

WPŁYW NASŁONECZNIENIA I WIATRU NA DZIAŁANIE KRZEMOWYCH MODUŁÓW POLIKRYSTALICZNYCH

Piotr Lichograj¹, Agata Zdyb²

¹ Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska, e-mail: p.lichograj@gmail.com

² Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, e-mail: a.zdyb@pollub.pl

STRESZCZENIE

Zmieniające się warunki otoczenia mają znaczący wpływ na sprawność i trwałość ogniw fotowoltaicznych. Na moduły fotowoltaiczne oddziałują między innymi takie czynniki zewnętrzne jak: temperatura modułu, zmieniająca się podczas dłuższej ekspozycji na promieniowanie świetlne, wiatr, zanieczyszczenia oraz częstotliwość opadów. Parametry modułów PV podawane przez producentów znacznie odbiegają od wyników osiąganych w warunkach naturalnych. W tej pracy przedstawiono laboratoryjne badanie wpływu temperatury modułu krzemowego polikrystalicznego na zmianę generowanego napięcia badanego bez obciążenia. Badania potwierdzają korelację wzrostu temperatury podczas długiej ekspozycji na promieniowanie świetlne ze spadkiem napięcia. Jednocześnie symulacja wiatru powoduje chłodzenie modułu oraz wzrost napięcia obwodu. Dalszy rozwój badań nad wpływem warunków otoczenia pozwoli na dokładną optymalizację umiejscowienia farm fotowoltaicznych.

Słowa kluczowe: ogniwa słoneczne, wydajność ogniw fotowoltaicznych, wpływ temperatury, wpływ wiatru.

THE INFLUENCE OF SUNLIGHT AND WIND ON THE POLYCRYSTALLINE SILICON MODULES

ABSTRACT

Changing conditions have a significant impact on the efficiency and durability of photovoltaic cells. On photovoltaic modules have also influence such external factors as temperature of the module, which changes during the long exposure to light radiation, wind, pollution and the frequency of rainfall. Parameters of PV modules provided by the manufacturers differ significantly from the results achieved under natural conditions. This work presents the laboratory study on the impact of temperature of the polycrystalline silicon module to the change of generated voltage tested with no load. Research confirms the correlation of temperature increase during the long exposure to light radiation with a voltage drop. At the same time simulation of wind causes the cooling of the module and increase the voltage circuit. Further development of research on the effects of environmental conditions will allow for accurate placement optimization of photovoltaic farms.

Keywords: solar cells, photovoltaic module efficiency, temperature dependence, wind dependence.

WSTĘP

W ciągu ostatnich dziesięcioleci znacząco wzrósł udział technologii fotowoltaicznych (PV – Photovoltaics) na całym świecie, jako alternatywy dla energii pozyskiwanej ze źródeł nieodnawialnych. Zmiana klimatu i wzrost cen surowców przetwarzanych na energię oraz perspektywa skończoności ich zasobów wymusza

szczególne zainteresowanie sektorem odnawialnych źródeł energii, w tym fotowoltaiką oraz rozwijaniem i tworzeniem nowych technologii energooszczędnych.

Obecnie istnieje bardzo szerokie spektrum technologii służących to produkcji ogniw słonecznych. Na potrzeby rynku wytwarzane są tradycyjne ogniwa krzemowe (monokrystaliczne, polikrystaliczne i mikrokrystaliczne) oraz

cienkowarstwowe (krzemowe amorficzne, CdS/ CdTe, CIGS, organiczne). W fazie testów laboratoryjnych są ogniwa barwnikowe i perowskitowe.

Wpływ na wydajność ogniwa PV mają głównie warunki klimatyczne, czyli zasoby energii słonecznej, prędkość wiatru, opady deszczu i zachmurzenie. Silne nasłonecznienie występujące np. w strefie równikowej oraz występująca tam wysoka temperatura powoduje znaczny spadek mocy oraz przyspieszoną degradację modułów, a w skrajnych warunkach może dojść do ich trwałego uszkodzenia. Poprawę wydajności modułów przy zwiększonym nasłonecznieniu można uzyskać poprzez zastosowanie dodatkowego układu chłodzącego spodnią powierzchnię modułów [Olchowik 2004, Olchowik 2006]. W przypadku stref o dużej częstotliwości opadów można także uzyskać wzrost wydajności ogniwa podczas dużego nasłonecznienia. Jest to spowodowane ciągłym oczyszczaniem paneli z występujących na ich powierzchni zabrudzeń. Wiatr niezależnie od strefy klimatycznej poprawia parametry ogniwa, powodując naturalne odprowadzenie nadmiaru ciepła z modułów. Najbardziej wietrznymi rejonami są tereny nadmorskie oraz wysokogórskie. Niekorzystne warunki wietrzne odnotowuje się na płaskich wyżynach oraz kotlinach międzygórskich. Polska znajduje się w strefie umiarkowanej, gdzie średnia prędkość wiatru wynosi około 3 m/s (mierzona na standardowej wysokości 10 m od gruntu). Maksymalne średnie prędkości roczne zanotowano w regionie wybrzeża, wynoszą one około 6 m/s.

