

Porównanie możliwości numerycznego modelowania ogniw fotowoltaicznych w środowisku Matlab Simulink oraz Scilab Xcos

Comparison of ability to numerical modeling of photovoltaic cells in the Matlab Simulink and Scilab Xcos environments

KAMIL KUTKOWSKI *

Materiały z XX SKWPWiE, Jurata 2016 r.
DOI: 10.17814/mechanik.2016.7.154

Artykuł omawia zagadnienie modelowania numerycznego i badań właściwości ogniw fotowoltaicznych, pracujących w zmiennych warunkach atmosferycznych, z wykorzystaniem dwóch różnych środowisk do wykonywania obliczeń naukowych i inżynierskich – komercyjnego Matlab Simulink oraz darmowego (open source) pakietu Scilab Xcos. Celem artykułu jest porównanie efektów modelowania tego samego rodzaju ogniwa fotowoltaicznego we wspomnianych środowiskach naukowych i inżynierskich.

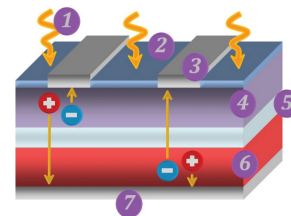
SŁOWA KLUCZOWE: ogniwo fotowoltaiczne, ogniwo słoneczne, modelowanie numeryczne, Matlab, Simulink, Scilab, Xcos

Article deals with the numerical modeling and testing the properties of the photovoltaic cells working in changeable weather conditions using two different environments to perform scientific calculations and engineering – commercial Matlab Simulink and free (open source) package Scilab Xcos. The aim of this article is to compare the effects of modeling the same type of photovoltaic cells in the above mentioned scientific and engineering environments.

KEYWORDS: photovoltaic cell, solar cell, PV panel, numerical modeling, Matlab, Simulink, Scilab, Xcos

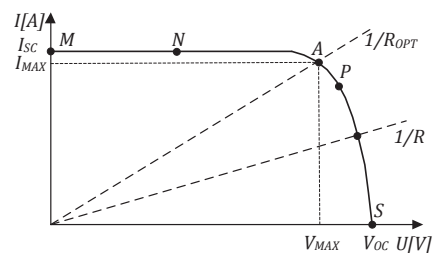
Mechanizm działania ogniw fotowoltaicznych jest oparty na wewnętrznym zjawisku fotoelektrycznym, które jest podstawą fotokonwersji. W celu jej opisanie należy się posłużyć kwantową teorią promieniowania świetlnego. Zakłada ona, że światło to strumień fotonów, z których każdy niesie ze sobą pewien kwant energii. Jeśli fotony padające na powierzchnię półprzewodnika mają energię większą od szerokości jego przerwy energetycznej, to następuje generacja par nośników energii elektrycznej (elektron–dziura). Pary te jednak szybko rekombinują, czego efektem jest głównie powstawanie energii cieplnej. Aby w półprzewodniku mogło wystąpić wewnętrzne zjawisko fotowoltaiczne (powstawanie siły elektromotorycznej pod wpływem oświetlenia), para elektron–dziura musi zostać trwale rozdzielona, zanim dojdzie do jej rekombinacji. Niezbędne do tego jest wewnętrzne pole elektryczne. Pole takie występuje w półprzewodniku, między innymi w obszarze złącza P–N, które wytwarza się np. metodą dyfuzji fosforu do krzemu zawierającego domieszkę akceptorową (krzem typu P). Na styku dwóch obszarów o różnych typach przewodnictwa powstaje ładunek przestrzenny, w którym występuje silne pole elektryczne. Działa ono jak filtr przepuszczający elektrony z części P do N i dziury z N do P. W efekcie na elektrodach ogniwa pojawia się napięcie. Od typu zastosowanych ogniw zależą bezpośrednio parametry techniczne oraz ekonomiczne paneli fotowoltaicznych, a w konsekwencji całej instalacji. Możliwości produkcji energii z konkretnych rodzajów ogniw fotowoltaicznych przedstawiane są najczęściej w postaci charakterystyk prądowo-napięciowych. Typową charakterystykę I-V dla stałego poziomu nasłonecznienia (G) oraz temperatury pracy ogniwa (T), przedstawia rys. 2. Obciążenie o charakte-

