

## ANALIZA PARAMETRÓW PRACY MODUŁU FOTOWOLTAICZNEGO

Zgodnie z zapowiedziami Ministerstwa Energii zawartymi w planie rozwoju elektromobilności należy spodziewać się coraz większego zapotrzebowania na energię elektryczną w sektorze transportu publicznego. W artykule przedstawiono prosty model modułu fotowoltaicznego zbudowany w oparciu o model matematyczny ogniwa fotowoltaicznego. Na podstawie modelu przeanalizowano wpływ warunków atmosferycznych na produkcję energii elektrycznej w module fotowoltaicznym. Uwzględniono wpływ temperatury, natężenia promieniowania słonecznego oraz wpływ prędkości wiatru. Przedstawiono charakterystyki wyznaczone w modelu matematycznym rzeczywistego modułu fotowoltaicznego zainstalowanego na Uniwersytecie Technologiczno-Humanistycznym im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu.

### WSTĘP

Ciągły wzrost cen paliw konwencjonalnych, wyczerpywanie się ich zasobów oraz zaostrzenie przepisów ochrony środowiska, wymuszają poszukiwanie alternatywnych, niskoemisyjnych źródeł energii między innymi takich jak energia słoneczna. Energia Słońca jest energią pozbawioną jakichkolwiek zanieczyszczeń, co stanowi jej dodatkowy atut na tle innych źródeł energii.

Do atmosfery ziemskiej dociera ze Słońca strumień energii równy około  $178 \times 10^{15}$  W i jest to niewielka część całkowitego promieniowania słonecznego. Mimo to strumień ten jest 30 000 razy większy niż całkowita moc wszystkich urządzeń zainstalowanych na Ziemi. Wielkością która charakteryzuje energię docierającą do atmosfery ziemskiej jest stała słoneczna wynosząca  $1,395 \text{ kW/m}^2$  [6]. Szacuje się, że wartość energii promieniowania słonecznego na terenie Polski zawiera się w granicach  $0 \div 5,5 \text{ kWh/m}^2/\text{dzień}$  a średnie napromienowanie słoneczne to  $1000 \text{ kWh/m}^2/\text{rok}$  [3,10].

Promieniowanie docierające na powierzchnię ziemi ulega rozproszeniu oraz odbiciu. Można zatem wyróżnić trzy rodzaje promieniowania.

*Promieniowanie bezpośrednie* to promieniowanie, które bez żadnych przeszkód dociera do powierzchni Ziemi i może zostać zaabsorbowane przez ogniwo fotowoltaiczne. Największy efekt konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną uzyskuje się przy kącie padania promieniowania na powierzchnię ogniwa wynoszącym  $90^\circ$ .

*Promieniowanie rozproszone* powstaje na skutek rozproszenia strumienia fotonów np. w chmurze. Promieniowanie rozproszone dociera do powierzchni Ziemi, jednak fotony posiadają mniejszą energię a kierunek i padania na powierzchnię płaską jest przypadkowy. Udział promieniowania rozproszonego w całkowitym promieniowaniu docierającym do Polski wynosi od od 47% latem do 70% zimą.

*Promieniowanie odbite* powstaje na skutek odbicia od obiektów znajdujących się na ziemi, np. budynków [4]. Wpływ promieniowania odbitego na produkcję energii elektrycznej jest pomijalnie mały.

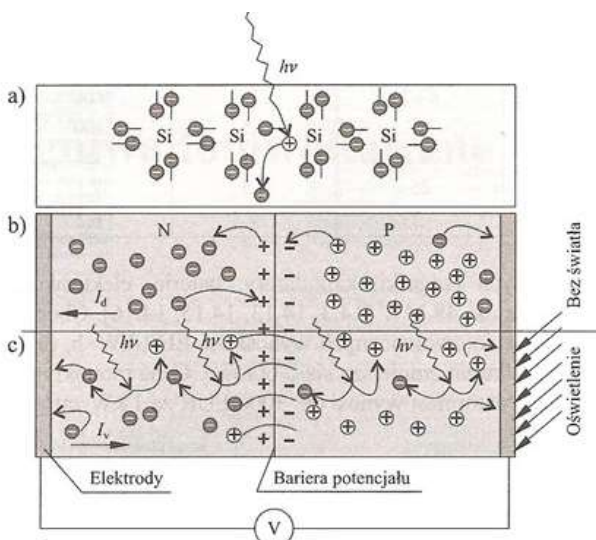
### 1. BUDOWA I ZASADA DZIAŁANIA OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH

#### 1.1. Zjawisko efektu fotowoltaicznego

Konwersja promieniowania słonecznego na energię elektryczną w ogniwach fotowoltaicznych następuje w wyniku powstawania efektu fotowoltaicznego [5,8].

Mechanizm zjawiska polega na powstaniu siły elektromotorycznej w wyniku zjawisk fizycznych w niejednorodnym ośrodku w następstwie jego oświetlenia. Ośrodkiem tym może być na przykład złącze dwóch półprzewodników, elektrolitu i półprzewodnika lub też półprzewodnika i metalu [11]. Efekt fotowoltaiczny zachodzi we wszystkich półprzewodnikach. W każdym z nich przebiega on z różną intensywnością oraz zachodzi przy różnej długości fal padającego światła. Półprzewodnikami nazywamy te pierwiastki których bariera potencjałów jest mniejsza niż  $5 \text{ eV}$  [5].

Fale światła widzialnego, powodują wybijanie elektronów z sieci krystalicznej półprzewodnika z pasma walencyjnego na poziom przewodnictwa. Skutkuje to powstawaniem dziur (+) w miejscach wybitych elektronów (-). Dziura ta jest zastępowana elektronem z sąsiadującego węzła sieci krystalicznej, a w miejscu tego elektronu powstaje nowa dziura. Kiedy w półprzewodniku jest przewaga elektronów, nazywa się go półprzewodnikiem typu n. Jeżeli występuje w nim przewaga dziur, nazywa się go półprzewodnikiem typu p [2]. Płytki półprzewodników typu n i typu p dosunięte do siebie tworzą złącze p-n. W miejscu styku tych dwóch rodzajów półprzewodników tworzy się wewnętrzne pole elektryczne nazywane barierą potencjałów [10]. Kiedy półprzewodnik pozostaje nieoświetlony dziury wędrują na lewo i w półprzewodniku płynie niewielki prąd dyfuzyjny  $I_d$ . Jeżeli natomiast złącze p-n zostaje oświetlone, to fotony powodują rozrywanie w złączu par elektron-dziura ((-) i (+)). Bariera potencjałów powoduje wtedy przesunięcie ładunków ujemnych do obszaru typu n, a ładunków dodatnich do obszaru typu p. Wynikiem takiego ruchu ładunków jest powstanie na złączu zewnętrznego stałego napięcia elektrycznego. Ponieważ rozdzielone ładunki w złączu mają nieograniczony czas życia (dopóki złącze jest naświetlane), złącze p-n działa jak źródło napięcia stałego (rys.1 - c) [2].

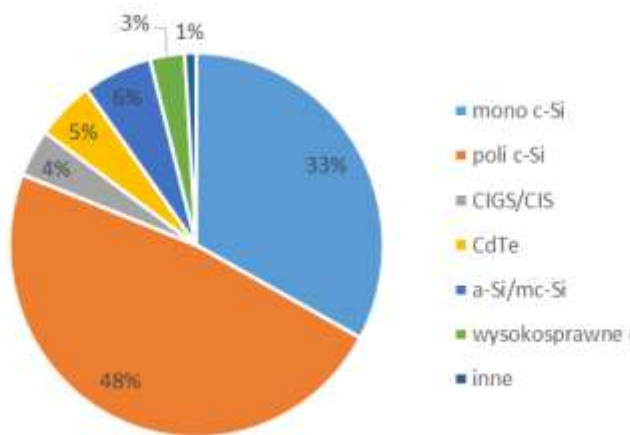


**Rys. 1.** Mechanizm fotowoltaiczny; a) mechanizm powstawania dziury, b) wsteczny prąd dyfuzyjny, c) przepływ prądu (złącze oświetlone) [2]

## 1.2. Budowa i podział fotoogniwa

Od czasu powstania pierwszych fotoogniw selenowych, które posiadały sprawność 0,5% powstało wiele nowych rozwiązań materiałowych oraz konstrukcyjnych. Ostatnie kilkanaście lat spowodowało, że przemysł wytwarzania ogniw fotowoltaicznych rozwija się w bardzo dynamiczny sposób. Skutkuje to znacznym spadkiem cen modułów fotowoltaicznych oraz podniesieniem ich sprawności energetycznej.

Dominującym materiałem wykorzystywanym do produkcji ogniw fotowoltaicznych jest krzem. Udział fotoogniw krzemowych szacowany jest na ponad 80% produkcji światowej [4].



**Rys. 2.** Udział poszczególnych technologii w rynku produkcji modułów fotowoltaicznych w 2012 roku [13]

W tabeli 1 przedstawiono podział ogniw fotowoltaicznych ze względu na zastosowany materiał oraz podano wartości osiąganych przez nie sprawności.

