



Monika PEPEŁOWSKA\*, Piotr OLCZAK\*\*

### **Problematyka doboru kąta posadowienia paneli fotowoltaicznych z uwzględnieniem profilu zapotrzebowania na energię**

Streszczenie: W ostatnich latach obserwowany jest rozwój zastosowania fotowoltaiki zarówno na świecie, jak i w warunkach krajowych, a tym samym wzrost wykorzystania instalacji w bilansie odnawialnych źródeł energii (OZE). Nieodłącznie powiązana z tym faktem jest spadkowa tendencja cen modułów fotowoltaicznych. Szczególne rozpowszechnienie zyskują mikroinstalacje prosumeckie o mocy do 10 kWp.

Dla maksymalizacji pozyskiwania energii słonecznej przy zastosowaniu w gospodarstwie domowym paneli fotowoltaicznych stosowany jest szereg metod. Jedną z możliwości jest sterowanie nachyleniem ogniw, a tym samym regulacja kąta ich posadowienia. Program priorytetowy Prosument (Program priorytetowy 2016) utworzony na podstawie Ustawy o odnawialnych źródłach energii (Ustawa OZE 2015) w pewien sposób zawęża obszar możliwości manipulacji kątem ustawienia paneli fotowoltaicznych. Kąt ten ma z kolei przełożenie na ustalenie wielkości doborowej montowanej instalacji.

W niniejszej pracy autorzy przedstawiają metodykę doboru odpowiedniego kąta nachylenia paneli fotowoltaicznych w celu pozyskania przez użytkownika jak największej ilości promieniowania słonecznego na formę użytecznej energii. Jako obszar badań autorzy przyjęli położenie miasta Kraków. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem programu komputerowego Matlab, będącego interaktywnym środowiskiem do wykonywania obliczeń naukowych. Do wykonania symulacji wykorzystano model promieniowania słonecznego Haya, Daviesa, Kluchera, Reindla w skrócie – model HDKR. Autorzy określili optymalne kąty posadowienia w zależności od wyznaczonego profilu zapotrzebowania na energię. W następnym kroku określono wielkości potrzebnej mocy liczonej w kWp/MWh zapotrzebowania na energię dla wytypowanej lokalizacji i kąta nachylenia paneli. Obliczenia wykonane w artykule nie uwzględniają sprawności urządzeń pośredniczących ze względu na ich liniowe zależności.

Słowa kluczowe: panel fotowoltaiczny, dobór instalacji, promieniowanie słoneczne, prosument

\* Mgr. inż., \*\* Dr inż., Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków;  
e-mail: monika@min-pan.krakow.pl

## **The tilt angle selecting problem of PV panels taking the energy demand profile into account**

**Abstract:** In recent years, the development of photovoltaic applications has been observed both in the world and in domestic conditions, and, as a consequence, an increase in the use of installations in the balance of renewable energy sources (RES). An inherent link to this fact is the downward trend in prices for solar modules. Solar PV installations (for prosumers) with a capacity of up to 10 kWp are becoming more and more popular.

A number of methods are used to maximize solar energy generation when using solar panels in a household. One of the possibilities is to control the inclination of the cells, and thus adjust the angle of their foundation. The prosumer priority program (Priority Program 2016) established on the basis of the Renewable Energy Sources Act (RES Act 2015) in some way narrows the area of the possibility of manipulating the orientation of photovoltaic panels. This angle, in turn, translates into determining the size of the installed installation.

In this paper, the authors present the methodology of selecting the appropriate angle of inclination of photovoltaic panels in order to obtain as much sun radiation as possible. The authors adopted the location of the city of Krakow as the research area. The research was carried out using Matlab software, which is an interactive environment for performing scientific calculations. The model of solar radiation Haya, Davies, Klucher, and Reindel were used for the simulation in short, the HDKR model. The authors determined the optimal angles of foundation depending on the determined profile of energy demand. In the next step, the amount of power needed in kWp/MWh was determined for the energy demand for the selected location and the angle of inclination of the panels. The calculations made in the article do not take into account the efficiency of intermediary devices due to their linear dependencies.