rze rezystancyjnym, na wykresie jest reprezentowane przez prostą $I/V=1/R$. Należy zauważyć, iż moc dostarczana do obciążenia jest zależna w tym przypadku wyłącznie od wartości rezystancji. Jeżeli rezystancja obciążenia ma małą wartość, ogniwo pracuje w obszarze M-N charakterystyki, gdzie zachowuje się jak źródło prądu stałego o poziomie natężenia zbliżonym do wartości prądu zwarcia.



Rys. 1. Budowa fizyczna ogniwa fotowoltaicznego: 1 – energia promieniowania słonecznego, 2 – warstwa antyrefleksyjna, 3 – elektroda przednia, 4 – materiał półprzewodnikowy typu N, 5 – obszar ładunku przestrzennego, 6 – materiał półprzewodnikowy typu P, 7 – elektroda tylna

Z drugiej strony, jeżeli rezystancja obciążenia jest duża, ogniwo pracuje w obszarze P-S charakterystyki i zachowuje się wówczas jak źródło napięcia stałego o poziomie potencjału zbliżonym do napięcia rozwarcia [1]. Kluczowy wpływ na pracę ogniw fotowoltaicznych mają warunki atmosferyczne, które determinują zmiany nasłonecznienia oraz temperatury pracy ogniwa. Tym samym wpływają na kształt charakterystyki prądowo-napięciowej.



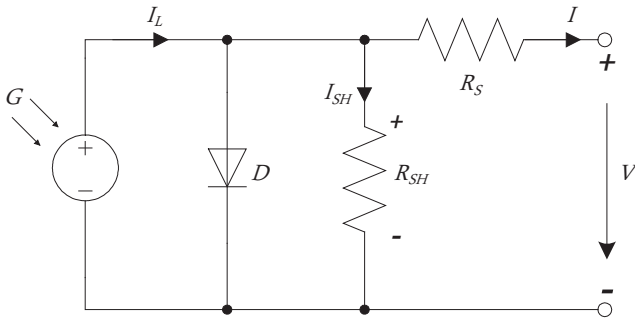
Rys. 2. Charakterystyka prądowo-napięciowa ogniwa fotowoltaicznego

W związku z powyższym w procesie projektowania ogniw, paneli i ostatecznie systemów fotowoltaicznych konieczne staje się przeprowadzenie szeregu symulacji komputerowych na opracowanym wcześniej modelu numerycznym, które pozwolą jeszcze przed fazą produkcji tak dopracować konstrukcję, aby była najbardziej optymalna względem konkretnych warunków atmosferycznych i/lub klimatycznych. W niniejszym opracowaniu zestawiono ze sobą dwa środowiska umożliwiające wykonywanie wspomnianych wcześniej obliczeń oraz symulacji. Jednym z nich jest Simulink będący rozszerzeniem komercyjnego środowiska Matlab, a drugim – pakiet Xcos (odpowiednik Simulink) wchodzący w skład darmowego oprogramowania Scilab.

* Mgr inż. Kamil Kutkowski (kamil.kutkowski@wat.edu.pl) – Wojskowa Akademia Techniczna

Modelowanie ogniwa fotowoltaicznego

Tworzenie modelu numerycznego rozpoczęto od schematu zastępczego ogniwa fotowoltaicznego. Schemat przedstawiony na rys. 3 zawiera źródło prądowe, na które pada promieniowanie świetlne oraz równoległe połączoną diodę, która odpowiada modelowemu złączu P-N w warunkach braku promieniowania świetlnego. Rezystancja R_S odpowiada wewnętrznej rezystancji szeregowej ogniwa fotowoltaicznego. Wartość rezystancji R_{SH} odpowiada wewnętrznej rezystancji równoległej (bocznikującej), która determinuje wartość prądu upływu [1].



Rys. 3. Schemat zastępczy ogniwa fotowoltaicznego

W idealnym ogniwie fotowoltaicznym przyjmuje się, że $R_{SH} = R_S = 0$, co jest dość popularnym założeniem. Prąd ogniwa jest różnicą fotoprądu I_L oraz prądu nasycenia diody I_0 :

$$I = I_L - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{nkT}} - 1 \right) \tag{1}$$

Model zawiera również zależność temperaturową fotoprądu od prądu nasycenia diody [2]:

$$I_L = I_L(T_1) (1 + K_0(T - T_1)) \tag{2}$$

$$I_L(T_1) = I_{SC}(T_{1,nom}) \frac{G}{G(nom)} \tag{3}$$

$$K_0 = \frac{I_{SC}(T_2) - I_{SC}(T_1)}{(T_2 - T_1)} \tag{4}$$

$$I_0 = I_0(T_1) \times \left(\frac{T}{T_1} \right)^{\frac{3}{n}} e^{\frac{qV_q(T_1)}{nk \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1} \right)}} \tag{5}$$

$$I_0(T_1) = \frac{I_{SC}(T_1)}{\left(e^{\frac{qV_{OC}(T_1)}{nkT_1}} - 1 \right)} \tag{6}$$

gdzie: G – natężenie promieniowania słonecznego; k – stała Boltzmana; q – ładunek elementarny.

Uwzględniono również rezystancję szeregową R_S , która reprezentuje wartość rezystancji wewnętrznej ogniwa oraz połączeń pomiędzy ogniwami:

$$R_S = - \frac{dV}{dI_{V_{OC}}} - \frac{1}{X_V} \tag{7}$$

$$X_V = I_0(T_1) \frac{q}{nkT_1} e^{\frac{qV_{OC}(T_1)}{nkT_1}} - \frac{1}{X_V} \tag{8}$$

Rezystancję równoległą R_{SH} , ze względu na jej marginalny wpływ na całość układu, postanowiono pominąć w modelu matematycznym.

Na potrzeby analizy numerycznej wybrano monokrystaliczny panel fotowoltaiczny produkcji polskiej firmy **Solar-Energy** – model **SE285/60M** o parametrach przedstawionych w tabelicy.

TABLICA. Parametry panelu fotowoltaicznego

Model	SE 285/60M
Typ	6" monokrystaliczne ogniwa krzemowe, 3 bus bar
Moc, Wp	285
Prąd ładowania, A	9,0
Prąd zwarcia, A	9,7
Napięcie nominalne, V	32,6
Napięcie jałowe, V	38,8
Liczba ogniw	60 sztuk [10x6]
Dane dla warunków: 1000 W/m ² ; 25 °C ; AM 1,5	



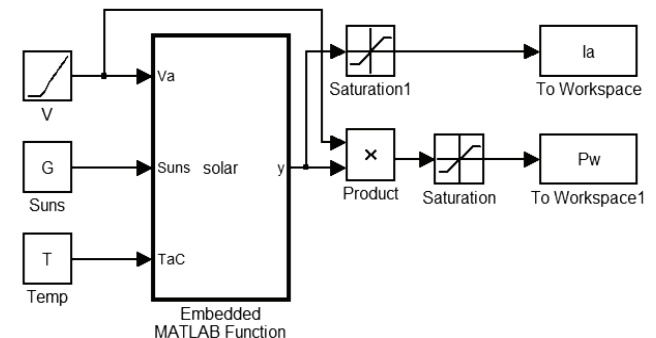
Modelowanie w środowisku Matlab Simulink

Simulink jest znanym i powszechnie używanym na świecie dodatkiem do programu Matlab, posiadającym bardzo szerokie możliwości oraz ogromną elastyczność. Nie sposób wymienić spektrum rozwiązań, które zostały zaimplementowane z wykorzystaniem tego pakietu. Dlatego w niniejszym opracowaniu ograniczono się jedynie do przedstawienia sposobu implementacji modelu numerycznego wybranego panelu fotowoltaicznego. Symulacje wykonane zostały w środowisku w wersji 7.7.0 (R2008b).