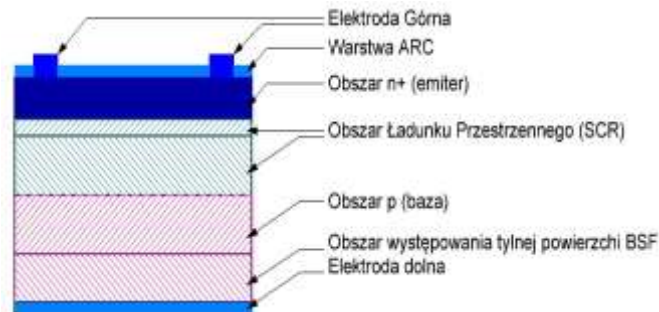
## 1.3. Zasada działania ogniw fotowoltaicznych

Niezwykła popularność ogniw krzemowych wynika z szerokiej dostępności piasku kwarcowego  $\text{SiO}_2$  oraz z zadowalającej sprawności głównego materiału służącego do ich produkcji czyli krzemu. Zawartość tego pierwiastka w zewnętrznych warstwach Ziemi stanowi około 27% i jest on dostępny prawie w każdym rejonie Świata.

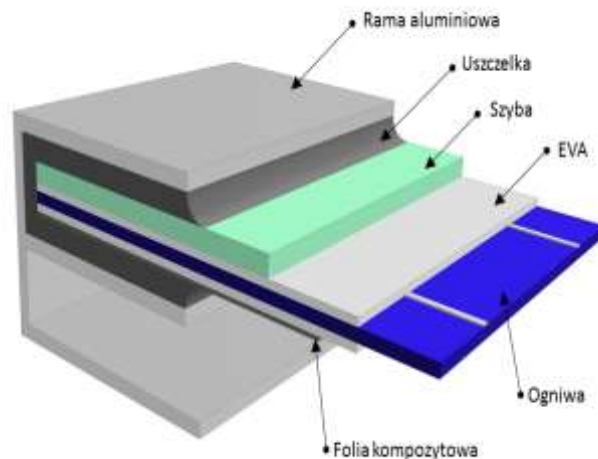
## Ogniwa monokrystaliczne

Piasek kwarcowy topi się w temperaturze  $1800^\circ\text{C}$ , a następnie oczyszcza. Czystość gotowego krzemu wynosi 99,9999%. Z tak oczyszczonego i roztopionego surowca pozyskuje się w warunkach próżni monokryształ krzemu z niewielką ilością boru. Monokryształ, to uformowany walec o średnicy 5÷30 cm i długości 1÷2 m. Stanowi on wyjściowy materiał do produkcji ogniw monokrystalicznych [5,7].

Ogniwa monokrystaliczne wytwarzane są poprzez laserowe cięcie monokryształu na płytki (typu p-) o grubości około 0.30 mm. Na powierzchni drugiej płytki, wytwarza się poprzez dyfuzję fosforu obszar typu n+. Ze względu na fakt, że od powierzchni fotoogniwa strumień świetlny zostaje w 40% odbity, pokrywa się go aktywną powierzchnią krzemu, przezroczystym materiałem antyrefleksyjnym (ARC). Przed nałożeniem warstwy ARC, powierzchnia jest teksturovana. Zabieg ten powoduje korzystne zmiany barwy światła odbitego, rozproszonego oraz współczynnika załamania światła. Nakładane są też warstwy selektywne, które filtrują widmo światła, przepuszczając pożądane długości fal. Wszystkie te procesy powodują obniżenie strat w postaci odbitej energii promieniowania do ok. 5%. Z górnej i dolnej strony ogniwa, naklejone zostają metalizowane elektrody. Górna elektroda ma powierzchnię dziesięciokrotnie mniejszą niż dolna. Dolna elektroda pokrywana jest w całości warstwą metalizowaną, mającą za zadanie stworzyć lustro odbijające fotony w krzemie, a tym samym zwiększyć ich absorpcję w krzemie. Dodatkowo w dolnej części półprzewodnika typu p, dyfundując domieszkę grupy III wytwarza się obszar p+. Powstałe w ten sposób na granicy tych obszarów złącze p-p+ wiąże się z powstaniem tylnego pola elektrycznego (BSF). Pole elektryczne BSF zwraca od dolnej elektrody elektrony, oraz zwiększa prawdopodobieństwo rozdziału nośników ładunków. [10,11]



**Rys. 3.** Budowa fotoogniwa krzemowego [11]



**Rys. 4.** Budowa modułu fotowoltaicznego [14]

Typowa wartość wygenerowanego napięcia przez ogniwa krystaliczne wynosi  $0,5 \pm 0,6$  V. Aby fotoogniwo osiągnęło napięcie 24 V, montuje się w nim 48 komórek. 36 ogniw fotowoltaicznych połączonych taśmą aluminiową daje moduł. Moduły łączy się w sposób szeregowy lub szeregowo-równoległy i tworzy się w ten sposób moduł fotowoltaiczny.

Udział monokrystalicznych ogniw fotowoltaicznych na rok 2014 wyniósł 33%. Są to najbardziej kosztowne ogniwa, a zarazem osiągające najwyższą sprawność w komercyjnej produkcji (22%). Budowę typowego ogniwa fotowoltaicznego przedstawia rysunek 3, natomiast budowę całego modułu fotowoltaicznego przedstawia rysunek 4.

## Ogniwa polikrystaliczne

Alternatywą dla monokrystalicznych ogniw krzemowych, są tańsze ogniwa polikrystaliczne. Podstawą do produkcji fotoogniw polikrystalicznych jest blok krzemu. Blok ten otrzymuje się najczęściej dwoma metodami, metodą Brigmana lub metodą odlewania bloku. Następnie blok jest cięty na mniejsze bloczki - prostopadłościowy o podstawie  $15,6 \times 15,6$  mm. Z otrzymanego bloczku tnie się płytki krzemowe o grubości do 0,2 mm. Cięcie odbywa się z jednoczesnym szlifowaniem powierzchni powstających płytek.

Dalsza obróbka płytek polikrystalicznych polega na:

- szlifowaniu,
- domieszkowaniu np.: fosforem,
- nałożeniu metalizowanych elektrod,
- pokryciu warstwą przeciwoodblaskową.

Ogniwa polikrystaliczne posiadają charakterystyczny niebieski kolor z dobrze widoczną strukturą kryształów. Sprawność ogniwa polikrystalicznego jest mniejsza niż ogniwa monokrystalicznych, i mieści się w granicach  $14 \pm 19\%$ . Obniżona sprawność rekompensowana jest niższymi kosztami produkcji.

Wszystkie ogniwa z krzemu polikrystalicznego pokrywane są hartowanym szkłem o zwiększonej przepuszczalności światła. Moduły opisywanych ogniw mogą pracować pojedynczo lub połączone w baterie o napięciu nie przekraczającym 1000 V. [5,10]

## Ogniwa cienkowarstwowe

Przyjmuje się, że ogniwa monokrystaliczne i polikrystaliczne należą do *generacji I*. Natomiast ogniwa cienkowarstwowe (w tym z krzemu amorficznego) należą do *generacji II ogniw fotowoltaicznych*. Podczas badania efektu fotowoltaicznego stwierdzono, że przemiana energii światła w energię elektryczną zachodzi tylko w warstwie granicznej między elektrodami, której grubość wynosi ok. 0,001 [mm]. Skutkiem tego było opracowanie technologii ogniw fotowoltaicznych, których budowa skupiła się cienkiej warstwie granicznej. Ogniwa cienkowarstwowe powstają poprzez nanoszenie znikomych warstw półprzewodników, na tanie podłoża bazowe.