**Keywords:** photovoltaic panel, installation selection, solar radiation, prosumer

## **Wprowadzenie**

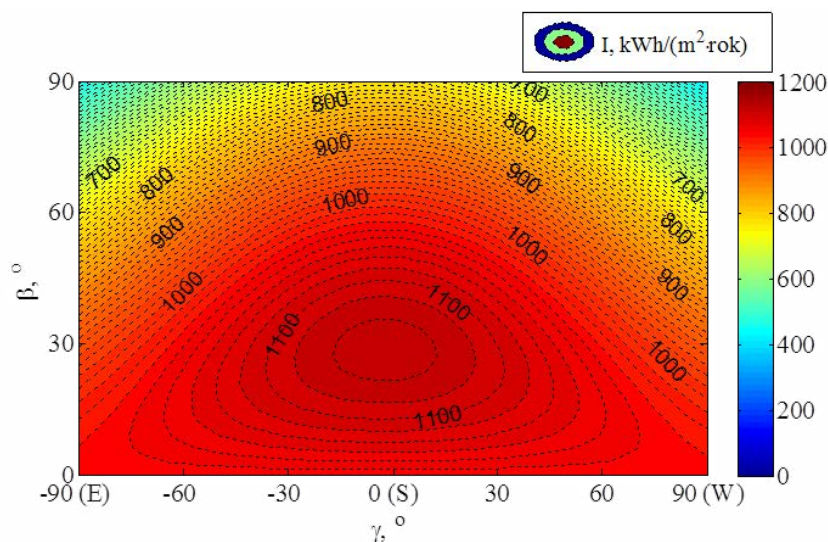
Istnieje szereg prac naukowych (Bakirci 2012; Xu i in. 2017; Kaddoura i in. 2016; Rowlands i in. 2011; Hafez i in. 2017; Żukowski i Radzajewska 2015), w których podejmuje się próbę określenia wielkości dostępnego nasłonecznienia, jak również możliwości jego maksymalizacji w ciągu roku. Wyznaczenie optymalnego kąta posadowienia daje możliwość wyprodukowania największej ilości energii przez panele fotowoltaiczne, pod warunkiem całkowitego jej bieżącego wykorzystywania. Jeżeli wyprodukowana energia nie byłaby wykorzystana w całości, efektem tego byłyby dodatkowe straty (gromadzenie jej nadmiaru). Jeden ze sposobów akumulacji, mający wirtualny charakter, wprowadzany jest w ramach programu Prosument. Użytkownikowi instalacji fotowoltaicznej umożliwia się skorzystanie z opustu w wysokości odpowiednio 80% (przysługuje posiadaczowi instalacji, którego moc instalacji sięga do 10 kWp) lub 70% (przysługuje posiadaczowi instalacji o mocy z zakresu między 10 kWp a 40 kWp) (Ustawa OZE 2015).

Dla właściciela instalacji, który nie ma możliwości wykorzystania wyprodukowanej przez niego energii na bieżąco, występuje różnica między ilością wyprodukowanej energii a ilością, o którą pomniejszają się jego rachunki za prąd – tę wielkość określamy jako energię użyteczną paneli fotowoltaicznych. Ilość użytecznej energii zależy od zapotrzebowania na energię dla budynku, z którego wynika także wielkość urządzeń (moc), co z kolei powiązane jest ze skalą uzyskiwanego opustu. Biorąc pod uwagę jedynie aspekt ekonomiczny, w sytuacji wystąpienia niskiej korelacji pomiędzy zużyciem a produkcją energii, bezzasadny wydaje się montaż powierzchni odpowiadającej mocy powyżej 10 kWp. Ponieważ użytkownik uzyskuje 10 punktów procentowych mniej opustu niżeli w przypadku montażu powierzchni o niższej mocy.

Użytkownik, z pomocą projektanta, chcąc zamontować instalację zbudowaną z paneli fotowoltaicznych, staje przed odpowiedzią na pytanie, jaką wielkość instalacji dobrać, oraz w przypadku gdy montowany jest stelaż – jaki kąt nachylenia dobrać. Powołując się na artykuł (Olczak i in. 2017) założono, że nie jest zasadna budowa stelaża dla nachylenia powierzchni w zakresie kątów z przedziału od 25 do 45°, skierowanych na południe.

W niniejszej pracy skoncentrowano się na energii elektrycznej wytworzonej w mikroinstalacjach prosumenckich bazujących na energii słonecznej – ogniwach fotowoltaicznych o mocy do kilkunastu kWp. Szczególną uwagę zwrócono na zmianę zapotrzebowania na moc instalacji w wartościach około 10 kWp, gdyż zauważono brak opłacalności ekonomicznej stosowania instalacji o mocy tylko nieznacznie większej niż 10 kWp, ze względu na skokową, a nie przejściową różnicę w oplocie. W pracy nie rozważano przypadków instalacji o mocy sięgającej ponad 40 kWp, przez wzgląd na jej odmienne warunki przyłączeniowe.

