

**Krzysztof BARAN, Marcin LEŚKO, Henryk WACHTA**POLITECHNIKA RZESZOWSKA, KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I ELEKTROENERGETYKI,  
ul. Wincentego Pola 2, 35-959 Rzeszów**Badania pozycjonowania paneli fotowoltaicznych na terytorium Polski****Mgr inż. Krzysztof BARAN**

Pracuje w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej. Studia wyższe ukończył w 2011r. na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej. Obecnie jest uczestnikiem studiów doktoranckich i przygotowuje rozprawę doktorską z zakresu techniki świetlnej.



e-mail: kbaran@prz.edu.pl

**Mgr inż. Marcin LEŚKO**

Pracuje na stanowisku asystenta w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej. Studia wyższe ukończył w 2011 roku na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Rzeszowskiej, gdzie następnie rozpoczął studia doktoranckie. Obecnie przygotowuje rozprawę doktorską z zakresu techniki świetlnej.



e-mail: mlesko@prz.edu.pl

**Dr inż. Henryk WACHTA**

Pracuje na stanowisku adiunkta w Katedrze Energoelektroniki i Elektroenergetyki Politechniki Rzeszowskiej. Studia wyższe ukończył w 1993 roku na Wydziale Elektrotechniki Politechniki Rzeszowskiej. Doktorat z zakresu techniki świetlnej uzyskał w 2004 roku na Politechnice Warszawskiej. W 2007 roku uzyskał certyfikat Eksperta Polskiego Komitetu Oświateniowego. Współautor dwóch patentów w dziedzinie konstrukcji opraw oświetleniowych. Prowadzi badania z zakresu wybranych problemów iluminacji architektonicznych.



e-mail: hwachta@prz.edu.pl

**Streszczenie**

W artykule, metodą symulacyjną, wyznaczono najbardziej korzystny kąt pochylenia panelu fotowoltaicznego dla wybranych miejscowości w Polsce, a następnie zasymulowano jednoosiowy, nadążny system ruchu za Słońcem. Roczną energię, uzyskaną przy wykorzystaniu systemu nadążnego, porównano z energią, uzyskaną z panelu fotowoltaicznego, który był zamontowany w stałej pozycji nakierowania.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, promieniowanie słoneczne, optymalny kąt pochylenia, system nadążny za Słońcem.

**Research of the positioning of photovoltaic panels in Poland****Abstract**

The paper presents the results of simulation research on the optimal tilt angle of photovoltaic panels in selected cities of Poland. The simulation was performed using the specialized computer software - Insel, which allowed simulating the work of the renewable energy sources. For the survey simulation there was selected a monocrystalline silicon photovoltaic panel of 185 W power and 14,49 % efficiency. The optimal tilt angle of panels, at which the biggest value of energy was obtained, based on the simulation, was respectively: 24° for Warsaw, 27° for Wrocław, 30° for Gdansk and Poznan and 38° for Rzeszow. In the second part of the paper there is described the simulation of a single-axis solar-tracking system performed with use of a computer application. The simulation was made for the same cities of Poland, as that for the optimal value of the tilt angle of the photovoltaic module. The researched solar-tracking system tracked the movement of the Sun in the vertical axis, while in the horizontal axis there was set the permanent optimal value of the panel tilt, determined based on the simulation. The application of the mentioned solar-tracking system caused the growth of the obtained energy from 18% (Warsaw) to 26% (Gdansk), depending on the place of the panel location.

**Keywords:** photovoltaic, solar radiation, optimal tilt angle, solar-tracking system.

**1. Wstęp**

Energia elektryczna uzyskiwana przy wykorzystaniu paneli fotowoltaicznych należy do jednych z najbardziej przyjaznych środowisku sposobów pozyskiwania "zielonej energii". Przyjęta

przez rząd Polski Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych [14] oraz opracowany przez Ministerstwo Gospodarki dokument " Polityka energetyczna Polski do 2030 roku " [11] , zakładający wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w finalnym zużyciu energii co najmniej do poziomu 15 procent w 2020 roku sprawia, że taki rodzaj pozyskiwania energii jest szczególnie wspierany przez rząd, a instalacje takie mogą liczyć na dodatkowe dotacje i ulgi [12].

