

WPLYW WARUNKÓW ŚRODOWISKOWYCH NA WYDAJNOŚĆ MODUŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH

THE IMPACT OF ENVIRONMENTAL CONDITIONS ON THE PERFORMANCE OF PHOTOVOLTAIC MODULES

A. Bąk, I. Borowicka, T. Cierlicki, W. Kruszelnicka¹

1. Zakład Inżynierii Systemów Technicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz, Polska

STRESZCZENIE

Niniejsza praca została poświęcona analizie wpływu warunków środowiskowych na wydajność modułów fotowoltaicznych. Celem pracy była analiza wpływu kąta pochylenia modułu PV, rodzaju modułu PV oraz warunków środowiskowych: azymutu, natężenia promieniowania słonecznego na parametry pracy modułu takie jak: współczynnik wypełnienia, sprawność, moc. Przedstawiono mobilne stanowisko do badań modułów fotowoltaicznych. Analizę przeprowadzono dla trzech kątów pochylenia (0°, 30° i 90°) dla modułu monokrystalicznego i modułu polikrystalicznego. Analiza wyników badań wykazała, że ustawienie kąta 30°, okazało się dla obu badanych modułów, najbardziej korzystnym ze względu na produkcję energii elektrycznej i parametry pracy.

SUMMARY

This paper is devoted to the analysis of the impact of environmental conditions on the performance of solar modules. The purpose of this work was to analyze the influence of tilt angle of PV modules on its work parameters such as: fill factor, efficiency, power. A mobile test stand for testing solar modules was presented. The analysis was carried out for three settings of module angle (0°, 30° and 90°) for the single crystal module and the polycrystalline module were analyzed. Analysis of the test results showed that setting the angle of 30° turned out to be the most effective option for both types of modules.

WPROWADZENIE

Słońce jest podstawowym źródłem energii na Ziemi. Energia promieniowania słonecznego dociera niemalże do każdego miejsca na kuli ziemskiej. Do jej głównych zalet należy zaliczyć ogólnodostępność, nieograniczone zasoby oraz brak bezpośrednich negatywnych oddziaływań podczas konwersji na energię elektryczną czy ciepłą. Zmniejszające się zasoby źródeł nieodnawialnych: ropy naftowej, węgla czy gazu ziemnego powodują, że energię odnawialną, a przede wszystkim słoneczną, próbuje się wykorzystać w najwyższym stopniu [Kruszelnicka W. et al. 2015, Kruszelnicka W. 2016, Kruszelnicka W. et al. 2017].

Promieniowanie słoneczne jest strumieniem energii wysyłanym przez Słońce we wszystkich kierunkach. W każdej sekundzie do powierzchni Ziemi dociera promieniowanie o mocy 1,367 kW/m² [Flizikowski J., Mroziński A., 2016]. Podczas przejścia wiązki promieniowania przez atmosferę ziemską część energii w niej zgromadzonej jest tracona w wyniku rozproszenia, odbicia i absorpcji. W efekcie do powierzchni ziemi promieniowanie słoneczne dociera w dwóch postaciach: promieniowania bezpośredniego i promieniowania rozproszonego [Jiang F., Wong A. 2005, Kruszelnicka W. et al. 2017].

Jednym ze sposobów wykorzystania energii zawartej w wiązkach świetlnych może być konwersja fototermiczna, polegająca na konwersji energii słonecznej na energię ciepłą. Obecnie do najpopularniejszych technologii zalicza się te oparte na wykorzystywaniu zjawiska fotowoltaicznego, które znalazło zastosowanie w modułach fotowoltaicznych wytwarzających energię elektryczną [Gail-Angee M. 2013, Koniszewski A. Mroziński A. 2016].