Oprócz krzemu amorficznego półprzewodnikami tymi są:

- siarczek kadmu  $CdS$ ,
- tellurek kadmu  $CdTe$ ,
- dwuselenek indow-miedziowy  $CuInSe_2$  inaczej *CIS*,
- arsenek galu  $GaAs$ ,
- dwuselenku miedziowo-indowo-galowego  $CuInGaSe_2$  (*CIGS*),

Ze względu na to, że proces produkcji ogniw cienkowarstwowych nie jest tak energochłonny jak ogniwa mono i polikrystalicznych, ich koszt jest niższy. Oprócz tego ograniczone są straty materiałowe (brak cięcia i szlifowania kryształów). Inną zaletą jest możliwość tworzenia dużych powierzchni paneli, oraz stosowanie tego typu ogniw na elewacjach budynków [7]. Sprawność cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych zawiera się w granicach od  $5 \pm 9\%$  w przypadku *a-Si*,  $20\%$  *CIS*, do  $26\%$  w przypadku *GaAs*. [7,10]

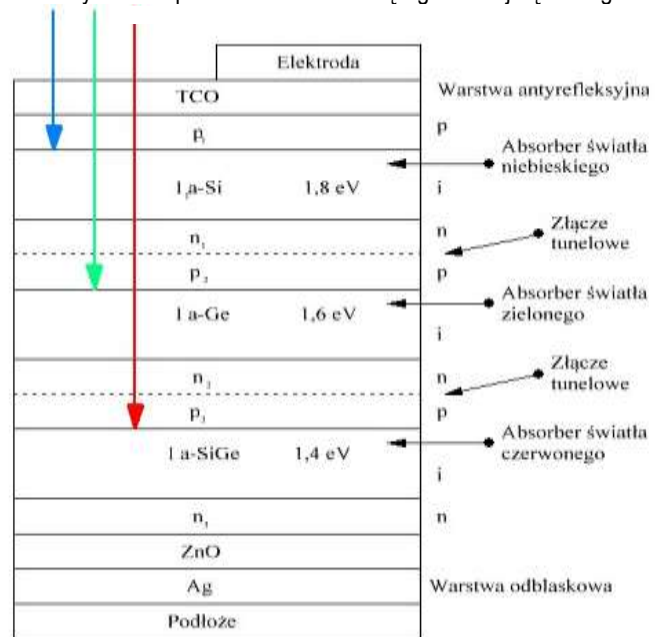
## Ogniwa fotowoltaiczne z krzemu amorficznego

Do budowy ogniw fotowoltaicznych oprócz krzemu o strukturze krystalicznej stosuje się coraz częściej krzem bezpostaciowy (amorficzny). Ogniwa z krzemu amorficznego zawierają w sobie od 8 do 12% wodoru. Posiadają też liczne defekty w swojej budowie strukturalnej. W fotoogniwach amorficznych, w wyniku działania promieni słonecznych zostaje obniżony współczynnik sprawności względem jego początkowej wartości (efekt Staeblera-Wrońskiego). Efekt ten polega na tym, że długotrwałe naświetlanie krzemu amorficznego wywołuje znaczny wzrost jego konduktywności. Jest to proces odwracalny, jednak wymaga to regenerowania poprzez wygrzewanie ogniw w ciemności. Efekt ten powoduje straty mocy wyjściowej sięgające 20% zanim materiał się ustabilizuje. Stąd sprawność ogniw amorficznych na poziomie  $5 \pm 9\%$ . [5,10]

Proces wytwarzania amorficznych modułów fotowoltaicznych polega na nakładaniu cienkich warstw krzemu na takim materiale jak szkło, tworzywo sztuczne lub stal nierdzewna. Na tak powstałym module nie widać pojedynczych ogniw. Produkcja ta jest prosta i łatwo ją zautomatyzować, a zużycie materiału i energii jest stosunkowo niskie, co wpływa na ich cenę. Wartość sprawności ogniw amorficznych zwiększono poprzez wprowadzenie konstrukcji wielozłączowych. Polega ona na ułożeniu materiałów łącząc jedno na drugim absorbując różne długości fali świetlnej.

Dzisiejsze cienkowarstwowe ogniwa fotowoltaiczne z krzemu amorficznego wykonuje się jako jedno lub wielozłączowe. Są to złącza typu *p-i-n*. Górna warstwa ogniwa pokryta jest najczęściej podwójną warstwą przewodzącą tlenek indu i cyny (ITO). Absorberem w dwuzłączowych ogniwach jest *a-Si:H* oraz *a-SiGe:H*, a do trójzłączowych dodatkowo dochodzi *a-SiC:H*. [5,10,11]

Na rysunku 5 przedstawiono budowę ogniwa trójzłączowego.



Rys. 5. Budowa ogniwa trójzłączowego [9]

## Ogniwa z arsenku galu

Fotoogniwa zbudowane z arsenku galu ( $GaAs$ ) to ogniwa, które mogą występować jako krystaliczne jak i cienkowarstwowe. Panele zbudowane z tych ogniw osiągają wysoką sprawność w porównaniu z innymi ogniwami słonecznymi. Sprawność tego rodzaju ogniw fotowoltaicznych w masowej produkcji to 26%, a w warunkach laboratoryjnych osiągają 30%. Wielkim atutem arsenku galu jest to, że wyprodukowane ogniwa charakteryzują się stosunkowo niewielkim wpły-

wem temperatury na ich parametry elektryczne. Parametry są zachowane nawet w temperaturze 400 °C. Zaletą ta powoduje, że ogniwa te wykorzystywane są w systemach zasilających z wykorzystaniem koncentratorów słonecznych i w technice kosmicznej. [5]

Arsenek galu oprócz opisanych powyżej zalet posiada też wady. Cena ogniw jest bardzo wysoka ponieważ gal jest pierwiastkiem rzadko spotykanym i dostępnym w niewielkich ilościach. Również użycie tego rodzaju modułów fotowoltaicznych jest poważnym problemem. Problemem stwarza również drugi składnik złącza-arsen, który jest silnie toksyczny. [5,7]

### Ogniwa III generacji

W ostatnich latach powstaje wiele ogniw fotowoltaicznych, które zaliczone są do ogniw III generacji. Do tej grupy należą ogniwa polimerowe. Polimery zachowują się jak typowe półprzewodniki. Mogą być tworzone na bazie materiałów o właściwościach gumy, linoleum czy powłok sztywnych. Zaletą ogniw polimerowych jest możliwość dowolnego ich kształtowania i dopasowania do każdej powierzchni. Wadą ogniw polimerowych jest ich niska sprawność (6÷8%) w porównaniu z ogniwami fotowoltaicznymi innych typów. O intensywności badań nad ogniwami polimerowymi świadczy fakt, że nie tak dawno sprawność ta wynosiła 4%.

Do ogniw III generacji należą również ogniwa barwnikowe zwane też fotoelektrochemicznymi. Zbudowane są z dwóch szklanych płytek. W przerwie między płytkami, która wynosi 40 μm, wprowadzony jest dwutlenek tytanu ze światłoczułym barwnikiem w rozpuszczeniu z zawartością jonów jodu. Ogniwa barwnikowe posiadają bardzo niską sprawność, ale nie zmieniają za to swych właściwości z upływem czasu. Posiadają jeszcze jedną wielką zaletę - są tanie [7].

## 2. SYMULACJA PRACY OGNIWA FOTOWOLTAICZNEGO

Coraz szersze zastosowanie ogniw fotowoltaicznych wymaga wykonania szczegółowych analiz związanych z eksploatacją systemów fotowoltaicznych. Jednym z rozwijanych zastosowań dla systemów fotowoltaicznych jest możliwość ładowania akumulatorów autobusów elektrycznych. Pojemność autobusowych magazynów energii oraz chęć szybkiego ich ładowania powoduje konieczność stosowania przyłączy elektrycznych o dużych mocach. Alternatywą stają się ładowarki wyposażone w instalacje fotowoltaiczne oraz magazyny energii, które ładują się powoli, a energię do autobusowego magazynu oddają w krótkim czasie.

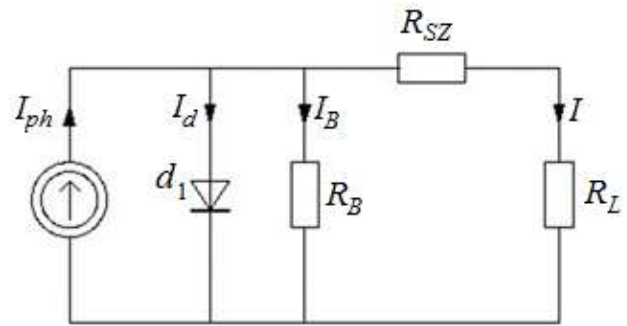
W niniejszym artykule zaprezentowano model ogniwa fotowoltaicznego i przeanalizowano charakterystykę produkcji energii w module fotowoltaicznym wykorzystując prosty model matematyczny ogniwa fotowoltaicznego.

### 2.1. Schemat zastępczy ogniwa fotowoltaicznego

Wielkości charakteryzujące ogniwo i stanowiące o jego jakości to m. in.:

- rezystancja szeregową  $R_{Sz}$  - składają się na nią rezystancje połączeń, rezystancja bazy oraz inne rezystancje warstw ogniwa. Dla ogniw krzemowych rezystancja szeregową  $R_{Sz}$  (rys. 6) wynosi od 0,05 Ω do 0,1 Ω;
- rezystancja bocznikowa  $R_B$  - jest reprezentacją możliwości upływu fotonapęcia  $I_{ph}$  wzdłuż krawędzi ogniwa lub wzdłuż granic ziaren. Dla ogniw krzemowych wartość rezystancji równoległej  $R_B$  (rys. 6) zawiera się w przedziale 200÷300 Ω,
- rezystancja obciążenia  $R_L$  - rezystancja zewnętrzna podłączona do elektrod ogniwa. Dobór rezystancji obciążenia powinien być

dynamiczny, aby w miarę zmieniających się warunków pracy dopasować punkt pracy ogniwa zapewniający pracę w okolicach punktu maksymalnej mocy [4].