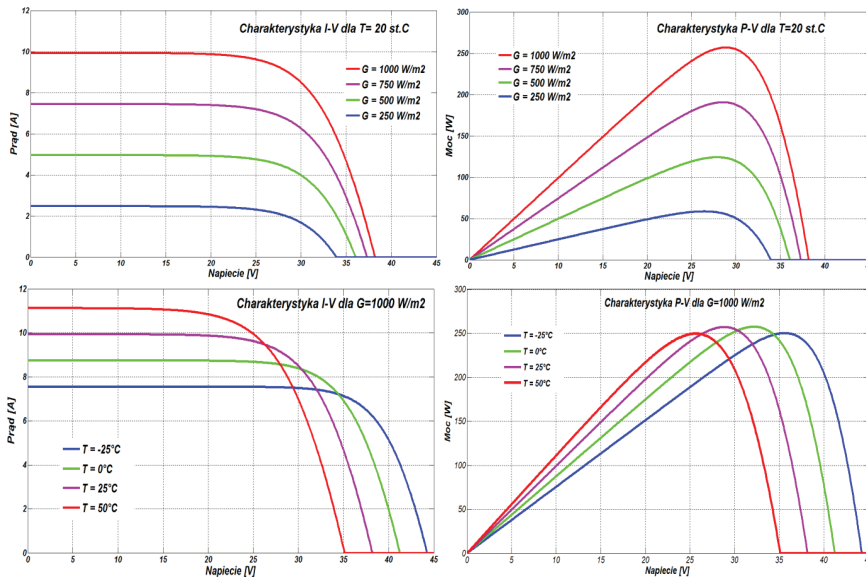
Pierwszym i kluczowym krokiem było zaimplementowanie wzorów opisujących schemat zastępczy ogniwa do postaci kodu programu Matlab i zapisanie go w postaci M-pliku:

```
function Ia=pv_function(Va,Suns,TaC)
% Ia = pv_function(Va,G,T) = wektor natężenia
% Ia,Va = wektor prądu i napięcia
% G = natężenie promieniowania słonecznego (1 Sun = 1000 W/m^2)
% T = temperatura w stopniach Celsjusza
k = 1.38e-23; % Stała Boltzmana
q = 1.60e-19; % ładunek elementarny
n=2; % Współczynnik jakości ogniwa, n=2 dla monokrystalicznych PV, n<2 dla amorficznych PV
Vg = 1.24; % Wartość przerwy energetycznej dla ogniwa monokrystalicznego
Ns = 60; % Ilość ogniw w panelu 60
T1 = 273 + 20;
Voc_T1 = 38.8 / Ns; %Napięcie obwodu otwartego w temperaturze T1=25st.C
Isc_T1 = 9.7; %Prąd zwarcia w temperaturze T1=25st.C
T2 = 273 + 75;
Voc_T2 = 31.54 / Ns; %Napięcie obwodu otwartego w temp. T2=75st.C -18,7% Voc_T1
Isc_T2 = 9.97; %Prąd zwarcia w temperaturze T2=75st.C +2,75% Isc_T1
TaK = 273 + TaC; % Temperatura pracy
K0 = (Isc_T2 - Isc_T1)/(T2 - T1);
IL_T1 = Isc_T1 * Suns;
IL = IL_T1*(1+K0*(TaK-T1));
Vt_T1=(k*T1)*q;
I0_T1 = Isc_T1/(exp(Voc_T1/(n*v_t_T1))-1);
I0_T2 = Isc_T2/(exp(Voc_T2/(n*v_t_T2))-1);
I0 = I0_T1*(TaK/T1)^(3/n)*exp(-(q*Vg)/(n*k)*(1/TaK)-(1/T1));
Xv = I0_T1*(q/(n*k*T1))*exp(q*Voc_T1/(n*k*T1));
dVdI_Voc = -(1.15/Ns)/2;
Rs = -dVdI_Voc-1/Xv;Vt_Ta = A * k * TaK / q; % = A * kT/q
Vc = Va/Ns;
Ia = zeros(size(Vc));
for j=1:5; % Wykorzystując metode Newtona
Ia = Ia - (IL - Ia - I0.*(exp((Vc+Ia.*Rs)/Vt_Ta) - 1))/( - (I0.*(exp((Vc+Ia.*Rs)/Vt_Ta) - 1)).*Rs./Vt_Ta);
end
```