Analizując możliwość ilościowego uzysku energii elektrycznej wytworzonej przy użyciu instalacji fotowoltaicznej przeprowadzono analizę wielkości dostępnego promieniowania słonecznego, występującego dla przyjętego obszaru badań, miasta Kraków (rys. 1). W obliczeniach posłużono się modelem promieniowania Haya, Daviesa, Kluchera, Reindla (HDKR) (Duffie i Beckman 2006), który jest uznany za najbardziej odpowiedni dla warunków polskich (Karlsson 2001; Chwieduk 2006, 2009) i był wykorzystywany w pracach m.in. Xu (Xu i in. 2017). Ilość dostępnego nasłonecznienia jest istotna dla użytkownika mikroinstalacji, ze względu na możliwą wielkość występującego zapotrzebowania na energię



Rys. 1. Dostępne nasłonecznienie (I) dla Krakowa w funkcji kąta nachylenia płaszczyzny  $\beta$  i azymutu  $\gamma$ , według typowego roku meteorologicznego

Źródło: opracowanie własne na podstawie (Ministerstwo... 2015; Olczak i in. 2017)

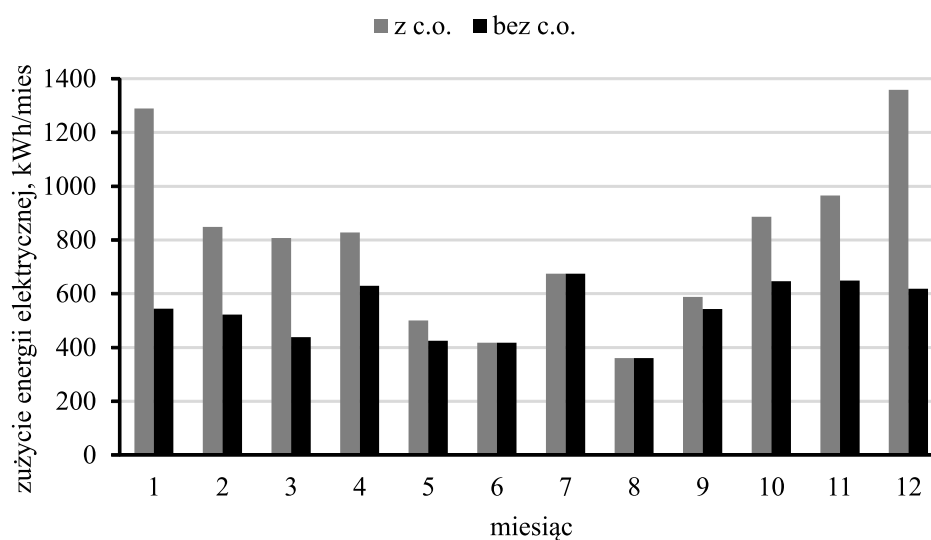
Fig. 1. Krakow available insolation (I) in the function of the angle of inclination of the plane  $\beta$  and azimuth  $\gamma$ , according to a typical meteorological year

elektryczną w jego gospodarstwie domowym. W pracy nie rozważano kwestii sprawności paneli, posługując się mocą wyrażoną w Watt peak.

Jak wynika z rysunku 1, maksymalna ilość dostępnego nasłonecznienia dla powierzchni nieruchomej to około 1150 kWh/(m<sup>2</sup>·rok). Ta wielkość sugeruje otrzymanie w ciągu roku ponad 1 MWh energii elektrycznej z 1 kWp instalacji fotowoltaicznej, bez rozważania problematyki jej wykorzystania i sprawności urządzeń pośredniczących.

W ramach niniejszej pracy utworzono możliwe do wystąpienia profile symulujące rozkład zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie domowym w ciągu roku, które pozwalają na określenie potrzebnej mocy liczonej w kWp/MWh zapotrzebowania na energię dla konkretnej lokalizacji i kąta nachylenia paneli. Analizując możliwości posadowienia paneli na dachu, rozważano tylko stronę południową budynku.

W celu utworzenia profilu zróżnicowania rozkładu zapotrzebowania na energię elektryczną w ciągu roku w domu jednorodzinnym, rozdział ilości zużywanej energii w skali miesięcznej autorzy zaczerpnęli z pracy Ireneusza Jelenia, który na zlecenie firmy Vaillant Saunier Duval z Warszawy zgromadził dane, bazując na swoim prywatnym gospodarstwie domowym, tak więc prezentowane przez niego wyniki zostały precyzyjnie zweryfikowane (Jeleń 2016). Obliczone przez Jelenia wartości miesięcznego zużycia energii elektrycznej zostały zaprezentowane na rysunku 2. Należy zaznaczyć, że w modelowym domu jednorodzinnym przytoczonym przez autora badań zainstalowano pompę ciepła, która pokrywała potrzeby centralnego ogrzewania (c.o.).

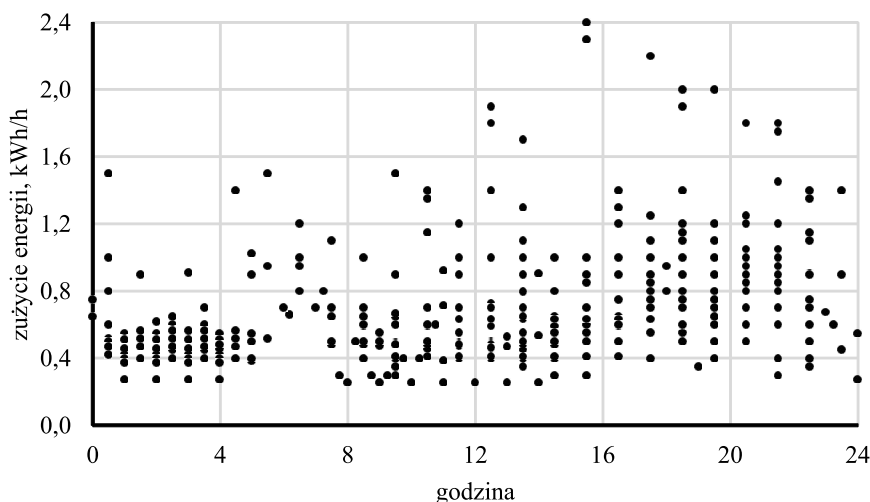


Rys. 2. Ilość zużywanej energii elektrycznej w domu jednorodzinnym  
Źródło: Jeleń 2016

Fig. 2. The amount of electricity consumed in a single-family home

W sezonie zimowym, bez uwzględnienia potrzeb zużycia energii na c.o., obserwuje się minimalny wzrost zużycia, a tym samym wyższe zapotrzebowanie na energię elektryczną. Jest to efekt wydłużonego czasu wykorzystywania energii na oświetlenie pomieszczeń oraz zapotrzebowania na energię pomocniczą dla układów centralnego ogrzewania (co w przytoczonym przypadku jest jedynie nieznacznie zauważalne ze względu na zastosowanie pompy ciepła).

Ponadto autorzy dokonali pomiarów ilości zużywanej energii elektrycznej w czteroosobowym gospodarstwie domowym w Małopolsce. Wyniki zaprezentowano na rysunku 3. Średnie dobowe zużycie energii elektrycznej to 18 kWh, w skali rocznej to 6550 kWh – ta wartość sugeruje zastosowanie instalacji fotowoltaicznej o wielkości około 6 kWp. Średnie rezultaty pomiarów wraz z przedstawieniem symulacji ilościowej produkcji energii elektrycznej podczas dwóch dobrze nasłonecznionych dni pokazano na rysunku 4.

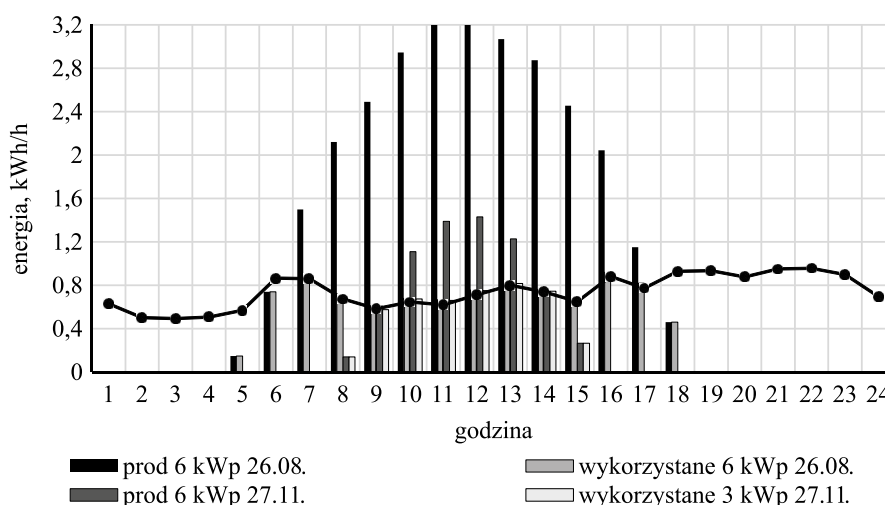


Rys. 3. Ilości zużywanej energii elektrycznej w domu jednorodzinnym – przykład pomiarów  
Źródło: pomiary własne