Wielkością charakteryzującą zmianę mocy ogniwa w zależności od temperatury jest temperaturowy współczynnik mocy (β_{MPP}). Współczynnik ten opisuje jak procentowo zmienia się moc modułu wykonanego w danej technologii przy zmianie temperatury o 1 stopień Celsjusza. Temperaturą referencyjną ogniwa jest temperatura 25 °C. W tabeli 1 zawarto temperaturowe współczynniki mocy dla wiodących technologii ogniwa PV. Jak można zauważyć, temperatura modułów ma znaczący wpływ na sprawność ogniwa. Najbardziej wrażliwe na zmianę temperatury są ogniwa krzemowe dla których współczynnik temperaturowy wynosi 0,4 %/°C, zaś dla technologii CdTe wartość ta jest prawie dwukrotnie mniejsza.

Wzrost temperatury zewnętrznej wywołany oświetlaniem zewnętrzną absorbującą światło powierzchni modułów fotowoltaicznych powoduje spadek ich wydajności, a także obniżenie wartości napięcia obwodu otwartego [Luque

Tabela 1. Współczynniki temperaturowe względem maksymalnego punktu mocy dla różnych technologii [Makrides, 2012].

Technologia	$\beta_{MPP}(\%/^{\circ}\text{C})$
Mono-c-Si	-0,40
Multi-c-Si	-0,45
a-Si	-0,20
a-Si/ $\mu\text{c-Si}$	-0,26
CIGS	-0,36
CdTe	-0,25

2003]. Ten proces znacząco zmienia się podczas chłodzenia modułu na przykład poprzez wiejący wiatr. Badania wpływu temperatury zewnętrznej oraz prędkości wiatru na pracę modułów fotowoltaicznych prowadzone są obecnie w wielu ośrodkach na świecie [Faiman 2008, Schwingshackl 2013, Gökmen 2016]. Prędkość wiatru w zakresie do 10 m/s ma znaczący wpływ na wydajność ogniwa PV. Wyższe prędkości powodują ustabilizowanie się wydajności ogniwa [Matei 2006].

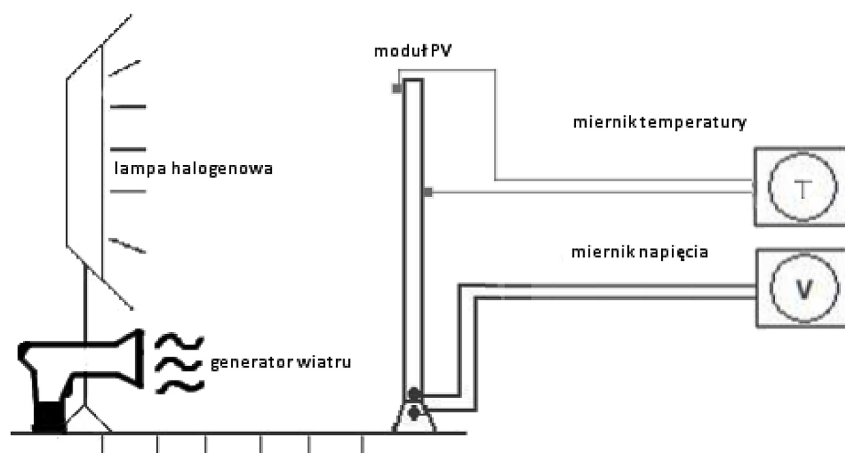
Na rynku PV najpopularniejszymi są moduły krzemowe polikrystaliczne. Technologia ich produkcji jest najlepiej rozwinięta i powszechna, co podyktowane jest niskim kosztem produkcji. Ze względu na ich niezawodność i szerokie zastosowanie na całym świecie, zostały one poddane badaniom opisanym w tym artykule. W dalszej części artykułu przeprowadzono modelowe badania zmian temperatury i napięcia obwodu otwartego modułu krzemowego polikrystalicznego w zależności od temperatury, która wzrasta wraz zastosowaniem oświetlenia ale maleje przy nawiewie wiatru.