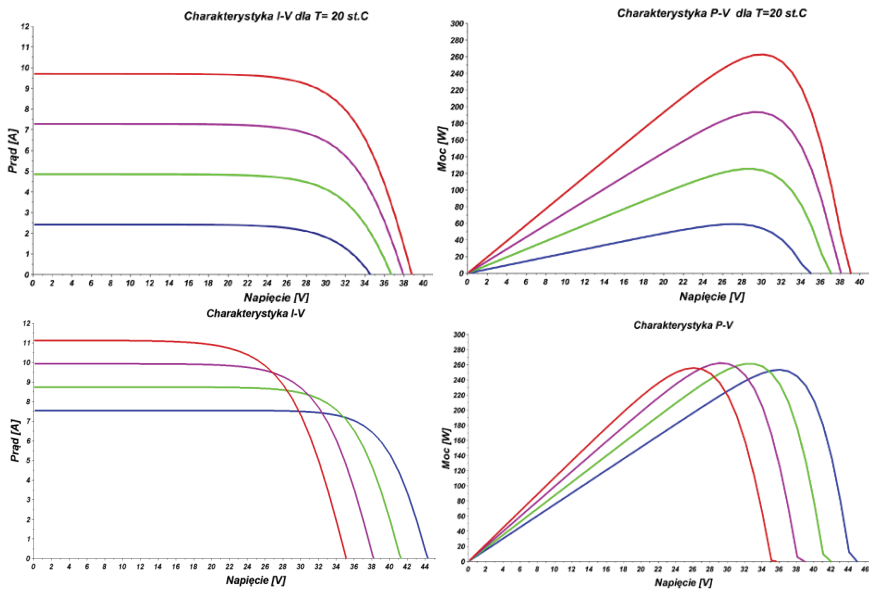
W takiej postaci program został zaimplementowany do jednego z bloków pakietu Matlab Simulink jako funkcja osadzona. Model w Simulink (przedstawiony na rys. 4) wymagał do pracy uprzednio załadowanych do przestrzeni Workspace zmiennych G (Suns) oraz T (TaC), które można wprowadzać ręcznie lub automatycznie przy pomocy przygotowanego skryptu w postaci M- pliku.



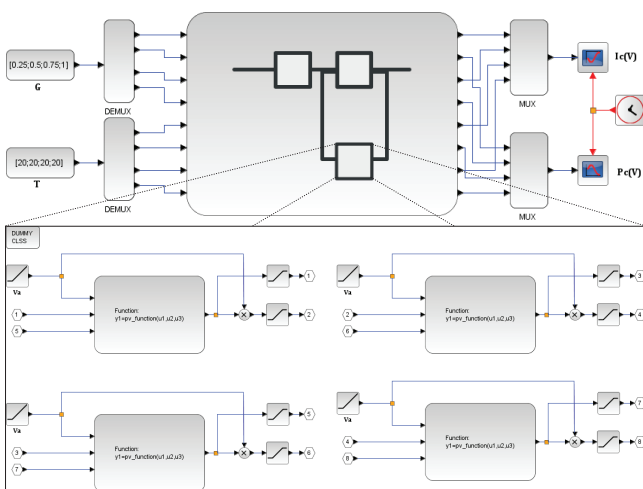
Rys. 4. Model ogniwa fotowoltaicznego utworzony w pakiecie Matlab Simulink