Rys. 6. Schemat zastępczy ogniwa fotowoltaicznego

Ogniwo idealne cechują wartości rezystancji  $R_B = \infty$  i  $R_{Sz} = 0$ , zatem na etapie projektowania ogniw fotowoltaicznych należy dążyć do uzyskania jak największej rezystancji bocznikowej  $R_B$  i jak najmniejszej rezystancji szeregowej  $R_{Sz}$ . Zbyt duża wartość rezystancji  $R_{Sz}$  może spowodować obniżenie wartości fotonapęcia, jednak jej wpływ na parametry ogniwa jest bardziej widoczny przy większym natężeniu promieniowania słonecznego i przy wyższych temperaturach pracy. Rezystancja bocznikowa wpływa na wartość fotonapęcia, a jej wpływ na parametry ogniw fotowoltaicznych widać przy małych wartościach natężenia promieniowania i niskich temperaturach pracy [4,5].

Źródło prądowe w wyniku zjawiska fotowoltaicznego wytwarza prąd  $I_{ph}$ , który jest wprost proporcjonalny do natężenia promieniowania słonecznego. Prąd ten można zapisać równaniem [5]:

$$I_{ph} = I_{sc} \left( \frac{G_0}{1000} \right) + J_0 (T_c - T_{odn}) \quad (1)$$

gdzie:  $I_{sc}$  - prąd zwarcia [A],  
 $T_{odn}$  - temperatura [K] w warunkach STC, tj. przy gęstości mocy promieniowania słonecznego  $G_0 = 1000 \text{ W/m}^2$ ; temperaturze modułu  $T_{odn} = 298 \text{ K}$ ; rozkładzie widma AM-1,5;  
 $G_0$  - gęstość mocy promieniowania słonecznego [ $\text{W/m}^2$ ],  
 $T_c$  - temperatura pracy ogniwa [K],  
 $J_0$  - współczynnik temperaturowy [A/K].

Prąd diody  $I_D$  [A] opisany jest równaniem [5,11]:

$$I_d = I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(U + R_{Sz}I)}{\alpha k_B T_c} \right) - 1 \right] \quad (2)$$

przy czym:

$$I_0 = I_{d0} \left( \frac{T_c}{T_{odn}} \right)^3 \exp \left[ \frac{qE_q}{\alpha k_B} \left( \frac{1}{T_{odn}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (3)$$

gdzie:  $R_{Sz}$  - rezystancja szeregową [Ω],  
 $U$  - spadek napięcia na obciążeniu [V],  
 $I_d$  - prąd diody [A],  
 $I$  - prąd obciążenia [A],  
 $I_{d0}$  - prąd „ciemny” diody [A],  
 $q = 1,602 \cdot 10^{-19}$  - ładunek elementarny [C],  
 $E_q$  - bariera energetyczna potencjału [V],  
 $k_B$  - stała Boltzmanna  $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$  [J/K],  
 $T_c$  - temperatura pracy fotoogniwa [K],  
 $\alpha$  - współczynnik jakości diody (dla ogniwa idealnego  $\alpha = 1$ , dla rzeczywistego  $1 < \alpha < 2$ ).

Prąd płynący przez rezystancję bocznikującą opisany jest równaniem [5]:

$$I_B = \frac{U + R_{SZ}I}{R_B} \quad (4)$$

gdzie:  $I_B$  - prąd płynący przez rezystancję bocznikującą [A],  
 $R_B$  - rezystancja bocznikująca [ $\Omega$ ].

Stosując prądowe prawo Kirchhoffa dla schematu zastępczego ogniwa (rys. 6) otrzymano następującą zależność:

$$I = I_{ph} - I_d - I_B \quad (5)$$

Podstawiając do równania (5) zależności od (1) do (4) otrzymano równanie nieliniowe opisujące charakterystykę prądowo-napięciową ogniwa fotowoltaicznego [4,5,12].

$$I = I_{sc} \left( \frac{G_0}{1000} \right) + J_0(T_c - T_{odn}) - I_0 \left[ \exp \left( \frac{q(U + R_{SZ}I)}{\alpha k_B T_c} \right) - 1 \right] - \frac{U + R_{SZ}I}{R_B} \quad (6)$$

Przyjmując, że  $U=0$  V i pomijając składową  $I_0$ , która jest dużo mniejsza niż prąd  $I_{ph}$ , zależności (6) otrzymano opis matematyczny przybliżonej wartości prądu zwarcia ogniwa fotowoltaicznego [11]:

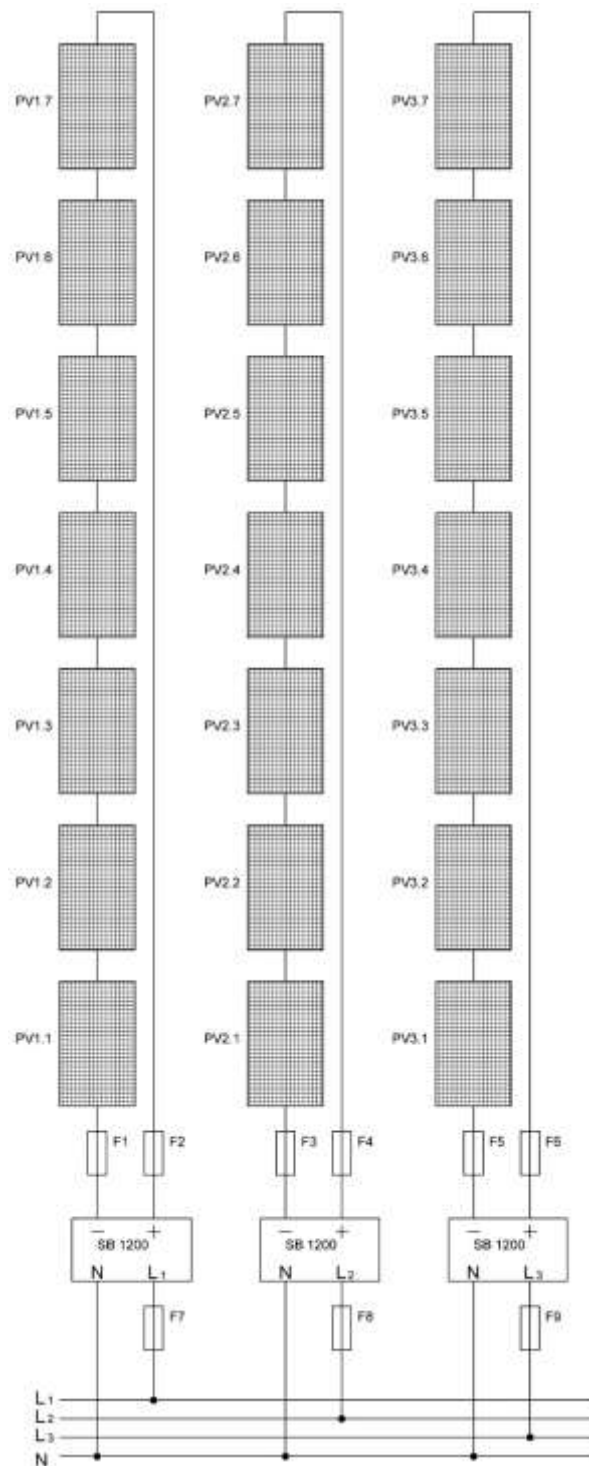
$$I_{sc} \approx \frac{I_{PH}}{1 + \frac{R_{SZ}}{R_B}} \quad (7)$$

Dla dobrej jakości ogniw fotowoltaicznych stosunek  $R_{SZ}/R_B \ll 1$  można więc uznać, że  $I_{sc} \approx I_{ph}$ . Zakładając, że  $I=0$  A a  $U=U_{oc}$ , czyli wtedy gdy elektrody fotoogniwa nie są połączone przez rezystancję obciążenia  $R_L$ , na podstawie zależności (6) uzyskuje się napięcie obwodu otwartego nazywanego również *napięciem biegu jałowego ogniwa* [5,11]:

$$U_{oc} = \frac{k_B T_c}{q} \ln \left( 1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (8)$$

### 3. SYMULACJA PRACY MODUŁU FOTOWOLTAICZNEGO

W symulacji została przedstawiona jedna z trzech sekcji generatora fotowoltaicznego wybudowanego w 2013 roku w Uniwersytecie Technologiczno-Humanistycznym im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu. Generator ten jest częścią sieci wyspowej Laboratorium Fotowoltaiki UTH. Instalacja fotowoltaiczna składa się z trzech łańcuchów fotowoltaicznych, z których każdy zawiera siedem połączonych szeregowo modułów fotowoltaicznych *Green Tech GT-180MCY*. Każdy z trzech łańcuchów fotowoltaicznych jest połączony przez zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe z osobnymi falownikami fotowoltaicznymi *SUNNY BOY 1200* (rys. 7). Łączna moc maksymalna jednej gałęzi omawianej instalacji fotowoltaicznej to 3x1260 W, a poziom napięcia generatora dla standardowych warunków badania to 264 V. Falowniki SB1200 zasilają poprzez zabezpieczenia nadmiarowo-prądowe wyspą instalację Laboratorium Fotowoltaiki [1].



