.umg.edu.pl; k.gorecki@we.umg.edu.pl

LITERATURA

1. A. Więcka, J. Zarzeczna, i in., Rynek Fotowoltaiki w Polsce, VII edycja Instytut Energetyki Odnawialnej, EC BREC Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2019,
2. P. Matuszczyk, T. Popławski, J. Flaszka, Wpływ natężenia promieniowania słonecznego i temperatury modułu na wybrane parametry i moc znamionową paneli fotowoltaicznych, Przegląd Elektrotechniczny, R. 91, Nr 12, 2015, s. 159-162 doi:10.15199/48.2015.12.40
3. A. Luque, S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Institute of Energy Conversion, University of Delaware, John Wiley and Sons, Ltd., Publication, USA 2011
4. S. Motahhir, A. Chalh, A. El Ghzizal, A. Derouich, Development of a Low-cost PV System using an improved INC algorithm and a PV panel Proteus model, Journal of Cleaner Production, Vol. 204, pp. 355-365, doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.246

5. E. Krac K. Górecki, Wpływ wybranych parametrów pogodowych na charakterystyki paneli fotowoltaicznych, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania*, R. 57, Nr 5, 2016, s. 40-43
6. M. Rashid, H. Rashid, *SPICE for Power Electronics and Electric Power*, Taylor and Francis Group, LLC, 2005
7. E. Gadjeva, M. Hristov, Behavioral Parametrized SPICE Models of Photovoltaic Modules, *Proceedings of the 20th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and systems MIXDES*, 2013, Gdynia, pp. 355-359
8. L. Castaner, and S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using Pspice*, John Wiley&Sons, 2002,
9. E. Gadjeva, M. Hristov, Computer-Aided Model Parameter Extraction of Photovoltaic Modules using SPICE, 19th International Symposium Power Electronics Ee2017, Novi Sad, Serbia, 2017, doi: 10.1109/PEE.2017.8171709
10. H. A Khawaldeh, H.h Aljarajreh, M. Al-Soeidat, Dylan D.-C. Lu, Li Li, Performance Investigation of a PV Emulator Using Current Source and Diode String, 2018 26th International Conference on Systems Engineering (ICSEng), 2018, doi: 10.1109/ICSENG.2018.8638207
11. J. J. Soon, K. Low, Shu Ting Goh, Multi-dimension Diode Photovoltaic (PV) Model for Different PV Cell Technologies, 2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2014, doi: 10.1109/ISIE.2014.6865012
12. B. Werner, W. Kołodenny, M. Prorok, A. Dziedzic, T. Żdanowicz: Electrical modeling of CIGS thin-film solar cells working in natural conditions. *Solar Energy Materials&Solar Cells*, 2011, pp. 2583–2587 doi: 10.1016/j.solmat.2011.03.014
13. 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, pp. 1-21, doi:10.3390/en11010036
14. P. K. Pandey, K.S. Sandhu, Multi Diode Modelling of PV Cell, 2014 IEEE 6th India International Conference on Power Electronics, 2014, 10.1109/IICPE.2014.7115793
15. B. A. Werner, Model fizyczny cienkowarstwowych modułów fotowoltaicznych ii-(iii)-vi pracujących w warunkach naturalnych, Rozprawa doktorska, Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010
16. E. Krac, J. Dąbrowski, K. Górecki, J. Zarębski, Modelowanie charakterystyk monokrystalicznych ogniw fotowoltaicznych przy różnych warunkach oświetlenia, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 94, Nr 9, 2018, s. 52-55
17. E. Krac, J. Dąbrowski, K. Górecki, New model of solar cells for SPICE, *Proceedings of the 25th International Conference Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES*, 2018, Gdynia, pp. 338-342
18. 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.