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawia rysunek 1. Pomiar przeprowadzono w temperaturze pokojowej 23 °C.

METODY POMIARU BADANYCH PARAMETRÓW PV

Do pomiarów wykorzystano moduł polikrystaliczny CELLINE SL010–12 o maksymalnej mocy 10 W. Parametry techniczne charakteryzujące moduł zawarto w tabeli 2.

Badania przeprowadzono w warunkach pokojowych z użyciem lampy halogenowej o mocy 1000 W, skierowanej bezpośrednio na moduł. Natężenie generowanego strumienia światła na powierzchni panelu było równe 17100 lx. Do pomiaru użyto luksometru PeakTech 5025. Dokładność



Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego.

urządzenia to $\pm 5\%$ rdg + 10 dgts (< 10.000 lux) oraz $\pm 10\%$ rdg + 10 dgts (> 10.000 lux).

Symulację wiatru wykonano urządzeniem Severin 2000 z nawiewem zimnego powietrza. Pomiar prędkości był realizowany poprzez zmianę odległości źródła wiatru od modułu. Prędkość wiatru dla danej odległości została wykalibrowana z pomocą anemometru Laserliner Airflow Test-Master.

Pomiary napięcia obwodu otwartego (moduł podczas badań pracował bez obciążenia) dokonano miernikiem Agilent U1252B. Pomiar temperatury zrealizowano za pomocą zestawu składającego się z dwóch czujników temperatury Dallas DS18B20, podłączonych do mikrokontrolera Arduino Nano z zadeklarowaną częstotliwością zapisu 12 pomiarów na minutę. Czujnik frontowy umieszczono w jednym z naroży modułu, tak aby nie zakłócić jego pracy. Spodni czujnik znajdował się w części centralnej. W celu zwiększenia dokładności pomiarów temperatury każdy z czujników przytwierdzono z użyciem pasty termoprzewodzącej.

Tabela 2. Szczegółowe parametry badanego modułu podane przez producenta.

Moduł fotowoltaiczny polikrystaliczny Celline CL010-12	
Moc maksymalna (dla promieniowania słonecznego o natężeniu 1000 W/m^2), P_{MPP}	10 [W]
Napięcie nominalne, U	12 [V]
Napięcie maksymalne (obwód otwarty), U_{oc}	21,6 [V]
Napięcie w punkcie mocy maksymalnej, U_m	17,2 [V]
Prąd zwarcia, I_{sc}	0,65 [A]
Prąd w punkcie mocy maksymalnej, I_m	0,58 [A]
Wymiary	340x280x17 mm
Masa	1,2 kg

WYNIKI BADAŃ WPŁYWU WIATRU NA WYBRANE PARAMETRY OGNIWA PV

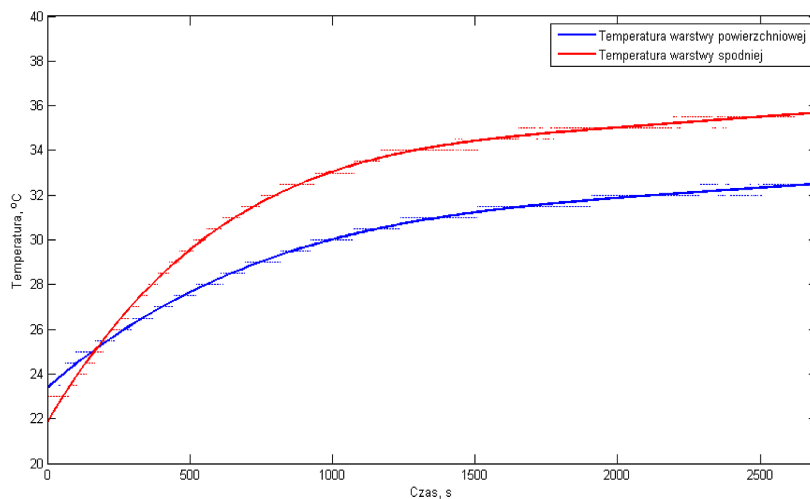
Na podstawie zarejestrowanych pomiarów otrzymano zależności zmiany temperatury w czasie. Temperatura została zmierzona w dwóch miejscach: na powierzchni czynnej oraz spodniej modułu. Lampa skierowana prostopadle do powierzchni modułu generowała moc ciągłą 135 W/m^2 , symulując energię światła słonecznego podczas pochmurnego dnia.