Na obecnym etapie rozwoju technologicznego dąży się do uzyskania jak największej sprawności przetwarzania promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Wśród dostępnych na rynku paneli fotowoltaicznych największą sprawność ( dochodzącą do ok. 17% ) posiadają moduły wykonane w technologii krzemu monokrystalicznego [13]. Oprócz sprawności ogniwa fotowoltaicznego, innym ważnym zagadnieniem, wpływającym na wielkość uzyskanej energii jest optymalne ustawienie kąta pochylenia panelu dla danej miejscowości. W celu maksymalnego wykorzystania promieniowania słonecznego, docierającego do powierzchni modułów, stosowane są również tzw. systemy nadążne za Słońcem.

**2. Promieniowanie słoneczne w Polsce**

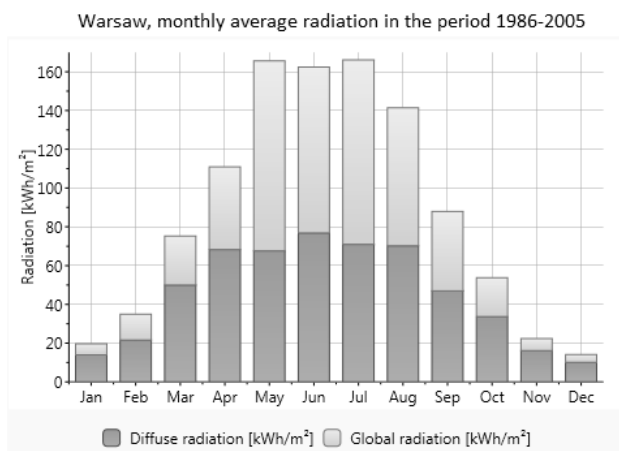
Zasoby energii słonecznej w Polsce, jak również w innych krajach europejskich związane są głównie z położeniem geograficznym oraz występującymi lokalnie warunkami meteorologicznymi.

Do scharakteryzowania promieniowania słonecznego najczęściej używane są następujące wielkości:

- napromieniowanie, czyli wartość strumienia energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni poziomej/pochylonej;
- usłonecznienie, czyli liczbę godzin słonecznych w ciągu roku,
- strukturę promieniowania słonecznego, czyli udział poszczególnych składowych promieniowania słonecznego (promieniowanie bezpośrednie, rozproszone oraz odbite) w promieniowaniu całkowitym,
- rozkład w czasie promieniowania słonecznego w cyklu rocznym, sezonowym oraz dobowym.

Wielkość energii słonecznej, która dociera do dowolnego odbiornika jest bardzo zróżnicowana w zależności od lokalizacji. Warunki klimatyczne Polski związane są ze znaczną zmianą kąta padania promieniowania słonecznego w cyklu rocznym oraz ze ścieraniem się dwóch frontów atmosferycznych - atlantyckiego i kontynentalnego, powodujące duże zróżnicowanie warunków klimatycznych. Częste zachmurzenia oraz duże opady jesienią i wiosną, a także niskie temperatury powietrza zimą, wpływają na bardzo nierównomierny rozkład napromieniowania w cyklu rocznym [4]. Około 80 % całkowitego rocznego napromieniowania przypada na siedem miesięcy okresu wiosenno-letniego (od kwietnia do października), przy czym czas operacji słonecznej w okresie letnim wydłuża się do 16 godzin dziennie, natomiast

w zimie skraca się do 8 godzin dziennie [5]. Charakterystyczne dla promieniowania słonecznego w Polsce jest duży udział składowej rozproszonej w promieniowaniu całkowitym. W ciągu roku udział ten wynosi powyżej 50%, a w czasie zimowym (listopad - luty) osiąga wartości maksymalne i zawiera się w przedziale od 65% do 73% [1].



Rys. 1. Średnie miesięczne napromieniowanie dla Warszawy w latach 1986-2005

Fig. 1. Monthly average radiation for Warsaw in the years 1986-2005

Na rys. 1 został przedstawiony wykres obrazujący średnie miesięczne wartości napromieniowania słonecznego dla Warszawy w latach 1986-2005. Kolorem pomarańczowym zaznaczono udział promieniowania rozproszonego, natomiast kolorem żółtym promieniowanie całkowite [10].