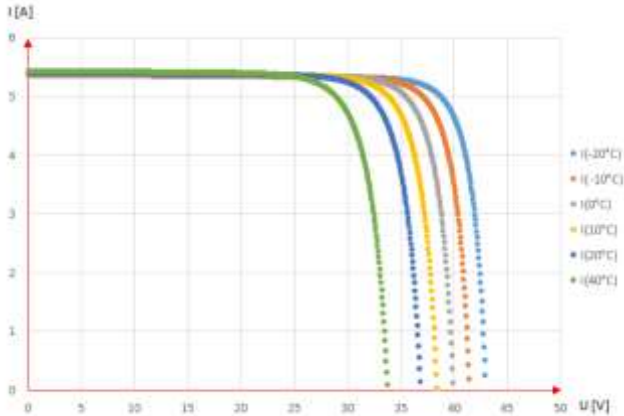
Rys. 7. Schemat połączeń instalacji fotowoltaicznej [1]

Tab. 1. Właściwości elektryczne zastosowanych modułów PV

Cechy elektryczne		
Moc maksymalna ( $P_M$ )	[W]	180
Tolerancja	[Wp]	+5
Napięcie w pkt. mocy maks ( $U_M$ )	[V]	36,50
Prądu w pkt. mocy maks ( $I_M$ )	[A]	5,10
Napięcie obwodu otwartego ( $U_{oc}$ )	[V]	41,35
Prąd zwarcia ( $I_{sc}$ )	[A]	5,4
Napięcie maksymalne systemu ( $U_{sys}$ )	[V]	600/1000
Diody (By-pass)	szt.	3
Bezpiecznik maksymalny w szeregu	[A]	10
Sprawność $\eta$	[%]	14,10
Współczynnik wypełnienia ( $FF$ )	[%]	>73

## 3.1. Wpływ temperatury na parametry modułu fotowoltaicznego

Temperatura pracy modułu fotowoltaicznego jest uzależniona od temperatury otoczenia, natężenia promieniowania słonecznego, konstrukcji samego modułu oraz prędkości wiejącego wiatru, który jest naturalnym chłodziwem modułu.

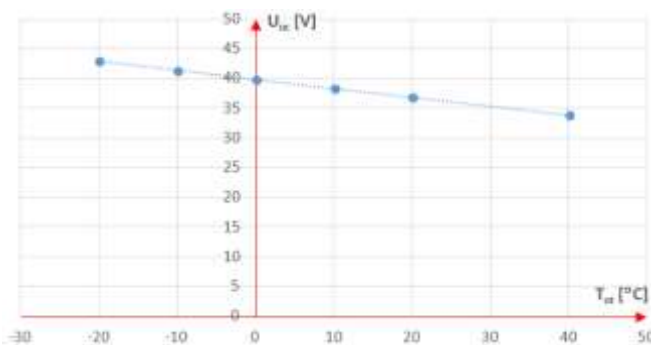


**Rys. 8.** Wpływ temperatury otoczenia  $t_{ot}$  na przebieg charakterystyki prądowo-napięciowej modułu fotowoltaicznego przy stałym natężeniu promieniowania  $G_0=1000 \text{ W/m}^2$

Rysunek 8 przedstawia wpływ temperatury otoczenia  $t_{ot}$  na charakterystykę  $I=f(U)$  modułu fotowoltaicznego przy stałym natężeniu promieniowania słonecznego  $G_0=1000 \text{ W/m}^2$ . Wraz ze wzrostem temperatury napięcie obwodu otwartego  $U_{oc}$  zmniejsza się. Ze zmian wartości napięcia  $U_{oc}$  można wyliczyć procentowy współczynnik temperaturowy  $\beta$  obwodu otwartego, który w przypadku rozpatrywanego modułu wynosi:

$$\beta = \frac{dU_{oc}}{dt} \rightarrow -149 \frac{\text{mV}}{^\circ\text{C}} \rightarrow -0,359 \text{ \%}/^\circ\text{C}$$

Zmianę napięcia obwodu otwartego w funkcji temperatury otoczenia  $t_{ot}$  przedstawia rysunek 9.

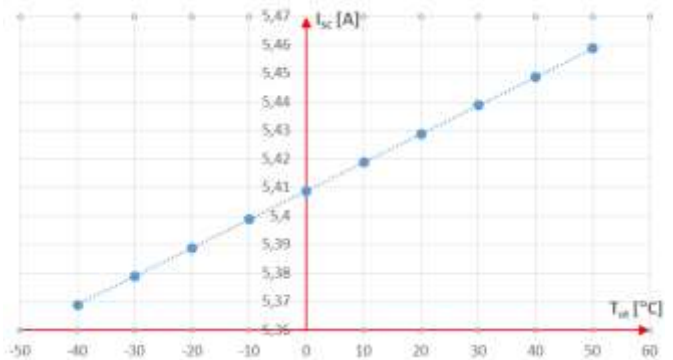


**Rys. 9.** Zmiana napięcia obwodu otwartego w funkcji temperatury otoczenia  $t_{ot}$

Zmiana temperatury ogniwa wpływa również na jego wydajność prądową (rys. 10). Zmiany prądu zwarcia  $I_{sc}$  ogniwa fotowoltaicznego są wprost proporcjonalne do wzrostu temperatury. Wyznaczony współczynnik temperaturowy prądu  $\alpha$ :

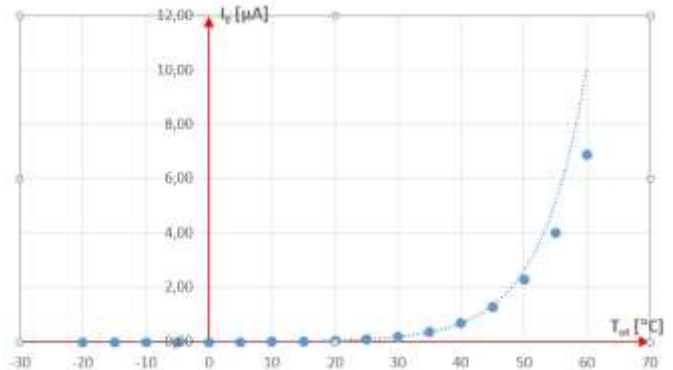
$$\alpha = \frac{dI_{sc}}{dt} \rightarrow 1,0 \left[ \frac{\text{mA}}{^\circ\text{C}} \right] \rightarrow 0,019 \left[ \frac{\text{\%}}{^\circ\text{C}} \right]$$

Wpływ temperatury otoczenia  $t_{ot}$  na prąd  $I_{sc}$  przedstawiony został na rysunku 10.



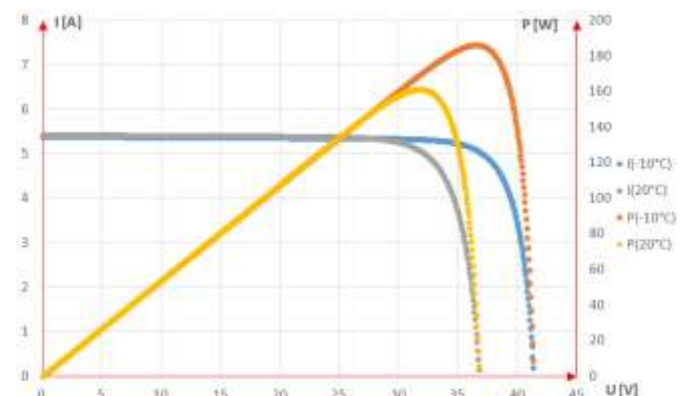
**Rys. 10.** Zmiana prądu zwarcia w funkcji temperatury otoczenia  $t_{ot}$

Spadek napięcia obwodu otwartego powodowany jest głównie wykładniczym charakterem prądu nasycenia  $I_0$ , który jest silnie uzależniony od temperatury pracy modułu fotowoltaicznego (rys. 11). Przy temperaturach powyżej  $25^\circ\text{C}$  można zauważyć gwałtowny wzrost prądu nasycenia ogniwa.

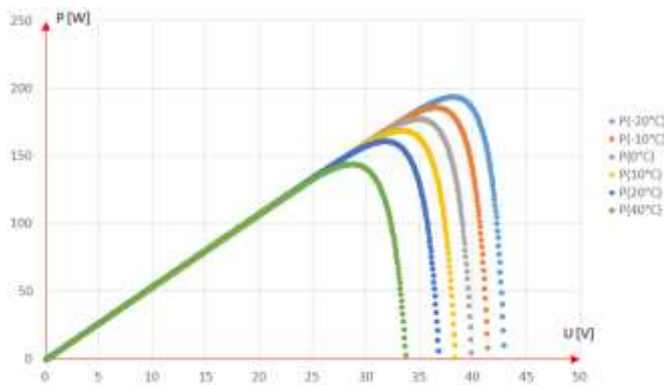


**Rys. 11.** Wpływ temperatury otoczenia  $t_{ot}$  na prąd nasycenia  $I_0$

Zmniejszenie wartości napięcia obwodu otwartego przy wzroście temperatury jest decydującym powodem obniżenia mocy modułu fotowoltaicznego (rys.12-13).