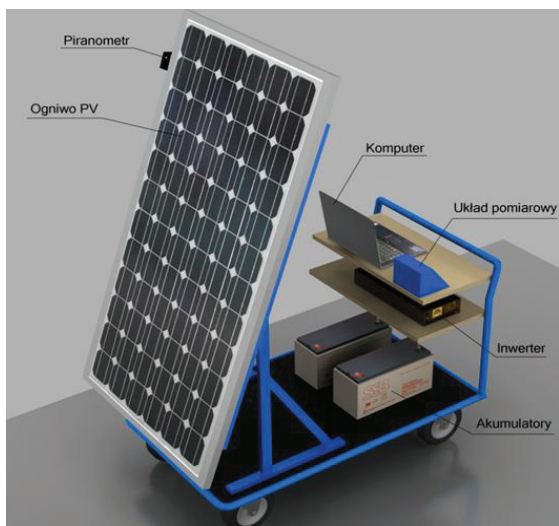
Na szybko rozwijającym się rynku instalacji PV efektywność energetyczna modułów w danych warunkach środowiskowych powinna być jak najwyższa. Nie jest to jednak łatwe do uzyskania, ponieważ każdy czynnik zewnętrzny wpływa na produkcję energii elektrycznej.

W związku z powyższym za cel pracy postawiono analizę wpływu trzech kątów pochylenia: 0°, 30°, 90°, rodzaju modułu PV (mono- i polikrystalicznego) oraz warunków środowiskowych: azymutu, natężenia promieniowania słonecznego na parametry pracy modułu takie jak: współczynnik wypełnienia, sprawność i moc.

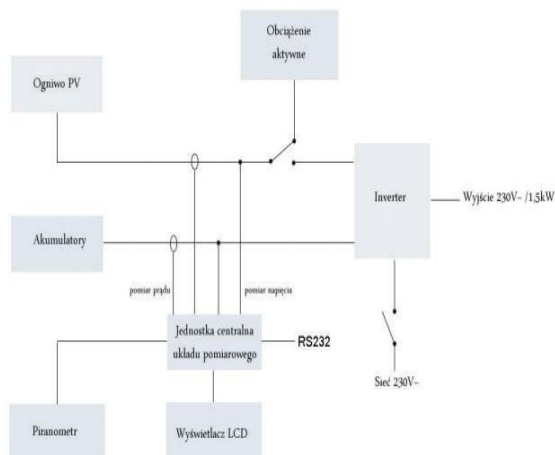
STANOWISKO BADAWCZE I OBIEKT BADAŃ

Stanowisko do badań modułów fotowoltaicznych ma charakter mobilny, dzięki zastosowaniu w podstawie modułu samojazdnej platformy. Moduł fotowoltaiczny został zamocowany na wsporniku, który umożliwia regulację kąta pochylenia w zakresie od 0 do 90°. W skład stanowiska wchodzi następujące elementy (Rys. 1.):

- Moduł fotowoltaiczny,
- Inwerter o mocy ciągłej 1,5kW wraz z wbudowaną ładowarką sieciową,
- Akumulatory żelowe 12V/100 Ah,
- Obciążenie aktywne (do badania ogniwa),
- Układ pomiarowy (schemat układu przedstawiono na rys. 2.),
- Komputer PC.



Rys. 1. Model stanowiska pomiarowego [Skibowski M. 2012]



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego [Skibowski M. 2012]

Badana instalacja fotowoltaiczna typu off-grid, posiada możliwość doładowania akumulatorów. Zastosowany inwerter MEAN WELL TN-1500, pracuje w dwóch trybach: oszczędzania energii oraz awaryjnego źródła zasilania. W badaniach wykorzystano 2 różnego typu moduły fotowoltaiczne:

- moduł monokrystaliczny SGM- D Seria 250W firmy SUNGEN,
- moduł polikrystaliczny BYD 240P6-30 firmy BYD.

Moduł monokrystaliczny SGM-D Seria 250W o sprawności równej 15,3%, został wykonany z ogniwa z tworzywa silikonowego, aby osiągnąć efekt długotrwałej stabilności i niezawodności. Szkło hartowane zapewnia stabilność oraz ochronę

przed różnego rodzaju uderzeniami. Materiały enkapsulacji z wielowarstwowych laminowanych arkuszy, również mają za zadanie ochronę modułu [Dane katalogowe firmy SUNGEN].