Na podstawie ekspertyzy Komitetu Termodynamiki i Spalania PAN w Polsce wydzielono 11 regionów pod względem przydatności dla energetyki słonecznej. Najbardziej uprzywilejowanymi rejonami są regiony Polski północnej oraz południowo-wschodniej, najmniej korzystne warunki panują w rejonie Górnego Śląska oraz Warszawy [8].

### 3. Wpływ usytuowania panelu fotowoltaicznego na wartość promieniowania docierającego do jego powierzchni

Do dowolnie pochylonej powierzchni względem poziomu dociera promieniowanie bezpośrednie, promieniowanie rozproszone przez atmosferę, jak również promieniowanie odbite od gruntu oraz znajdujących się w pobliżu obiektów. Całkowita wartość natężenia promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni panelu fotowoltaicznego jest ściśle związana z kątem pochylenia tego panelu.

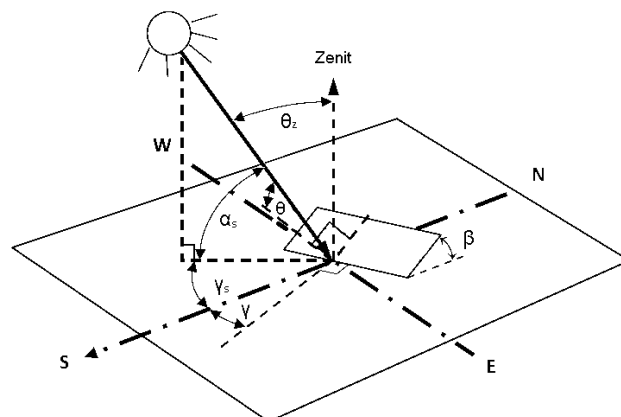
Na rys. 2 przedstawiona została powierzchnia modułu nachylona pod kątem  $\beta$  do powierzchni Ziemi, odchylona od kierunku południowego o kąt azymutalny  $\gamma$ . Zaznaczona została normalna do powierzchni poziomej Ziemi oraz do powierzchni pochylonej pochłaniającej promieniowanie słoneczne, kąt padania bezpośredniego promieniowania słonecznego  $\theta$  na powierzchnię pochyloną oraz kąt zenitalny bezpośredniego promieniowania słonecznego  $\theta_z$ .

W wybranych pozycjach literatury jako najbardziej korzystny kierunek ustawienia modułów w warunkach Polski, podawany jest kierunek południowy [3, 6, 7]. Dla panelu ustawionego w takim kierunku, kąt padania bezpośrednich promieni słonecznych można wyznaczyć z następującej zależności [2]:

$$\cos(\theta) = \sin(\delta)[\sin(\varphi - \beta)] + (\cos(\delta)\cos(\omega)\cos(\varphi - \beta), \quad (1)$$

gdzie:  $\theta$  - kąt padania bezpośrednich promieni słonecznych,  $\delta$  - wartość deklinacji słonecznej,  $\varphi$  - szerokość geograficzna danej

lokalizacji,  $\beta$  - kąt nachylenia płaszczyzny modułów,  $\omega$  - wartość kąta położenia Słońca na nieboskłonie.



Rys. 2. Podstawowe zależności pomiędzy położeniem Słońca a powierzchnią nachyloną do poziomu, na którą pada promieniowanie słoneczne

Fig. 2. Basic dependencies between the Sun's location and the surface tilted to the level on which the solar radiation impinges

Biorąc pod uwagę tylko składową bezpośrednią promieniowania słonecznego, to maksymalny zysk dla tego typu promieniowania występuje wtedy, gdy promienie padają prostopadle na powierzchnię panelu. Natomiast biorąc pod uwagę składową rozproszoną promieniowania słonecznego to maksymalny zysk występuje, gdy panel jest ustawiony w pozycji poziomej. Najmniejszy udział w promieniowaniu całkowitym ma składowa odbita, która w największym stopniu pochłaniania jest przy położeniu pionowym panelu. Dlatego też należy dążyć do zapewnienia odpowiedniego kąta pochylenia panelu, maksymalizującego jego zyski energetyczne w przewidzianym czasie eksploatacji, uwzględniając wszystkie składowe promieniowania słonecznego.