Rys. 5. Charakterystyki ogniwa SE285/60M dla zmiennych warunków nasłonecznienia i temperatury wygenerowane w programie Matlab



Rys. 6. Charakterystyki ogniwa SE285/60M dla zmiennych warunków nasłonecznienia i temperatury wygenerowane w programie Scilab



Rys. 7. Model ogniwa SE285/60M stworzony w środowisku Scilab Xcos

Efektem symulacji było uzyskanie charakterystyk prądowo-napięciowych względem zmiennego nasłonecznienia G przy

stałej temperaturze T oraz względem zmiennej temperatury przy $G = \text{const}$.

Modelowanie w środowisku Scilab Xcos

Środowisko Xcos, wchodzące w skład środowiska Scilab (w wersji 5.5.2), umożliwia wykonywanie niemal tych samych operacji, jakie oferuje Simulink. Ciekawą funkcjonalnością jest narzędzie translatora *Matlab do Scilab*, dzięki któremu M-pliki stworzone w środowisku Matlab możemy uruchamiać w środowisku Scilab. Niestety, funkcjonalność ta nie jest doskonała i przy złożonych programach wskazane jest sprawdzenie i poprawienie efektów translacji. Niemniej jednak z sukcesem dokonano translacji wcześniej przedstawionego programu do pliku tekstowego Scilab z rozszerzeniem *.sci czyli do tzw. SciNotes.

Kolejnym krokiem było stworzenie w środowisku Xcos modelu symulacyjnego, przedstawionego na rys. 7.

Jak wynika z rys. 7, w przypadku środowiska Xcos zmienne G oraz T nie zostały ładowane z przestrzeni Workspace, ale zadeklarowane bezpośrednio w modelu, w postaci 4-elementowych, jednowymiarowych tablic danych. Xcos podobnie jak Simulink umożliwia budowanie złożonych bloków funkcyjnych, co jest ciekawą alternatywą dla tworzenia modeli, bazując wyłącznie na językach programowania. Z tak opracowanym modelem proces symulacji ograniczał się jedynie do uaktualniania zmiennych wejściowych, oczywiście po uprzednim skompilowaniu funkcji *pv_function* w okienku SciNotes'a. Efekty symulacji zostały przedstawione na rys. 6.

Podsumowanie

Wyniki otrzymanych symulacji przeprowadzonych dla opracowanego modelu panelu fotowoltaicznego SE 285/60M w środowiskach Matlab Simulink oraz Scilab Xcos można uznać za w pełni zbieżne. Scilab wydaje się doskonałą alternatywą dla wszystkich zainteresowanych modelowaniem numerycznym i symulowaniem zjawisk fizycznych. Najsilniejszym argumentem przemawiającym za programem Scilab jest darmowa licencja, dzięki której osoby prywatne, przedsiębiorstwa lub nawet szkoły o mniej zasobnych portfelach są w stanie wykonywać badania i symulacje porównywalne z tymi, jakie oferuje Matlab, nie obciążając dodatkowo budżetu domowego lub firmowego. Oczywiście istnieją pewne różnice w niektórych funkcjonalnościach, najczęściej na korzyść środowiska Matlab, niemniej, jak wykazuje powyższe opracowanie, Scilab w wielu aspektach mu nie ustępuje.

LITERATURA

1. Model of Photovoltaic Module in Matlab™. González-Longatt, Francisco M. 2005.
2. Evaluating MPPT converter topologies using a Matlab PV model. Walker, Geoff. Queensland.