Pierwszy eksperyment polegał na poddaniu modułu działaniu energii lampy halogenowej w trakcie 45 minut, gdzie w końcowej fazie badania temperatura zaczęła się stabilizować (rys. 2).

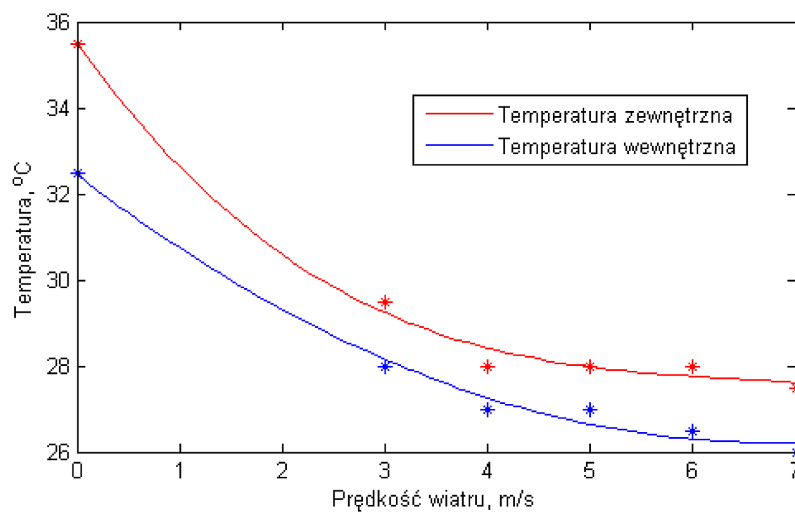
Oświetlenie modułu powoduje wzrost jego temperatury o ok. 10°C , przy czym tylna powierzchnia modułu utrzymuje nieco wyższą temperaturę niż przednia.

Wpływ wiatru na temperaturę modułu przedstawiony jest na rysunku 3. Symulowany nawiew o prędkości do 7 m/s powoduje ochłodzenie modułu o ok. 7°C mimo stałego oświetlenia lampą halogenową. Temperatura powierzchni zewnętrznej poddanej działaniu światła i wiatru jest w całym zakresie pomiarów niższa niż tylnej części modułu.

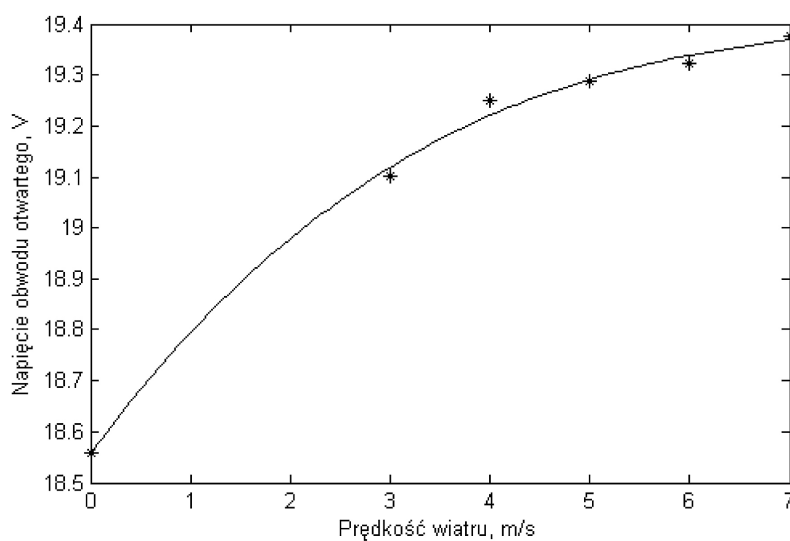
Podczas badania wpływu warunków zewnętrznych na wartość napięcia obwodu otwartego (rys. 4), poszczególne pomiary realizowane były do momentu ustabilizowania się napięcia na mierniku. Zakres pomiarowy ograniczono do maksymalnej prędkości 7 m/s , symulując typowe warunki panujące na obszarze Polski. Wzrost prędkości wiatru powodujący spadek temperatury modułu skutkuje zwiększeniem wartości napięcia obwodu otwartego o ok. $0,8 \text{ V}$.



Rys. 2. Wpływ energii światła na wzrost temperatury powierzchniowej i spodniej warstwy modułu.



Rys. 3. Zależność temperatury modułu fotowoltaicznego od prędkości wiatru.



