

Łukasz NAGI*, Michał KOZIOŁ*

WPŁYW ZMIAN WARUNKÓW PRACY PANELI FOTOWOLTAICZNYCH NA WYDAJNOŚĆ SYSTEMU PV

Artykuł zawiera syntetyczny opis istniejących rozwiązań technologicznych dotyczących wykorzystania fotowoltaiki, jako ekologicznego źródła energii. Przedstawione zostały rodzaje ogniw PV, jakie z powodzeniem są stosowane oraz przegląd literaturowy oraz doniesienia o nowych rozwiązaniach istniejących technologii. Przedstawiono również informacje dotyczące wykorzystania nowych materiałów do zwiększania sprawności paneli fotowoltaicznych. W dalszej części opisano systemy i układy zwiększające sprawność instalacji używanych komercyjnie. W następnym rozdziale przedstawiono dane techniczne używanych w badaniach paneli oraz systemu nadążnego, którego są częścią. Zbadano wpływ różnych czynników na wydajność ogniw fotowoltaicznych. Przebadano 2 rodzaje paneli składające się z monokryształów krzemu i postaci polikryształicznej tego pierwiastka oraz przeanalizowano uzyskane dane.

SŁOWA KLUCZOWE: fotowoltaika, panele PV, grafen.

1. WSTĘP

Wraz z rozwojem technologicznym i zwiększającą się populacją ludzką na świecie zwiększyło się zapotrzebowanie na energię elektryczną, a jednocześnie wzrosła ilość zanieczyszczeń uwalnianych do środowiska w trakcie produkcji energii elektrycznej czy ciepła. Rozwój technologiczny począwszy od rewolucji przemysłowej gdzie istotnym źródłem energii było spalanie węgla, poprzez kolejne coraz bardziej innowacyjne metody pozyskiwania ciepła i energii elektrycznej takich jak energia ze spalania innych paliw, energia pochodząca z elektrowni atomowych aż do czasów współczesnych gdzie nadal najpopularniejsze są paliwa kopalne generuje wiele zanieczyszczeń, które uwalniane są do środowiska. Energia pochodząca z odnawialnych źródeł nazywana jest czystą energią, ponieważ nie generuje zanieczyszczeń w trakcie konwersji jednego rodzaju energii w drugi (w elektryczną lub ciepło). Niewspółmiernie niższe koszty środowiskowe działają na korzyść OZE i mogą być przeciwwagą dla niższych kosztów ekonomicznych pozyskiwania energii w trakcie spalania np. węgla. Innym powodem, dla którego powinno się rozwijać technologie wykorzystujące

* Politechnika Opolska

odnawialne źródła energii jest fakt, że paliwa konwencjonalne w niedługiej perspektywie mogą się skończyć. Ich ilość jest ograniczona, a co za tym idzie możliwy jest również wzrost ich cen, a tym samym koszt produkcji energii również może wzrosnąć. Szczególną uwagę należy zwrócić też, na politykę zmniejszania emisji zanieczyszczeń do środowiska, która również coraz bardziej wpływa na ekonomiczne aspekty związane z tradycyjnymi elektrowniami.

Odnawialne źródła energii, do których zaliczyć można między innymi promieniowanie słoneczne, wiatr, pływy morskie czy geotermia zyskują coraz większe znaczenie w energetyce światowej. Również w Polsce powstaje coraz więcej instalacji wykorzystujących nowoczesne źródła energetyczne niewpływające negatywnie na środowisko. Jednym ze źródeł z największym potencjałem rozwoju technologicznego i wzrostu wydajności, a tym samym możliwym do implementacji w polskim przemyśle elektroenergetycznym jest fotowoltaika, bazująca na zamianie energii promieniowania słonecznego na ciepło i energię elektryczną

2. OGNIWA PV

Efekt fotowoltaiczny to zjawisko fizyczne polegające na powstaniu siły elektromotorycznej w ciele stałym pod wpływem promieniowania świetlnego. Należy do zjawisk fotoelektrycznych wewnętrznych. W ogniwach fotowoltaicznych energię elektryczną generują fotony, które padają na półprzewodnik, z którego zbudowane są ogniwa. Sam proces konwersji zachodzi w strukturze krystalicznej materiału półprzewodnikowego [1]. Ogniwa fotowoltaiczne zbudowane mogą być z różnego rodzaju materiałów półprzewodnikowych. Najpowszechniejsze to ogniwa krzemowe. Kolejnymi grupami są ogniwa zbudowane z materiałów organicznych, półprzewodników nieorganicznych oraz zbudowane z pierwiastków należących do grup 11-16 układu okresowego pierwiastków [2]. Ze względu na typ materiału użytego do budowy ogniwa, a także na zróżnicowane rozwiązania technologiczne można podzielić istniejące moduły w różny sposób. Klasyfikacja może się odnosić zarówno do zastosowanego materiału jak i struktury półprzewodnika, jego grubości czy typu zastosowanego złącza.