**Rys. 12.** Wpływ temperatury na charakterystyki  $I=f(U)$  oraz  $P=f(U)$

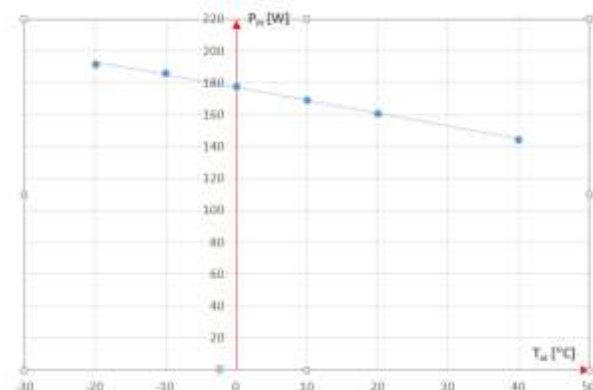


**Rys. 13.** Zmiana mocy modu fotowoltaicznego w funkcji temperatury otoczenia  $t_{ot}$

Spadek temperatury otoczenia  $t_{ot}$  powoduje zwiększenie mocy wytworzonej przez moduł fotowoltaiczny. Przy ujemnych temperaturach moc modułu fotowoltaicznego przekracza wartości nominalne. Wzrost temperatury powoduje przesunięcie punktu maksymalnej mocy (PMM) na charakterystyce w kierunku wartości mniejszych od nominalnych. Zmianę położenia punktów PMM względem temperatury ilustruje rysunek 14.



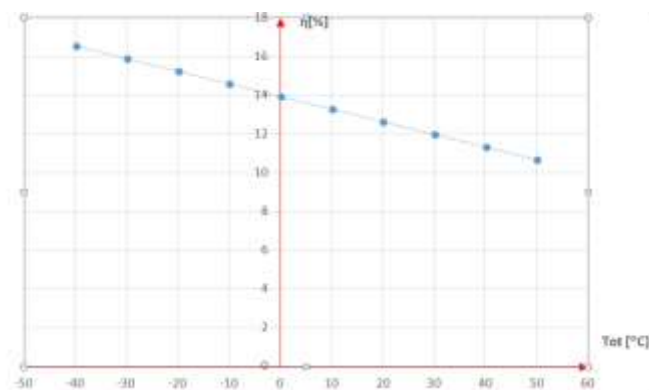
**Rys. 14.** Zmiana położenia punktów MPP na charakterystyce  $I=f(U)$



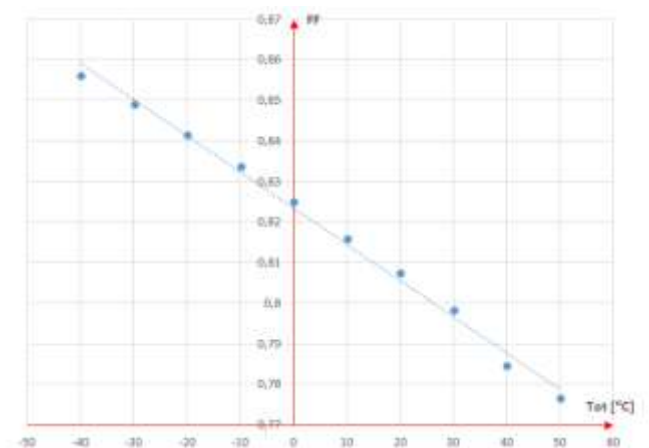
**Rys. 15.** Wpływ temperatury na moc maksymalną modułu fotowoltaicznych

Dla badanego modułu spadek mocy wraz ze wzrostem temperatury wyniósł  $0,597 \text{ W}/^{\circ}\text{C}$ , a zatem temperaturowy współczynnik mocy maksymalnej wynosi  $-0,332 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ . Spadek mocy modułu skutkuje obniżeniem sprawności  $\eta$  oraz wartości współczynnika wypełnienia  $FF$  modułu fotowoltaicznego (rys.16-17). Spadek wartości współczynnika sprawności  $\eta$  modułu fotowoltaicznego w funkcji temperatury otoczenia  $t_{ot}$  ma charakter liniowy. Wartość zmian wynosi  $0,066\%$  na każdy stopień wzrostu temperatury  $t_{ot}$ . Sprawność konwersji badanego modułu w granicach temperatury od  $-40^{\circ}\text{C}$  do

$+50^{\circ}\text{C}$  spadła o  $5,86\%$ . Spadek współczynnika wypełnienia jest zależnością również liniową w funkcji temperatury. W analizowanym zakresie temperatur zmieniła się od  $FF=0,85$  dla temperatury otoczenia  $t_{ot}$  bliskiej  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $FF=0,78$  dla temperatury otoczenia  $t_{ot}$  bliskiej  $50^{\circ}\text{C}$ .



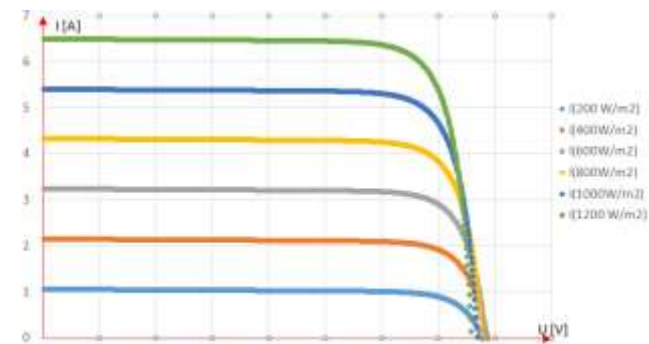
**Rys. 16.** Zmiana sprawności  $\eta$  modułu fotowoltaicznego w funkcji temperatury otoczenia  $t_{ot}$



**Rys. 17.** Wpływ temperatury otoczenia  $t_{ot}$  na współczynnik wypełnienia  $FF$

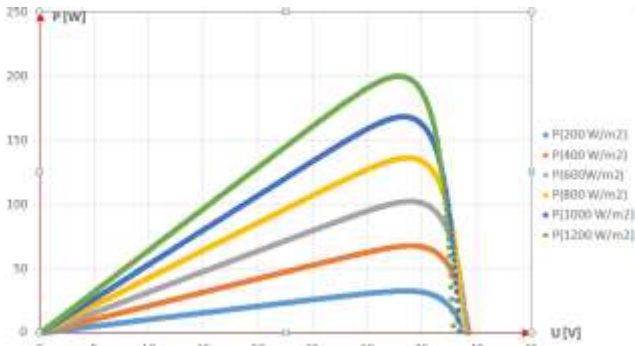
### 3.2. Wpływ zmian natężenia promieniowania słonecznego na pracę modułu fotowoltaicznego

Na podstawie modelu matematycznego modułu fotowoltaicznego przeprowadzono symulację pracy modułu fotowoltaicznego przy zmieniającym się natężeniu promieniowania słonecznego  $G_0$ . W obliczeniach przyjęto stałą wartość temperatury otoczenia  $T_{ot}=20^{\circ}\text{C}$ . Wpływ zmian natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  na charakterystykę  $I=f(U)$  pokazano na rysunku 18.

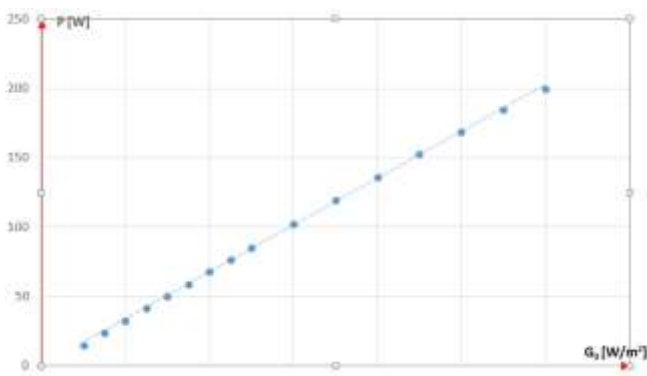


**Rys. 18.** Zmiana charakterystyki  $I=f(U)$  dla wybranych wartości  $G_0$  przy  $T_{ot}=20^{\circ}\text{C}$

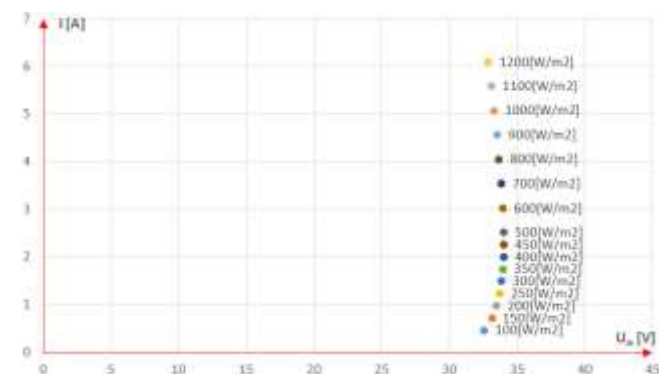
Wzrost natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  powoduje wzrost prądu  $I$  modułu fotowoltaicznego. Zmiana wartości natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  powoduje niewielkie zmiany napięcia  $U$  generowanego przez moduł. Wzrost prądu  $I$  modułu fotowoltaicznego przy niewielkich zmianach napięcia  $U$  modułu fotowoltaicznego powoduje zwiększenie mocy  $P$  generowanej przez moduł fotowoltaicznego (rys. 19).