Rys. 4. Zależność napięcia (obwodu otwartego) modułu fotowoltaicznego od prędkości wiatru.

WNIOSKI

1. Przeprowadzone eksperymenty potwierdzają, że badany moduł znacznie się nagrzewa pod wpływem zewnętrznego oświetlenia. Maksymalna temperatura spodniej części modułu wzrosła podczas badań do około 35,5 °C, natomiast wierzchnia do 32,5 °C w stosunku do temperatury otoczenia wynoszącej 23 °C. Napięcie obwodu otwartego ogniwa w wymienionych warunkach ustabilizowało się do 18,56 V.
2. Symulacja wiatru, wraz ze zmianą prędkości wiatru do 7 m/s powoduje, że temperatura modułu maleje do 26 °C, a mierzona wartość napięcia obwodu otwartego stabilizuje się powodując wzrost napięcia o nieco ponad 0,8 V. Chłodzenie modułu poprzez wymuszony ruch powietrza powoduje obniżenie temperatury ogniwa i co za tym idzie poprawę generowanego napięcia. Obserwacje te są zgodne z założeniami teoretycznymi dotyczącymi wpływu temperatury na pracę modułu fotowoltaicznego. Wzrost temperatury powoduje zmianę przerwy energetycznej półprzewodnika i wpływa na parametry pracy ogniwa fotowoltaicznych.
3. Zmiana temperatury wpływa bezpośrednio na sprawność ogniwa jak również okres ich eksploatacji. Inwestycja w instalację fotowoltaiczną powinna więc już na etapie planowania uwzględniać warunki zewnętrzne panujące w danej lokalizacji. Pod uwagę powinno być brane nie tylko nasłonecznienie ale również temperatura zewnętrzna i warunki wiatrowe. Lokalne występowanie dużych prędkości wiatru, umożliwia wykorzystanie jego chłodzącej roli i tym samym wpływa na poprawę sprawności modułów fotowoltaicznych.
4. Powyższa praca potwierdza przyjęte założenia, tym samym konieczny jest dalszy rozwój badań nad wpływem różnych czynników zewnętrznych m. in. nasłonecznienia, wiatru, zanieczyszczeń powietrza, ilości opadów na wydajność PV oraz ich wzajemnej korelacji. Taki charakter prac naukowych pozwoli zoptymalizować lokalizację farm PV na odpowiednich obszarach. Dalsze badania wymaga-

ją wyznaczenia pełnych charakterystyk I-V, na podstawie których będzie możliwe określenie wpływu uwzględnianych warunków otoczenia na sprawność badanych modułów.

LITERATURA

1. Olchowik J.M., Józwick I., Szymczuk D., Zabielski K., Mucha J., Tomaszewski R., Banaś J., Olchowik S., Adamczyk J., Cieplak T., Zdyb A. 2004. Analysis of solar cell efficiency in hybrid solar system under conditions of south-easterly Poland. Proc. of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7–11 June 2004, Paris, France: 3294–3296.
2. Olchowik J.M., Gułkowski S., Cieślak K., Józwick I., Banaś J., Olchowik S., Zdyb A., Szymczuk D., Adamczyk J., Tomaszewski R., Zabielski K., Mucha J., Cieplak T. 2006. Comparative study of the solar modules performance in the hybrid system in south-easterly Poland during first two years of exploitation. Proc. of 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4–8 September 2006, Dresden, Germany: 3049–3050.
3. Faiman D. 2008. Assessing the Outdoor Operating Temperature of Photovoltaic Modules. Prog. Photovolt: Res. Appl. 16: 307–315.
4. Schwingshackl C., Petitta M., Wagner J.E., Beluardo G., Moser D., Castelli M., Zebisch M., Tetzlaff A. 2013. Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for accurate estimation. Energy Procedia 40, 77–86.
5. Makrides G., Zinsser B., Norton M.M. and Georgiadiou G.E. 2012. Performance of Photovoltaics Under Actual Operating Conditions, Third Generation Photovoltaics. Vasilis Fthenakis (ed.) Intech. <http://www.intechopen.com/books/third-generation-photovoltaics/performance-of-photovoltaics-under-actual-operating-conditions>.
6. Luque A., Hegedus S., 2003. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. Wiley 2003.
7. Mattei M., Notton G., Cristofari C., Muselli M., Poggi P., 2006. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. Renewable Energy 31, 553–567.
8. Gökmen N., Hu W., Hou P., Chen Z., Sera D., Spataru S., 2016. Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations, Renewable Energy 90, 283–290.