

**Maciej Rozpondek**

Wyższa Szkoła Techniczna, Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych  
ul. Rolna 43, 40-555 Katowice  
Katowice School of Technology, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Applied  
Arts, Rolna 43, 40-555 Katowice, Poland  
*e-mail: maciej.rozpondek@wst.com.pl*

**Grzegorz Kasprzyk**

Wyższa Szkoła Techniczna, Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych  
ul. Rolna 43, 40-555 Katowice  
Katowice School of Technology, Faculty of Architecture, Civil Engineering and Applied  
Arts, Rolna 43, 40-555 Katowice, Poland

s. 77-90

---

## TECHNICZNO-ENERGETYCZNE ASPEKTY ZASTOSOWANIA MIKROINSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH W BUDYNKACH JEDNORODZINNYCH

### STRESZCZENIE

Przedstawiono tendencje w rozwoju ogniw fotowoltaicznych. Zaprezentowano założenia i przeanalizowano uwarunkowania działania mikroinstalacji fotowoltaicznych w budynkach. Przedstawiono schemat procesowy projektowania i doboru elementów składowych instalacji fotowoltaicznej on-grid.

Trends in the development of photovoltaics cells have been presented. The assumptions were presented and the conditions of photovoltaic micro installations in buildings were analyzed. The process diagram of designing and selection of on-grid photovoltaic system components is presented.

### SŁOWA KLUCZOWE

ogniwa fotowoltaiczne, energetyka prosumencka, zintegrowane systemy fotowoltaiczne w budownictwie.

## WPROWADZENIE

Bezpieczeństwo eksploatacyjne budynków jest ściśle związane z zapewnieniem ciągłego zasilania w nośniki energetyczne, szczególnie w energię elektryczną. W Unii Europejskiej zużycie energii w budynkach wynosi około 40% w stosunku do całkowitego i nadal ma tendencję wzrostową. W celu minimalizacji zużycia energii w rozwiązaniach projektowych systemów energetycznych w inteligentnych budynkach stosuje się odnawialne źródła energii – OZE oraz systemy hybrydowe. Budynki inteligentne, w tym także jednorodzinne, są wyposażone w wysoko zaawansowany system zarządzania – Building Management System, w którym wykorzystuje się układy sterowania i regulacji automatycznej oraz monitoring. W eksploatacji budynków inteligentnych zapewnienie zasilania w energię elektryczną jest warunkiem sine qua non w realizacji jego funkcji technicznych [1-3]. Wykorzystanie potencjału odnawialnych źródeł energii jest skutecznym sposobem zapewnienia większego bezpieczeństwa eksploatacyjnego. Jeżeli dotychczasowy odbiorca będzie jednocześnie producentem zużywanej energii w części lub w całości, to wówczas z jej konsumenta staje się prosumentem. Zgodnie z wprowadzoną od pierwszego lipca 2016 roku nowelizacją ustawy o OZE prosumentem jest odbiorca końcowy dokonujący zakupu energii elektrycznej na podstawie kompleksowej umowy wytwarzania energii elektrycznej wyłącznie z OZE w mikroinstalacji. Wyprodukowana energia elektryczna powinna być zużywana na potrzeby własne, nie związane z wykonywaną działalnością gospodarczą. Wymóg zużycia wytworzonej energii elektrycznej tylko na potrzeby własne, nie z tytułu prowadzenia działalności gospodarczej, nie obejmuje rolników. Mikroinstalacją nazywa się instalację OZE o zainstalowanej łącznej mocy elektrycznej nie większej niż 40 kW przyłączonej do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym od 110 kV lub mocy cieplnej nie większej niż 120 kW. W Polsce instalacje fotowoltaiczne są przeznaczone głównie dla zaspokojenia potrzeb własnych, których moc nie powinna być przewymiarowana, ponieważ zgodnie z nowym systemem rozliczania nadwyżka energii elektrycznej przepada na rzecz jej sprzedawcy. Takie zalety mają fotowoltaiczne systemy on-grid z magazynowaniem energii z podłączeniem do sieci energetycznej i samodzielne, czyli off-grid bez dostępu do sieci energetycznej. Zasoby wytworzonej i zmagazynowanej energii są jednak ograniczone pojemnością akumulatora i z tego powodu, aby wyeliminować brak zasilania w przypadku długotrwałego pełnego zachmurzenia lub przy innych niekorzystnych zjawiskach atmosferycznych, systemy off-grid są dodatkowo wyposażone w agregat prądotwórczy. Energetyka prosumencka jest to więc przejście od kupowanych produktów, czyli energii elektrycznej, ciepła i paliw transportowych od sektorowych dostawców w energetyce do prosumenckich łańcuchów wartości w gospodarce energetycznej. Tak więc energetyka prosumencka integruje popyt i podaż w tych trzech segmentach produktowych. Prosumenckie mikroinstalacje energetyczne – PME mogą stanowić istotny potencjał w zaopatrzeniu w energię elektryczną szczególnie na obszarach wiejskich. Wyróżnia się trzy główne segmenty energetyki prosumenckiej, tj. zastosowanie w domach jednorodzinnych – PME 1, we wspólnotach mieszkaniowych – PME 2 i w infrastrukturze budowlanej, czyli m.in. w szkołach, urzędach gminnych, szpitalach – PME 3. W Polsce na terenach wiejskich liczbę małych gospodarstw rolnych ocenia się na około 1,05 miliona w segmencie PME 1, które tworzą potencjalny rynek energetyki budynkowej słonecznej i wiatrowej. Liczba domów mieszkalnych we wspólnotach mieszkaniowych w segmencie PME 2, poza gospodarstwami rolnymi, wynosi około 2 do 2,5 milionów. Syntetyczne wartości wskaźnika nieciągłości, czyli braku zasilania w energię elektryczną na terenach wiejskich są około 5 razy większe niż w miastach. Prosumenckie mikroinstalacje energetyczne

wykorzystujące odnawialne źródła energii są także najefektywniejszym sposobem spełnienia wymogów Pakietu 3x20. Instalacja PME powinna być wyposażona w baterię akumulatorów, zasobnik ciepła, a także w optymalną, inteligentną strukturę zarządzania energią – smart-grid [4-6].