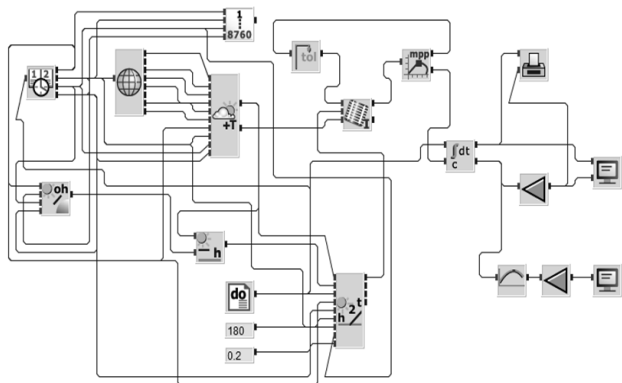
Dla instalacji pracującej przez cały rok w warunkach Polski, w wybranej literaturze przedmiotu jako optymalny kierunek ustawienia modułów zgodnie podawany jest kierunek południowy, natomiast co do optymalnego kąta pochylenia występują już rozbieżności. W pozycji [6] jako optymalny kąt pochylenia dla instalacji pracującej przez cały rok, przy uwzględnieniu wszystkich składowych promieniowania słonecznego podana jest wartość kąta równa szerokości geograficznej danej miejscowości pomniejszona o ok.  $5 \div 10^\circ$ , co daje przedział kątowy od ok.  $39^\circ$  do ok.  $44^\circ$ . W pozycji [7] jako optymalny kąt pochylenia panelu dla warunków polskich podana jest przedział kątowy od  $30^\circ$  do  $40^\circ$ , natomiast w pozycji [3] podana jest jedna wartość kąta i wynosi ona  $30^\circ$ .

### 4. Badania nad optymalnym kątem pochylenia paneli fotowoltaicznych w wybranych miastach Polski

Optymalny kąt pochylenia modułów fotowoltaicznych został wyznaczony przy wykorzystaniu specjalistycznego oprogramowania komputerowego - Insel [9]. Program ten umożliwia symulację pracy odnawialnych źródeł energii takich jak: kolektory słoneczne, turbiny wiatrowe czy panele fotowoltaiczne. Najbardziej jednak rozbudowaną częścią programu jest część związana z fotowoltaiką. W programie dostępna jest obszerna baza paneli fotowoltaicznych, które są dostępne w sprzedaży na rynku. Charakterystyczną cechą wymienionego oprogramowania są bloki symulacyjne, przy pomocy których, łącząc wejścia jednych bloków z odpowiednimi wyjściami innych bloków tworzony jest układ symulacyjny.

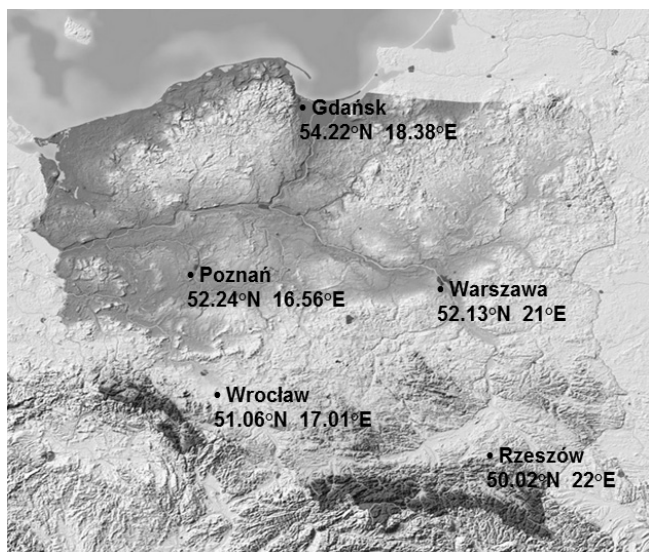
Na rys. 3 pokazany został układ symulacyjny pozwalający wyznaczyć optymalny kąt pochylenia panelu dla wybranej miejscowości. Głównymi elementami przedstawionego modelu jest blok pozwalający określić czas symulacji, blok zawierający dane

meteorologiczne wybranej miejscowości, blok z wbudowaną bazą paneli fotowoltaicznych oraz możliwością ustawienia kąta azymutalnego i kąta pochylenia wybranego panelu, blok MPP zapewniający pracę panelu z maksymalną mocą przy danych warunkach meteorologicznych oraz blok całkujący uzyskaną energię w określonym przedziale czasu.



