

Artur BUGAŁA*, Karol BEDNAREK*

ANALIZA PRACY SIECIOWYCH INSTALACJI FOTOWOLTAICZNYCH Z WYKORZYSTANIEM OPROGRAMOWANIA SYMULACYJNEGO

W pracy przedstawiono analizę porównawczą efektywności energetycznej instalacji fotowoltaicznej przyłączonej do sieci elektroenergetycznej, przeprowadzoną na podstawie rejestracji dobowej produkcji energii elektrycznej oraz symulacji komputerowej. Prognozowanie uzysku energetycznego przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania PVSol, które umożliwia oszacowanie czasowej produkcji energii elektrycznej z uwzględnieniem lokalnych danych klimatycznych oraz zjawiska zacienienia obiektu. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i symulacji określono korelację wartości wielkości mierzonej z wyznaczeniem wybranych parametrów analizy statystycznej. Przeprowadzona analiza może być szczególnie przydatna na etapie planowania czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych, a także w przypadku analiz ekonomicznych.

SŁOWA KLUCZOWE: zysk energetyczny, fotowoltaika, układ sieciowy, symulacja komputerowa.

1. WPROWADZENIE

W dzisiejszym świecie energia jest towarem – dobrem, bez którego trudno jest wyobrazić sobie wszelką działalność gospodarczą, jak i życie prywatne. Człowiek próbuje ją pozyskać, magazynować, przesyłać oraz przetwarzać w sposób optymalny. Związane jest to z jednej strony z najtańszym jej wytworzeniem, transportem oraz użytkowaniem – z drugiej natomiast z ekologią we wszelkich aspektach występowania i wykorzystania energii [2-9, 13].

Uzysk energetyczny zarówno w przypadku instalacji PV, jak też turbin wiatrowych jest zależnością stochastyczną, co utrudnia znacznie jego dokładne wyliczenie, a czasami nawet oszacowanie. Przy rozważaniach zasadności wykorzystania wspomnianych ekologicznych źródeł energii niezbędne jest przeprowadzenie rachunku ekonomicznego w celu wykazania, że taka inwestycja ma szansę być rentowną. Z przedstawionych względów wielkiej wagi nabierają wszelkie sposoby realizacji obliczeń uzysku energetycznego w rozważanych obiektach, które byłyby zbieżne ze statystycznie opracowanymi wynikami pomiarów prze-

* Politechnika Poznańska

prowadzonych na obiektach fizycznych. Urealnienie obliczeń komputerowych stwarza podstawę do wiarygodnego ich wykorzystania w procesie podejmowania decyzji inwestycyjnych.

W pracy zajęto się określaniem efektywności energetycznej instalacji fotowoltaicznej. Analizy w tym zakresie zrealizowano dwutorowo:

- na bazie obliczeń komputerowych, przy wykorzystaniu oprogramowania PVSol (w którym podczas obliczeń czasowej produkcji energii elektrycznej wykorzystuje się lokalne dane klimatyczne, jak również możliwość uwzględnienia występowania zacielenia obiektu),
- na podstawie pomiarów fizycznych dobowej produkcji energii elektrycznej, przy wykorzystaniu właściwej obróbki statystycznej uzyskanych wyników.

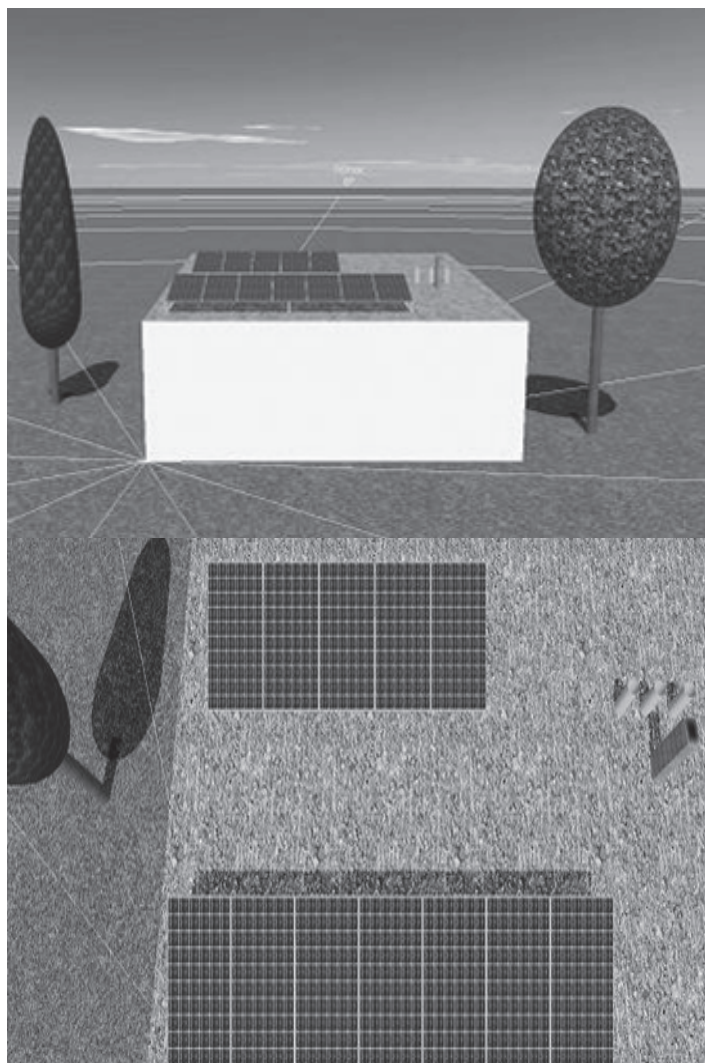
Celem przeprowadzonych rozważań jest stworzenie narzędzi do realizacji analiz ekonomicznych oraz oszacowań czasu zwrotu nakładów inwestycyjnych w przypadku podejmowania decyzji o ewentualnym wdrożeniu w życie projektu instalacji PV.

2. OBIEKT BADAŃ

Obiektem badań jest dachowa mikroinstalacja fotowoltaiczna o znamionowej mocy elektrycznej 3 kW zlokalizowana 96 km od Poznania w kierunku północno-wschodnim (województwo Wielkopolskie). Średnia wartość nasłonecznienia dla tego obszaru wyznaczona z okresu 1994-2016 wynosiła 1050 kWh/m², natomiast liczba godzin słonecznych, podczas których rejestruje się bezpośrednio promieniowanie słoneczne 1760 h [15].

Konstrukcja wsporcza, wykonana ze stali ocynkowanej ogniowo i aluminium, do której przytwierdzono moduły fotowoltaiczne, tworzy płaszczyznę nachyloną pod kątem 30° do płaszczyzny horyzontalnej, natomiast kąt azymutalny fotoodbiornika wynosi około 10° (kierunek południowo-zachodni). Moduły fotowoltaiczne zostały ułożone w dwóch rzędach. W instalacji zastosowano 12 sztuk modułów fotowoltaicznych firmy Yingli Solar model YL250P-29b o mocy 250 W. Przetworzenie energii elektrycznej DC/AC zrealizowano z wykorzystaniem falownika firmy Steca Stecagrid 3000.

Na rysunku 1 przedstawiono wizualizację analizowanej instalacji fotowoltaicznej w środowisku symulacyjnym PVSol.



Rys. 1. Wizualizacja analizowanej instalacji fotowoltaicznej o mocy 3 kW w programie PVSol

Parametry zastosowanych modułów fotowoltaicznych i falownika przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry techniczne zastosowanych modułów fotowoltaicznych i falownika.

Moduł fotowoltaiczny			Falownik DC/AC		
Warunki STC			Wejście DC		
Sprawność	%	15,3	Max napięcie wejścia	845	V
Napięcie przy P_{MAX}	V	30,4	Minimalne napięcie wejścia	350	
Prąd przy P_{MAX}	A	8,24	Napięcie MPP	350-700	
Warunki NOCT			Max prąd wejściowy	12	A
Napięcie przy P_{MAX}	V	27,6	Wyjście AC		
Prąd przy P_{MAX}	A	6,56	Max prąd wyjścia	16	A
Parametry termiczne			Max moc czynna	3000	W
Nominalna temperatura robocza	°C	46	Max moc pozorna	3130	VA
Współczynnik temperatury dla P_{MAX}	% / °C	0,45	Max sprawność	98,6	%
Współczynnik temperatury dla V_{OC}		0,33	Europejska sprawność	98,3	
Współczynnik temperatury dla I_{SC}		0,06	Sprawność MPP	>99,7 (statyczna) >99 (dynamiczna)	
Współczynnik temperatury dla V_{MPP}		0,45			

3. WYNIKI POMIARÓW I SYMULACJI

Analizowana instalacja fotowoltaiczna została uruchomiona w czerwcu 2015 roku i na podstawie uzyskanych warunków technicznych przyłączenia do sieci elektroenergetycznej umożliwia transfer energii elektrycznej, umniejszonej o jej zużycie na potrzeby własne obiektu, na którym powstała instalacja. Przedstawione wyniki, stanowiące wybraną próbę pomiarową, pochodzą z reprezentatywnego roku pomiarowego (06.2015 r. – 05.2016 r.). W ramach przeprowadzonych badań dokonano rejestracji wartości chwilowej mocy elektrycznej, napięcia po stronie zmiennoprądowej AC, natężenia prądu i skumulowanej energii elektrycznej. Rodzaj zastosowanego przemiennika energii DC/AC zapewnia śledzenie punktu mocy maksymalnej, celem optymalizacji napięcia układu połączonych modułów fotowoltaicznych.

Symulację komputerową przewidywanych uzysków energii elektrycznej wykonano w programie komputerowym PVSol. Jako dane wejściowe wykorzystano

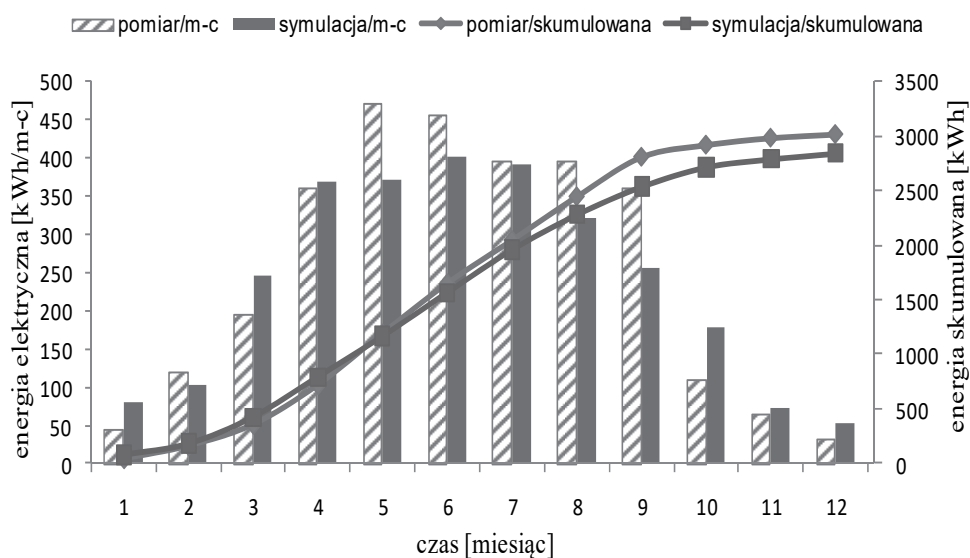
no dane klimatyczne, pochodzące ze stacji meteorologicznej zlokalizowanej na terenie miasta Piła. W obliczeniach założono: 5% straty ze względu na sprawność zastosowanego inwertera, 4% straty związane z oddziaływaniem temperatury, 2% straty przewodowe po stronie DC i AC, a także te wynikające z ograniczenia sprawności konwersji fotowoltaicznej na skutek niskiej wartości irradiancji, zabrudzenia, zacienienia i okresowego zaśnieżenia.

W tabeli 2 przedstawiono roczną produkcję energii elektrycznej dla instalacji fotowoltaicznej na podstawie uzyskanych wyników pomiarów i symulacji komputerowej.

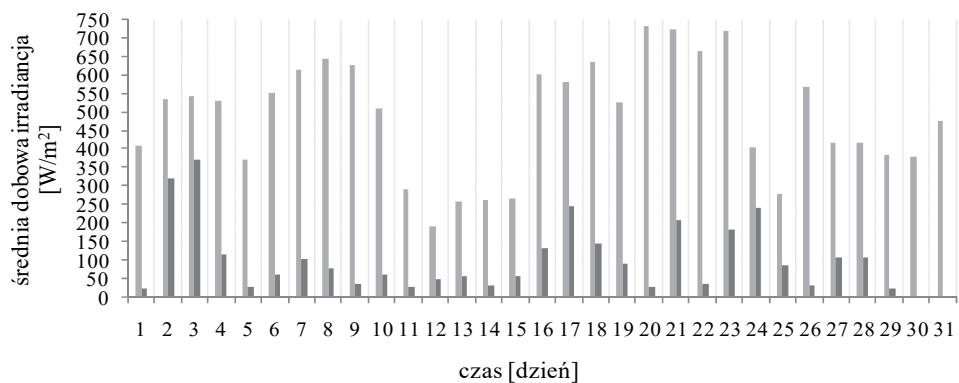
Tabela 2. Roczna wartość energii elektrycznej z konwersji fotowoltaicznej dla instalacji fotowoltaicznej o mocy znamionowej 3 kW.

miesiąc	energia elektryczna – pomiar	energia elektryczna – symulacja
	[kWh]	
styczeń	44	79
luty	119	102
marzec	195	245
kwiecień	361	368
maj	472	372
czerwiec	457	400
lipiec	395	391
sierpień	397	320
wrzesień	361	256
październik	110	179
listopad	64	73
grudzień	33	52
suma	3008	2837

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg zmienności rocznej produkcji energii elektrycznej dla analizowanej instalacji fotowoltaicznej o mocy nominalnej 3 kW. Wartości energii elektrycznej zarejestrowanej w układzie pomiarowym porównano z wynikami symulacji komputerowej w programie PVSol. Na rysunku 3 przedstawiono zmienność średniej gęstości mocy promieniowania słonecznego, stanowiącego dane wejściowe w symulacji, dla przykładowych dni miesięcy letnich i zimowych.



Rys. 2. Przebieg zmienności rocznej produkcji energii elektrycznej dla analizowanej instalacji fotowoltaicznej o mocy nominalnej 3 kW



Rys. 3. Przebieg zmienności średniej irradiancji dla dni okresu letniego oraz okresu zimowego

4. ANALIZA STATYSTYCZNA WYNIKÓW

Ocenę zgodności wyników pomiarów i symulacji komputerowej przeprowadzono z wykorzystaniem wybranych narzędzi analizy statystycznej w postaci średniokwadratowego błędu (*RMSE*), błędu średniego (*MBE*) oraz współczynnika korelacji Pearsona *k* [1, 10-12, 14]:

$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{\sum (C_i - M_i)^2}{n}}}{\bar{M}} 100\% \quad (1)$$

$$MBE\% = \frac{\frac{\sum (C_i - M_i)}{n}}{\bar{M}} 100\% \quad (2)$$

$$k = \frac{\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (C_i - \bar{C})^2][\sum_{i=1}^N (M_i - \bar{M})^2]}} \quad (3)$$

gdzie: M_i – wartość zmierzona wielkości elektrycznej, C_i – wartość obliczona wielkości elektrycznej, n – liczebność próby, \bar{M} – wartość średnia wielkości zmierzonej, \bar{C} – wartość średnia wielkości obliczonej

Wartość błędu $RMSE\%$ i $MBE\%$ może wskazywać, czy nastąpiło przeszacowanie lub niedoszacowanie wartości energii elektrycznej, wyznaczonej na podstawie komputerowej symulacji pracy analizowanej instalacji fotowoltaicznej, w stosunku do wartości zmierzonej. Przeprowadzona analiza umożliwi stwierdzenie, czy opracowany model instalacji PV i przyjęte założenia można zastosować (z dużą dokładnością) do opracowania bilansu energetycznego rzeczywistych instalacji słonecznych. Współczynnik korelacji k , unormowany w przedziale

$[-1, 1]$, określa poziom zależności pomiędzy wartością zmierzoną i obliczoną zmiennej o charakterze stochastycznym.

Na podstawie zależności (1) – (3) obliczono wartości procentowego błędu średniokwadratowego, błędu średniego i współczynnika korelacji Pearsona. Wyniki przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki analizy statystycznej obejmującej wartość $RMSE\%$, $MBE\%$ i współczynnik korelacji Pearsona

RMSE%	MBE%	k
[%]	[%]	[-]
22,10	-5,70	0,96

5. UWAGI KOŃCOWE I WNIOSKI

Wydajność energetyczna instalacji fotowoltaicznych jest uwarunkowana szeregiem czynników. Wybrane z nich mogą być kontrolowane przez człowieka

(kąąt pochylenia płaszczyzny ogniw fotowoltaicznych, kąąt azymutu, rodzaj zastosowanego fotoprzetwornika, ograniczanie lokalnego zacieniania, stosowanie zaawansowanych układów energoelektronicznych w celu optymalizacji mocy), natomiast pozostałe wynikają ze stochastycznego charakteru źródła promieniowania, co prowadzi do zmienności irradiancji i okresowego nasłonecznienia.

Koszt inwestycyjny instalacji fotowoltaicznej jest uzależniony od wielkości zainstalowanej mocy elektrycznej, co wpływa bezpośrednio na parametry pozostałych urządzeń stanowiących jej elementy składowe jak falowniki, regulatory ładowania, rodzaje konstrukcji wsporczych. Szacuje się, że ponad 70% całkowitych kosztów to zakup urządzeń wraz z całym osprzętem elektrycznym. Z tego względu szczególnie istotne jest jak najdokładniejsze oszacowanie wielkości produkcji energii elektrycznej nowobudowanej instalacji fotowoltaicznej dla danej lokalizacji. W tym celu można zastosować dedykowane oprogramowanie komputerowe, które poprzedza fazę inwestycyjną. Umożliwia ono weryfikację przewidywanej wydajności projektowanego systemu fotowoltaicznego, wizualizację obiektu i jego zlokalizowanie na tle pozostałych elementów środowiska, analizę zacienienia, określenie wpływu temperatury otoczenia na charakterystykę pracy modułów fotowoltaicznych. