



Paulina SAWICKA-CHUDY¹, Elżbieta RYBAK-WILUSZ²,
Maciej SIBIŃSKI³, Marian CHOLEWA¹, Ryszard PAWEŁEK⁴

Analiza zaopatrzenia w energię elektryczną budynku użyteczności publicznej z wykorzystaniem instalacji fotowoltaicznej i mikroturbiny

Streszczenie: W ostatnich latach poszukiwania nowych, efektywnych rozwiązań wytwarzania energii są skierowane na produkcję energii elektrycznej z wykorzystaniem nośników odnawialnych oraz przyjaznych środowisku. Spowodowało to wzrost zainteresowania ogniwami PV oraz systemami kogeneracyjnymi. W artykule, na tle historii rozwoju kolejnych generacji ogniw PV, zaprezentowano główne czynniki wpływające na ich parametry eksploatacyjne. Scharakteryzowano średnie dzienne promieniowanie słoneczne i prędkości wiatru w Łodzi. Przedmiotem badań była stacjonarna i nadążna instalacja fotowoltaiczna o łącznej mocy szczytowej 15 kWp oraz mikroturbina gazowa o mocy elektrycznej 30 kW, znajdujące się na Politechnice Łódzkiej na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, zasilające sieć elektroenergetyczną budynków laboratoriów. Pomiarów energetycznych prowadzono w 2016 roku i na ich podstawie wykonano analizę efektywności energetycznej i analizę finansową zaopatrzenia budynków w energię. Oceniono uzysk energii w modułach stacjonarnych i nadążnych oraz procentowe pokrycie energii elektrycznej z ogniw PV i mikroturbiny. Wyznaczono rozkład miesięcznych oszczędności, roczną oszczędność kosztów energii oraz czas zwrotu kosztów inwestycyjnych badanych systemów. Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że energia wytworzona przez moduły nadążne jest około 3 razy większa niż wytworzona w modułach stacjonarnych. Natomiast roczne oszczędności kosztów energii przy zastosowaniu mikroturbiny gazowej są około dziesięciokrotnie większe niż dla paneli nadążnych. Po przeprowadzeniu tej analizy można stwierdzić opłacalność stosowania agregatów kogeneracyjnych i paneli fotowoltaicznych, mimo dużych nakładów finansowych. Czas zwrotu nakładów inwestycyjnych wynosi około 12 lat podczas użytkowania instalacji przez cały rok.

Słowa kluczowe: instalacja fotowoltaiczna, system stacjonarny, system nadążny, mikroturbina gazowa, efektywność energetyczna

¹ Uniwersytet Rzeszowski, Katedra Biofizyki, Rzeszów; e-mail: sawicka61@wp.pl; mcholewa@ur.edu.pl

² Politechnika Rzeszowska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, Rzeszów; e-mail: elrywi@prz.edu.pl, współautor do korespondencji.

³ Politechnika Łódzka, Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych, Łódź; e-mail: maciej.sibinski@p.lodz.pl

⁴ Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, Łódź; e-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl

An analysis of the electricity supply at a public building utilizing photovoltaic systems and a microturbine

Abstract: Recently, the search for new effective energy production solutions has been focused on the production of electricity using renewable and environmentally friendly carriers. This resulted in an increased interest in PV cells and cogeneration systems. The article looks at the main factors affecting their operational parameters against the background of the development history of subsequent generations of PV cells. Average daily solar radiation and wind velocity in Lodz were characterized. The research was done on a static and tracking system with a total peak power of 15 kWp and a 30 kW microturbine. PV panels are installed on the building of the Institute of Electrical Power Engineering of the Lodz University of Technology and they work as part of DERLab. A microturbine is inside the building. Energy measurements were carried out in 2016 giving grounds for the analysis of energy efficiency and financial analysis of the energy supply in buildings. Energy yields in the static and tracking system as well as percentage coverage of electricity from PV cells and microturbines were assessed. The distribution of monthly savings, annual savings of energy costs and the payback time of the investment costs of the systems subject to the test were determined. The research we have done allows us to say that the energy produced by follow-up modules is about 3 times greater than that generated in stationary modules. On the other hand, the annual savings of energy costs using gas micro-turbines are about 10 times higher than those of lagging panels. The analysis shows that it is possible to determine the profitability of the microturbine and photovoltaic panels use despite large financial outlays. The payback period of investment outlays is about 12 years when using the installation throughout the year.

Keywords: photovoltaic installations, tracking system, fixed-tilt panels, gas microturbine, energy efficiency

Wprowadzenie

Ogniwa fotowoltaiczne umożliwiają zamianę energii Słońca na energię elektryczną. Pod wpływem oddziaływania promieniowania słonecznego na półprzewodnik, powstaje siła elektromotoryczna. Pojedyncze ogniwo PV w punkcie maksymalnej mocy generuje napięcie od 0,5 do 2,0 V (Dobrzański i in. 2011; Goetzberger i Hoffmann 2005; Dobrzański i in. 2009; Klugman-Radziemska 2010).

W 1839 roku A.C. Becquerel zaobserwował po raz pierwszy efekt fotowoltaiczny w obwodzie dwóch oświetlonych elektrod (Cl–Ag), które były zanurzone w elektrolicie. Fotowoltaika oparta na krzemie była możliwa dzięki wykorzystaniu metody otrzymywania monokryształów, którą odkrył polski chemik Jan Czochrański w 1916 roku (Boszkowicz 2013). Pierwsze zastosowanie ogniw krzemowych miało miejsce w 1958 roku. Zasilają one urządzenia pokładowe satelity Vanguard 1 i miały sprawność około 11% i 5 W mocy elektrycznej (Boszkowicz 2013; Vanguard 2018; Zhu 2012).

W ostatnich latach obserwuje się na świecie dynamiczny rozwój fotowoltaiki. Ogniwa możemy podzielić na trzy generacje. Pierwszą z nich określa się również mianem krzemowych ogniw fotowoltaicznych. Jest ona obecnie najczęściej wybieraną technologią w przypadku zastosowań naziemnych (Dumiszewska i in. 2014). Dzieje się tak dlatego, iż jest to surowiec szeroko dostępny i wystarczająco niezawodny, a jego właściwości fizyczne zostały przez lata już dobrze poznane (Znajdek i in. 2010). Najwyższe sprawności dla ogniw krzemowych wynoszą obecnie 26,7% (Green 2017).

Druga generacja materiałów fotowoltaicznych to cienkowarstwowe półprzewodniki, takie jak: krzem amorficzny, tellurek kadmu, mieszanina selenu, galu, indu i miedzi, siarczek miedzi i indu, tlenek tytanu i tlenki miedzi (Dumiszewska i in. 2014). Sprawności cienko-

warstwowych ogniw słonecznych są niższe od krzemowych i wahają się pomiędzy 10% a 21,7% (Green 2017). Jednak koszt ich produkcji jest również dużo niższy (Dumiszewska i in. 2014; Sawicka-Chudy i in. 2017).

Trzecia generacja ogniw fotowoltaicznych to ogniwa fotochemiczne, DSSC, nanokrystaliczne lub ogniwa barwnikowe Gratzela, polimerowe ogniwa organiczne, ogniwa tandemowe (wielozłączowe), ogniwa słoneczne z gorącymi nośnikami, ogniwa wielopasmowe oraz termofotowoltaiczne (Dumiszewska i in. 2014; Aaditya, Mani 2013).

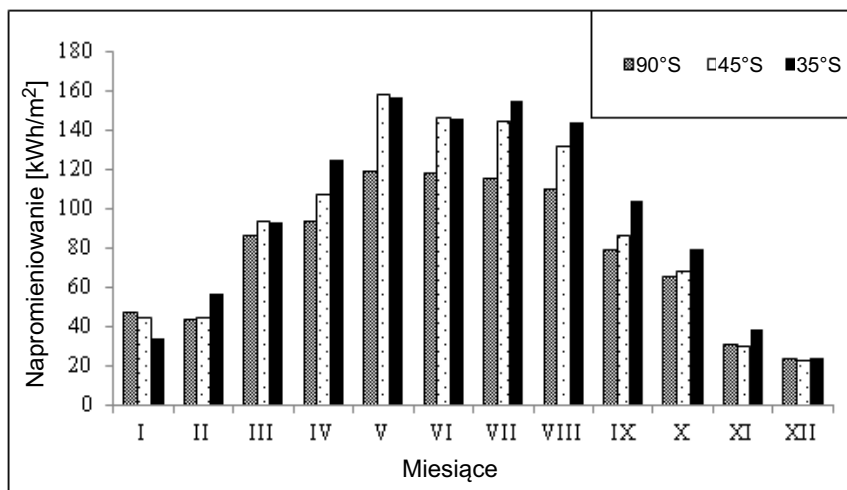
Na parametry ogniw PV eksploatowanych w warunkach rzeczywistych mają wpływ, poza cechami konstrukcyjnymi, natężenie promieniowania słonecznego oraz temperatura urządzenia. Temperatura ogniwa zależy od warunków nasłonecznienia i chłodzenia (wiatr, opady deszczu, sposób mocowania ogniwa, wilgotności, temperatury otoczenia, zacienienie, otaczającej roślinności). Nadmierne nagrzewanie się modułów stanowi istotny problem obniżający wydajność instalacji fotowoltaicznej (Znajdek i in. 2010; Aaditya i Mani 2013).

W nadążnych układach fotowoltaicznych panel obraca się względem położenia Słońca (Bhuvanewari 2013; Dhanabal 2013). Aby energia słoneczna była efektywnie wykorzystywana do dostarczania energii elektrycznej, wydajność instalacji PV musi być zmaksymalizowana (Das 2015). Wcześniejsze badania w Europie wykazały, że średnia moc wyjściowa fotowoltaicznych systemów nadążnych waha się od 13–15% (Şenpınar i Cebeci 2012) do ponad 20% (Qi-Xun Zhang i in. 2015) i do 31% (Helwa 2010) – wyższych niż w przypadku paneli stacjonarnych (w zależności od rodzaju i lokalizacji systemu). Systemy śledzenia są droższe niż ich stacjonarne odpowiedniki ze względu na bardziej złożoną technologię i ruchome części niezbędne do ich działania (Sawicka-Chudy i in. 2018). Wielu naukowców zaprojektowało, wyprodukowało i przetestowało nadążne systemy fotowoltaiczne, które zapewniły więcej energii w ciągu roku niż systemy stacjonarne (Stern i in. 2018, Tomson 2008, Lorenzo i in. 2002).

1. Warunki nasłonecznienia i warunki wiatrowe w Łodzi

Polska jest dobrym i miarodajnym obszarem do badań i pomiarów, ponieważ mieści się w warunkach AM1.5. Warunki meteorologiczne w Łodzi (tak jak i w całej Polsce) charakteryzują się bardzo nierównym rozkładem promieniowania słonecznego w cyklu rocznym. Jest to spowodowane dużym zachmurzeniem i opadami deszczu jesienią i wiosną, niskimi temperaturami powietrza w zimie i upalnymi latami. Korzystając z symulatora i bazy meteorologicznej PVGIS (Baza... 2017) otrzymano dane napromieniowania dla Łodzi ($\Phi = 51^{\circ}46'36''N$; $\varphi = 19^{\circ}27'17''E$). Optymalny kąt pochylenia powierzchni panelu PV w kierunku południowym określony przez program PVGIS (Baza... 2017) wynosi 35° . Na rysunku 1 przedstawiono miesięczne napromieniowanie w Łodzi na powierzchnię pochyloną pod kątem 35° i 45° oraz na powierzchnię wertykalną (kierunek południowy).

Obliczono, że roczna wartość napromieniowania dla Łodzi, na powierzchnię modułu PV pochyloną pod kątem 35° wynosi 1250 kWh/m^2 , a przy 90° jest o 26% mniejsza (929 kWh/m^2). Zróżnicowanie napromieniowania w poszczególnych miesiącach jest spowodowane przede wszystkim czynnikami klimatycznymi, pogodowymi oraz środowiskowymi.



Rys. 1. Miesięczne napromieniowanie w kolejnych miesiącach dla Łodzi dla 35, 45 i 90° (S) pochylenia panelu PV
Źródło: opracowanie własne na podstawie (Baza meteorologiczna PVGIS)

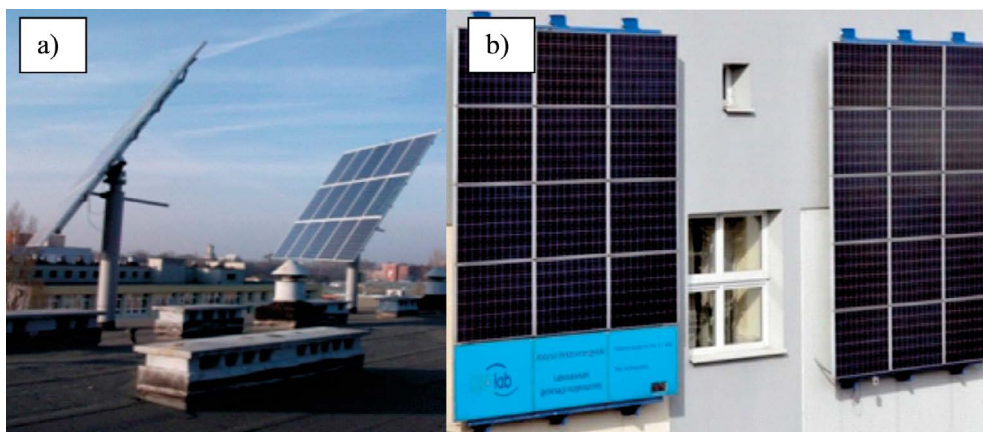
Fig. 1. Monthly irradiation in the following months in Lodz for 35, 45 and 90° (S) inclinations of the PV panel

Zasoby energii słonecznej Łodzi są wystarczająco efektywne do wykorzystania modułów fotowoltaicznych. Większość gospodarstw domowych może korzystać z energii słonecznej w celu pokrycia większości swojego zapotrzebowania na energię elektryczną w miesiącach wiosenno-letnich.

Zasoby energii wiatrowej dla Łodzi analizowano na podstawie bazy Ministra Infrastruktury i Rozwoju (Ministerstwo... 2017) zawierającej typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne dla obszaru Polski. Na podstawie informacji zebranych ze stacji określono, że średnioroczna prędkość wiatru w Łodzi wynosi 3,3 m/s. Największe prędkości występują późną jesienią, zimą i wczesną wiosną, są dni, w których prędkość osiąga 11 m/s. Wiatr jest czynnikiem wpływającym na zwiększenie intensywności odbierania ciepła z modułu fotowoltaicznego. Wzrost prędkości wiatru obniża temperaturę ogniw, co może wpływać na wzrost generowanej mocy maksymalnej w okresie letnim (Figura i Zientarski 2016).

2. Przedmiot i cel badań

W 2007 roku w Laboratorium Generacji Rozproszonej (LGR) w Instytucie Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej został uruchomiony automatyczny, komputerowy system zbierania podstawowych parametrów pracy stacjonarnego systemu fotowoltaicznego oraz danych meteorologicznych. Panele znajdują się na elewacji budynku A11 Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, pod kątem 90° względem poziomym, w kie-



Rys. 2. Widok paneli fotowoltaicznych systemu fotowoltaicznego: a) nadążnego i b) stacjonarnego
 Źródło: Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej (Sawicka-Chudy i in. 2018)

Fig. 2. View of photovoltaic solar panels: a) tracking systems and b) fixed-tilt panels

runku południowym. Nadążne moduły PV zainstalowano na przełomie 2009/2010 roku na dachu tego samego budynku. Oba systemy przyłączone są do sieci laboratorium LGR. Kubatura pomieszczeń LGR to około 1100 m³, średnie obciążenie mocą czynną wynosi 12 kW, a obciążenie maksymalne może sięgać 50 kW. Widok paneli fotowoltaicznych systemu nadążnego i stacjonarnego przedstawiono na rysunku 2. Tabela 1 zawiera parametry systemów fotowoltaicznych.

TABELA 1. Parametry systemu fotowoltaicznego stacjonarnego i nadążnego (Schwab Solartechnik, Porsharp)

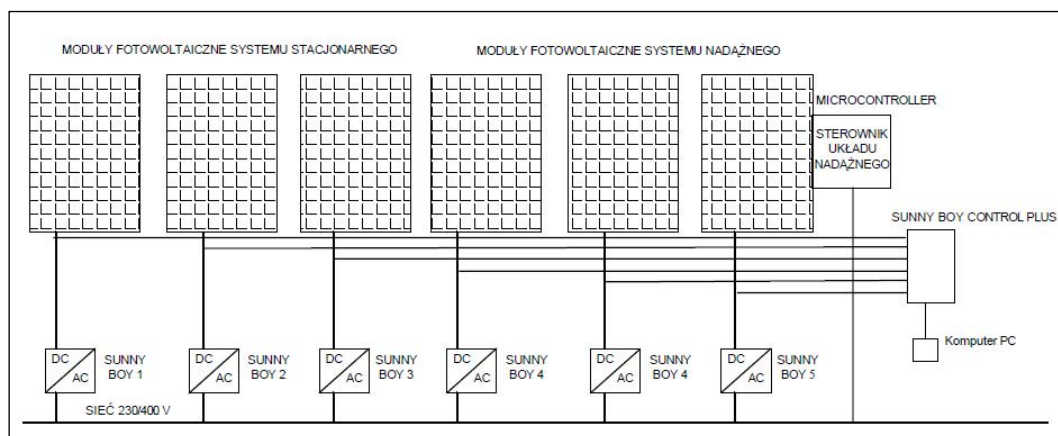
TABLE 1. Parameters of fixed-tilt and tracking photovoltaic systems

| Parametr | Stacjonarny | Nadążny | Parametr | Stacjonarny | Nadążny |
|---------------------------------------|------------------|------------------|--------------|-------------|---------|
| Ilość modułów [szt.] | 27 | 45 | P_{mp} [W] | 225 | 200 |
| Moc systemu [kWp] | 6 | 9 | I_{mp} [A] | 7,44 | 7,27 |
| Typ paneli | 225TT | SF200A | I_{sc} [A] | 8,13 | 7,77 |
| Łączna powierzchnia [m ²] | 45 | 75 | V_{mp} [V] | 30,30 | 27,60 |
| Producent | IBC PolySol | Solar-Fabrik AG | V_{oc} [V] | 36,70 | 35,00 |
| Ogniwa | Polikrystaliczne | Polikrystaliczne | | | |

Moduły stacjonarne i nadążne są podzielone na trzy równe, połączone szeregowo zespoły jednofazowe podłączone do sieci elektroenergetycznej. Przyłączenie jest zrealizowane przez falowniki typu Sunny Boy. Pracę modułów fotowoltaicznych kontroluje Sunny Boy

Control Plus, który umożliwia także zbieranie danych na komputerze. Rysunek 3 przedstawia schemat badanego systemu fotowoltaicznego.

Panele w systemie nadążnym umieszczone są na konstrukcji nadążnej firmy DEGER energie GmbH, typ DEGER Tracker 3000NT. Konstrukcja umożliwia regulację w zakresie kąta pochylenia oraz w płaszczyźnie wschód/zachód. Regulacja położenia paneli realizowana jest przez system fotoczuJNIKÓW sterujących siłownikami konstrukcji w celu ustawienia paneli prostopadłe do Słońca, a więc śledzenie ruchu Słońca odbywa się w sposób ciągły. System nadążny do zmiany orientacji używa energii wygenerowanej przez siebie. Maksymalny pobór mocy przez jeden Tracker nie przekracza 100 W. Panele stacjonarne usytuowane są pionowo na południowej elewacji budynku Instytutu Elektroenergetyki PŁ (rys. 2b).



Rys. 3. Schemat systemu fotowoltaicznego nadążnego i stacjonarnego
Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Diagram of fixed-tilt and tracking photovoltaic systems

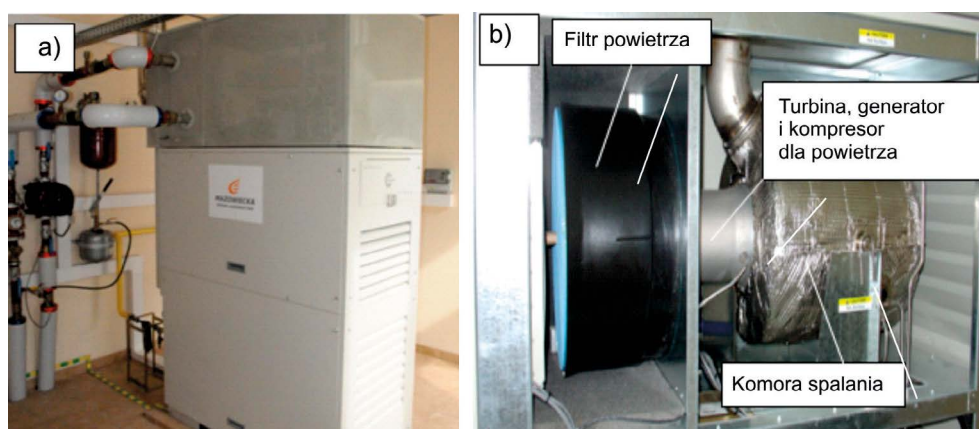
W 2008 r. w budynku Laboratorium Generacji Rozproszonej zainstalowano i uruchomiono mikroturbinę typu C30 firmy Capstone. Turbina zasilana gazem ziemnym wysokometanowym produkuje energię elektryczną wprowadzoną do sieci LGR, a powstające różnice bilansowe mocy elektrycznej w budynku laboratorium są wymieniane z siecią zewnętrzną. W tabeli 2 przedstawiono podstawowe parametry mikroturbiny.

TABELA 2. Parametry mikroturbiny C30 firmy Capstone (Bezobsługowe turbinowe agregaty kogeneracyjne)

TABLE 2. Capstone microtubin C30 parameters

| Parametr | Moc elektryczna | Sprawność elektryczna | Moc cieplna | Sprawność cieplna |
|----------|-----------------|-----------------------|-------------|-------------------|
| Wartość | 30 kW | 25% | 60 kW | 65% |

Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie mikroturbiny z zewnątrz i wewnątrz urządzenia wraz z opisanymi podstawowymi elementami. Napędzany przez turbinę generator o dużej prędkości obrotowej (do 96 000 obr/min), poprzez energoelektroniczny układ przetwarzania energii dostarcza energię elektryczną do sieci LGR. Mikroturbina może pracować równoległe z siecią energetyczną lub zasilać sieć autonomiczną (wyspowa), wytwarza suche, bogate w tlen spaliny z ultra niskimi emisjami zanieczyszczeń (Capstone... 2005).



Rys. 4. Mikroturbina Capstone C30 a), wewnątrz urządzenia b)
 Źródło: Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej

Fig. 4. Capstone microturbine C30 a), interior of the device b)

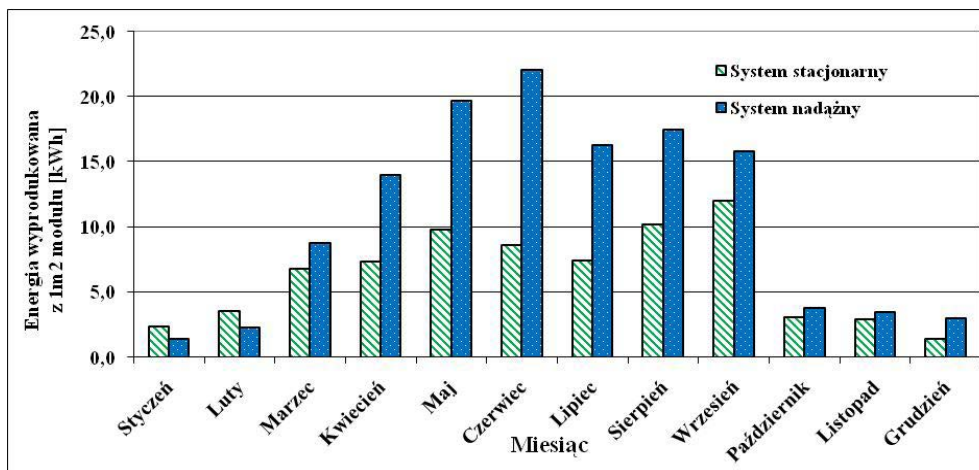
Przede wszystkim celem badań było:

- porównanie efektywności energetycznej dwóch systemów fotowoltaicznych, o różnych rozwiązaniach konstrukcyjnych mocowań, stacjonarnego oraz nadążnego, pracujących w warunkach rzeczywistych,
- ocena możliwości pokrycia potrzeb energetycznych budynku z wykorzystaniem mikroturbiny gazowej,
- wybranie optymalnej konfiguracji systemów dla warunków centralnej Polski.

3. Analiza możliwości zaspokojenia potrzeb energetycznych budynku

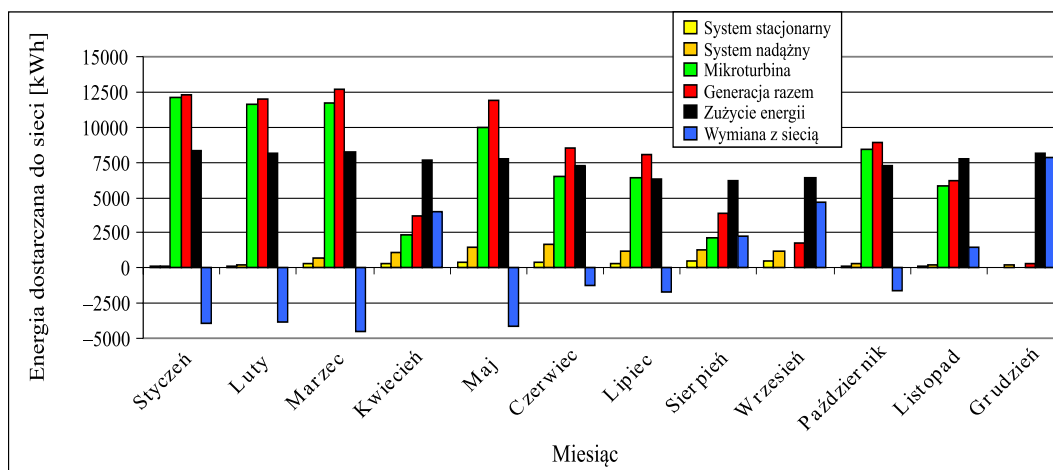
Pomiary energetyczne badanej instalacji fotowoltaicznej oraz mikroturbiny były prowadzone od 1 stycznia do 31 grudnia w 2016 roku. Na rysunku 5 przedstawiony jest wykres miesięcznego uzysku energetycznego z 1 m² modułów z systemu nadążnego i stacjonarnego.

Na rysunku 6 zaprezentowano roczny bilans energii, w podziale na poszczególne miesiące 2016 roku, obejmujący całkowitą energię elektryczną wytworzoną przez źródła zainstalowane w LGR (instalacje fotowoltaiczne i mikroturbinę), rzeczywiste zużycie energii



Rys. 5. Miesięczny uzysk energii z 1 m² modułu dla paneli nadążnych i stacjonarnych w 2016 r.
Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Monthly energy yield from 1 m² module for tracking and fixed-tilt panels in 2016



Rys. 6. Roczny bilans energii elektrycznej w 2016 r. (w podziale na okresy miesięczne) w Laboratorium Generacji Rozproszonej z uwzględnieniem produkcji (z paneli nadążnych i stacjonarnych oraz mikroturbiny), zużycia energii elektrycznej przez urządzenia laboratorium oraz wymiany z siecią.
Źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Annual electricity balance in 2016 (divided into monthly periods) in the Laboratory, including production (from tracking and fixed-tilt panels and a microturbine), electricity consumption by laboratory equipment and exchange with the network

elektrycznej przez urządzenia zainstalowane w laboratorium oraz wymianę energii z siecią zasilającą. W budynku laboratorium w czasie trzech miesięcy letnich (lipiec–wrzesień), z uwagi na przerwę wakacyjną, zużycie energii elektrycznej było od około 23 do 26%, a w czerwcu i październiku o 13% niższe w porównaniu ze styczniem (rys. 6). Całkowite roczne zużycie energii elektrycznej wyniosło 89,47 MWh, a roczna produkcja energii była równa 90,12 MWh. Nadwyżka wytworzonej energii została przekazana do sieci zasilającej w ilości 0,65 MWh, przy czym w poszczególnych miesiącach wymiana energii z siecią zasilającą kształtowała się przede wszystkim w zależności od stopnia wykorzystania zdolności produkcyjnych mikroturbiny.

W ciągu roku energia uzyskana w modułach nadążnych jest średnio trzy razy większa niż w modułach stacjonarnych. Natomiast jeżeli bierze się pod uwagę miesięczny uzysk energii z 1 m² modułu (rys. 5) tylko w styczniu i lutym uzyskano więcej energii w porównaniu do systemu mobilnego, a w październiku i listopadzie wartości są porównywalne. Natomiast w siedmiu miesiącach roku (marzec–wrzesień) energia uzyskana z systemu nadążnego jest od 23% do 50% większa od energii pozyskanej z systemu stacjonarnego. Z rysunku 6 wynika, że w największym stopniu zapotrzebowanie na energię elektryczną pokrywa mikroturbina.

Zestawienie uzysku energii z modułów stacjonarnych i nadążnych w 2016 roku przedstawia tabela 3. W analizowanym okresie system nadążny dostarczył do sieci wewnętrznej laboratorium 9,6 MWh energii, co stanowi około 10,73% całkowitego rocznego zapotrzebowania na energię. System stacjonarny dostarczył około 3,4 MWh (3,8%), natomiast mikroturbina wytworzyła 77,12 MWh (86,2%), z czego 0,65 MWh (0,72%) przekazano do sieci zewnętrznej.

TABELA 3. Uzysk energii w modułach stacjonarnych i nadążnych w 2016 roku

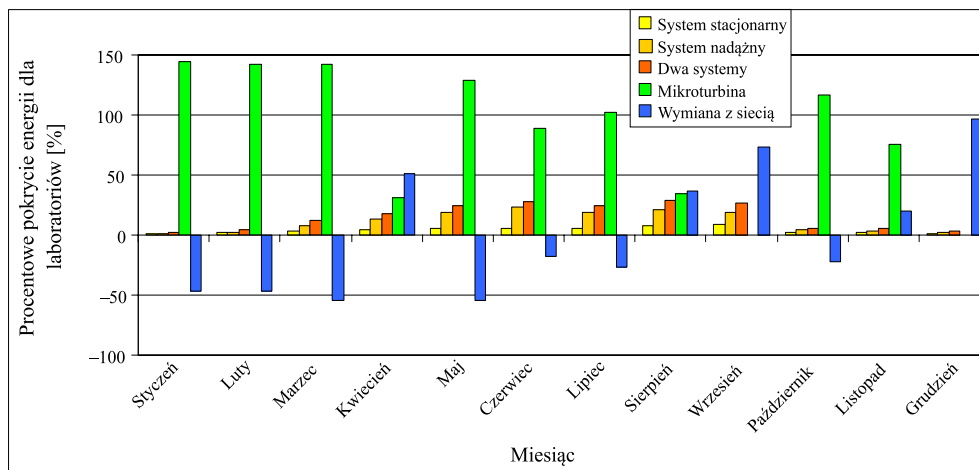
TABLE 3. Energy yield infixed-tilt and tracking systems in 2016

| Moduły | Energia wytworzona [kWh] | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--------------------------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|-----|--------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | Suma |
| Stacjonarne | 104 | 160 | 307 | 330 | 441 | 388 | 335 | 460 | 540 | 139 | 132 | 62 | 3 398 |
| Nadążne | 107 | 170 | 655 | 1 049 | 1 476 | 1 658 | 1 224 | 1 309 | 1 187 | 285 | 259 | 221 | 9 600 |
| Suma | 211 | 161 | 962 | 1 379 | 1 917 | 2 046 | 1 559 | 1 769 | 1 727 | 424 | 391 | 283 | 12 998 |

Źródło: Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej.

Na rysunku 7 przedstawiono procentowe pokrycie energii elektrycznej dla laboratoriów przez system stacjonarny i nadążny oraz mikroturbinę (we wrześniu i grudniu mikroturbina nie pracowała ze względu na konserwację).

Instalacja nadążna paneli PV pokrywa od 1,3 do 22,8% miesięcznego zapotrzebowania na energię elektryczną, a instalacja stacjonarna od 0,8 do 8,4%. Orientacja pionowa modu-



Rys. 7. Procentowe pokrycie energii elektrycznej dla laboratoriów przez system stacjonarny, nadążny i mikroturbinę
 Źródło: opracowanie własne

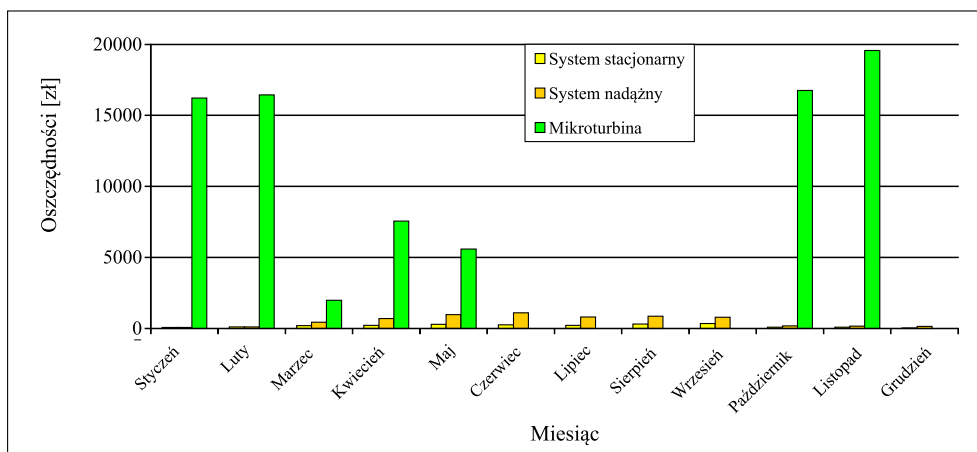
Fig. 7. Percentage of electricity for laboratories by fixed-tilt and tracking systems and a microturbine

łów stacjonarnych ma przewagę w ilości produkowanej energii jedynie w styczniu i lutym, z uwagi na bardziej korzystny, zbliżony do prostopadłego, kąt padania promieni słonecznych na powierzchnię paneli. Szczyt produkcji przez panele PV występuje w sześciu miesiącach roku, od kwietnia do września i jest efektem wysokiego dziennego napromieniowania w okresie wiosenno-letnim (rys. 1). Stacjonarne i nadążne instalacje PV pokrywają 14,5% rocznego zużycia energii, natomiast mikroturbina pokrywa pozostałe 85,5% (77 124 kWh) rocznego zużycia energii elektrycznej przez urządzenia eksploatowane w laboratorium. Praca mikroturbiny pozwala w kolejnych miesiącach roku na stabilną dostawę energii, zwłaszcza w okresie jesienno-zimowym, od października do marca (rys. 6). W poszczególnych miesiącach mikroturbina zaspokaja nawet 100% zapotrzebowania na energię elektryczną i dodatkowo eksportuje energię do sieci zewnętrznej (rys. 7).

4. Analiza ekonomiczna zaopatrzenia budynku w energię

Zakładając, że aktualna cena energii elektrycznej brutto, uwzględniająca opłaty stałe i zmienne, wynosi 0,66 zł/kWh (Polska... 2018) (stan na styczeń 2018), a cena ciepła brutto jest równa 0,45 zł/kWh oraz przyjmując miesięczny koszt zakupu gazu dla mikroturbiny ponoszony przez właściciela na podstawie comiesięcznych faktur VAT, zestawiono miesięczne oszczędności (rys. 8) wynikające z zainstalowania systemu stacjonarnego i nadążnego oraz z mikroturbiny.

Roczne oszczędności wynikające z eksploatacji urządzeń wytwórczych zainstalowanych w laboratorium generacji rozproszonej określono na podstawie zmierzonej licznikami



Rys. 8. Miesięczne oszczędności z systemu stacjonarnego i nadążnego oraz z mikroturbiny
Źródło: opracowanie własne

Fig. 8. Monthly costs saving from fixed-tilt and tracking panels and a microturbine

rocznej produkcji energii elektrycznej i ciepła oraz kosztów eksploatacyjnych związanych z zakupem gazu i przeglądami instalacji. Szczegółowe dane liczbowe dotyczące produkcji energii i kosztów eksploatacyjnych podano w tabeli 4.

Z przeprowadzonej analizy ekonomicznej wynika opłacalność zastosowania instalacji kogeneracyjnej i fotowoltaicznej. Roczny zysk ze stacjonarnej instalacji fotowoltaicznej

TABELA 4. Roczne oszczędności uzyskane w Laboratorium generacji rozproszonej w 2016 roku

TABLE 4. Annual savings obtained in the Distributed Generation Laboratory in 2016

| Urządzenie wytwórcze | Produkcja energii [kWh] | | Cena energii [zł/kWh] | Wartość energii [zł] | Roczne koszty eksploatacyjne [zł] | | Oszczędności [zł] |
|-------------------------|-------------------------|---------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------|-------------------|
| | elektrycznej | ciepła | | | koszt zakupu gazu | koszt przeglądów | |
| System PV stacjonarny | 3 398 | - | 0,66 | 2 242,68 | - | 0 | 2 242,68 |
| System PV nadążny | 9 600 | | 0,66 | 6 336,00 | | 0 | 6 336,00 |
| Suma PV | 12 998 | | 0,66 | 8 578,68 | | 0 | 8 578,68 |
| Mikroturbina | 77 124 | 358 800 | 0,66 | 212 361,84 | 122 581,75 | 9 314,38 | 80 465,71 |
| | - | | 0,45 | | | | |
| Razem | 90 122 | 358 800 | - | 220 940,52 | 122 581,75 | 9 314,38 | 89 044,39 |

(przy rocznym uzysku energii ok. 3400 kWh) to 2243 zł, z instalacji nadążnej (roczny uzysk energii ok. 9600 kWh) to 6336 zł. Roczne oszczędności kosztów energii elektrycznej przy zastosowaniu mikroturbiny gazowej są około dziesięciokrotnie większe niż dla paneli fotowoltaicznych. Roczna oszczędność kosztów energii przy wykorzystaniu mikroturbiny (przy uwzględnieniu produkcji ciepła przez mikroturbinę i po odliczeniu kosztów gazu i przeglądów) wynosi 80 466 zł. Koszty zakupu i instalacji agregatu kogeneracyjnego wyniosły około 588 tys. zł, a systemów fotowoltaicznych około 537 tys. zł. Należy jednak zaznaczyć, że były to instalacje pilotażowe i koszty ich budowy były wyższe niż przy typowych instalacjach. Mikroturbina wytworzyła rocznie około 358,80 MWh ciepła wykorzystanego do wspomagania instalacji c.o. budynków oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. Biorąc pod uwagę uzyskane w ciągu roku oszczędności (89 044,39 zł) oraz całkowite nakłady (1 125 384,99 zł) związane z budową tych instalacji, można oszacować, że inwestycja zwróci się po około 12 latach. Należy tutaj zaznaczyć, że eksploatacja źródeł energii w laboratorium nie jest nastawiona na maksymalizację oszczędności, ale prowadzona jest zgodnie z potrzebami procesów dydaktycznych i realizowanych badań naukowych.

Podsumowanie

Przedstawiona analiza jest wynikiem rocznego monitoringu instalacji fotowoltaicznej złożonej z systemu stacjonarnego oraz nadążnego o łącznej mocy szczytowej 15 kWp oraz agregatu kogeneracyjnego wyposażonego w mikroturbinę gazową o mocy elektrycznej 30 kW i mocy cieplnej 60 kW. Przedstawiono pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną oraz dokonano analizy ekonomicznej. Przeprowadzone badania pozwalają na stwierdzenie, że energia wytworzona przez moduły nadążne jest około trzy razy większa niż wytworzona w modułach stacjonarnych. Natomiast roczne oszczędności kosztów energii elektrycznej przy zastosowaniu mikroturbiny gazowej są około dziesięciokrotnie większe niż dla paneli fotowoltaicznych. Po przeprowadzeniu tej analizy, można stwierdzić także opłacalność stosowania agregatów kogeneracyjnych i paneli fotowoltaicznych, mimo dużych nakładów finansowych, to czas zwrotu nakładów inwestycyjnych wynosi około 12 lat, podczas użytkowania instalacji wytwarzającej energię elektryczną i ciepło przez cały rok.

Literatura

- Aaditya, G. i Mani, M. 2013. Climate-responsive integrability of building-integrated photovoltaics. *International Journal of Low-Carbon Technologies* t. 8, z. 4, s. 271–281. DOI: 10.1093/ijlct/cts039.
- Baza meteorologiczna PVGIS. [Online] <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis> [Dostęp: 2.09.2017].
- Bezobsługowe turbinowe agregaty kogeneracyjne. Katalog produktu. Aspamet Capstone. s. 4.
- Bhuvanewari i in. 2013 – Bhuvanewari, C., Rajeswari, R. i Kalaiarasan, C. 2013. Analysis of solar energy based street light with auto tracking system. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 2(7), s. 3422–3428.
- Boszkowicz, P. 2013. *Krzemowe warstwy funkcjonalne na ogniwa słoneczne*. Rozprawa doktorska, Kraków.
- Capstone... 2005 – Capstone MicroTurbine User's Manual, Document 400001-001 Rev. C (February 2005), Capstone Turbine Corporation, 21211 Nordhoff Street, Chatsworth, California 91311 USA.

- Das i in. 2015 – Das, P.K., Habib, M.A. i Mynuddin, M. 2015. Microcontroller Based Automatic Solar Tracking System with Mirror Booster. *International Journal of Sustainable and Green Energy* 4(4), s. 125–136.
- Dhanabal i in. 2013 – Dhanabal, R., Bharathi, V., Ranjitha, R., Ponni, A., Deepthi, S. i Mageshkannan, P., 2013. Comparison of Efficiencies of Solar Tracker systems with static panel Single-Axis Tracking System and Dual-Axis Tracking System with Fixed Mount. *International Journal of Engineering and Technology* 5(2), s. 1925–1933.
- Dobrzański i in. 2009 – Dobrzański, L.A., Drygała, A., Panek, P., Lipiński, M. i Zięba, P. 2009. Development of the laser method of multicrystalline silicon surface texturization. *Archives of Materials Science and Engineering* 38/1, s. 5–11.
- Dobrzański i in. 2011 – Dobrzański, L.A., Drygała, A. i Poprawa, M. 2011. Nadążny system fotowoltaiczny sterowany komputerowo. *Czasopismo techniczne. Mechanika* R. 108, z. 7, 4-M/2011, s. 57–64.
- Dumiszewska i in. 2014 – Dumiszewska, E., Knyps, P., Wesołowski, M. i Strupiński, W. 2014. Multi-junction solar cells. *Przegląd Elektrotechniczny* R. 90, nr 5. Wyd. Sigma-Not, DOI: 10.12915/pe.2014.05.49.
- Figura, R. i Zientarski, W. 2016. Analiza parametrów pracy modułu fotowoltaicznego. *Autobusy : technika, eksploatacja, systemy transportowe* 12, s. 602–611.
- Green, M.A. 2017. Thin-film solar cells: review of materials, technologies and commercial status. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* t. 18, s. 15–19.
- Goetzberger, A. i Hoffmann, V.U. 2005. *Photovoltaic solar energy generation*. Springer, Berlin.
- Helwa i in. 2010 – Helwa, N.H., Bahgat, A.B.G., Shafee, A.M.R.El. i Shenawy, E.T.El. 2010. Maximum collectable solar energy by different solar tracking systems. *Energy Sources* 22(1), s. 23–34.
- Klugman-Radziemska, E. 2010. *Fotowoltaika w teorii i praktyce*. Wyd. 1. Legionowo: BTC.
- Lorenzo i in. 2002 – Lorenzo, E., Perez, M., Ezpeleta, A. i Acedo, J. 2002. Design of tracking photovoltaic systems with a single vertical axis. *Progress in Photovoltaics: research and applications*, 10, s. 533–543.
- Ministerstwo Infrastruktury. [Online] mib.gov.pl [Dostęp: 6.12.2017].
- Polska Grupa Energetyczna SA. [Online] www.pge.pl [Dostęp: 1.01.2018].
- Posharp. The Source for Renewables™. [Online] www.posharp.com [Dostęp: 11.12.2017].
- Qi-Xun Zhang i in. 2015 – Qi-Xun, Zhang, Hai-Ye, Yu, Qiu-Yuan, Zhang, Zhong-Yuan, Zhang, Cheng-Hui, Shao i Di, Yang. 2015. A Solar Automatic Tracking System that Generates Power for Lighting Greenhouses. *Energies* 8(7), s. 7367–7380.
- Sawicka-Chudy i in. 2017 – Sawicka-Chudy, P., Wisz, G., Płoch, D., Cholewa, M., Knyps, P., Dumiszewska, E., i Sibiński, M. 2017. Impacts of Tunnel Junction Thickness on the Performance of Triple-Junction Solar Cells. *Journal of Nanoelectronics and Optoelectronics* t. 12, s. 737–741.
- Sawicka-Chudy i in. 2018 – Sawicka-Chudy, P., Sibiński, M., Cholewa, M. i Pawełek, R. 2018. Comparison of Solar Tracking and Fixed-Tilt Photovoltaic Modules in Lodz. *J. Sol. Energy Eng* 140, 024503, s. 6, DOI: 10.1115/1.4039097.
- Schwab Solartechnik. [Online] www.schwab-solartechnik.de [Dostęp: 11.12.2017].
- Şenpinar, A. i Cebeci, M. 2012. Evaluation of power output for fixed and two-axis tracking PV arrays. *Appl. Energy* 92, s. 677–685.
- Stern i in. 1996 – Stern, M., Duran, G., Fourer, G., Mackamul, K., Whalen, W., Loo, M.V. i West, R. 1996. *Development of a low cost integrated 20-kW-AC solar tracking sub-array for Grid-Connected PV power system applications*. Final technical report. National Laboratory of the U.S. Department of Energy Managed 11 July 1995–31 July 1996. [Online] <https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/23118.pdf> [Dostęp: 10.01.2018].
- Tomson, T. 2008. Discrete two-positional tracking of solar collectors. *Renewable Energy* 33(3) s. 400–405.
- Vanguard. [Online] en.wikipedia.org/wiki/Vanguard_1 [Dostęp: 15.01.2018].
- Zhu, L. 2012. *Development of Metal Oxide Solar Cells through Numerical Modelling*. Rozprawa doktorska, Bolton.
- Znajdek i in. 2010 – Znajdek, K., Sibiński, M., Lisik, Z. i Walczak, S. 2010. Badanie wpływu temperatury na parametry elektryczne krzemowych ogniw fotowoltaicznych. *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* 0033-2089. R. 51, nr 5, s. 49–52.