Rys. 3. Model symulacyjny w programie Insel  
Fig. 3. Simulation model in the Insel program

Do sondażowych symulacji wybrano panel fotowoltaiczny na bazie krzemu monokrystalicznego o mocy 185 W i sprawności wynoszącej 14,49 %. Panel ustawiony został w kierunku południowym a następnie kąt pochylenia panelu zmieniany był od 0° do 90° z krokiem co jeden stopień. Czas symulacji został ustalony na jeden rok. Symulację przeprowadzono dla wybranych pięciu miast Polski (Gdańsk, Poznań, Rzeszów, Warszawa oraz Wrocław) przedstawionych na rys. 4. Miejscowości te obejmują cały zakres zmian szerokości geograficznej dla terytorium Polski oraz leżą w różnych rejonach scharakteryzowanych pod względem przydatności dla energetyki słonecznej.



Rys. 4. Wybrane do symulacji miasta Polski  
Fig. 4. Polish cities selected for simulation

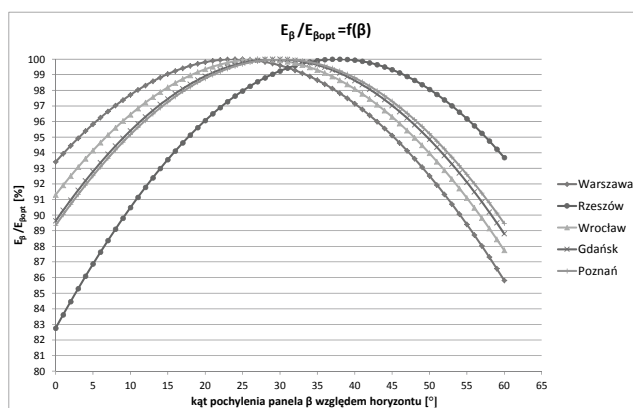
Optymalny kąt pochylenia paneli, przy którym uzyskana została największa wartość energii, na podstawie symulacji, wyniósł odpowiednio: 24° dla Warszawy, 27° dla Wrocławia, 30° dla Gdańska i Poznania oraz 38° dla Rzeszowa. Największą wartość energii uzyskano dla Rzeszowa – 223,45 kWh, natomiast najmniejszą dla Warszawy – 156,04 kWh. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Uzyskana roczna energia oraz optymalny kąt pochylenia panelu w wybranych miastach Polski

The obtained annual energy and the optimal panel tilt angle in the selected cities of Poland

Miasto	Uzyskana roczna energia, kWh	Optymalny kąt pochylenia panelu, °
Gdańsk	197,77	30
Poznań	182,31	30
Rzeszów	223,45	38
Warszawa	156,04	24
Wrocław	180,21	27

Na rys. 5 został przedstawiony wpływ zmian wartości kąta pochylenia panelu na wielkość uzyskanej rocznej energii. Na wykresie został zaznaczony procentowy stosunek uzyskanej rocznej energii dla danego kąta pochylenia do energii uzyskanej przy kącie optymalnym w funkcji kąta pochylenia panelu fotowoltaicznego.



Rys. 5. Wpływ kąta pochylenia panelu na wartość uzyskanej energii  
Fig. 5. Influence of the tilt angle on the value of the obtained energy

Ustawienie panelu fotowoltaicznego pod kątem odbiegającym o kilka lub kilkanaście stopni od wyznaczonej wartości optymalnej nie powodowało gwałtownego spadku uzyskanej energii rocznej. Uzyskana energia w takim przypadku była mniejsza zaledwie o ok. kilka procent. Natomiast, gdy ustawienie kąta pochylenia panelu odbiegało znacznie od wyznaczonej wartości optymalnej, uzyskana energia w takim przypadku była niższa o kilkanaście lub kilkadziesiąt procent. Przykładowo, gdy panel fotowoltaiczny był ustawiony w Warszawie pod kątem 60° uzyskana roczna energia była niższa o 15% w stosunku, gdy panel był ustawiony pod optymalnym kątem, w tym przypadku dla Warszawy wynoszącego 24°.

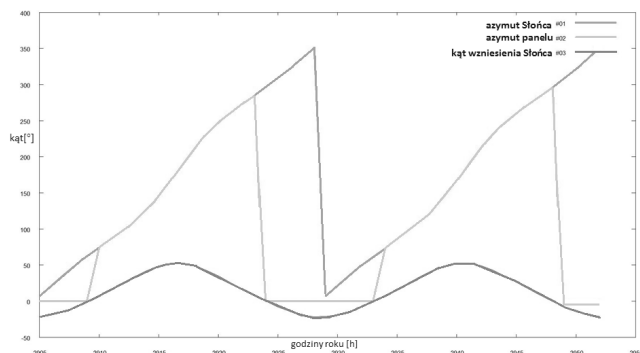
## 5. System nadążny za Słońcem - badania symulacyjne

Każde nieruchome ustawienie paneli fotowoltaicznych skutkuje tym, że część promieniowania słonecznego jest niewykorzystywana przez system fotowoltaiczny. W celu eliminacji tego mankamentu buduje się systemy nadążne, śledzące pozorny ruch Słońca po nieboskłonach. Systemy takie można podzielić na systemy jednoosiowe, w których ruch Słońca śledzony jest w jednej osi (poziomej lub pionowej) oraz systemy dwuosiowe, w których śledzenie ruchu Słońca odbywa się równocześnie w obydwu osiach.

Przy wykorzystaniu oprogramowania Insel, zamodelowany został jednoosiowy system nadążny za Słońcem. Koszt zakupu takiego systemu, w zależności od rozmiaru powierzchni, na której mogą być zainstalowane panele fotowoltaiczne wynosi ok.

kilkunastu tysięcy złotych. Producenci deklarują, że zastosowanie takiego systemu powoduje wzrost uzyskanej energii do 35% w zależności od lokalizacji. Dla warunków polskich, wzrost ten wynosi ok. 25% [8].

Symulację wykonano dla tych samych miast Polski, dla których wcześniej wyznaczono optymalny kąt pochylenia oraz przy wykorzystaniu tego samego panelu fotowoltaicznego. Symulowany jednoosiowy system nadążny za Słońcem, zmienia pozycję w osi pionowej podążając za Słońcem ze wschodu na zachód, natomiast w osi poziomej, został ustawiony stały, optymalny kąt pochylenia, który został wyznaczony w poprzednim punkcie artykułu.



Rys. 6. Jednoosiowy układ nadążny za Słońcem - zasada działania  
Fig. 6. One-axis solar-tracking system - principle of operation

Na rys. 6 został przedstawiony wycinek dwóch dni z symulacji, obrazujący zasadę działania jednoosiowego systemu nadążnego za Słońcem. Jeżeli Słońce pojawiało się nad horyzontem, a więc kąt wzniesienia Słońca (kolor niebieski) był dodatni, wówczas kąt azymutalny panelu fotowoltaicznego (kolor zielony), przyjmował wartość równą kątowi azymutalnemu Słońca (kolor fioletowy).

Tab. 2. Uzyskana roczna energia przy wykorzystaniu jednoosiowego systemu nadążnego za Słońcem w wybranych miastach Polski

Tab. 2. The obtained annual energy using the single-axis solar-tracking system in the selected cities of Poland

Miasto	Uzyskana roczna energia przy stałym pochyleniu panelu, kWh	Uzyskana roczna energia z systemem nadążnym jednoosiowym, kWh	Wzrost uzyskanej energii, %
Gdańsk	197,77	248,65	25,72
Poznań	182,31	219,52	20,4
Rzeszów	223,45	270,72	21,15
Warszawa	156,04	184,25	18,07
Wrocław	180,21	220,8	19,98

W tabeli nr. 2 porównano uzyskaną energię, gdy panel fotowoltaiczny był zainstalowany w stałej pozycji oraz gdy zastosowano jednoosiowy system nadążny za Słońcem. Zastosowanie takiego systemu spowodowało wzrost uzyskanej energii od ok. 18% (Warszawa) do ok. 26% (Gdańsk), co generalnie pokrywa się z informacjami, podawanymi przez producentów wymienionych systemów [8].

## 6. Wnioski

Na podstawie zrealizowanych badań można wyprowadzić kilka istotnych wniosków.