Drugi z badanych modułów - moduł polikrystaliczny BYD 240P6-30 charakteryzuje się sprawnością rzędu 14,14%. Podobnie jak w przypadku modułu monokrystalicznego szkło hartowane i materiały enkapsulacji z wielowarstwowych laminowanych arkuszy, odpowiadają za większą sztywność i odporność na uderzenia. [Dane katalogowe firmy BYD]. Porównanie danych technicznych obu badanych modułów przedstawiono w tabeli 1.

METODYKA BADAŃ

Badanie polegało na wyznaczeniu wpływu warunków środowiskowych na efektywność energetyczną wybranych rodzajów modułów fotowoltaicznych. Badanie zostało przeprowadzone przy natężeniu promieniowania słonecznego na poziomie około 800W/m^2 , które rejestrowano za pomocą piranometru z sensorem w postaci fotodiody BPW34.

Wyznaczanie charakterystyki prądowo-napięciowej I-U, polega na zwiększaniu/zmniejszaniu rezystancji obciążenia od wartości minimalnej do maksymalnej i rejestracji napięcia i natężenia prądu, poprzez naciśnięcie przycisku „wyślij dane”, znajdującego się na panelu jednostki centralnej. Pomiary odbywały się w godzinach od 15:00 do 16:00.

Po ustawieniu stanowiska na płaskim podłożu, obrano azymut południowy i ustawiono płaszczyznę modułu pod wybranym kątem: 0° , 30° , 90° . Dokonywano zmian natężenia przepływu prądu w zakresie od 0 do 6,2 A, co 0,2 A za pomocą rezystora. Ważnym elementem badań była rejestracja natężenia promieniowania słonecznego, które w warunkach rzeczywistych zmieniało się w zakresie od 792 do 806W/m^2 . Układ pomiarowy wyposażono w wyświetlacz o rozdzielczości 240×128 , na którym w czasie rzeczywistym możliwy jest odczyt monitorowanych parametrów. Podczas wyznaczania charakterystyki prądowo-napięciowej rejestrowano:

- natężenie promieniowania słonecznego za pomocą piranometru (zakres pomiarowy: $0-2000\text{W/m}^2$, rozdzielczość: 2W/m^2 , dokładność: $\pm 5\%$),
- temperaturę za pomocą czujnika temperatury (zakres pomiarowy: -55°C do $+125^\circ\text{C}$, rozdzielczość: $0,5^\circ$),
- natężenie (zakres pomiarowy $0-10\text{A}$, rozdzielczość: $0,01\text{A}$, dokładność: $\pm 5\%$),
- napięcie (zakres pomiarowy: $0-100\text{V}$, rozdzielczość: $0,1\text{V}$, dokładność: $\pm 5\%$),
- moc.

Temperatura modułu w czasie obserwacji wahała się w granicach od 39° do $43,5^\circ$ Celsjusza.

Tabela 1. Dane techniczne modułów fotowoltaicznych wykorzystanych do badań [Dane katalogowe firmy SUNGEN, Dane katalogowe firmy BYD]

Model	SGM-250D	BYD 240P6-30
Moc znamionowa Pmax	250W	240Wp
Otwarty obwód napięcia	38,1V	37,30V
Prąd zwarcia ISC lub krótki obwód prądowy	8,79A	8,57A
Napięcie przy mocy maksymalnej Vpmax	30,7V	29,64V
Maksymalny prąd zasilania Ipmax	8,14A	8,10A
Sprawność	15,3%	14,14%
Model	SGM-250D	BYD 240P6-30
Temperaturowy współczynnik do Vmp	-0,34%/K	-0,32%/°C
Temperaturowy współczynnik od Vmp	+0,037%/K	+0,059%/°C
Temperaturowy współczynnik Pm	-0,48%/K	-0,43%/°C
Liczba Ogniw	60 (10x6)	60 (10x6)
Rozmiary: mm	1650mm×990mm×40mm	1640mm×992mm×40mm
Ciężar	19,5kg	18,9kg
Diody typu Bypass	6 diod	6 diod
Maksymalne obciążenie	Od śniegu: 5400Pa; od wiatru: 2400Pa	Od śniegu: 5200Pa; od wiatru: 2000Pa
Bezpiecznik	15A	15A
Temperatura pracy	-40~+85 (-40°F ~ +185°F)	-40~+85 (-40°F ~ +185°F)
Temperatura przechowywania	-40~+85 (-40°F ~ +185°F)	-40~+85 (-40°F ~ +185°F)
Wilgotność przechowywania	<85% wilgotności względnej.	<75% wilgotności względnej.

