



Bartosz SOLIŃSKI<sup>1</sup>

## **Bilansowanie mikroinstalacji fotowoltaicznej w gospodarstwie domowym**

Streszczenie. Duża zmienność i nieprzewidywalność wielkości wytwarzania energii elektrycznej z elektrowni fotowoltaicznych wynika z jej zależności od aktualnych warunków nasłonecznienia. Warunki te uzależnione są od szeregu czynników i są zmienne w czasie. Mimo tej specyfiki instalacje fotowoltaiczne stają się coraz bardziej popularne na świecie i w Polsce. Jest to spowodowane przede wszystkim tym, że wytwarzanie energii z odnawialnych źródeł ma wiele zalet, m.in. pozyskiwana energia jest darmowa, odnawialna w czasie i ekologiczna, a jej produkcja we własnym zakresie daje częściowe uniezależnienie się od dostaw energii z sieci elektroenergetycznej. Ponadto obserwowany znaczący spadek cen modułów fotowoltaicznych jeszcze bardziej przyspieszył rozwój wykorzystania tego źródła energii. W Polsce zainteresowanie tą metodą wytwarzania energii, wśród gospodarstw domowych, znacząco wzrosło po wprowadzeniu w systemie prawnym instytucji prosumenta i zastosowania wielu ułatwień administracyjnych oraz wsparcia finansowego. Wprowadzone mechanizmy pozwoliły m.in. na bilansowanie netto zużytej i wyprodukowanej przez mikroinstalację energii, poprzez pośrednie magazynowanie jej w sieci elektroenergetycznej. W artykule scharakteryzowano problematykę bilansowania się źródeł wykorzystujących energię słoneczną na podstawie mikroinstalacji wykorzystywanej w gospodarstwie domowym (tzw. instalacji prosumenckiej). W przeprowadzonych analizach porównano profil obciążenia typowego gospodarstwa domowego i profil generacji energii z instalacji fotowoltaicznej, wyznaczając rzeczywiste kształtowanie się poziomu bilansowania takiego systemu.

Słowa kluczowe: bilansowanie mocy, mikro-instalacja, odnawialne źródła energii, elektrownia fotowoltaiczna

### **Power balancing of photovoltaic microinstallations in households**

Abstract: The large variability and unpredictability of energy production from photovoltaic power microinstallations results from the dependence on the current weather conditions. These conditions depend on a number of factors and are variable over the time. Despite this specificity, photovoltaic micro-installations are becoming more and

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków; e-mail: bartosz.solinski@zarz.agh.edu.pl

more popular in the world and in Poland. This is mainly due to the fact that the generation of energy from renewable sources has numerous advantages, the energy is free, renewable in time and ecological, and its production on its own gives partial independence from energy supplies from the power grid. In addition, the observed significant prices decrease of solar modules has further accelerated the development of the use of this energy source. Concern for this method of energy production among households has increased significantly in Poland after introducing the prosumer in the legal framework and the use of administrative and financial support. The implemented prosumer mechanisms allowed, for example, the net balancing of the energy consumed and produced by the micro-installation through storage in the power grid. The article describes the problem of balancing sources using solar energy, based on micro-installation used in the household (the so-called prosumer installation). The conducted analyses compared the load profile of a typical household and the energy generation profile from a photovoltaic installation, determining the real balancing formation level of such a system.

Keywords: power balancing, micro-installation, renewable energy sources, photovoltaic power plants