Rys. 19. Zmiana charakterystyki  $P=f(G_0)$  przy  $T_{ot}=20\text{ }^\circ\text{C}$



Rys. 20. Zmiana wartości mocy maksymalnej  $P_m$  dla wybranych wartości natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  przy  $T_{ot}=20\text{ }^\circ\text{C}$

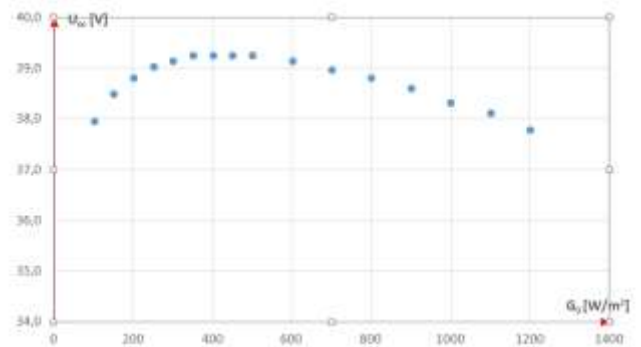


Rys. 21. Zmiana położenia PMM na charakterystyce prądowo-napięciowej dla wybranych wartości natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$

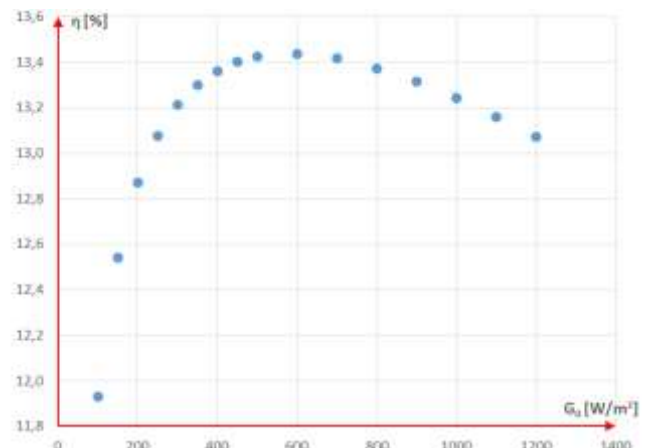
Na rysunku 20 zilustrowano zależność wartości maksymalnych punktów mocy w zależności od natężenia promieniowania słonecznego. Wzrost mocy zależy liniowo od wartości natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$ . Zmianę położenia punktu maksymalnej mocy (PMM) na charakterystyce prądowo-napięciowej modułu ilustruje rysunek 21. Wraz ze wzrostem natężenia promieniowania słonecznego punkty PMM przyjmują coraz większe wartości.

Wpływ zmian natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  na napięcie obwodu otwartego  $U_{oc}$  przedstawiono na rysunku 22. Napięcie obwodu otwartego  $U_{oc}$  początkowo rośnie do wartości 39,26 V przy

$G_0=350\text{ W/m}^2$ , a następnie zmniejsza swą wartość do poziomu 37,8 V przy  $G_0=1200\text{ W/m}^2$ . Przy zmieniającym się natężeniu promieniowania słonecznego spadek wartości  $U_{oc}$  nie ma jednak dużego wpływu na moc modułu w porównaniu ze zmianami temperatury otoczenia.



Rys. 22. Wpływ wzrostu wartości natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  na napięcie obwodu otwartego  $U_{oc}$



Rys. 23. Zmiana wartości współczynnika sprawności  $\eta$  ogniwa w funkcji natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$

Zmianom wartości natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  towarzyszy zmiana sprawności przetwarzania energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną w ogniwie fotowoltaicznym (rys. 23). Nieliniowy charakter zmian współczynnika sprawności  $\eta$  w funkcji natężenia promieniowania słonecznego  $G_0$  uwarunkowany jest wieloma czynnikami takimi jak zmiana temperatury ogniwa oraz napięcia generowanego przez moduł fotowoltaiczny.

### 3.3. Wpływ prędkości wiatru na pracę modułu fotowoltaicznego

Na podstawie modelu matematycznego ogniwa fotowoltaicznego, przeprowadzono symulację pracy modułu fotowoltaicznego przy zmieniającej się prędkości wiatru  $\omega$  [m/s]. Założono stałą temperaturę otoczenia  $T_{ot}=20\text{ }^\circ\text{C}$ , a temperaturę pracy ogniw fotowoltaicznych oparto na dwuskładnikowym modelu temperatury pracy ogniw, opracowanym przez Sandia National Laboratory (USA)[15].

Dwuskładnikowy model uwzględnia dodatkowo prędkość wiejącego wiatru, który jest czynnikiem chłodzącym moduł fotowoltaiczny wg zależności:

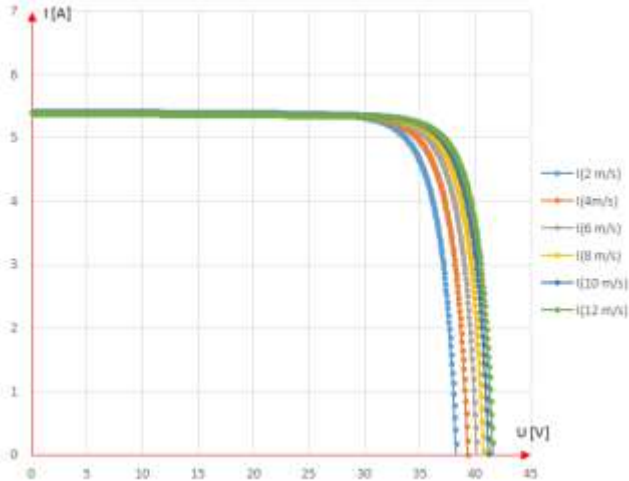
$$T_C = G_0 e^{(a+b\omega)} + T_{ot} \quad (9)$$

gdzie:  $T_C$  – temperatura pracy ogniwa fotowoltaicznego [K],  
 $G_0$  – natężenie promieniowania słonecznego [ $\text{W/m}^2$ ],  
 $T_{ot}$  – temperatura otoczenia [K],



$a, b$  – współczynniki uzależnione od sposobu zamontowania modułu fotowoltaicznego i od technologii wykonania,  $\omega$  – prędkość wiatru [m/s].

Wiatr jest czynnikiem wpływającym na zwiększenie intensywności odbierania ciepła z modułu fotowoltaicznego. Wzrost prędkości wiatru  $\omega$  [m/s] obniża temperaturę  $T_c$  ogniw znajdujących się w modułach fotowoltaicznych, co powoduje wzrost napięcia  $U$  pracy modułu fotowoltaicznego i jednoczesny wzrost generowanej mocy maksymalnej (rys. 24).



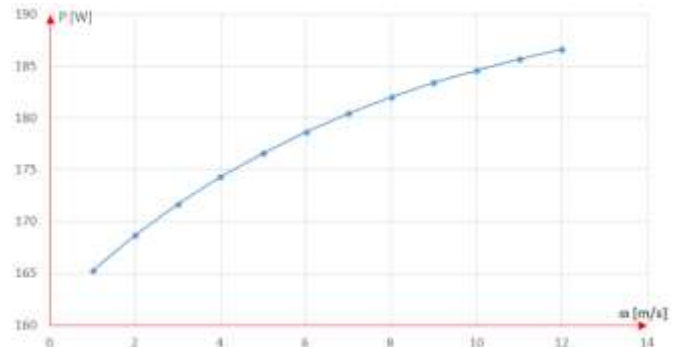
**Rys. 24.** Wpływ prędkości wiatru  $\omega$  na zmianę charakterystyki prądowo-napięciowej modułu fotowoltaicznego

Zmianę położenia punktów PMM na charakterystyce prądowo-napięciowej modułu fotowoltaicznego dla wybranych prędkości wiatru  $\omega$  ilustruje rysunek 25. Należy zauważyć, że wartość prądu maksymalnego  $I_m$  przy zmianach prędkości wiatru pozostaje bez zmian.



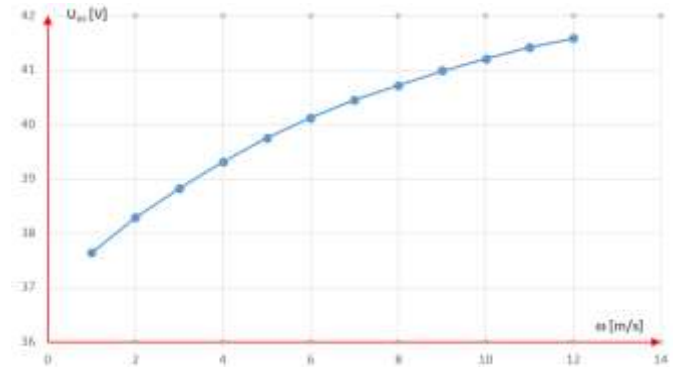
**Rys. 25.** Zmiana położenia punktów PMM na charakterystyce prądowo-napięciowej dla wybranych prędkości wiatru

Wzrost prędkości wiatru  $\omega$  powoduje nieliniowy wzrost mocy modułu fotowoltaicznego (rys. 26). Jest to efekt zwiększającego się napięcia (rys. 28) przy obniżaniu temperatury  $T_c$  ogniw fotowoltaicznych (rys. 27).

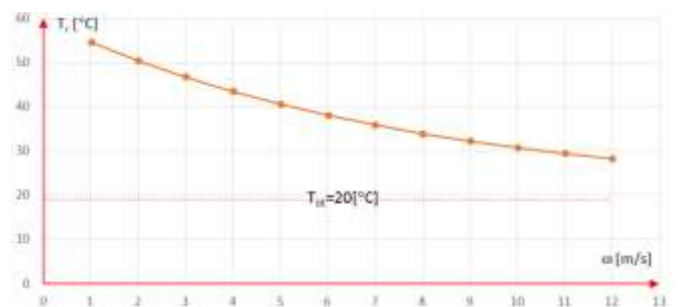


**Rys. 26.** Wpływ prędkości wiatru  $\omega$  na moc maksymalną modułu fotowoltaicznego

Napięcie  $U_{oc}$  ogniwa wzrasta nieliniowo wraz ze zwiększającą się prędkością wiatru  $\omega$ . Nieliniowa zmiana napięcia  $U_{oc}$  w funkcji prędkości wiatru  $\omega$  spowodowana jest nieliniową zdolnością obniżania temperatury  $T_c$  ogniwa fotowoltaicznego przy coraz większej prędkości wiatru  $\omega$  (rys. 28).

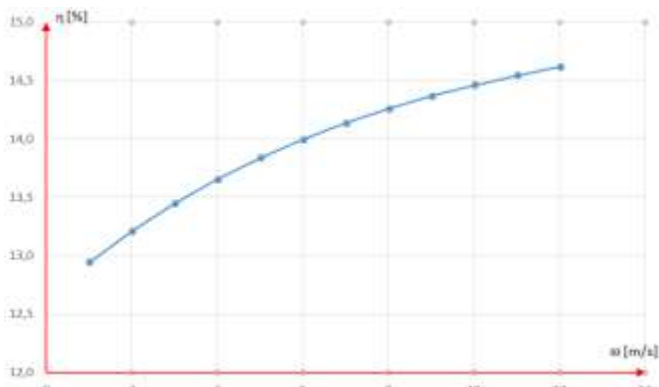


**Rys. 27.** Wpływ prędkości wiatru  $\omega$  na zmianę napięcia  $U_{oc}$  obwodu otwartego modułu



**Rys. 28.** Zmniejszenie temperatury pracy panelu fotowoltaicznego na skutek wzrostu prędkości wiatru.

Obniżenie temperatury  $T_c$  ogniwa wywołane przez wiatr sprawia, że współczynnik sprawności  $\eta$  modułu fotowoltaicznego rośnie (rys. 29).



**Rys. 29.** Zmiana współczynnika sprawności  $\eta$  modułu fotowoltaicznego pod wpływem zmian prędkości wiatru  $\omega$ .

Wiatr korzystnie wpływa na pracę modułu fotowoltaicznego obniżając jego temperaturę. Im większa prędkość wiatru  $\omega$  tym niższa jest temperatura  $T_C$  ogniw w module fotowoltaicznym i wyższe parametry wyjściowe modułu, a zarazem całego generatora fotowoltaicznego.

## PODSUMOWANIE

W artykule przedstawione zostały podstawowe rodzaje ogniw fotowoltaicznych z uwzględnieniem ich budowy i materiałów służących do ich wytworzenia. Zaprezentowano wyniki analizy modelu matematycznego modułu fotowoltaicznego zbudowanego w oparciu o model ogniwa fotowoltaicznego wykonanego w technologii polikrystalicznej. Model ogniwa uwzględniał wpływ natężenia promieniowania słonecznego, temperatury otoczenia oraz prędkości wiatru na pracę modułu. Przeanalizowano wpływ wymienionych czynników na elektryczne parametry pracy modułu fotowoltaicznego.

Artykuł ukazuje zależność mocy wyjściowej modułu fotowoltaicznego w zależności od czynników atmosferycznych. Pokazano, że wzrost temperatury otoczenia, ma negatywny wpływ na moc oraz współczynnik sprawności ogniw fotowoltaicznych poprzez zmniejszenie wartości napięcia całego modułu. Im wyższa jest temperatura otoczenia, tym większa jest temperatura pracy ogniwa fotowoltaicznego a tym samym mniejsze napięcie obwodu otwartego modułu. Istotne znaczenie ma wpływ wiatru, który w naturalny sposób obniża temperaturę pracy modułu fotowoltaicznego i poprawia niekorzystny wpływ wzrostu temperatury otoczenia na jego parametry pracy. Im większa prędkość wiatru tym większy jest współczynnik sprawności ogniwa fotowoltaicznego. Z analizy zawartej w artykule wynika, że wpływ temperatury otoczenia oraz chłodzenia modułu przez wiatr, mają bardzo niewielki wpływ na prądy płynące w module fotowoltaicznym. Można stwierdzić, że czynniki te nie wpływają ani na prąd zwarcia modułu ani na prąd w punkcie maksymalnej mocy.

Decydujący wpływ na wartości prądu modułu ma zmiana natężenia promieniowania słonecznego. Zmiana wartości prądu zwarcia jest wprost proporcjonalna do zmiany natężenia promieniowania słonecznego. Wzrost natężenia promieniowania słonecznego jest głównym czynnikiem wzrostu mocy modułu, ale powoduje też liniowy wzrost temperatury pracy modułu fotowoltaicznego. Wzrost temperatury pracy przekładają się na spadki napięcia wyjściowego modułu, a tym samym na spadek mocy. Są to jednak spadki pomijalnie małe w porównaniu z przyrostem mocy modułu pod wpływem przyrostu natężenia promieniowania słonecznego.

## BIBLIOGRAFIA

1. Figura R., *Laboratorium Fotowoltaiki-baza badawczo-dydaktyczna dla przemysłu*, 2010.
2. Gronowicz J., *Niekonwencjonalne Źródła Energii*, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji PIB, 2010.
3. Jabłoński W., Wnuk J., *Zarządzanie odnawialnymi źródłami energii*, Oficyna Wydawnicza Humanitas, Sosnowiec 2009.
4. Jastrzębska G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
5. Jastrzębska G., *Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa 2013.
6. Lewandowski W., *Proekologiczne odnawialne źródła energii* Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2007.
7. Nowicki M., *Nadchodzi era Słońca* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
8. Oszczak W., *Kolektory słoneczne i fotoogniwa w twoim domu* Wydawnictwa Komunikacji i Łączności sp. z o.o., Warszawa 2012.
9. Tytko R., *Odnawialne Źródła Energii*, Lotos Poligrafia sp. z o.o., 2009.
10. Tytko R., *Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej*, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków 2015.
11. Waclawek M., Rodziewicz T., *Ogniwa słoneczne. Wpływ środowiska naturalnego na ich pracę*, Wydawnictwo Naukowo Techniczne sp. z o.o., Warszawa 2014.
12. Walter J., *Nanokrystaliczne ogniwa fotowoltaiczne-budowa i właściwości elektrody pomocniczej* Politechnika Krakowska, Kraków 2014.
13. <http://solaris18.blogspot.com/2013/10/udzia-w-rynku-poszczegolnych.html>
14. <http://portalfotowoltaika.pl/panele-fotowoltaiczne-szyte-na-miare-kompleksowe-rozwiazania-dla-zakladow-produkcyjnych>
15. <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/module-temperature/sandia-module-temperature-model>

### The PV module operating parameters analysis

*The Ministry of Energy published the development plan for electromobility. According to the Ministry of Energy announcement the increasing demand for electric energy in the public transport sector should be expected. A simple PV module model built on the basis of the photovoltaic cell mathematical model is presented. The impact of weather conditions on the PV module electric power production are analyzed. The temperature impact, solar radiation impact and wind speed impact are taken into consideration. The estimated characteristics of the photovoltaic generator installed at the Kazimierz Pulaski University of Technology and Humanities in Radom are shown.*

Autorzy:

dr inż. **Radosław Figura** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu i Elektrotechniki, r.figura@uthrad.pl

inż. **Wojciech Zientarski** – Absolwent Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, wojciech.zientarski@gmail.com