Po wyznaczeniu charakterystyki napięciowo-prądowej dla badanych modułów wyznaczono wartości współczynnika wypełnienia FF , sprawności η oraz rezystancji optymalnej R_{opt} . W obliczeniach sprawności całkowitej η przyjęto wartość średnią natężenia promieniowania słonecznego.

Współczynnik wypełnienia FF (fill factor) określa jakość ogniwa. Jest to stosunek powierzchni prostokąta o bokach I_{MPP} i U_{MPP} do powierzchni prostokąta o bokach I_{SC} i U_{OC} i wyraża się wzorem [Flizikowski J., Mroziński A., 2016]:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} = \frac{I_{MPP} \cdot U_{MPP}}{I_{SC} \cdot U_{OC}} \quad (1)$$

gdzie:

I_{MPP} - natężenie prądu dla modułu w punkcie mocy maksymalnej, A,

U_{MPP} - napięcie prądu dla modułu w punkcie mocy maksymalnej, V,

I_{SC} - prąd zwarcia badanego modułu, A,

U_{OC} - napięcie obwodu otwartego badanego modułu, V.

Sprawność η jest najważniejszym parametrem określającym jakość ogniwa PV, określa się ją jako stosunek mocy maksymalnej do mocy promieniowania światła słonecznego E padającego na powierzchnię czynną ogniwa S [Flizikowski J., Mroziński A., 2016]:

$$\eta = FF \cdot \frac{I_{SC} \cdot U_{OC}}{E \cdot S}, \% \quad (2)$$

Aby maksymalnie wykorzystać wydajność ogniwa należy obciążać je taką wartością rezystancji (rezystancja optymalna), dla której występuje punkt mocy maksymalnej MPP (Maximum Power Point). Wartość rezystancji optymalnej wyznacza się na podstawie zależności (3) [Flizikowski J., Mroziński A., 2016]:

$$R_{opt} = \frac{U_{MPP}}{I_{MPP}}, \Omega \quad (3)$$

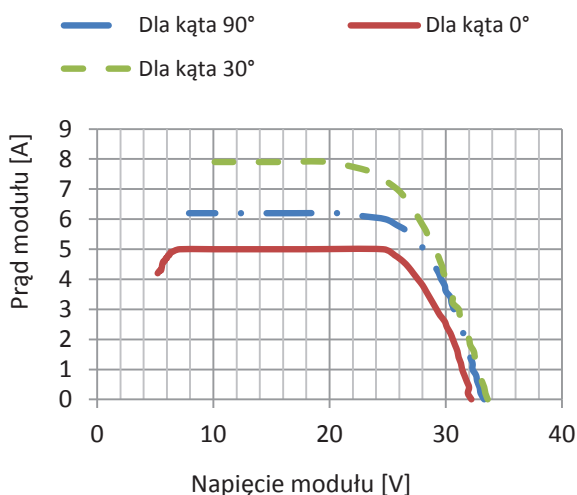
WYNIKI I ICH ANALIZA

Na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczono krzywe charakterystyki prądowo napięciowej ($I=f(U)$) oraz mocy w zależności od napięcia ($P=f(U)$) dla modułu monokrystalicznego i polikrystalicznego, i kątów pochylenia 0°, 30° i 90°.

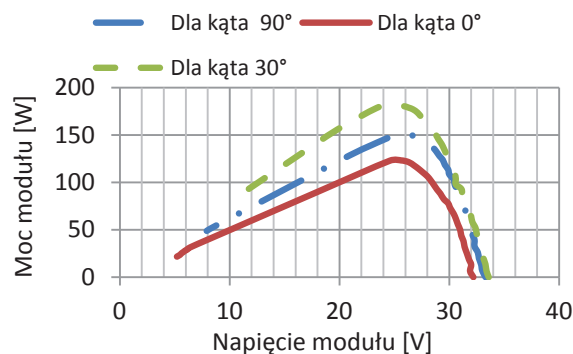
Wyniki i analiza dla modułu monokrystalicznego

Na rysunku 3 przedstawiono wykres zbiorczy charakterystyk prądowo napięciowych, a na rysunku 4 wykres mocy w funkcji napięcia modułu monokrystalicznego SUNGEN dla badanych kątów.

W rzeczywistych warunkach promieniowanie maksymalne na powierzchnię modułu kształtowało się na poziomie 818 W/m². Jest to wartość o 18,2% niższa niż przyjęta w warunkach standardowych. Największa wartość mocy tzw. punkt mocy maksymalnej, wyniosła 180,7 W przy kącie równym 30° (tab. 2).



Rysunek 1. Charakterystyka prądowo napięciowa modułu monokrystalicznego dla kątów 0°, 30° i 90° [opracowanie własne]



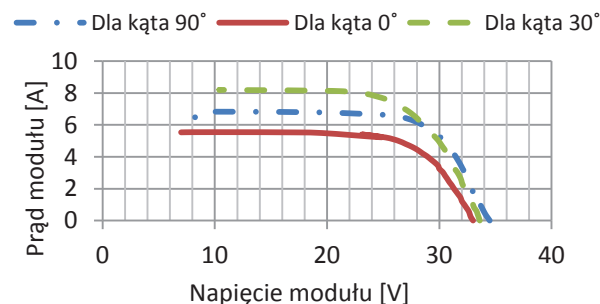
Rysunek 2. Moc modułu monokrystalicznego w funkcji napięcia dla kątów: 0°, 30° i 90° [opracowanie własne]

Wynik ten nie okazał się zaskoczeniem, ponieważ w polskich warunkach geograficznych wartość optymalna kąta pochylenia zawiera się w przedziale od 28 do 32°. Takie pochylenie zapewnia najkorzystniejszą absorpcję promieniowania słonecznego przez moduł w ciągu roku. Przy kącie 0° moc wyniosła połowę w porównaniu z zakładaną wartością przy STC. Sprawność modułu, podana przez producenta w warunkach STC wynosi 14,7%, natomiast podczas badań sprawność chwilowa zawierała się w zakresie od 15,9% do 16,7%.

Współczynnika wypełnienia nie należy odnosić do efektywności modułu lub sprawności. Dzięki niemu dopasowuje się obciążenie do modułu fotowoltaicznego tak, aby optymalne było wykorzystanie mocy.

Wyniki i analiza dla modułu polikrystalicznego

Na rysunku 5 przedstawiono wykres zbiorczy charakterystyk prądowo napięciowych, a na rysunku 6 wykres mocy w funkcji napięcia modułu polikrystalicznego BYD 240P6-30 dla badanych kątów. Promieniowanie maksymalne podczas badań charakterystyk prądowo-napięciowych modułu polikrystalicznego wynosiło 776 W/m². Jest to wartość o 22,4% niższa niż ta założona w warunkach standardowych.

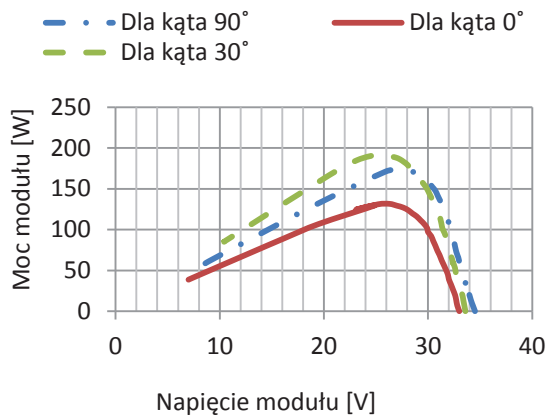


Rysunek 3. Charakterystyka prądowo napięciowa modułu polikrystalicznego dla kątów 0°, 30° i 90° [opracowanie własne]

Tabela 2. Porównanie danych modułu monokrystalicznego dla różnych kątów [opracowanie własne]

Parametr modułu PV	Dane producenta (przy STC)	Kąt pochylenia modułu		
		0°	30°	90°
Napięcie obwodu otwartego U_{oc} [V]	37,9	32,2	33,6	33,3
Prąd zwarcia I_{sc} [A]	8,79	4,2	7,85	6,2
Napięcie w punkcie mocy max U_{mpp} [V]	30,1	25,6	25,1	25,8
Prąd w punkcie mocy max I_{mpp} [A]	7,97	5,8	7,2	5,8
Moc maksymalna P_{mpp} [W]	250,0	123,3	180,7	150,1
Rezystancja optymalna R_{opt} [Ω]	7,2	15,5	3,49	4,45
Współczynnik wypełnienia FF	0,76	0,91	0,69	0,73
Sprawność η [%]	15,3	15,9	21,4	16,7
Natężenie promieniowania padającego prostopadłe na powierzchnię modułu E [W/m^2]	1000	686,5*	757,5*	800,6*

*wartości średnie.



Rysunek 6. Moc modułu polikrystalicznego w funkcji napięcia dla kątów: 0°, 30° i 90° [opracowanie własne]

Największa wartość mocy tzw. punkt mocy maksymalnej, wyniosła 192,6 W przy kącie równym 30° (tab. 3). Przy kącie 0° moc wyniosła połowę w porównaniu z zakładaną wartością przy STC. Sprawność modułu w warunkach STC wyniosła 14,75%, natomiast podczas badań w warunkach rzeczywistych sprawność chwilowa zawierała się w zakresie od 16,2% do 22,9%.

Warto zauważyć, że przy podobnych warunkach nasłonecznienia moduł polikrystaliczny uzyskiwał większe moce niż moduł monokrystaliczny, mimo mniejszej mocy nominalnej. Dotyczy to wszystkich badanych kątów pochylenia. Zarejestrowane większe wartości mocy i sprawności wynikają z faktu, że moduły polikrystaliczne do konwersji wykorzystują w lepszym stopniu rozproszone promieniowanie słoneczne.

Tabela 3. Porównanie danych panelu polikrystalicznego dla różnych kątów [opracowanie własne]

Parametr modułu PV	Dane producenta (przy STC)	Kąt pochylenia modułu		
		0°	30°	90
Napięcie obwodu otwartego U_{oc} [V]	37,30	33,0	33,6	34,5
Prąd zwarcia I_{sc} [A]	8,57	5,53	8,2	5,73
Napięcie w punkcie mocy max U_{mpp} [V]	29,64	26,3	23,5	27,1
Prąd w punkcie mocy max I_{mpp} [A]	8,10	5,10	7,61	6,41
Moc maksymalna P_{mpp} [W]	240,0	131,7	192,6	173,7
Rezystancja optymalna R_{opt} [Ω]	7,2	5,15	3,32	4,23
Współczynnik wypełnienia FF	0,76	0,72	0,70	0,88
Sprawność η [%]	14,14	16,2	22,9	22,2
Natężenie promieniowania padającego prostopadłe na powierzchnię modułu E [W/m^2]	1000	721,8*	747,2*	697,3*

*wartości średnie.

WNIOSKI

Cel badawczy pracy został zrealizowany poprzez analizę wpływu warunków środowiskowych na wydajność modułów fotowoltaicznych.

Do najważniejszych czynników zewnętrznych, które wpływają na ilość energii elektrycznej produkowanej przez moduły fotowoltaiczne, zalicza się: intensywność promieniowania słonecznego, a przede wszystkim kąt padania promieni słonecznych.

Badania przeprowadzone w niniejszej pracy wskazały, iż dla obu badanych modułów PV, z punktu widzenia efektywności jego pracy, najbardziej korzystnym kątem pochylenia spośród badanych, był kąt 30°. Jest to kąt zapewniający, najbardziej zbliżone do prostopadłego, padanie promieni słonecznych na płaszczyznę modułu, dzięki czemu jest ono najlepiej absorbowane. Rozbieżność pomiędzy mocami podanymi przez producentów, a tymi uzyskanymi podczas badań, wynika z warunków środowiskowych w jakich były one wyznaczane (np. STC w laboratorium, badania własne w warunkach rzeczywistych). Przeprowadzona w pracy analiza pozwala na porównanie oferowanych na rynku modułów fotowoltaicznych, nie tylko z perspektywy mocy szczytowej, ale również pod względem mocy chwilowych w rzeczywistych warunkach pracy.

Podczas realizowanych badań wyższą sprawnością wykazał się moduł polikrystaliczny BYD (dla kąta 30° sprawność wyniosła 22,9%). Wartości mocy i sprawności dla tego modułu dla każdego z trzech kątów przewyższały wartości uzyskane dla modułu monokrystalicznego SUNGEN.

Uzyskana sprawność modułów polikrystalicznych była wyższa w badanych warunkach użytkowania. Jest to zasadniczo sprzeczne z rozważaniami teoretycznymi (ogniwa monokrystaliczne są bardziej sprawne), lecz w praktyce często obserwowane. Dodatkowo różnice pomiędzy sprawnościami i uzyskiwanymi mocami modułu polikrystalicznego i monokrystalicznego może wynikać z różnego poziomu zaawansowania technologicznego i jakości wytwarzania weryfikowanych modułów.

BIBLIOGRAFIA

- Flizikowski J., Mroziński A., 2016: *Inżynieria instalacji fotowoltaicznych*, Monografia pod redakcją Adama Mrozińskiego, Bydgoszcz
- Gail-Angee M. 2013 *Study of the operating temperature of a PV module*, Project Report 2013 MVK160 Heat and Mass Transfer, May 16, Lund, Sweden
- Jiang F., Wong A., 2005, *Study on the performance of different types of PV modules in Singapore*, International Power Engineering Conference, Singapore, pp. 1-109. doi: 10.1109/IPEC.2005.206888
- Koniszewski A., Mroziński A., 2016: *Inżynieria instalacji solarnych*. Monografia pod redakcją A. Mrozińskiego, Bydgoszcz
- Kruszelnicka W., Kozłowska N., Mroziński A. 2015 *Analiza efektywności energetycznej i ekonomicznej podgrzewacza wody użytkowej przez instalację zasilaną modułami fotowoltaicznymi*, Mechanik. Miesięcznik Naukowo - Techniczny, nr 10/2015, str. 70-80, 11 pkt MNiSW
- Kruszelnicka W., Mroziński A., Dutka M., Bałdowska P. 2017 *Study of PV modules under real environmental conditions*, Actual problems of modern science, edit. J. Musiał, O. Polishchuk, S. Ruslan, Khmelnytsky National University, Ukraina 2017, str. 811-820
- Kruszelnicka W., Mroziński A., Polishchuk O., Polishchuk A. 2017 *Monitoring of photovoltaic installation with electric energy storage*, Actual problems of modern science, edit. J. Musiał, O. Polishchuk, S. Ruslan, Khmelnytsky National University, Ukraina 2017, str. 781-792
- Kruszelnicka W. 2016, *Analiza efektywności hybrydowych systemów energii odnawialnej*, IX Eko-Euro-Energia. Inżynieria Odnawialnych Źródeł Energii. red. Adam Mroziński, Bydgoszcz 2016, str. 103-122, ISBN: 978-83-64423-33-8
- Skibowski M. 2012, *Stanowisko dydaktyczne do badań instalacji fotowoltaicznej*. Praca magisterska. Wydział Inżynierii Mechanicznej, UTP w Bydgoszczy, wrzesień 2012
- Dane katalogowe firmy SUNGEN, https://www.sge.solar/english/about_01.php (dostęp: 28.04.2018r)
- Dane katalogowe firmy BYD, <http://www.byd.com/en/ElectricSolutions.html> (dostęp: 30.04.2018r)