Fig. 3. The amount of electricity consumed in a single-family home – an example of measurements

Pomiary wskazują na występowanie dwóch szczytów poboru energii elektrycznej poranny (krótszy) oraz wieczorny.

W przypadku 26 sierpnia (rys. 4) dla analizowanej instalacji stwierdzono wyprodukowanie 28,5 kWh energii elektrycznej, z czego 9,6 wykorzystanej na bieżąco, a reszta oddana do sieci. Dla 27 listopada wartości te wyniosły odpowiednio 6,9 i 4,6 kWh. Ponadto niekorzystnie wpływa odchylenie standardowe zanotowanego zużycia zwłaszcza w godzinach popołudniowych, gdyż zmniejsza to pobieranie energii na bieżąco z paneli a zwiększa ilość „magazynowej” w sieci.



Rys. 4. Średnie ilości zużywanej energii elektrycznej w przykładowym domu jednorodzinym oraz symulacyjne wielkości produkcji energii.

Źródło: pomiary własne oraz (Ministerstwo... 2015)

Fig. 4. Average amounts of electricity consumed in an exemplary single-family house and simulation energy production volumes

### Opis założeń, wyniki modelu

Analizując dane przedstawione na rysunkach 3 i 4, zmienność nasłonecznienia oraz odchylenie standardowe zapotrzebowania od średniej ustalono składowe modelu obliczeniowego energii użytecznej (Olczak i Pełowska 2018). Ponadto uwzględniono w obliczeniach charakterystykę zależności sprawności paneli fotowoltaicznych od bieżącego natężenia promieniowania słonecznego, z której to wynika, że poniżej wartości natężenia promieniowania słonecznego z zakresu 10–20 W/m<sup>2</sup> wytwarzanie energii elektrycznej praktycznie nie występuje (Gil 2015).

Do budowy modelu odwzorowującego warunki, ilość zapotrzebowania i wykorzystania energii elektrycznej dla domu jednorodzinego oraz wskazanie etapów, przez które powinien przejść prosument zarazem wykorzystujące możliwości Ustawy OZE, poczyniono założenia (Olczak i Pełowska 2018):

- gdy wielkość produkcji energii z fotowoltaiki ( $Pei$ ) przewyższa zapotrzebowanie na energię w domu ( $Ze_i$ ), to połowa zapotrzebowania jest pokrywana z produkcji na bieżąco. Przy tym założeniu równanie energii użytecznej przyjmuje postać:

$$U_{ei} = 0,8 \cdot (Pe_i - 0,5 \cdot Ze_i) + 0,5 \cdot Ze_i$$

- stany pośrednie, gdy produkcja energii z fotowoltaiki jest niższa niż zapotrzebowanie w domu, ale mniej niż dwukrotnie. Przy tym założeniu równanie energii użytecznej przyjmuje postać:

$$U_{ei} = P_{ei} - (2 \cdot P_{ei} - Z_{ei}) \cdot 0,2 \cdot 0,5$$

- gdy ilość produkcji energii z fotowoltaiki jest przynajmniej dwa razy niższa niż zapotrzebowanie w domu, to cała wyprodukowana ilość energii kierowana jest na pokrycie zapotrzebowania w domu. Przy tym założeniu równanie energii użytecznej przyjmuje postać:

$$U_{ei} = P_{ei}$$

gdzie:

- $P_{ei}$  – produkcja energii z fotowoltaiki w miesiącu  $i$ ,
- $Z_{ei}$  – zapotrzebowanie na energię w miesiącu  $i$ ,
- $U_{ei}$  – energia użyteczna w miesiącu  $i$ ,
- 0,2 – 20% straty z wyprodukowanej energii (wynikające z 80% możliwości odzysku energii elektrycznej z sieci),
- 0,5 – przyjęty współczynnik, korygujący fakt, że połowa wyliczonej różnicy nie jest wykorzystywana na bieżąco.