## Wprowadzenie

Odnawialne źródła energii to takie jej rodzaje, których wykorzystanie nie wiąże się z ich długotrwałym deficytem, a zasoby odnawiają się w krótkim czasie. Wytwarzanie energii z odnawialnych źródeł ma wiele zalet, do których można zaliczyć m.in. pozyskanie odnawialnej w czasie i ekologicznej energii czy też uniezależnienie od dostaw energii z sieci elektroenergetycznej (Lewandowski 2006; Soliński 2015; Gasparatos i in 2017). Mikroinstalacje fotowoltaiczne, pozyskujące energię promieniowania słonecznego, charakteryzują się dodatkowo łatwą i szybką instalacją (łatwy montaż i podłączenie do instalacji elektrycznej gospodarstwa domowego i sieci elektroenergetycznej). Dzięki zastosowaniu modułów fotowoltaicznych, łączonych w panele i typoszeregów inwerterów sieciowych, dostosowanych do różnym poziomów mocy zainstalowanej, są łatwo skalowalne. Natomiast w wyniku odpowiednich uregulowań prawnych (prosument), ich instalacja nie wymaga uzyskania pozwoleń budowlanych i koncesji na sprzedaż energii elektrycznej. Jednak, jak się wydaje, dominującym czynnikiem zwiększonej popularności tego typu instalacji jest stały wzrost ich opłacalności ekonomicznej, związany z coraz większą redukcją kosztów modułów fotowoltaicznych oraz możliwością uzyskania dotacji czy też preferencyjnego kredytowania.

Jednym z głównych problemów towarzyszących wytwarzaniu energii ze słońca jest duża zależność od aktualnych warunków pogodowych, zmieniających się w czasie. Parametry nasłonecznienia zmieniają się w wyniku naturalnego obrotu Ziemi oraz jej ruchu wokół Słońca, a także zachmurzenia i wielu innych czynników, które powodują stochastyczny charakter pracy instalacji fotowoltaicznej. Efektem tego jest duża zmienność i nieprzewidywalność wielkości generowanej mocy chwilowej. Z jednej strony przenosi się to na niepewność szacunków wielkości produkcji energii dla planowanych systemów energetycznych, a z drugiej powoduje ciągłą zmienność w czasie, wpływającą na konieczność bilansowania mocy i regulacji z wykorzystaniem konwencjonalnych źródeł energii, w zależności od zmian mocy generowanej przez instalację fotowoltaiczną. Kolejnym ważnym czynnikiem który wpływa na konieczność bilansowania jest brak dostosowania strony popytowej energii (zużycia) do jej produkcji w danej chwili.

Idealna byłaby sytuacja, gdyby instalacja fotowoltaiczna w sposób ciągły pokrywała częściowo lub całkowicie zapotrzebowanie na moc znajdujących się w budynku odbiorców. Niestety, jak już wspomniano, z uwagi na krótko- i długoterminową zmienność warunków atmosferycznych, a także zmienność obciążenia (strona popytowa), taki bilans jest nieosiągalny. Przy wykorzystywaniu tak mało przewidywalnego i nieciąglego źródła energii, jakim jest słońce, pożądane jest dołączenie do instalacji zasobników energii elektrycznej, które gromadzą nadmiar energii w czasie nadprodukcji, a oddają ją w momencie zwiększonego zapotrzebowania, gdy warunki atmosferyczne nie sprzyjają wytwarzaniu energii ze źródeł odnawialnych. Obecnie jednak wykorzystanie magazynów energii jest ekonomicznie nieuzasadnione. Znanym rozwiązaniem, stosowanym w systemie prosumenckim, jest możliwość niejako magazynowania nadprodukcji energii w sieci elektroenergetycznej, a następnie jej odzyskiwania przy zastosowaniu odpowiednich wielkości korekcyjnych dla energii w ten sposób zmagazynowanej (zob. [Ustawa... 2015](#)).

Celem artykułu jest przedstawienie problematyki bilansowania się źródeł, wykorzystujących energię słoneczną, w mikroinstalacji zlokalizowanej w gospodarstwie domowym (tzw. instalacji prosumenckiej). Wprowadzenie w systemie prawnym instytucji prosumenta, a także innych mechanizmów pozwalających na bilansowanie netto zużytej i wyprodukowanej przez mikroinstalację energii (*net metering*), istotnie zmieniło zasady i reguły rozliczania energii oddanej do sieci przez wytwórcę (prosumenta), co znacząco zredukowało niedogodności dla producenta tej energii. Wciąż jednak brak bilansowania całego systemu oddziałuje niekorzystnie na sieć elektroenergetyczną. W przeprowadzonych analizach scharakteryzowano wpływ generacji mocy instalacji fotowoltaicznej oraz profili obciążenia dla gospodarstwa domowego. Na podstawie analizowanego studium przypadku ukazano, jak sytuacja bilansowa może kształtować się w przeciętnym gospodarstwie domowym, wykorzystującym instalację fotowoltaiczną i jaka część energii, zużywana w gospodarstwie domowym, jest rzeczywiście w pełni bilansowana.

## 1. Wykorzystanie energii promieniowania słonecznego

Promieniowanie słoneczne jest podstawowym źródłem energii na ziemi. Strumień energii słonecznej podążający w stronę Ziemi ma gęstość mocy  $1366 \text{ W/m}^2$ , co na prostopadłym do kierunku strumienia przekroju kuli ziemskiej daje stały dopływ mocy rzędu 173 000 TW ([Mejro 1980](#)). Wielkość energii docierającej do powierzchni Ziemi w ciągu roku jest wielokrotnie większa od wszystkich kopalnych zasobów energetycznych (złóż węglowodorów) i znacząco przewyższa potrzeby energetyczne całego świata. Jest ona jednak rozproszona, charakteryzuje się nierównomiernym rozkładem w czasie (cykl dobowy i roczny), a także jest uwarunkowana terytorialnie, klimatycznie i czasowo. Energię promieniowania słonecznego człowiek może wykorzystywać na dwa podstawowe sposoby: zamieniać ją bezpośrednio w energię elektryczną w ogniach fotowoltaicznych (konwersja fotowoltaiczna) oraz w ciepło, które z kolei może być wykorzystane np. do ogrzewania wody użytkowej (konwersja fototermiczna). Ponadto występuje także konwersja fotochemiczna (fotosynteza wpływająca na rozwój roślin), będąca trzecim sposobem wykorzystania energii słonecznej.

Moc dla generacji fotowoltaicznej  $P_{PV}$  [W] jest dana przez równanie (Markvart 2000):

$$P_{PV} = \eta_{PV} \cdot A_{PV} \cdot I_c \quad (1)$$

gdzie:

- $\eta$  – sprawność modułu  $PV$  [%],
- $A_{PV}$  – całkowita powierzchnia modułu [ $m^2$ ],
- $I_c$  – natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyznę modułu [ $W/m^2$ ].

Pierwszym krokiem przy projektowaniu instalacji fotowoltaicznej jest określenie niezbędnej mocy jednostki wytwórczej, zależnej od przyszłego wykorzystania elektrowni i możliwości instalacyjnych w gospodarstwie domowym. Na podstawie przewidywanego zapotrzebowania na energię elektryczną oraz wiedzy na temat lokalnych warunków nasłonecznienia można w przybliżeniu wyliczyć moc elektrowni fotowoltaicznej mogącej pokryć zapotrzebowanie.

W przypadku analizy bilansu mocy systemu dobór wielkości mocy zainstalowanej w mikroinstalacji fotowoltaicznej jest niezmiernie istotnym zagadnieniem. Może ona być szacowana na podstawie danych godzinowych, średnich dziennych w danym miesiącu czy też wartości minimalnych dla dziennej mocy instalacji fotowoltaicznej w danym miesiącu. W tym celu stosuje się wiele różnych metod optymalizacyjnych, które ze względu na różne kryteria określają odpowiednią moc instalacji. Do tych kryteriów możemy zaliczyć m.in. prawdopodobieństwo utraty dostaw (LPSP – *Lost of Power Supply Probability*), dostosowanie do maksymalnego obciążenia krótkoterminowego, dostosowanie do zapotrzebowania w danym okresie czasu czy też kryteria związane z bilansowaniem zapotrzebowania na energię lub kosztami (zob. Mahesh i Sandhu 2015).

## 2. Bilansowanie mikroinstalacji fotowoltaicznej w gospodarstwie domowym

Bilans mocy dla instalacji fotowoltaicznej funkcjonującej w gospodarstwie domowym zależy od stosunku generowanej przez nią mocy i aktualnego zapotrzebowania na moc przez odbiorniki wykorzystywane w gospodarstwie domowym. Gdy zapotrzebowanie jest większe od generacji, równanie może przyjąć postać:

$$P_{GD} = P_{PV} + P_{Sp} \quad (2)$$

gdzie:

- $P_{GD}$  – moc pobierana przez gospodarstwo domowe [W],
- $P_{PV}$  – moc wytwarzana przez instalację fotowoltaiczną [W],
- $P_{Sp}$  – moc pobierana z sieci elektroenergetycznej przez gospodarstwo domowe [W].

W przypadku gdy zapotrzebowanie jest mniejsze od generacji z instalacji fotowoltaicznej równanie przyjmuje postać:

$$P_{GD} = P_{PV} - P_{Sw} \quad (3)$$

gdzie:

$P_{Sw}$  – moc wysłana do sieci elektroenergetycznej przez gospodarstwo domowe [W].

Jak widać, niedobory lub nadwyżki mocy związane ze stochastycznym charakterem generacji z instalacji fotowoltaicznej i zmiennym profilem obciążenia przez odbiorniki zainstalowane w gospodarstwie domowym kompensuje sieć elektroenergetyczna, która staje się niejako magazynem energii, z którego w każdej chwili gospodarstwo domowe może skorzystać.

Idealna byłaby sytuacja, gdyby produkcja w sposób ciągły pokrywała całkowite lub częściowe zapotrzebowanie na energię użytkowników. W tym przypadku wystarczyłoby zainstalowanie instalacji fotowoltaicznej o odpowiedniej mocy aby pokryć zapotrzebowanie odbiorników w gospodarstwie domowym. Niestety z uwagi na charakter i specyfikę energii słońca, jak to już wcześniej wspomniano, taki bilans jest niemożliwy do osiągnięcia (bez zastosowania zasobników energii i znacznego przewymiarowania mocy instalacji).

Problematyka analizy bilansowania jest tematem wielu prac, w których autorzy skupiają się przede wszystkim na aspektach doboru wielkości mocy (Diaf i in. 2007; Nelson i in. 2006), zastosowaniu systemu magazynowania czy też wykorzystania systemów hybrydowych (Wang i in 2008; Iqbal 2003; Soliński 2015).

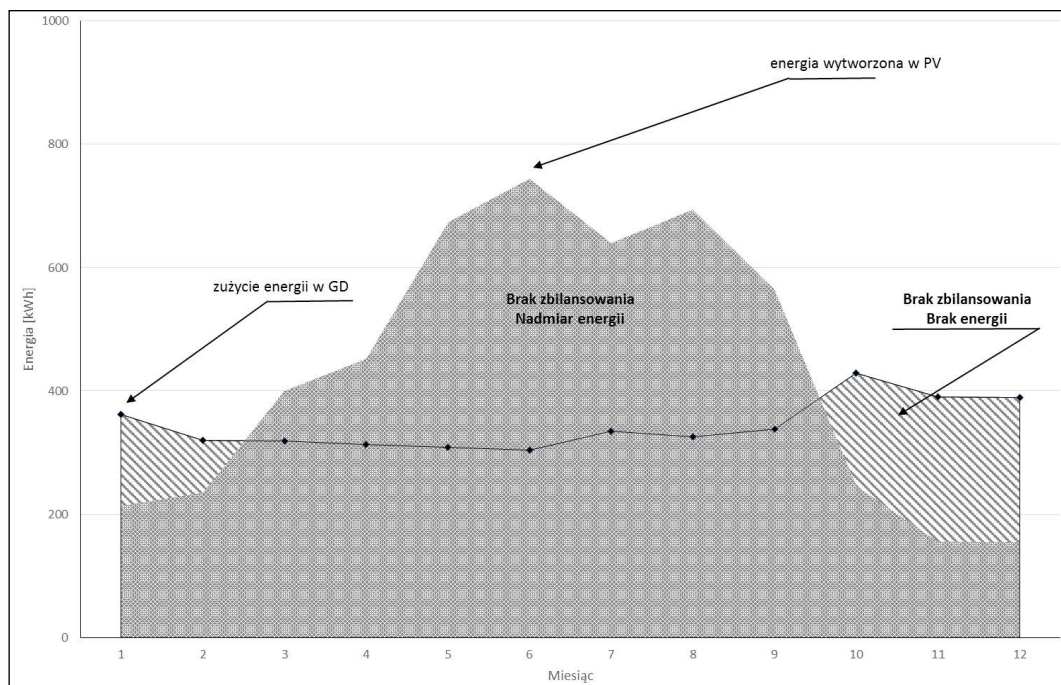
W badaniach przeprowadzonych w artykule dotyczących bilansowania systemu wykorzystano rzeczywiste dane z pracującej elektrowni fotowoltaicznej zainstalowanej w gospodarstwie domowym. Umożliwiło to precyzyjne określenie rzeczywistego poziomu bilansowania energii poprzez wykorzystanie odczytów z systemu SCADA elektrowni fotowoltaicznej oraz odczytów z elektronicznego licznika energii.

Badane gospodarstwo domowe jest zlokalizowane w Polsce południowej i zamieszkiwane przez czteroosobową rodzinę, a jej roczne zużycie energii w badanym roku wyniosło 4132,2 kWh. Natomiast instalacja fotowoltaiczna charakteryzuje się następującymi parametrami technicznymi: 19 sztuk modułów fotowoltaicznych REC 260PE o łącznej mocy 4,94 kWp oraz inwerter ABB TRIO 8,5 TL. Wydajność energetyczna wyznaczona na podstawie rzeczywistych odczytów energetycznych dla tej mikroinstalacji PV w ciągu roku wyniosła 5173 kWh/rok.

### 3. Analiza poziomu bilansowania systemu

Na rysunku 1 przedstawiono bilansowanie się systemu w ujęciu miesięcznym, ukazując wielkość produkcji energii elektrycznej uzyskaną w ciągu badanego roku w mikroinstalacji (PV) oraz zużycie energii przez gospodarstwo domowe w poszczególnych miesiącach (GD).

Znając wielkości wytworzonej energii w mikroinstalacji i zapotrzebowanie na nią przez gospodarstwo domowe, można wyznaczyć poziom bilansowania się instalacji, w zależności od analizowanego okresu, co przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 1. Miesięczna produktywność PV, zużycie energii przez GD i bilansowanie systemu  
Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Monthly PV energy production, energy consumption by household and system balancing

TABELA 1. Wskaźniki bilansowania systemu dla różnych okresów

TABLE 1. System balancing indicators for different periods

Okres	Wielkość wytwarzanej energii w PV [kWh]	Zużycie energii przez gospodarstwo domowe [kWh]	Nadwyżka/niedobór energii [kWh]
Cały rok	5 173	4 132	+1 041
Miesiące 1, 2, 10–12	1 005	1 889	-884
Miesiące 3–9	4 168	2 243	+1 925

Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 1 wyznaczono wskaźniki poziomu bilansowania się instalacji dla okresu rocznego i okresów miesięcznych. Jak można zaobserwować na rysunku 1 oraz w tabeli 1, roczna wielkość zapotrzebowania na energię przez gospodarstwo domowe może zostać

w pełni pokryta przez produkcję energii w mikroinstalacji PV, w tym przypadku występuje nadmiar tej energii (+1041 kWh). Analizując z kolei miesięczne wielkości wytworzonej energii i zapotrzebowania na nią, można zaobserwować, że w systemie wystarczają one do częściowego lub pełnego zaspakajania popytu na energię gospodarstwa domowego, w zależności od miesiący. W miesiącach wiosenno-letnich występuje nadwyżka energii w stosunku do zapotrzebowania, a w miesiącach zimowych niedobór, co ukazano w tabeli 1.

W celu wyznaczenia rzeczywistego bilansowania się systemu posłużono się wzorem na wielkość energii zbilansowanej, w tym przypadku zużytej bezpośrednio w gospodarstwie domowym:

$$E_{bilansowa} = \sum_{i=1}^{8760} E_i - ESP_i \quad (5)$$

gdzie:

- $E_i$  – całkowita energia zużyta w GD w godzinie  $i$  [kWh],
- $ESP_i$  – energia pobierana przez gospodarstwo domowe z sieci elektroenergetycznej w godzinie  $i$  [kWh].

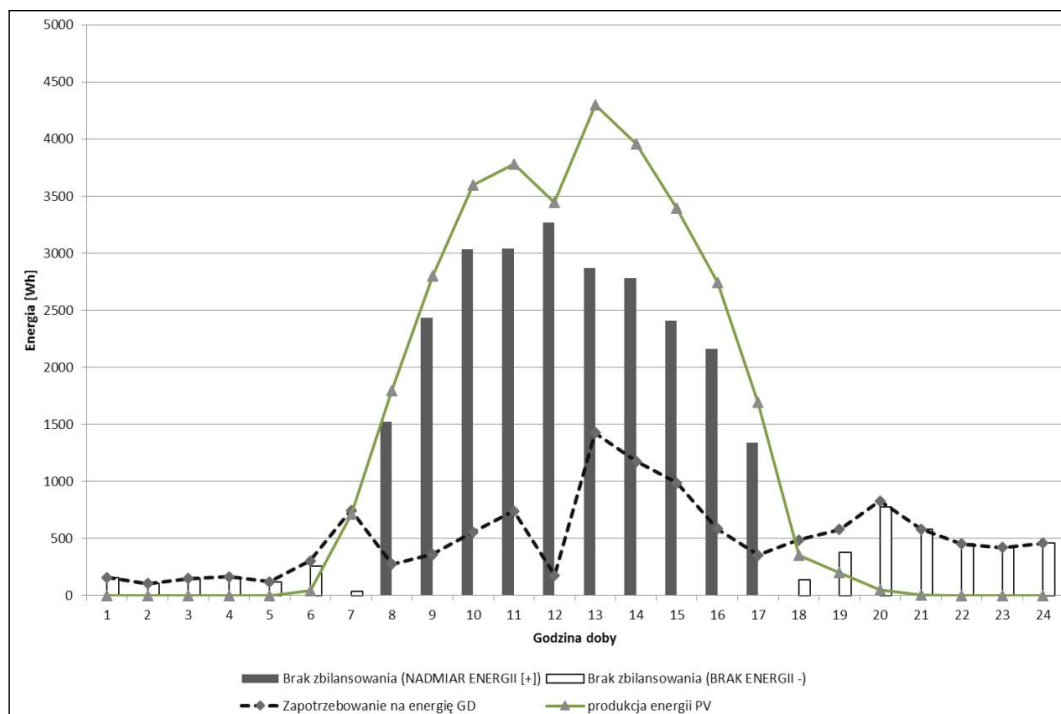
Całkowita energia zużyta w gospodarstwie domowym  $E_i$  obejmuje zarówno energię z instalacji fotowoltaicznej, jak i sieci elektroenergetycznej. Odejmując od niej wielkości energii pobranej z sieci, otrzymujemy wielkość energii wytworzonej w PV i bezpośrednio zużytej w GD w danej godzinie. Za okres badania przyjęto jeden rok, dla którego sporządzono grafiki godzinowe bilansowania się systemu.

Analizy rzeczywistego (bieżącego) bilansowania wskazują na zupełnie inny obraz zaistniałej sytuacji, co ukazano na rysunku 2 dla jednego przykładowego dnia działania systemu (12 lipca 2017 roku).

Jak można zaobserwować na rysunku 2 w każdej z godzin system nie jest w pełni zbilansowany, występują nadwyżki energii jak i jej niedobór. W godzinach nocnych od 18 do 7 rzeczywiste zużycie energii w GD było pokrywane przez w całości lub części przez energię z sieci. Natomiast w godzinach 8 do 17 występowała nadwyżka energii, która została odprowadzona do sieci elektroenergetycznej.

Dokonując analizy dla danych godzinowych z całego roku określono w tabeli 2 wielkości energii zbilansowanej bezpośrednio w GD, czyli energii wytworzonej w PV i bezpośrednio zużytej w GD na bieżące zapotrzebowanie oraz jej udziały, które wyznaczono jako stosunek energii zbilansowanej bezpośrednio i całkowitej energii zużytej w GD oraz stosunek energii zbilansowanej i całkowitej energii wytworzonej przez PV.

Jak można zauważyć zbilansowana energia w gospodarstwie domowym stanowiła 24,4%, a więc około jedną czwartą jej zużycia, choć instalacja PV wytworzyła w ciągu roku więcej energii niż wyniosło całkowite zapotrzebowanie GD. Dodatkowo można zauważyć, że część zbilansowana stanowiła 19,5% energii, która została wytworzona przez instalację PV, a więc zaledwie jedną piątą jej całkowitej generacji.



Rys. 2. Wielkości wytworzonej energii przez system PV i zużycie energii przez gospodarstwo domowe w kolejnych godzinach doby (12.07.2017)  
 Źródło: opracowanie własne

Fig 2. Quantity of generated energy by the PV microinstallation and energy consumption by the household in the following hours of the day (2017-07-12)

TABELA 2. Wskaźniki bilansowania systemu dla okresów godzinowych

TABLE 2. System balancing indicators for hourly periods

Okres	Wielkość energii zbilansowanej bezpośrednio [kWh]	Udział w stosunku do całkowitej energii zużytej w GD [%]	Udział w stosunku do całkowitej energii wytworzonej w PV [%]
Dane godzinowe z całego roku	1 007	24,4	19,5

Źródło: opracowanie własne.



## Podsumowanie

Dostarczanie zbilansowanej energii w systemie elektroenergetycznym, przy ciągłym wzroście udziału źródeł odnawialnych, nabiera coraz większego znaczenia. Jest z punktu widzenia wielu uczestników rynku czymś pożądanym i wartościowym. Energia wytworzona i bezpośrednio zużyta w systemie, w badanym przypadku stanowiąca 19,5% generacji PV, nie musiała być w żaden sposób magazynowana czy też przesyłana. Nie powodowała tym samym zakłóceń funkcjonowania systemu elektroenergetycznego.

Niezmiernie trudno jest dobrać system oparty na energii słońca, w taki sposób, aby bilansowanie bieżącego zużycia energii w gospodarstwie domowym było znaczące, przy jednoczesnym „nieprzeskalowaniu” i braku zastosowania zasobnika energii – w badanym przypadku instalacja PV dostarczyła bezpośrednio 24,4% energii do gospodarstwa domowego. Natomiast sieć elektroenergetyczna, pełniąc w tym przypadku niejako rolę magazynu dla tego systemu, pozwoliła na pełne rozliczenie wytworzonej i zużytej energii, z niewielką nadwyżką. Takie rozwiązanie generuje istotne korzyści dla prosumenta, w związku z oszczędnościami wynikającymi z braku opłat za pobraną energię z sieci i konieczności wykorzystania własnych zasobników energii.

## Literatura

- Diaf i in. 2007 – Diaf, S., Diaf, D., Belhamel, M., Haddadi, M. i Louche, A. 2007. A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy* t. 35, z. 11, s. 5708–5718.
- Gasparatos i in. 2017 – Gasparatos, A., Doll, C., Esteban, M., Ahmed, A. i Olang, T. 2017. Renewable energy and biodiversity: implication for transitioning to a Green Economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70, s. 161–184.
- Iqbal, M. 2003. Simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy* 28(4), s. 511–522.
- Lewandowski, W. 2006. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.
- Markvart, T. red. 2000. *Solar electricity*. 2<sup>nd</sup> ed., Wiley, USA.
- Mejro, C. 1980. *Podstawy gospodarki energetycznej*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.
- Soliński i in. 2015 – Soliński, B., Matusik, M., Ostrowski, J. i Turoń, K. 2015. *Modelowanie funkcjonowania hybrydowych wiatrowo-słonecznych systemów wytwarzania energii elektrycznej*. Kraków: Wyd. AGH.
- Soliński, B. 2015. *Zarządzanie hybrydowymi systemami wytwarzania energii elektrycznej wykorzystującymi odnawialne źródła energii*. Kraków: Wyd. AGH.
- Ustawa o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (tekst ujednolicony po nowelizacji z 2018 roku Dz.U. 2018 poz. 1269).
- Wang, C. i Nehrir, H. 2008. *Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System*. Power and Energy Society General Meeting – Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21<sup>st</sup> century.