Istniejące ogniwa fotowoltaiczne jak już wspomniano mogą różnić się od siebie parametrami, materiałem i technologią wykonania. Ten ostatni parametr wynika z ciągłego rozwoju techniki produkcji, ale i odkrywania kolejnych właściwości różnych materiałów, które pozwalają na efektywniejsze wykorzystanie energii pochodzącej ze słońca. Ogniwa PV można podzielić wg różnych klasyfikacji, ale najpopularniejszym jest podział ze względu na generację [3].

Generacja pierwsza cechuje się wysoką sprawnością sięgającą 14-22%. Inną zaletą jest szeroki rynek produktów tego typu, ponadto jest to pewna i spraw-

dzona technologia. Nazywana jest często mianem krzemowych ogniw fotowoltaicznych. W tej technologii ogniw różnią się poziomem krystalizacji krzemu:

- ogniw fotowoltaiczne z krzemu monokrystalicznego,
- ogniw fotowoltaiczne z krzemu polikrystalicznego,
- ogniw fotowoltaiczne z quasi-monokrystaliczne.

Wadą ogniw pierwszej generacji jest brak odporności na zabrudzenia i efekty zacienienia. Ta technologia jest również na granicy swoich możliwości [4, 5].

Ogniwa polikrystaliczne to najtańsze w produkcji ogniw z I generacji. Powstają z wykorzystaniem kryształów krzemu, który wykryzalizował w postaci wielu mniejszych kryształów. Uzyskują wyższą sprawność w wysokich temperaturach pracy w stosunku do ogniw wykorzystujących monokryształy krzemu.

Ogniwa monokrystaliczne wytwarzane są z jednego kryształu krzemu. Kryształ taki ma uporządkowaną strukturę wewnętrzną. Produkcja ogniw monokrystalicznych jest dość kosztowna, ponieważ wymaga wytworzenia pojedynczych dużych kryształów, posiadających kształt walca. Następnie tną się taki kryształ na pojedyncze plastry o grubości 2-3 mm. Ogniw zbudowane z monokryształów krzemu osiągają wyższą sprawność, sięgającą 20% i dużą żywotność.

Ogniwa quasi –monokrystaliczne są hybrydą powstałą z wykorzystania technologii produkcji ogniw mono- i polikrystalicznych. Składają się z monokryształu ułożonego w środku ogniw i polikryształu wypełniającego pozostałą powierzchnię. Takie połączenie zapewnia wyższą sprawność ogniw poprzez lepsze wypełnienie powierzchni ogniw oraz lepsze właściwości w zależności od temperatury.

3. NOWE TECHNOLOGIE W PRODUKCJI PANELI PV – GRAFEN

Jedną z najnowszych technologii, nad którymi prowadzone są badania naukowe jest zastosowanie grafenu w produkcji nowoczesnych paneli fotowoltaicznych. Sam grafen to płaska struktura złożona tylko z atomów węgla. Posiada jednoatomową grubość, a węgiel w nim zawarty łączy się w sześciokąty. Opis teoretyczny powstał w pierwszej połowie XX wieku. Prace nad tym materiałem zaowocowały wyprodukowaniem unikalnej struktury, posiadającej właściwości przewidziane wcześniej [6, 7]. Grafen posiada wiele pożądanych przez przemysł cech i właściwości [8]:

- niewielka rezystywność,
- bardzo wysoka ruchliwość elektronów w temperaturze pokojowej - μ około $2 \cdot 10^5 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ (dla porównania krzem ma $1500 \text{ cm}^2/\text{Vs}$),
- warstwa o grubości jednego atomu pochłania 2,3% białego światła [9],

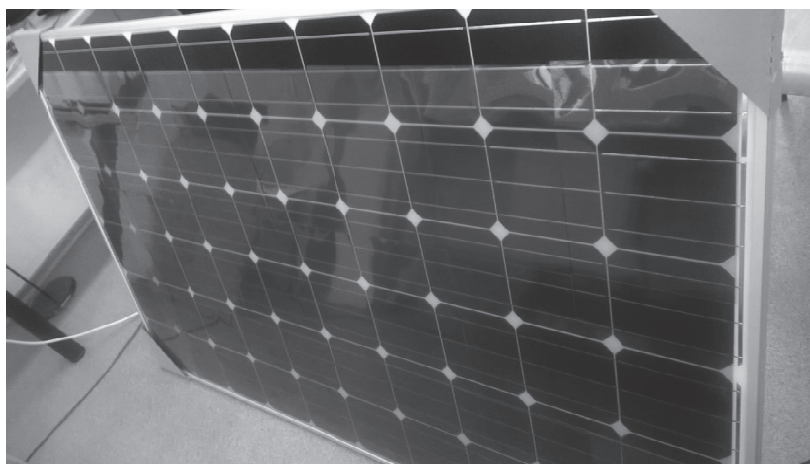
- jest bardzo dobrym przewodnikiem elektryczności i ciepła – zmierzona przewodność cieplna to od 4840 ± 440 do 5300 ± 480 W/mK [10],
- prędkość przepływu elektronów wynosi 1/300 prędkości światła w próżni,
- posiada dużą wytrzymałość na rozciąganie – 130 GPa. Stal czy kevlar mają około 0,4 GPa [11].

Przykładowym wykorzystaniem grafenu i jego właściwości może być przenikalność dla jednych substancji przy jednoczesnym nieprzepuszczaniu innych. Membrana z utlenionego grafenu jest przenikalna dla wody, ale dla gazów już nie. Daje to możliwość filtracji wody bez stosowania skomplikowanych procedur czy technologii używanych dziś. Grafen jest materiałem, który można traktować jak półprzewodnik lub półmetal. Jego pasmo przewodnictwa i pasmo walencyjne są ze sobą złączone, ale nie przenikają się. Oznacza to, że grafen posiada zerową przerwę energetyczną [12]. Ta unikalna struktura i właściwości stały się powodem gwałtownego wzrostu zainteresowania tym materiałem. Dziedziny zajmujące się urządzeniami mikroelektronicznymi czy optoelektronicznymi [13] czy też materiałami do przechowywania energii [14] z powodzeniem rozwijają technologie wykorzystujące tę alotropową odmianę węgla. W dodatku funkcjonalny grafen o zadowalającej, jakości można otrzymać za pomocą tanich procesów produkcyjnych, co prowadzi do niższych kosztów komercyjnych. Wykorzystanie grafenu w produkcji paneli fotowoltaicznych ma szerokie uzasadnienie ze względu na jego właściwości. Ogniwa słoneczne oparte na grafenie mogą zwiększyć absorbowanie promieniowania elektromagnetycznego pochodzącego z fali świetlnej. Transparentność materiału ma atrakcyjny potencjał aplikacyjny w przezroczystych elektrodach cienkowarstwowych (TE) czy ogniwach, w których procesy warunkuje się odpowiednim barwnikiem. Dobra TE powinna cechować się niską rezystywnością, wysoką przezroczystością. Dotychczas stosowano tlenki cynku z indem (ITO) lub fluorem (FTO), jako najlepiej sprawdzające się materiały elektrodowe. Jednak szereg wad takich jak wysokie ceny produkcji, małe zasoby indu czy kruchość cyny sprawiają, że poszukiwane są zastępcze materiały spełniające podobną rolę [15]. W ogniwach DSSC, które składa się z przezroczystej elektrody, mezoporowatej warstwy półprzewodnika (zwykle tlenku tytanu (IV)), jednowarstwowej powłoki z barwnikiem, elektrolitu i elektrody przeciwnej również można z powodzeniem stosować grafen. Barwnikowe ogniwa fotoczułe przyciągają uwagę niskim kosztem produkcji i porównywalną wydajnością do ogniw słonecznych z amorficznego krzemu [16, 17]. Same ogniwa DSSC są atrakcyjne dla komercyjnego użycia, ale do praktycznego ich użycia należałoby dokonać kilku ulepszeń. Poza zastąpieniem obecnych barwników opartych na rutenie, które są drogie, czy optymalizacją struktur TiO_2 można zastąpić drogą platynę używaną do produkcji elektrody przeciwnej grafenem. Ponadto ogniwo takie stanie się również bardziej elastyczne i wydajne [18]. Warstwa zawierająca dwutlenek tytanu jest głównym

składnikiem większości ogniw DSSC. Fotoelektrony generowane z molekuł barwnika są tą warstwą transportowane do anod [19]. To prowadzi do zmniejszenia wydajności ogniwa w związku z reakcją rekombinacji. Wprowadzenie grafenu, jako dodatkowej warstwy przylegającej do TiO_2 i tym samym zmniejszenie ilości rekombinacji prowadziłyby do uzyskania większej sprawności ogniwa [20].

4. ANALIZA UZYSKANYCH WYNIKÓW

W ramach przeprowadzonych symulacji przebadane zostały 2 różne panele fotowoltaiczne należące do I generacji. Oba oparte o struktury krzemu. Pierwszy z nich miał ogniwa zbudowane z monokryształu krzemu, natomiast drugi był typem polikrystalicznym. Rysunek 1 przedstawia jeden z analizowanych paneli fotowoltaicznych. Zarówno moduły z ogniw mono i polikrystalicznych należą do układu nadążnego, który zostanie zainstalowany na II kampusie Politechniki Opolskiej.



Rys. 1. Moduł monokrystaliczny użyty w badaniach. Na powierzchni panelu umieszczano półprzepuszczalną folię do symulacji zabrudzeń przez osiadający kurz, pył i inne zanieczyszczenia lotne

W skład układu obecnie wchodzi jeszcze system nadążny firmy Solar Tracker. Jest to dwuosiowy stojak obrotowy model DSO-1000. Tzw. tracker solarny daje możliwość podążania zamieszczonych na nim paneli fotowoltaicznych za największym w danym momencie promieniowaniem słonecznym. Według producenta daje to aż 60% więcej uzyskanej energii z procesów fotowoltaicznych. System ten różni się od systemu używającego GPS, który ustawia panele PV w kierunku przewidywanego przez niego największego poziomu promieniowa-

nia. Instalacja ta w założeniu podąża za słońcem i ustawia panele PV w konfiguracji dwóch płaszczyzn o różnych możliwościach nachylenia kątów. Kąt obrotu w azymucie zachód-wschód wynosi 160° , a w kierunku południe-północ 90° . Tracker obraca się za pomocą dwóch siłowników elektrycznych każdy o mocy 50 W. Stojak zaprojektowany jest do montażu od dwóch do czterech modułów fotowoltaicznych do 2 kW każdy.

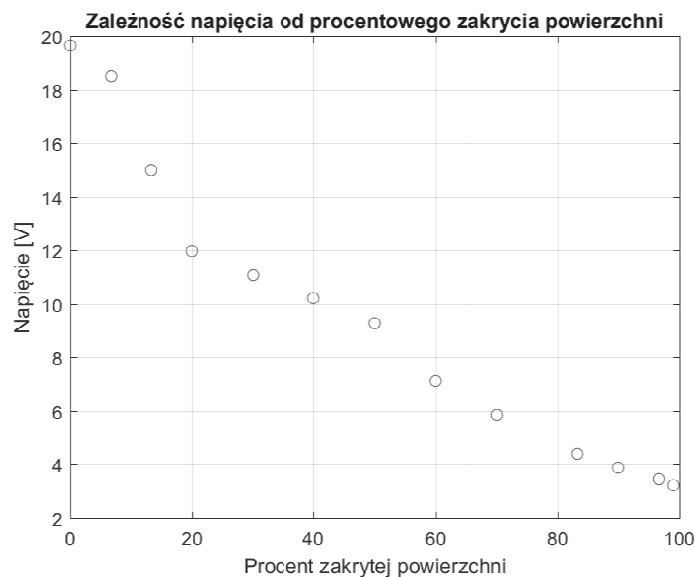
Panel fotowoltaiczny monokrystaliczny użyty do analizy wpływu zmian warunków zewnętrznych na jego wydajność miał zmierzoną moc producenta w standardowych warunkach (STC), gdzie nasłonecznienie wynosi 1000 W/m^2 , a temperatura ogniwa wynosi 25° C . Jego moc nominalna w punkcie mocy wynosi 270 Wp (Wat w MPP). Napięcie jałowe w STC wynosi 38,8 V, a prąd zwarciovowy 9,2 A. Napięcie i prąd przy mocy maksymalnej według specyfikacji wynosi odpowiednio 31,15 V i 8,68 A.

Podobne parametry posiadał drugi z przebadanych modułów. Polikrystaliczna struktura ogniw wpływała na inne reakcje panelu na symulowane zmiany warunków pracy. Panele polikrystaliczne są wydajniejsze od monokrystalicznych w wyższych temperaturach, jednak są bardziej czułe na zmiany natężenia światła słonecznego. Parametry, jakimi charakteryzował się moduł to moc nominalna w STC 270 Wp, napięcie jałowe 38,85 V, prąd zwarciovowy 9,15 A, napięcie przy mocy maksymalnej 31,4 V, natomiast natężenie prądu przy mocy maksymalnej 8,6 A.

Pierwszym z przeprowadzonych badań było sprawdzenie wpływu zabrudzenia modułu monokrystalicznego na napięcie i prąd generowany przez panel. Układ obciążony był żarówkami 5 W, 21 W oraz diodą (każdym obciążeniem osobno w celu dobrania odpowiedniego obciążenia). Zabrudzenia występujące na powierzchni paneli PV są dwojakiego rodzaju. Punktowe, najczęściej wynikające z ptasich odchodów, oraz występujące na całej powierzchni. Osiedlanie pyłów i zanieczyszczeń spowodowane jest wieloma czynnikami, spośród których wyróżnić można spalanie paliw kopalnych w piecach przydomowych, w elektrowniach czy też spaliny z samochodów. Gruba warstwa osiadających pyłów również skutecznie może tłumić docieranie promieniowania słonecznego do ogniw fotowoltaicznych. Symulacja zabrudzeń punktowych polegała na przesłanianiu części modułu nieprzepuszczalnym dla światła materiałem. Modelowanie zabrudzeń przeprowadzono od środka modułu w kierunku zewnętrznych ogniw znajdujących się przy ramie panelu. Rysunek 2 przedstawia charakterystykę napięciową modułu monokrystalicznego w zależności od procentowego przysłonienia jego powierzchni. Badanie przeprowadzono w warunkach laboratoryjnych z poziomem natężenia światła słonecznego wynoszącego ok. 900 luksów. Napięcie jałowe osiągnęło wartość 26,5 V.

Uzyskane wyniki pomiarowe oraz ich analiza wykazały, że spadek wydajności modułu z ogniwami monokrystalicznymi zależy nie tylko od powierzchni, która przestaje być aktywna w procesie fotowoltaicznym, ale również od tego,

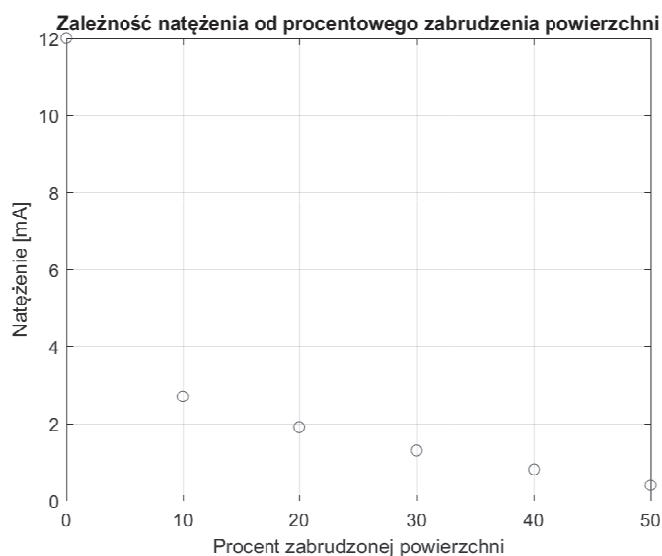
która część zostaje zabrudzona, a tym samym przestaje przetwarzać energię światła słonecznego na elektryczną. Początkowy wyraźny spadek napięcia i natężenia prądu dla obu pomiarów wykazał, że najbardziej wrażliwym na symulowane zmiany miejscem panelu jest jego środek co wynika z wewnętrznych połączeń ogniw i ilości diod. Elementy, które znajdowały się dalej od środka mniej wpływały na wydajność całego modułu i spadek parametrów był łagodniejszy. Można to tłumaczyć tym, że moduł skierowany w stronę źródła światła jest idealnie skierowany tylko centralną częścią. Ogniwa znajdujące się przy ramach modułu odbierały tylko część światła, ponieważ padało one pod innym kątem na tą część panelu. Wyplaszczenie wykresów w ich końcowej części sugeruje taką interpretację. Symulacja powierzchniowego zabrudzenia osiadającym pyłem równomiernie na całej powierzchni wykazała spadek napięcia z wartości 17,31 cV na 11,38 cV i odpowiednio spadek natężenia prądu na wyjściu z modułu monokrystalicznego z 10,2 mA do 6,2 mA. Natężenie oświetlenia wynosiło 350 luksów.



Rys. 2. Wykres zależności napięcia prądu na wyjściu modułu monokrystalicznego od procentowego zasłonięcia jego powierzchni. Natężenie oświetlenia 900 Lx

Dla modułów z ogniwami polikrystalicznymi wykonano takie same badania. Przykładowe uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 3. Tutaj również można zaobserwować spadek napięcia oraz natężenia prądu na wyjściu z panelu wraz z zakrywaniem powierzchni aktywnej. Panele polikrystaliczne są czulsze na zmiany natężenia oświetlenia, co można zauważyć na wykresach. Spadek parametrów wyjściowych, a tym samym spadek mocy jest jeszcze wyraźniejszy

niż w module z ogniwami monokrystalicznymi. Przy niskim natężeniu światła wystarczyło zakryć 10% powierzchni panelu z części centralnej, aby wywołać obniżenie wydajności o ponad 80%. Również symulacja powierzchniowego zabrudzenia osadami wykazała spadek napięcia i natężenia prądu odpowiednio z 17,84 V i 10,4 A do 14,44 V i 8,2 A.



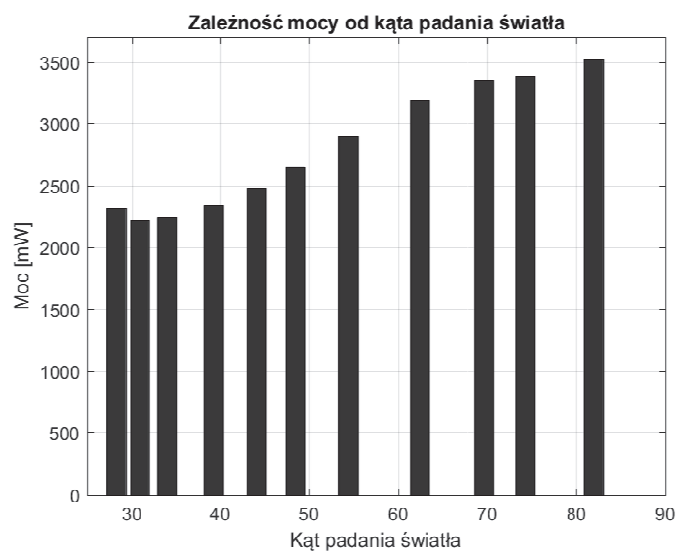
Rys. 3. Wykres zależności natężenia prądu na wyjściu modułu polikrystalicznego od procentowego zasłonięcia jego powierzchni. Natężenie oświetlenia 1100 Lux

Moduł z ogniwami polikrystalicznymi okazał się odporniejszy na zabrudzenia typu osadowego, natomiast ogniwa monokrystaliczne wykazują się większą odpornością na zabrudzenia punktowe, całkowicie nieprzepuszczalne.

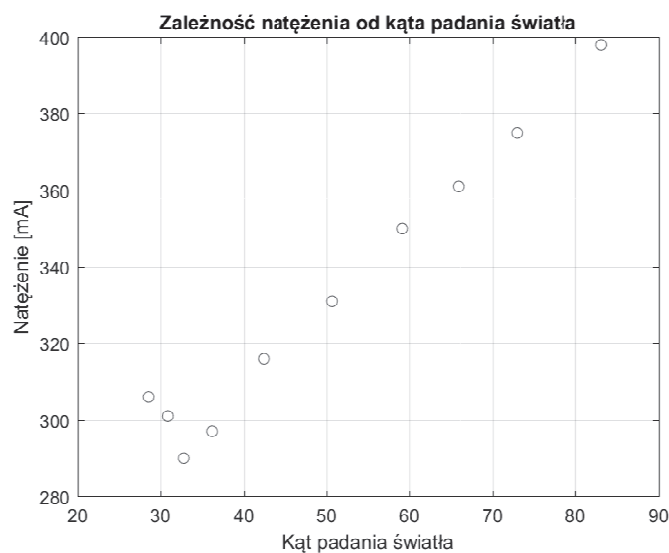
Kolejnym przeprowadzonym badaniem było wyznaczenie zależności wytwarzanego napięcia i natężenia prądu przez oba panele od kąta padania światła. Przeprowadzono symulacje dla 3 konfiguracji. Dla panelu monokrystalicznego obciążonego rezystancją 20Ω i natężeniu światła 2600 Lx pochodzącego z lampy o mocy 2000 W oddalonej o pewną odległość, dla panelu polikrystalicznego w takich samych warunkach oraz dla panelu polikrystalicznego obciążonego rezystancją 15Ω przy natężeniu światła 1900 luksów z lampy 1000 W. Na rysunkach 4 i 5 przedstawiono uzyskane zależności dla mocy i natężenia prądu dla różnych paneli.

Należy zwrócić uwagę, że wraz ze zwiększaniem się kąta padania światła (zmniejszanie się kąta nachylenia panelu względem osi poziomej dla paneli i nieruchomego źródła światła) w przypadku obu modułów malało uzyskiwane napięcie, natężenie i moc na wyjściu z paneli. Tłumaczyć to należy zjawiskiem

odbicia promieni świetlnych od powierzchni badanych modułów. Im większy kąt padania (większe odchylenie od prostopadłego ustawienia źródła i modułu) tym procentowo więcej promieni świetlnych odbijało się od paneli.



Rys. 4. Zależność uzyskanej mocy na wyjściu z panelu monokrystalicznego od kąta nachylenia modułu względem źródła światła



Rys. 5. Zależność natężenia prądu na wyjściu z panelu polikrystalicznego od kąta nachylenia modułu względem źródła światła. Natężenie światła 2600 Lx

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania paneli fotowoltaicznych miały na celu sprawdzenie ich wydajności w różnych warunkach pracy. Podawane przez producentów sprawności i maksymalne parametry uzyskiwane przez ich produkty otrzymywane są w specyficznych warunkach określonych standardami. Pomiary dokonane w ramach niniejszej pracy dyplomowej wykazały, że faktyczna wydajność w rzeczywistych warunkach pracy dwóch analizowanych modułów odbiega od specyfikacji podanej przez producenta. Również symulacja różnego rodzaju zabrudzeń istotnie wpływa na wydajność zarówno panelu monokrystalicznego jak i jego polikrystalicznego odpowiednika. Tłumienie światła przez różne filtry, jakimi mogą być osady kurzu, pyłów czy punktowe zabrudzenia paneli (jedne mniej inne bardziej transparentne) zmniejsza wydajność układu znacząco, a więc należałoby zawierać tego typu informację w specyfikacji produktu w części o konserwacji i użytkowaniu tych urządzeń. Spadek uzyskiwanej mocy wraz z ilością zabrudzeń powinien być również wskaźnikiem, że żaden system pozyskiwania energii bez odpowiedniej konserwacji nie będzie sprawny tak długo jak deklaruje producent.

Obecnie koszty zakupu paneli i systemów sterowania nimi w stosunku do uzyskiwanej energii nie sprawiają, że technologia ta jest bardzo popularna ze względów ekonomicznych. Zakupione przez Politechnikę Opolską panele i system nadążny wykazały, że w zimowych warunkach eksploatacji przy słabym naświetleniu, kącie padania światła determinowanym przez pozycję słońca na niebie o tej porze roku i w końcu zabrudzenia spowodowane zarówno przez zanieczyszczenia środowiska, wpływ fauny jak i sama pora zimowa (potencjalna szadź czy śnieg na powierzchni paneli), że z ekonomicznego punktu widzenia tu i teraz technologia ta nie może być popularna. Jednak należy zwrócić uwagę, że w warunkach ciągłej eksploatacji paliw kopalnych i konsekwencji takiego działania omówionego na wstępie pracy odnawialne źródła energii będą zyskiwały coraz większą popularność, a energia pochodząca ze światła słonecznego może być liderem w zaspokajaniu zapotrzebowania na ten produkt na świecie. Światło, które dociera do ziemi jest nieskończoną ilością potencjalnego bogactwa, które rozwijana technologia jest w stanie przekazać ludzkości.

LITERATURA

- [1] Korasiak P., Sprawność konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną współczesnych ogniw i modułów fotowoltaicznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 1, no. 7, pp. 124–129, 2017.
- [2] Jastrzębska G., *Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie*. Warszawa WKŁ, 2013.

- [3] Dumiszewska E., Wesołowski M., and Strupiński W., *Wielozłączowe ogniwa słoneczne*, *Przegląd Elektrotechniczny*, no. 5, pp. 215–221, 2014.
- [4] Głów A., Kurz D., *Sposoby ochrony instalacji fotowoltaicznych przed następstwami zacięń*, *Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering*, Issue 79, s. 113-120, 2014
- [5] Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G., *Analysis of the influence of shading by horizon of PV cells on the operational parameters of a photovoltaic system*, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4, s. 78-80, 2014
- [6] Novoselov K.S., Geim A.K., Morozov S. V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S. V., Grigorieva I. V., Firsov A.A., and Novoselov K.S., *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*, *Source: Science, New Series Gene Expression: Genes in Action*, vol. 306, no. 5696, pp. 183–191, 2007.
- [7] Berger C., Song Z., Li T., Li X., Ogbazghi A.Y., Feng R., Dai Z., Marchenkov A.N., Conrad E.H., First P.N., and de Heer W., *Ultrathin Epitaxial Graphite: 2D Electron Gas Properties and a Route toward Graphene-based Nanoelectronics*, *Journal of Physical Chemistry B*, vol. 108, no. 52, pp. 19912–19916, 2004.
- [8] Balandin A.A., Ghosh S., Bao W., Calizo I., Teweldebrhan D., Miao F., and Lau C.N., *Superior thermal conductivity of single-layer graphene*, *Nano Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 902–907, 2008.
- [9] Nair R.R., Blake P., Grigorenko A.N., Novoselov K.S., Booth T.J., Stauber T., Peres N.M.R., and Geim A.K., *Fine structure constant defines visual transparency of graphene*, *Science*, vol. 320, no. 5881, p. 1308, 2008.
- [10] Chen J.H., Jang C., Xiao S., Ishigami M., and Fuhrer M.S., *Intrinsic and extrinsic performance limits of graphene devices on SiO₂*, *Nature Nanotechnology*, vol. 3, no. 4, pp. 206–209, 2008.
- [11] Lee C., Wei X., Kysar J.W., and Hone J., *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene*, *Science*, vol. 321, no. 5887, pp. 385–388, 2008.
- [12] Hicks J., Shepperd K., Wang F., and Conrad E.H., *The structure of graphene grown on the SiC surface*, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 45, no. 15, p. 154002, 2012.
- [13] Bonaccorso F., Sun Z., Hasan T., and Ferrari A.C., *Graphene photonics and optoelectronics*, *Nature Photonics*, vol. 4, no. 9, pp. 611–622, 2010.
- [14] Yoo E.J., Kim J., Hosono E., Zhou H.S., Kudo T., and Honma I., *Large reversible Li storage of graphene nanosheet families for use in rechargeable lithium ion batteries*, *Nano Letters*, vol. 8, no. 8, pp. 2277–2282, 2008.
- [15] Wassei J.K. and Kaner R.B., *Graphene, a promising transparent conductor*, *Materials Today*, vol. 13, no. 3, pp. 52–59, 2010.
- [16] Gonçalves L.M., de Zea Bermudez V., Ribeiro H.A., and Mendes A.M., *Dye-sensitized solar cells: A safe bet for the future.*, *Energy & Environmental Science*, vol. 1, no. 6, p. 655, 2008.
- [17] Yum J.-H., Chen P., Grätzel M., and Nazeeruddin M.K., *Recent Developments in Solid-State Dye-Sensitized Solar Cells*, *ChemSusChem*, vol. 1, no. 8–9, pp. 699–707, 2008.

- [18] Ning Z., Fu Y., and Tian H., Improvement of dye-sensitized solar cells: what we know and what we need to know, *Energy & Environmental Science*, vol. 3, no. 9, p. 1170, 2010.
- [19] Grätzel M., Dye-sensitized solar cells, *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, vol. 4, no. 2, pp. 145–153, 2003.
- [20] Yang N., Zhai J., Wang D., Chen Y., and Jiang L., Two-dimensional graphene bridges enhanced photoinduced charge transport in dye-sensitized solar cells, *ACS Nano*, vol. 4, no. 2, p. 887, 2010.

THE INFLUENCE OF CHANGE OF WORKING CONDITIONS FOR PHOTOVOLTAIC PANELS ON EFFICIENCY OF THE PV SYSTEM

The paper contains a synthetic description of existing technological solutions regarding the use of photovoltaics as an ecological energy source. The types of PV cells that have been successfully used and the literature review as well as reports on new solutions of existing technologies have been presented. Information was also provided on the use of new materials for increasing the efficiency of photovoltaic panels. The following sections describe systems and arrangement that increase the efficiency of commercial installations. The next chapter presents the technical data used in the framework of the paper thesis and the follow-up system of which they are part. The influence of various factors on the efficiency of photovoltaic cells was examined. Two types of panels consisting of silicon mono - and a polycrystalline form of this element were tested and the obtained data analyzed. The conclusions are presented in the last chapter of the paper.

(Received: 30.01.2018, revised: 23.03.2018)