Ponadto obliczenia przeprowadzono tak, aby użyteczna energia nie przekraczała wielkości rocznego zapotrzebowania na nią. Wielkość zapotrzebowania na energię elektryczną w skali miesięcznej przyjmowano na podstawie następującego wzoru (Olczak i Peplowska 2018):

$$Z_{ei} = a \cdot (i - c)^2 + b$$

gdzie:

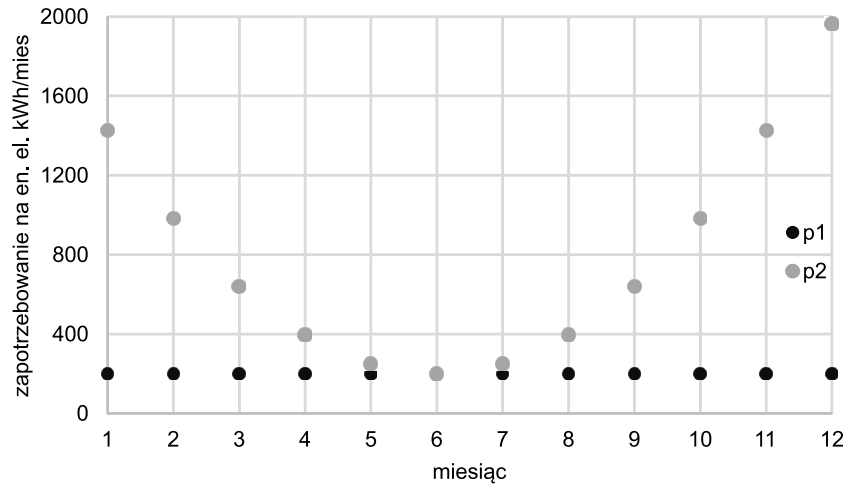
- $a$  – współczynnik nieliniowy, gdy osiąga zero, zapotrzebowanie w skali roku jest liniowe i stałe,
- $b$  – wielkość zapotrzebowania na energię w  $c$ -tym miesiącu,
- $c$  – nr miesiąca z minimum zapotrzebowania ( $c = 6$ ),
- $i$  – nr miesiąca poddanego analizie.

Na rysunku 5 zaprezentowano wielomianowe przybliżenie zużycia energii elektrycznej w zależności od numeru miesiąca w roku. Zobrazowano dwa skrajne przypadki,  $p_1$  i  $p_2$ , przy stałym współczynniku  $b$  i zmiennym współczynniku liniowym  $a$  (Olczak i Peplowska 2018).

Metodami iteracyjnymi określono dla danej lokalizacji w zależności od współczynników przybliżających profil zapotrzebowania na energię, optymalny kąt posadowienia paneli – rysunek 6.

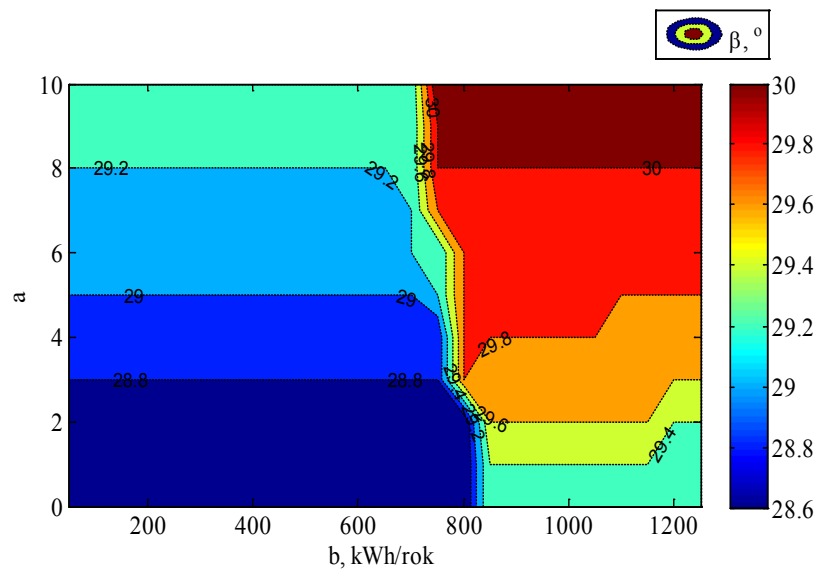
Dla optymalnych wartości kąta posadowienia zależnych od rozkładu zapotrzebowania w roku oraz ilości tego zapotrzebowania wyznaczono współczynniki (rys. 7).

Wśród analizowanych wariantów posadowienia najniższy nakład mocy na użyteczną energię otrzymano przy zastosowaniu kąta nachylenia paneli zlokalizowanego w przedziale 28,6–30°.



Rys. 5. Wielomianowe przybliżenie zużycia energii elektrycznej w zależności od numeru miesiąca w roku  
 Źródło: opracowanie własne na podstawie (Olczak i Peplowska 2018)

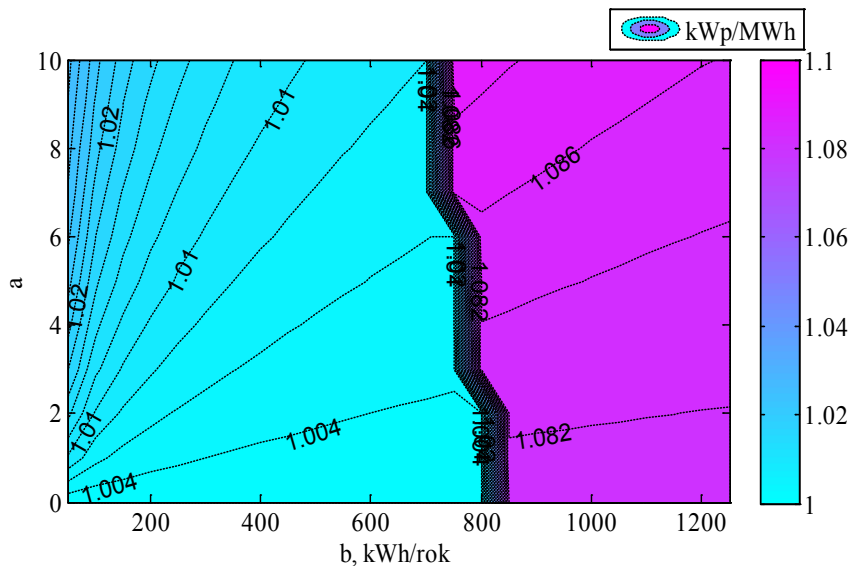
Fig. 5. Polynomial approximation of electricity consumption depending on the number of the month in one year



Rys. 6. Wybór najlepszego, ze względu na moc, kąta nachylenia paneli w zależności od zapotrzebowania na energię (a – współczynnik nieliniowy zapotrzebowania na energię elektryczną, b – wielkość zapotrzebowania na energię w 6. miesiącu roku)  
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Choosing the best, depending on the power, the angle of inclination of the panels depending on the energy demand  
 (a – nonlinear demand for electricity, b – the amount of energy demand in the 6th month of the year)





Rys. 7. Zależność potrzebnej mocy w stosunku do ilości wyprodukowanej użytecznej energii oraz od rozkładu zapotrzebowania na energię elektryczną (a, b), dla optymalnego kąta (z rys. 6)  
 Źródło: opracowanie własne

Fig. 7. The dependence of the required power in relation to the amount of useful energy produced and on the distribution of electricity demand (a, b), for the optimal angle (from Fig. 6)

W sytuacji, gdy występuje stałe zapotrzebowanie na energię w ciągu roku nakład mocy osiąga parametr poniżej 1,01 kWp/MWh, gdy instalacja jest mniejsza niż 10 kWp oraz około 1,08 kWp/MWh, gdy instalacja jest większa niż 10 kWp. Uwzględniając w obliczeniach średnie sprawności urządzeń pośredniczących, realna moc potrzebna do zainstalowania, którą należałoby zainstalować, powinna wynieść odpowiednio około 1,15 kWp/MWh i 1,22 kWp/MWh.

Zgodnie z oczekiwaniami, stwierdzono znacznie niższą zależność potrzebnej zainstalowanej mocy od kąta nachylenia paneli, niż od poziomu zapotrzebowania na energię. Przejście na większą moc niż 10 kWp powoduje konieczność zwiększenia o około 8,5% powierzchni zamontowanych paneli.

### Podsumowanie

Użytkownik, chcąc zastosować źródło odnawialne (panel fotowoltaiczny) jako element mogący produkować energię elektryczną dla własnego gospodarstwa domowego może zetknąć się z szeregiem rozważań. Do najważniejszych z nich należą pytania – jak duże jest zapotrzebowanie na energię elektryczną, a tym samym jak dużo energii należało by pozyskać w wyniku montażu urządzenia oraz – jak posadzić panel, aby jego moc była jak najbardziej efektywnie wykorzystywana. Szereg możliwości dla prosumentów wynika z wprowadzonych przez rząd dokumentów. Najważniejszym z nich jest ustawa o odnawialnych źródłach energii.

W pracy autorzy analizują możliwości pozyskania energii elektrycznej wytworzonej w mikroinstalacjach prosumenckich bazujących na energii słonecznej, tj. ogniwach fotowoltaicznych o mocy do kilkunastu kWp, zaznaczając głównie instalacje do 10 kWp.

Reasumując wyniki przeprowadzonych badań, analiza dostępnego na terenie Krakowa nasłonecznienia sugerowałaby współczynniki kWp/MWh sięgające poniżej 1,0, nawet przy uwzględnieniu sprawności. Uwzględniając jednak możliwość uzyskania opustów zależnych od profilu zapotrzebowania na energię, wielkość ta sięga powyżej 1,0. Najmniejsze wartości, czyli najkorzystniejsze rozwiązania (najmniejsza powierzchnia w stosunku do efektów) wśród badanych ustawień, to stosowanie kąta nachylenia paneli fotowoltaicznych około 29°. Przy doborze urządzeń należy pamiętać, aby uwzględnić także sprawność inwertera oraz sprawność przesyłu w instalacji domowej.

## Literatura

- Bakirci, K. 2012. General models for optimum tilt angles of solar panels: Turkey case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, s. 6149–6159.
- Chwieduk, D. 2006. *Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku*. Warszawa: IPPT PAN, s. 14–33.
- Chwieduk, D. 2009 – Recommendation on modelling of solar energy incident. *Renewable Energy* 34, s. 736–741.
- Duffie, J.A. i Beckman, W.A. 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*.
- Gil, P. 2015. Roczne wyniki pomiaru sprawności amorficznych kolektorów fotowoltaicznych w Rzeszowie. *Rynek Energii* 8.
- Hafez A.Z. i in. 2017. Tilt and azimuth angles in solar energy applications – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 77, s. 147–168.
- Jeleń, I. 2016. Koszty ogrzewania domu pompą ciepła w latach 2012–2015. [Online] Dostępne w: <http://eko-blog.pl/2016/01/koszty-ogrzewania-domu-pompa-ciepła-2012-2015/> [Dostęp: 23.08.2017].
- Kaddoura i in. 2016. On the estimation of the optimum tilt angle of PV panel in Saudi Arabia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* t. 65, s. 626–634.
- Karlsson, J. 2001. *Windows – Optical Performance and Energy Efficiency*, Uppsala: ACTA UNIVERSITATIS UPSALIENSIS.
- Ministerstwo...2015. Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju. Wskaźniki emisji i wartości opałowe paliwa oraz typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski do obliczeń energetycznych budynków. [Online] Dostępne w: <http://www.mir.gov.pl/strony/zadania/budownictwo/dane-do-swiadectw-charakterystyki-energetycznej-budynkow> [Dostęp: 23.07.2015].
- Olczak i in. 2017 – Olczak, P., Kryzia, D. i Olek, M. 2017. Ekonomiczna efektywność zastosowania stelaża w instalacji solarnej – studium przypadku. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* nr 8, t. 48, s. 331–334.
- Olczak, P. i Peplowska, M. 2018. *Problematyka doboru wielkości przydomowych instalacji fotowoltaicznych*. [W:] Energetyka solarna w badaniach naukowych, red. Kwietkiewicz P., Poznań, s. 80–90 (w druku).
- Program priorytetowy 2016. Wsparcie działań ochrony środowiska i gospodarki wodnej realizowanych przez partnerów zewnętrznych Część 3) Prosument – linia dofinansowania z przeznaczeniem na zakup i montaż mikroinstalacji odnawialnych źródeł energii. Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Warszawa.
- Rowlands Ian H i in. 2011. Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy* t. 39, s. 1397–1409.
- Ustawa OZE 2015. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii Dz.U. 2015, poz. 478.
- Xu Ruidong i in. 2017. Analysis of the optimum tilt angle for a soiled PV panel. *Energy Conversion and Management* 148, s. 100–109.
- Żukowski, M. i Radzajewska, P. 2015. Optymalny kąt nachylenia kolektorów słonecznych na terenie Polski. *Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja* nr 4, t. 4, s. 138–142.