Niemożliwe jest wyznaczenie jednej wartości kąta pochylenia panelu fotowoltaicznego, przy którym uzyskuje się maksymalną

energię, dla każdej miejscowości w warunkach Polski. Optymalna wartość pochylenia jest inna dla każdej miejscowości, co związane jest z położeniem geograficznym, ukształtowaniem terenu czy stopniem zanieczyszczenia powietrza, wpływającym na wartość nasłonecznienia danej miejscowości.

Podawana w literaturze wartość optymalnego kąta pochylenia panelu (30° - 45°) generalnie obejmuje przedział, dla którego możliwe jest uzyskanie maksymalnej energii rocznie w warunkach Polski. W czasie badań, gdy panel był ustawiony w podanym przedziale kątowym, w zależności od miejscowości, uzyskał od 96% do 100% maksymalnej energii. Odchylenie o kilka lub kilkanaście stopni od wartości optymalnej nie powoduje drastycznego spadku uzyskanej energii (ok. kilka %) i dla małych instalacji słonecznych będzie ono mało odczuwalny. Natomiast w dużych instalacjach fotowoltaicznych, produkujących energię rzędu MWh rocznie, należy dążyć (np. drogą wcześniejszych symulacji) do wyznaczenia optymalnego kąta pochylenia, ponieważ spadek efektywności o kilka % spowoduje znaczne straty potencjalnej energii słonecznej.

W celu zwiększenia wydajności pracy paneli fotowoltaicznych, możliwe jest zastosowanie jedno lub dwuosiowego systemu nadążnego za Słońcem. Podczas symulacji w zależności od wybranego miasta, zastosowanie jednoosiowego systemu nadążnego za Słońcem spowodowało roczny wzrost uzyskanej energii od 18% do 26%. Koszt zakupu takiego systemu (ok. kilkanaście tysięcy złotych) jest jednak na tyle duży, że inwestycja taka jest mało opłacalna i dedykowana głównie tam, gdzie nie ma możliwości zainstalowania dodatkowych paneli słonecznych. Natomiast gdy dysponuje się wystarczającym miejscem na zainstalowanie dodatkowych paneli, to takie rozwiązanie wydaje się być zdecydowanie bardziej opłacalne niż zakup systemu nadążnego za Słońcem.

## 7. Literatura

- [1] Chwieduk D.: Energetyka słoneczna w Polsce i na świecie. Materiały XII Szkoły Optoelektroniki, Kazimierz Dolny 22-24 maja 1977.
- [2] Chwieduk D.: Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku. Praca habilitacyjna, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 2006.
- [3] Łotocki H.: ABC systemów fotowoltaicznych sprzężonych z siecią energetyczną. Poradnik dla instalatorów. Wydawnictwo KaBe, Krosno 2011.
- [4] Rodziejewicz T., Waclawek M.: Ogniwa słoneczne - wpływ środowiska naturalnego na ich pracę. Warszawa, WNT 2011.
- [5] Rodziejewicz T., Ząbkowska-Waclawek M., Żdanowicz T.: Wykorzystanie modułów fotowoltaicznych w obszarach o większych szerokościach geograficznych, Chem. Dydak. Ekol. Metrol. 1998.
- [6] Sarniak M.: Podstawy fotowoltaiki. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [7] Szymański B.: Małe instalacje fotowoltaiczne. Wydawnictwo GLOBEnergia.
- [8] <http://www.ecosolar.pl/systemy-sledzace-slonce-etatrack-c-49.html>
- [9] <http://www.inseleu>
- [10] <http://www.meteororm.com/products/meteororm-software/>
- [11] <http://www.mg.gov.pl/files/upload/8134/Polityka%20energetyczna%20oost.pdf>
- [12] <http://www.mg.gov.pl/node/16913>
- [13] <http://www.soldar.pl/oferta/fotowoltaika/moduly-fotowoltaiczne/>
- [14] [http://www.ure.gov.pl/pl/prawo/prawowspolnotowe/dyrektywy/4925\\_DzU-UE-L-0914016.html](http://www.ure.gov.pl/pl/prawo/prawowspolnotowe/dyrektywy/4925_DzU-UE-L-0914016.html)

otrzymano / received: 08.07.2013

przyjęto do druku / accepted: 02.09.2013

artykuł recenzowany / revised paper