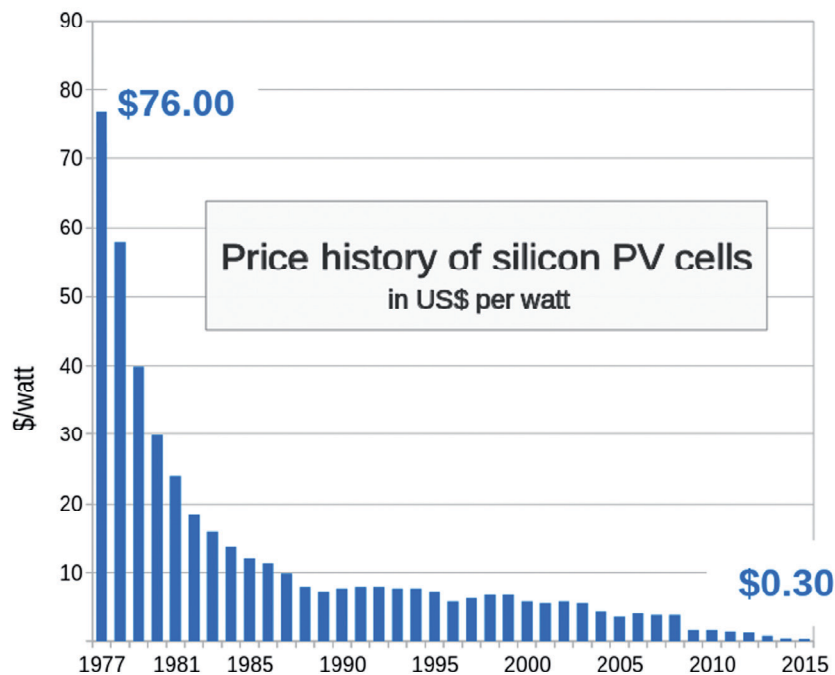
## 1. CHARAKTERYSTYKA SYSTEMÓW FOTOWOLTAICZNYCH – AKTUALNE TENDENCJE

W Polsce udział budynków jednorodzinnych w powstawaniu smogu wynosi około 40% co oznacza, że jest wprost proporcjonalny do całkowitego zużycia energii w budynkach. Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w budynkach w celach grzewczych jest ściśle związane z obniżeniem emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych do atmosfery. Jest to szczególnie istotne w Polsce, w której udział energii elektrycznej wytworzonej z paliw kopalnych wynosi około 80%, a na cele grzewcze zużywa się około 12 mln Mg węgla kamiennego. Emisja z procesów spalania paliw stałych do ogrzewania budynków i ze środków transportu jest przyczyną końcowego miejsca w rankingu czystości powietrza (pyły zawieszone PM 10 i PM 2,5) [7-10]. Ekologiczną energię elektryczną można również produkować dysponując odpowiednimi warunkami obszarowymi lub wykorzystując ekologiczne źródła znacznej mocy. W przeciętnych polskich warunkach nie dysponuje się jednak odpowiednio silnym źródłem i dużą powierzchnią działki. Energia elektryczna w domach jednorodzinnych produkowana jest najczęściej w modułach fotowoltaicznych na niewielką skalę, czyli w mikroinstalacjach [11]. Dynamikę rozwoju mocy systemów fotowoltaicznych PV dla instalacji z koncesją URE w Polsce w latach 2009-2016 przedstawiono w tabeli 1 [11-16].

Tabela 1. Dynamika rozwoju systemów fotowoltaicznych PV w Polsce w latach 2009-2016 – instalacje z koncesją URE – opracowanie własne na podstawie [11-16]  
 Table 1. Growth dynamics of photovoltaic PV systems in Poland in 2009 - 2016 - installations with ERO (Energy Regulatory Office - URE) concession - own work on the basis of [11-16]

Rok	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Moc systemów PV, MW	0,001	0,033	1,125	1,290	1,901	21,004	71,031	99,098
Wartość w stosunku do roku bazowego 2009	1	33	1125	1290	1901	21 004	71 031	99 098

Moc instalacji PV zwiększyła się prawie 100 000 razy porównując 2016 rok w stosunku do bazowego roku 2009 – tabela 1 [11-16]. Przy uwzględnieniu także mikroinstalacji, czyli systemów PV o mocy do 40 kW, ogólna moc zainstalowanych systemów fotowoltaicznych w 2016 roku w Polsce wynosiła około 200 MW. Pomimo tak dynamicznego rozwoju udział fotowoltaiki w odnawialnych źródłach energii jest nieznaczny – tabela 2 i w 2016 roku wynosił zaledwie 1,18%, a uwzględniając moc PV w mikroinstalacjach wynosi około dwa razy więcej, czyli 2,36%. Tak szybkemu rozwojowi systemów fotowoltaicznych w latach 1977+2015 sprzyjał spadek ceny za moc 1 W – rys. 1. W instalacjach PV cena 1 W zmniejszyła się z 76,00 do 0,30 USD, czyli ponad 253 razy wg Bloomberg New Energy Finance & pv.energytrend.com.



Source: Bloomberg New Energy Finance & pv.energytrend.com

Rys. 1. Zmiana ceny jednostkowej za moc 1W w ogniwach fotowoltaicznych w latach 1977 – 2015 w USD/W wg Bloomberg New Energy Finance & pv.energytrend.com  
 Fig. 1. The change of unit price for 1W – in photovoltaic cells in 1977 - 2015 in USD/W (source: Bloomberg New Energy Finance & pv.energytrend.com)

Cena jednostkowa ogniw fotowoltaicznych zależy także od kraju i producenta. Przyjmuje się, że ceny ogniw w okresie ostatnich 30 lat taniały o około 22% w wyniku każdego kolejnego podwojenia rynku, czyli następuje wraz ze wzrostem łącznej fotowoltaicznej mocy zainstalowanej. Najniższe ceny są oferowane przez firmy hinduskie, chińskie i japońskie. Aktualny poziom i trend cen za 1 W mocy w ogniwach fotowoltaicznych w różnych krajach w okresie od stycznia 2016 do kwietnia 2017 pokazano na rys. 2 [17], gdzie Q – oznacza odpowiedni kwartał roku.

Począwszy od lutego 2017 zauważa się tendencję wzrostową w USA i stabilizację ceny w pozostałych krajach Chinach, Japonii i Indiach na poziomie ok. 0,40 USD/W. Może to wynikać z postępowania prowadzonego przez International Trade Commission na wniosek amerykańskich producentów modułów fotowoltaicznych dotyczącego restrykcji handlowych na import modułów PV z Chin. Jednak podaż modułów na rynku chińskim została zabsorbowana w wyniku dynamicznego wzrostu inwestycji fotowoltaicznych, to jest mocy wynoszących odpowiednio 24,4 w pierwszej połowie i 10,5 GW w lipcu 2017 roku [17].

W tabeli 2 przedstawiono udział zainstalowanych systemów fotowoltaicznych z koncesją URE do całkowitej mocy w odnawialnych źródłach energii w Polsce, który jednak jest ciągle nieznaczny. Moc ogniw fotowoltaicznych podaje się dla warunków STC i NOCT. Porównując moc przykładowego modułu solarnego, polikrystalicznego Hanwha Q-Cells QPRO-G3-BF-265 o mocy średniej 265 W, 60-ogniowy, czarna ramka – otrzymuje się moc odpowiednio w warunkach: STC – 267,5 Wp i NOCT – 197,1 Wp

[18,19]. Sprawność (skuteczność) konwersji energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną w ogniwach PV dynamicznie rośnie, zwiększyła się kilkadziesiąt razy w latach 1976-2016 i aktualnie w warunkach laboratoryjnych wynosi 46.0% – rys. 3 [20]. Tak wysokie sprawności są osiągnięte jednak w ogniwach produkowanych w specjalnych technologiach i na bardzo niewielką skalę.

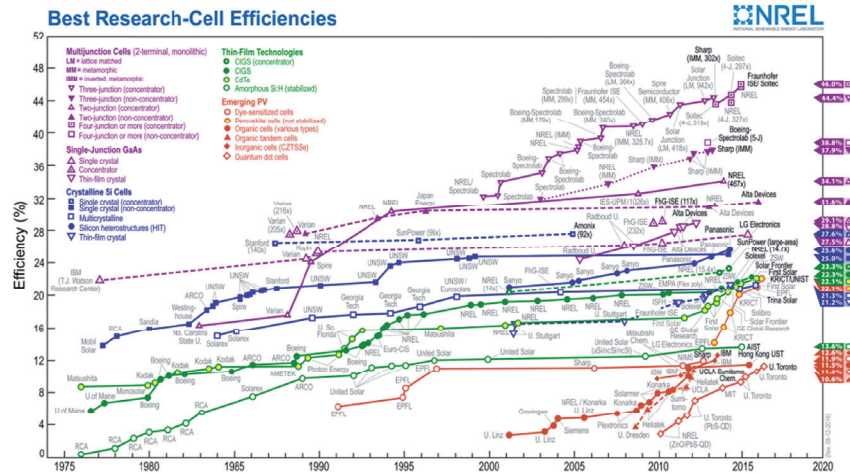


Rys. 2. Cena za 1 W mocy w ogniwach fotowoltaicznych w różnych krajach w okresie styczeń 2016 – kwiecień 2017 [17]  
Fig. 2. The price for 1W power in photovoltaic cells in different countries in the period between January 2016 and April 2017 [17]

Tabela 2. Udział zainstalowanych systemów fotowoltaicznych PV w odnawialnych źródłach energii w latach 2009-2016 w Polsce w stosunku do instalacji z koncesją URE – opracowanie własne na podstawie [11-16]  
Table 2. The participation of installed photovoltaic PV systems in renewable energy sources in 2009-2016 in Poland in relation to installations with ERO (Energy Regulatory Office - URE concession) concession - own work based on [11-16]

Rok	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
OZE	1 993,246	2 556,423	3 082,043	4 416,088	5 510,684	6 028,637	6 970,033	8 415,541
PV/OZE [%]	0,00005	0,001	0,0365	0,029	0,034	0,35	1,02	1,18

Sprawności ogniw PV wytwarzanych w masowej skali wynoszą około 20%. Najbardziej wydajne dostępne na rynku są panele Sunpower serii X produkcji USA, które mają sprawność rzędu 21,5% co z powierzchni 1 m x 1,7 m umożliwia otrzymanie 345 W [11]. Aktualnie produkowane seryjnie w Chinach ogniwa PV przez firmę JinkoSolar osiągają sprawności odpowiednio dla ogniw monokrystalicznych – 21,35, a dla polikrystalicznych – 18,9% [21]. Moc w systemach fotowoltaicznych przypadająca na jednego mieszkańca, wg EurObserv'ER w 2016 roku, wynosi w Polsce 2,3 Wp, wobec średniej w Unii Europejskiej równej 186,1 Wp. W krajach UE przykładowe moce PV są równe odpowiednio: w RFN – 489,8, Czechach – 197,7, a na Słowacji – 109 Wp. Tak więc, pomimo bardzo dużej dynamiki wzrostu mocy zainstalowanych systemów fotowoltaicznych, Polska znajduje się dopiero na 26 miejscu w Unii Europejskiej. Wg [22] w Polsce do 2021 roku ceny energii elektrycznej dla gospodarstw domowych będą rosły co roku o około 4%, czyli wzrost cen w tym okresie może wynosić około 20%. Aktualnie średnia cena energii elektrycznej pozyskiwanej z sieci dla gospodarstw domowych wynosi około 0,60 zł/kWh, natomiast koszt energii wygenerowanej z domowej instalacji fotowoltaicznej szacuje się na około 0,30 zł/kWh. Przyjmuje się, że każdy kilowat energii elektrycznej wytworzonej z instalacji fotowoltaicznej ogranicza emisję roczną o około 16 kg NO<sub>x</sub>, 9 kg SO<sub>x</sub> oraz od 600 do 2300 kg CO<sub>2</sub> w zależności od składu paliwa konwencjonalnego i wartości natężenia promieniowania słonecznego [23].



Rys. 3. Efektywność konwersji ogniw fotowoltaicznych wytwarzanych od 1976 roku (Narodowe Laboratorium Energii Odnawialnej Źródeł Energii) [20]

Fig. 3. Photovoltaic cells conversion efficiency in the period of 1976-2016 (National Renewable Energy Laboratory) [20]

Magazynowanie wytworzonej energii elektrycznej metodami heliologicznymi i helioelektrycznymi (fotowoltaicznymi) w skali makro jest istotnym problemem technologicznym. W RFN firma SWB należąca do koncernu energetycznego EWE zamówiła w szwajcarskiej firmie Leclanche dostawę bateryjnego, złożonego z sześciu kontenerów magazynu energii o pojemności 15 MWh, działającego w ramach układu hybrydowego zespoleonego z magazynem termalnym. Przyjęty sposób rozwiązania – technologia termalnego gromadzenia energii – zapewnia większą efektywność inwestycji. W planach koncernu EWE jest budowa do 2023 roku największego magazynu energii na świecie – przepływowej baterii o docelowej mocy 120 MW i pojemności 700 MWh. Do realizacji tego celu wykorzysta się kawerny solne, w których przechowywany jest gaz ziemny. Ocenia się, że ilość zmagazynowanej w dwóch kawernach energii może wystarczyć do zaspokojenia godzinowego zapotrzebowania na energię miasta wielkości Berlina [24].

## 2. CHARAKTERYSTYKA ZASTOSOWANIA MIKROINSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH ZINTEGROWANYCH Z BUDYNKAMI (BIPV).

Przykładami praktycznych zastosowań fotowoltaiki są przede wszystkim zintegrowane systemy fotowoltaiczne w budownictwie BIPV (Building Integrated Photovoltaics). Instalacje fotowoltaiczne cechują się nie tylko efektywnością wytwarzania energii elektrycznej ale także estetyką. Fotowoltaika, praktycznie utożsamiana z budynkowymi systemami zintegrowanymi (BIPV), stanowi niemal 99%, wytwarzania energii elektrycznej wśród mikroinstalacji. Moduły BIPV cechują się dowolnością kształtów i kolorów praktycznie bez ograniczeń co umożliwia zrealizowanie niemal każdej koncepcji architektonicznej. Zastosowanie modułów fotowoltaicznych, szczególnie na fasadach, zastępując tradycyjne materiały okładzinowe ogranicza koszty materiałowe i pozwala uniknąć podwójnych kosztów robocizny. Ponadto zastosowanie zintegrowanych systemów fotowoltaicznych z budynkami poprawia bilans energii przez ograniczenie strat ciepłych szczególnie w trakcie wytwarzania energii elektrycznej [25]. Przyjmuje się, że rocznie



przeciętne gospodarstwo domowe zużywa około 2500 kWh energii elektrycznej. Dla takiego zużycia energii w domu jednorodzinnym typowa instalacja fotowoltaiczna powinna mieć moc około 3 kW. Mikroinstalacje fotowoltaiczne o mocy do 3 kW stanowią – 31%, a w zakresie 3-5 kW – 35%. Średnia wartość udziału własnego w instalacjach fotowoltaicznych wynosi 11% co oznacza, że 89% wytworzonej energii elektrycznej jest przekazywane do sieci. Jest to spowodowane głównie przez przesunięcie maksimum produkcji energii i jej zużycia. Najwięcej wytworzonej energii występuje odpowiednio w środku dnia i w okresie letnim, podczas gdy maksimum zużycia przypada na godziny popołudniowo-wieczorne i okres jesienno-zimowy. Sposobem na „przybliżenie” nałożenia maksimum produkcji i zużycia energii jest zwiększenie zużycia energii przed i w okresie południowym, co można zrealizować w wyniku zaprogramowania pracy urządzeń przez tzw. zarządzanie energią w budynku i jej wykorzystanie w układzie ogrzewania budynku z powietrzną pompą ciepła. [26,27]. Energia wygenerowana przez instalację fotowoltaiczną jest funkcją wielu zmiennych m.in. mocy nominalnej, rodzaju ogniwa, jego usytuowania i aktualnych warunków pogodowych. Maksymalne nasłonecznienie otrzymuje się przy prostopadłym ustawieniu powierzchni modułu do pozornego ruchu Słońca. W Polsce roczna gęstość promieniowania słonecznego na płaszczyznę poziomą wynosi od 950 do 1250 kWh/(m<sup>2</sup>•rok). Najczęściej w przybliżeniu przyjmuje się, że wartość średnia nasłonecznienia (insolacji, gęstości rocznej promieniowania) zawiera się w przedziale 1000÷1050 kWh/(m<sup>2</sup>•rok). Gęstość dobową promieniowania słonecznego jest mała i nawet w strefie równikowej wynosi zaledwie 300 W/m<sup>2</sup>, natomiast w Polsce nie przekracza 100 W/m<sup>2</sup>. W Polsce średnia wartość usłonecznienia, czyli czasu widoczności tarczy Słońca, wynosi około 1600 h/rok. Średnie globalne wartości nasłonecznienia dla powierzchni jednostkowej pochylonej pod optymalnym kątem są bardzo zbliżone dla Polski i Niemiec i wynoszą odpowiednio: 1161 i 1148 kWh/(m<sup>2</sup>•rok). Ponadto rozkład promieniowania słonecznego w ciągu roku w Niemczech jest jeszcze bardziej nierównomierny niż w Polsce. Natężenie promieniowania padające na powierzchnię modułu fotowoltaicznego prostopadłą do Słońca w stosunku do powierzchni poziomej jest w lecie o 50%, a w okresie zimowym – trzykrotnie większe [23]. Wartości nasłonecznienia w maju i czerwcu mogą dochodzić do 160 kWh/(m<sup>2</sup>•miesiąc), a w grudniu i styczniu wynoszą odpowiednio około 20 i 25 kWh/(m<sup>2</sup>•miesiąc) [27]. W systemach stacjonarnych kąt ustawienia powierzchni modułu do powierzchni horyzontalnej jest stały. W Polsce przyjmowany jako optymalny kąt nachylenia modułów fotowoltaicznych w instalacjach stacjonarnych w stosunku do płaszczyzny poziomej wynosi przeważnie od 35 do 37°. Przykładowe wartości optymalnego kąta wynoszą 34° dla Lublina [28] i 36° dla Gdańska [23] ale podawane są także większe wartości 45° [28]. Największą sprawność kolektor otrzymuje się przy automatyzacji ruchu za Słońcem tzw. tracking systems. Stosowane są dwa typy systemów nadążających za Słońcem jednoosiowe i dwuosiowe. Parametry techniczno-energetyczne wpływające na moc instalacji fotowoltaicznych przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Warunki techniczno-energetyczne wpływające na moc instalacji fotowoltaicznych dla takiej samej powierzchni paneli – A = const  
 Table 3. Technical and energy conditions affecting the power of photovoltaic installations for the same panel area - A = const

Parametr	Charakterystyka parametru
Miejsce instalacji	W zależności od szerokości geograficznej zmienia się kąt padania promieni słonecznych; czynnik ten nie ma większego wpływu, jeżeli planowane instalacje znajdują się na terenie Polski.
Kąt nachylenia stały	Powierzchnia, na której instalujemy panele powinna być nachylona pod kątem co najmniej 15 stopni, ze względu na proces samooczyszczania i odśnieżania paneli. Przeważnie, jako optymalną wartość stałego kąta nachylenia w roku, przyjmuje się $\alpha \approx 35\text{--}37^\circ$ . Optymalne wartości kąta pochylenia wynoszą dla okresu ciepłego $\alpha_c \approx 42,5^\circ$ , a dla chłodnego $\alpha_c \approx 70^\circ$ względem poziomu [23].
Kąt nachylenia zmienny – instalacje nadążne tzw. sun-tracking	Wg [29] różnica między systemem nadążnym, śledzącym pozorny ruch Słońca, a systemem ze stałym (nieruchomym) kątem nachylenia wynosi 2,5% co daje różnicę 27 kWh/(m <sup>2</sup> •rok). Oznacza to, że w przypadku mikroinstalacji fotowoltaicznych praktycznie zastosowanie systemu nadążnego jest ekonomicznie nieuzasadnione.
Ograniczenia i uwarunkowania instalacji	Przeszkody otaczające instalację, które mogą spowodować zacienienie lub uniemożliwić instalację – drzewa, budynki, słupy, ogrodzenia oraz w przypadku dachów dodatkowo świetliki, okna i kominy.
Dodatkowe wymagania infrastrukturalne wynikające z projektu	Stacje transformatorowe, drogi technologiczne i pożarowe oraz ogrodzenia terenu.
Wymagania technologiczne	Dopuszczalne maksymalne obciążenie dachu oraz wytrzymałość konstrukcji na siłę wiatru i śnieg.
Przyjmuje się, że z 1 kWp z instalacji PV wyprodukuje się w ciągu roku 1000 kWh energii elektrycznej.	

W tabeli 4 przedstawiono dynamikę wzrostu liczby, mocy i potencjału do rocznej produkcji energii elektrycznej w mikroinstalacjach fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkami w latach 2013-2017 [30,31].

Tabela 4. Dynamika wzrostu liczby, mocy i potencjału do rocznej produkcji mikroinstalacji fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkami – opracowanie własne na podstawie [30,31]  
 Table 4. Growth dynamics of the number, power and potential for annual production of solar micro-installations integrated with buildings - own elaboration based on [30,31]

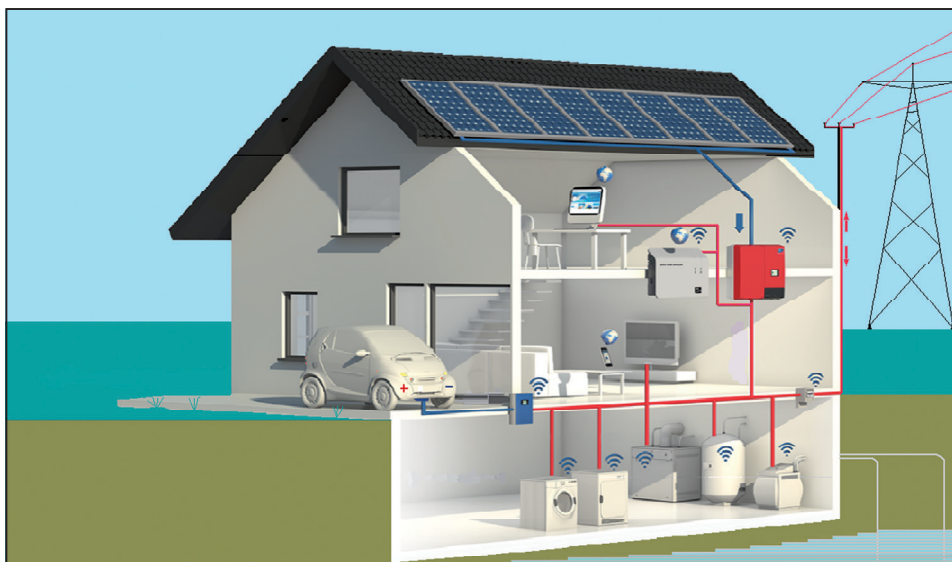
Parametr	Lata					Dynamika wzrostu 2017/2013
	2013	2014	2015	2016	2017	
Liczba instalacji	40	574	4217	14 792	27 310	682,75
Moc zainstalowana, MW	0,2	2,8	50,7	91,2	172,5	862,5
Potencjał rocznej produkcji energii, MWh	189	2646	47 912	86 184	163 010	862,49

Z porównania danych zamieszczonych w tabelach 1 i 4 wynika, że wartości zainstalowanej mocy minimalnie się różnią, co jest spowodowane korzystaniem z różnych źródeł, czyli URE [11-16] i raportu SBF Polska [30,31]. W ostatnich trzech latach, czyli 2015-2017 – dynamika liczby, mocy i potencjału produkcji energii ustabilizowała się i wynosi rok do roku około dwa razy. Pomimo tak dużej dynamiki wzrostu mikroinstalacji



fotowoltaicznych ich udziały w Polskim Systemie Energetycznym, którego średnia moc w 2017 roku wyniosła 43,3 GW, są niewielkie i wynoszą odpowiednio: w wytworzonej energii elektrycznej – około 0,1%, a w zainstalowanej mocy – około 0,4% [30,31].

W prosumenckich mikroinstalacjach energetycznych wygenerowaną energię elektryczną ponad potrzeby własne zasilania odbiorników domowych można przekazać do sieci energetycznej – instalacje typu on-grid lub magazynować w akumulatorach – instalacje typu on-grid i off-grid. Efektywnym i przyszłościowym sposobem akumulacji energii elektrycznej jest także zasilanie samochodu elektrycznego. Czysta energia powinna pochodzić z odnawialnych źródeł energii – OZE, najlepiej z instalacji fotowoltaicznych. W literaturze [10,11,32] przedstawiono koncepcję prosumenckiej instalacji fotowoltaicznej w domu jednorodzinnym – rys. 4. Akumulatory samochodu elektrycznego są zasilane przy nadmiarze produkowanej energii, nie zużywanej gospodarstwie domowym, z paneli fotowoltaicznych usytuowanych na dachu budynku lub wolnostojącego garażu.



Rys. 4. Schemat aksonometryczny domowej mikroinstalacji fotowoltaicznej podłączonej do sieci energetycznej [10,11,32]

Fig. 4. Axonometric diagram of a home photovoltaic micro-solar installation to the power grid [10,11,32]

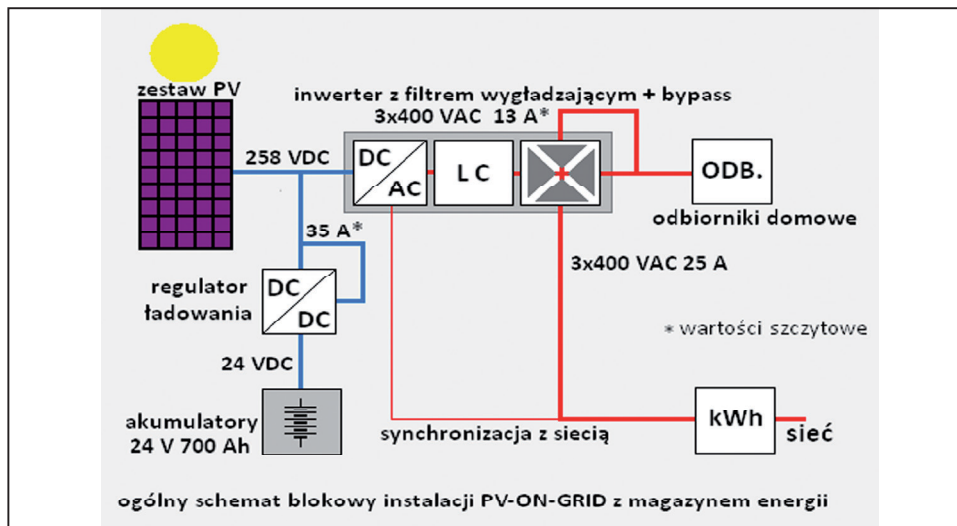
Samochody elektryczne są wyposażane w różne konstrukcje złączy – portów ładowania, które zależą od producenta i rynku, czyli kontynentu i kraju użytkowania. W Europie najczęściej nowe samochody elektryczne będą wyposażane w porty ładowania: Typ 2 – wykorzystywany do ładowania 1 i 3 fazowego, CCS Colombo 2 – mający jeszcze segment stałoprądowy umożliwiający ładowanie z zewnętrznego źródła oraz CHAdeMO – z osobnym portem do ładowania prądem stałym. W świecie dominującymi są porty: Typ 2 – najbardziej rozpowszechniony i rozszerzona wersja CCS Colombo 2. W domowych instalacjach najczęściej stosuje się jednofazowe gniazdo elektryczne o najniższych parametrach, które jest wykorzystywane do ładowania z mocą do 3,7 kW (230 V, 16 A). Port ładowania powinien być kompatybilny z konkretnym samochodem. W celu dostosowania infrastruktury ładowania do jak największej liczby samochodów punkty ładowania są wyposażane w 2-3 rodzaje złączy [33].

W budynkach jednorodzinnych przyjmowane w projektach przeciętne wartości zużycia energii elektrycznej w gospodarstwie jednorodzinnym przedstawiono w tabeli 5 [34].

Tabela 5. Przyjmowane w projektach przeciętne wartości zużycia energii elektrycznej w urządzeniach w domu jednorodzinnym - opracowanie własne na podstawie [34]  
 Table 5. The average values of electricity consumption in devices in a single-family home accepted in the projects - own study based on [34]

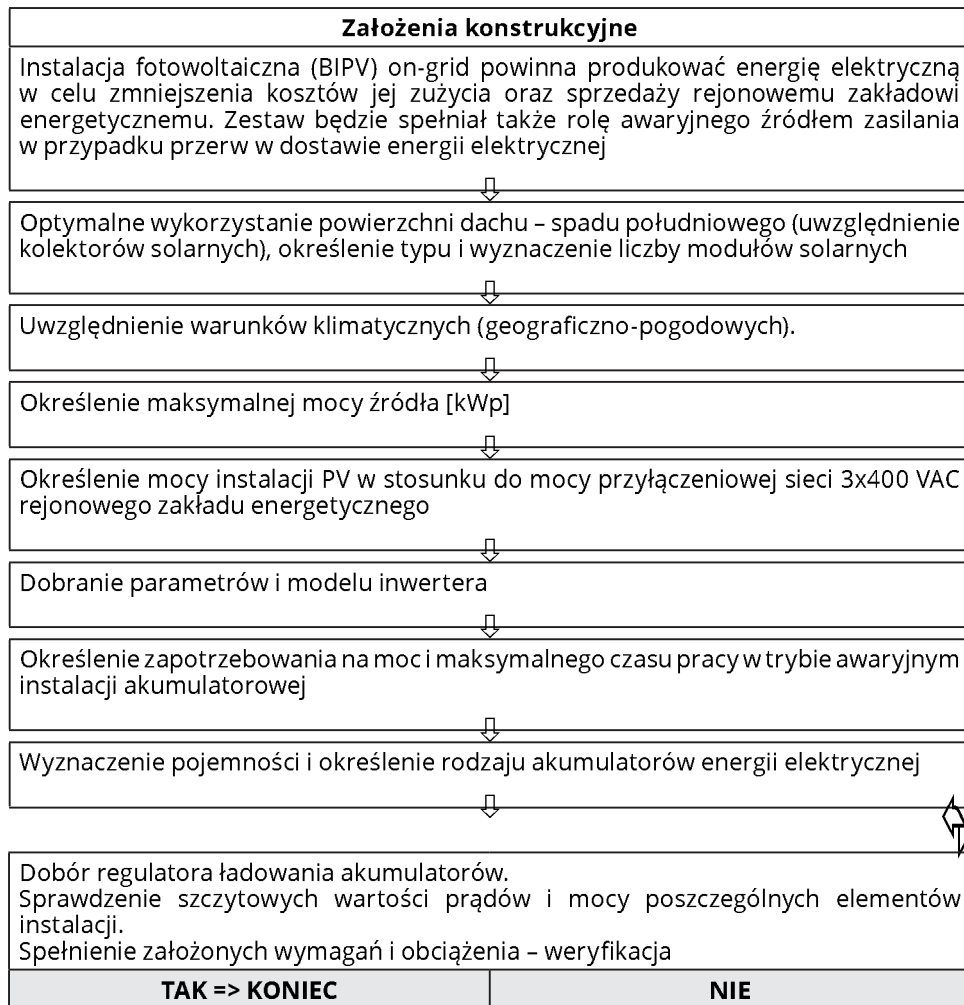
Rodzaj urządzenia	Zużycie energii przez urządzenie, kWh/dobę
Kuchenka	2
Lodówka	1
Pralka	1
Żelazko	0,5
Oświetlenie	0,5
Multimedia DMP (Digital MediaPlayer) – RTV, komputer, drukarka, skaner; DMP (Digital Media Player)	0,5
Rezerwa zapotrzebowania ok. 35%	2
Razem	7,5 kWh/dobę

Wg pracowni projektowej a-zero [35] przy zapotrzebowaniu na energię elektryczną dla przeciętnego domu jednorodzinnego o powierzchni użytkowej 150-200 m<sup>2</sup>, w którym nie zainstalowano ogrzewania elektrycznego, pompy ciepła, wentylacji mechanicznej, ani klimatyzacji – powinno się przyjmować wartość – 12,5 kWh/dobę. Przy założeniu, że przeciętna sprawność modułów fotowoltaicznych wynosi 12%, współczynnik strat między modułem i odbiornikiem – 0,75, a średnia dzienna (dobowa) wartość nasłonecznienia jest równa – 3 kWh/(m<sup>2</sup>•dzień), wówczas po przyjęciu średniej z [34] i [35] dobowej wartości zapotrzebowania na energię elektryczną, czyli 10 kWh/dobę, obliczona powierzchnia modułów fotowoltaicznych wynosi około 37 m<sup>2</sup>. Schemat procesowy projektowanej instalacji fotowoltaicznej dla domu jednorodzinnego przedstawiono na rys. 5, a algorytm ogólny procesowy projektowania i doboru elementów składowych, zintegrowanej z budynkiem mikroinstalacji fotowoltaicznej (BIPV) on-grid z magazynem energii, przedstawiono na rys. 6 [10].



Rys. 5. Schemat procesowy mikroinstalacji fotowoltaicznej zintegrowanej z budynkiem (BIPV) on-grid z magazynem energii [10]

Fig. 5. Process diagram of a photovoltaic micro-installation integrated with the building (BIPV) on-grid with an energy store [10]



Rys. 6. Algorytm ogólny projektowania i doboru elementów składowych mikroinstalacji fotowoltaicznej zintegrowanej z budynkiem (BIPV) on-grid [10]  
 Figure 6. The general algorithm for the design and selection of components for photovoltaic micro-installations integrated with the building (BIPV) on-grid [10]

Algorytm przedstawiony na rys, 6 wykorzystano do obliczenia parametrów mikroinstalacji PV [10]. Przyjęto następujące założenia:

- dom energooszczędny o powierzchni  $A = \text{ok. } 165 \text{ m}^2$ ,
- instalacja PV powinna zapewnić bezpieczeństwo działania i komfort przebywania w analizowanym domu zamieszkałym przez cztery osoby w okresie zimowym, w niekorzystnych warunkach, tj. w przypadkach:
  - przerwy dostawy energii z sieci energetycznej,
  - braku nawet minimalnej wartości natężenia promieniowania słonecznego, potrzebnego dla produkcji energii przez panele PV przez okres jednej doby.

Na podstawie przyjętego wyposażenia domu – urządzeń i oświetlenia – określono zapotrzebowanie na energię elektryczną w przedmiotowym energooszczędnym domu jednorodzinnym, które wynosi 9 kWh/dobę oraz zapotrzebowanie na moc i energię w okresie zimowym, które wynoszą odpowiednio: 6,85 kW i 8 kWh. Wyznaczono i dobrano parametry mikroinstalacji fotowoltaicznej on-grid, która składa się z 36 paneli polikrystalicznych SELFA SV60P.3-250 o sprawności 15,3%, całkowitej mocy szczytowej 9,0 kWp i jest wyposażona

wmagazyn energii elektrycznej o napięciu 24V i pojemności 700Ah. Szczytowa produkcja energii instalacji PV, wspomagana i stabilizowana bufora baterii akumulatorów osiąga natężenie prądu w układzie 3x400 VAC na poziomie 13 A. Moc instalacji jest równa 9,0 kW i powinna, z wyłączeniem sporadycznych przypadków, zapewnić potrzeby czteroosobowej rodziny w analizowanym domu w ciągu roku. W przypadku oszczędniejszego użytkowania urządzeń elektrycznych, zwłaszcza AGD, RTV i multimediów można obniżyć zużycie energii elektrycznej do 5 kWh, co wydłuży czas pracy bufora do prawie 2 dni [10].

W literaturze [36] przedstawiono dobór instalacji fotowoltaicznej i magazynu energii elektrycznej w autonomicznym budynku jednorodzinnym o powierzchni 200 m<sup>2</sup> na podstawie symulacji. Z analizy instalacji fotowoltaicznych wynika, że jedynie instalacja o mocy 9 kW i powierzchni 60 m<sup>2</sup> może być umieszczona na dachu budynku. W instalacji PV przyjęto ogniwa o sprawności 15%. Pojemność akumulatora energii elektrycznej współpracującego z instalacją PV o mocy 9 kW powinna wynosić co najmniej 79 kWh. Są to wartości zbliżone do obliczonych, wg przedstawionego algorytmu – rys. 6, dla energooszczędnego domu jednorodzinnego [10].

W celu optymalnego wykorzystania energii słonecznej w procesach projektowania systemów fotowoltaicznych stosuje się wiele programów symulacyjnych, wśród których wyróżnia się kilka kategorii, takich jak: narzędzia do wymiarowania (programy narzędziowe), programy symulujące działanie systemu fotowoltaicznego, otwarte środowiska symulacyjne (MATLAB/SIMULINK czy LabVIEW), bazy danych zawierające dane o nasłonecznieniu w rejonach świata – najbardziej uniwersalną jest baza danych MeteorNorm. Sprawność eksploatowanych zainstalowanych ogniw fotowoltaicznych nie jest stała i zależy głównie od nasłonecznienia i temperatury powierzchni paneli. Ogniwa fotoelektryczne przy dużym nasłonecznieniu mają sprawność zbliżoną do wyznaczonej w warunkach NOCT. W literaturze przyjmuje się, że jeżeli dla ogniw polikrystalicznych sprawność energetyczna wynosi 18%, to w typowych zastosowaniach dla modułów fotowoltaicznych wynosi od 9 do 12% [37]. Maksymalne sumy dziennego promieniowania mogą dochodzić w lecie do 8 kWh/(m<sup>2</sup>•dzień). Nadmiar wytworzonej w takich warunkach energii elektrycznej może być oddawany odpłatnie do sieci energetycznej. W słoneczny dzień zimy wartość nasłonecznienia może wynosić nawet 3 kWh/(m<sup>2</sup>•dzień) [38]. W nocy oraz w okresie zimowym, w warunkach minimalnego lub niemal całkowitego braku nasłonecznienia, energia elektryczna jest pobierana z sieci energetycznej lub ze zmagazynowanych zasobów. Do przechowywania energii elektrycznej najczęściej wykorzystuje się ogniwa chemiczne, których wadą jest ograniczona żywotność, relatywnie wysoka cena oraz użycie toksycznych związków do ich produkcji co powoduje konieczność kosztownej utylizacji. Z tego względu, w celu zapewnienia bezpieczeństwa eksploatacyjnego, najczęściej magazynujemy tylko taki zasób energii, której ilość zapewnia zasilanie sterowania awaryjnym źródłem ciepła. Taką rolę spełnia najczęściej kocioł gazowy lub kocioł spalający ekologiczne, odnawialne paliwo, do których można zaliczyć na przykład pelety, wytwarzane z niektórych gatunków drewna lub z odpadów organicznych, pochodzących np. z przemysłu spożywczego.

## PODSUMOWANIE

W ostatnich trzech latach 2015-2017 liczba, moc i potencjał rocznej produkcji energii elektrycznej w mikroinstalacjach fotowoltaicznych zwiększała się każdorazowo około dwa razy. Pomimo tak dużej dynamiki wzrostu mikroinstalacji fotowoltaicznych ich udziały w Polskim Systemie Energetycznym, są niewielkie i wynoszą odpowiednio: w wytworzonej energii elektrycznej około 0,1%, a w zainstalowanej mocy – około 0,4%. Wytwarzanie energii elektrycznej w mikroinstalacjach fotowoltaicznych w budynkach jednorodzinnych

powoduje zmniejszenie zużycia energii pierwotnej oraz wymierne korzyści ekologiczne w wyniku redukcji emisji zanieczyszczeń pyłowo-gazowych. Produkcja energii elektrycznej w instalacjach fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem on-grid (BIPV) zwiększa znacząco potencjał energetyki prosumenckiej i zapewnia bezpieczeństwo eksploatacyjne, które w przedstawionym rozwiązaniu wynosi do prawie 2 dni. Zastosowanie mikroinstalacji fotowoltaicznych sprzyja również zrównoważonemu, zdywersyfikowanemu rozwojowi energetyczno-środowiskowemu, szczególnie na terenach wiejskich. Zintegrowane systemy fotowoltaiczne w budownictwie (BIPV), tj. z konstrukcją dachu lub fasadą budynku, mogą także poprawić estetykę budynku.

#### BIBLIOGRAFIA

- [1] Gil S., Rozpondek M., Grychowski T.: Porównanie warunków cieplnych i jakości środowiska wewnętrznego budynku energooszczędnego z budynkiem tradycyjnym. W: Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja 2011, nr 11, s. 459 – 465. ISSN 0137-3676.
- [2] Niezabitowska E. (red): Budynek inteligentny t. 1. Potrzeby użytkownika a standard budynku inteligentnego. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2005, s. 42, 47-49, 175-183. ISBN 83-7335-224-4.
- [3] Mikoś J. Budownictwo ekologiczne. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000, s. 119-122, 235-243. ISBN: 83-88000-52-7.
- [4] Popczyk J.: Energetyka prosumencka. Publikacja europejskiego Kongresu finansowego. Instytut Badań nad Gospodarką Rynkową – Gdańska Akademia Bankowa & Jan Popczyk, 2014, [dostęp 2 listopada 2017]. Dostępny w: [http://www.efcongress.com/sites/default/files/energetyka\\_prosumencka.pdf](http://www.efcongress.com/sites/default/files/energetyka_prosumencka.pdf)
- [5] Popczyk J.: Zmiana paradygmatu rozwoju energetyki. Cud energetyczny? Polityka zrównoważonego rozwoju w gospodarce komunalnej – doświadczenia szwedzkie i polskie realia: materiały konferencyjne, Katowice 6 czerwiec 2016 r. Wyższa Szkoła Techniczna w Katowicach – Ambasada Królestwa Szwecji, 2016.
- [6] Popczyk J.: Potencjał energetyki prosumenckiej w kształtowaniu gospodarki niskoemisyjnej. W: Gospodarka niskoemisyjna. Uwarunkowania i wyzwania. Wydawnictwo Adam Marszałek, Toruń 2014, s. 170-171, 188-191.
- [7] Rozpondek M., Kasprzyk G.: Energetyczno-ekologiczne aspekty zastosowania pompy ciepła w budynku jednorodzinnym. W: Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach. Wydawnictwo WST, 2016 nr 008, s. 75-86. ISSN 2082-7016.
- [8] Rozpondek M., Kasprzyk G.: Systemy grzewcze w budynkach jednorodzinnych jako instrument energetyki prosumenckiej. W: Zeszyty Naukowe Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach. Wydawnictwo WST 2016 nr 008, s. 97-106. ISSN 2082-7016.
- [9] Budynki jednorodzinne odpowiadają za 40 proc. smogu w Polsce. [dostęp 11 listopada 2017]. Dostępny w: <http://gramwzielone.pl/walka-ze-smogiem/28808/budynki-jednorodzinne-odpowiadaja-za-40-proc-smogu-w-polsce>
- [10] Kasprzyk G.: Opracowanie projektu procesowego zastosowania wybranych odnawialnych źródeł energii w domu jednorodzinnym. Praca dyplomowa inżynierska. Wyższa Szkoła Techniczna – Wydział Architektury, Budownictwa i Sztuk Stosowanych, Katowice 2016.
- [11] Rozpondek M.: Warsztaty – fotowoltaika pod lupą. Materiały szkoleniowe – wpływ nowoczesnych technologii solarnych na środowisko naturalne. WST, Katowice 2017.
- [12] Rynek fotowoltaiki w Polsce. Raport. Warszawa: Instytut energetyki Odnawialnej, 2016 [dostęp 12.09.2017]. Dostępny w: [http://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2016/11/Raport\\_Rynek\\_fotowoltaiki-w-Polsce-2016.pdf](http://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2016/11/Raport_Rynek_fotowoltaiki-w-Polsce-2016.pdf)
- [13] [dostęp 2.09.2017]. Dostępny w: [http://www.cire.pl/pliki/2/edukacja\\_wiecka\\_po\\_adpo\\_kor.pdf](http://www.cire.pl/pliki/2/edukacja_wiecka_po_adpo_kor.pdf)
- [14] [dostęp 17.09.2017]. Dostępny w: <http://www.polskapv.pl/wp-content/uploads/2016/05/Raport-Rozw%C3%B3j-polskiego-ryнку-fotowoltaicznego-w-latach-2010-2020.pdf>

- [15] [dostęp 2.10.2017]. Dostępny w: <http://ww2.senat.pl/k7/dok/opinia/2010/oe-155.pdf>
- [16] [dostęp 8.09.2017]. Dostępny w: <http://pv-polska.pl/>
- [17] Ceny modułów PV w USA zaczęły rosnać. Dlaczego? [dostęp 3 listopada 2017]. Dostępny w: <http://gramwzielone.pl/energia-sloneczna/28643/ceny-modulow-pv-w-usa-zaczely-rosnac-dlaczego>
- [18] [dostęp 22.09.2017]. Dostępny w: <https://www.powerstream.ca/attachements/Solar-Panel-Information.pdf> – 2.04.2017.
- [19] [dostęp 14.09.2017]. Dostępny w: <http://thegrid.rexel.com> – 2.04.2017.
- [20] [dostęp 16.09.2017]. Dostępny w: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_cell\\_efficiency](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_cell_efficiency) – 22.05.2017
- [21] [dostęp 21.09.2017]. Dostępny w: <http://gramwzielone.pl/energia-sloneczna/28820/chinski-skok-w-sprawnosci-ogniwa-krystalicznego> - 10.11.2017
- [22] [dostęp 12.11.2017]. Dostępny w: <http://swiatoze.pl/od-jutra-panele-fotowoltaiczne-w-ofercie-ikea/>
- [23] Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce. Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010. s. 24-32, 111-126, 157-159. ISBN 978-83-60233-58-0.
- [24] [dostęp 8.10.2017]. Dostępny w: <http://gramwzielone.pl/magazynowanie-energii/28821/niemcy-postawia-hybrydowy-magazyn-energii-z-bateriami-na-15-mwh>
- [25] Golubiewski G.: Fotowoltaiczne systemy zintegrowane z budynkiem – BIPV. W: GLOBEnergia 2010 nr 3, s. 5-51. ISSN 1897-1288.
- [26] Będkowska A.: Fotowoltaika w Polsce: ziarno na podatnej glebie. W: GLOBEnergia 2016 nr 3, s. 6-7. ISSN 1897-1288.
- [27] Obracaj D., Korzec M., Matusik M., Sas S.: Analiza możliwości wykorzystania paneli fotowoltaicznych w układzie ogrzewania budynku z powietrzną pompą ciepła. W: Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja 2017 (48) nr 6. s.240. ISSN 0137-3676.
- [28] Jastrzębska G.: Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowania. WKiŁ, Warszawa 2013, s. 137-138, 131-133, 188-193. ISBN 978-83-206-1847-1.
- [29] Sidor T.: Alternatywne źródła energii. Wydawnictwo WSZOP, Katowice 2011, s. 42-46. ISBN 978-83-61378-23-5.
- [30] [dostęp 17.03.2018]. Dostępny w: <http://polskapv.pl/rynek-mikroinstalacji-fotowoltaicznych-w-polsce-w-2017-r-wzroslo-o-81-mwp/>
- [31] [dostęp 18.03.2018]. Dostępny w: <http://globenergia.pl/mikroinstalacje-fotowoltaiczne-w-polskim-systemie-energetycznym-raport-sbf-polska-pv/>
- [32] Dostępny w: <http://info-car.pl/infocar/artykuly/historia-samochodu-elektrycznego.html>
- [33] Markiewicz A.: Ładowanie aut elektrycznych. Podstawy. W: GLOBEnergia 2018 nr 1, s. 62-65. ISSN 1897-1288.
- [34] Klugmann-Radziemska E.: Odnawialne źródła energii. Przykłady obliczeniowe. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2009, s. 85. ISBN 978-83-7348-255-5.
- [35] [dostęp 16.10.2017]. Dostępny w: <http://www.a-zero.pl/pracownia.html>
- [36] Dybiński, O.: Dobór instalacji fotowoltaicznej i magazynu energii elektrycznej w autonomicznym budynku jednorodzinnym na podstawie symulacji. W: Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja 2017 nr 4, s. 155-160. ISSN 0137-3676.
- [37] Praca zbiorowa. Chojnacki J.: Fotowoltaika. Odnawialne i nieodnawialne źródła energii. Poradnik. Wydawca TARBONUS 2008. s. 86-163, 221-256. ISBN: 978-83-7394-220-2.
- [38] [dostęp 24.10.2017]. Dostępny w: <http://www.instsani.pl/401/zasoby-energii-slonecznej>

## TECHNICAL AND ENERGY ASPECTS OF THE USE OF MICRO-INSTALLATIONS OF PV IN SINGLE-FAMILY BUILDINGS

### KEYWORDS

photovoltaics cells, prosumer energy, building integrated photovoltaics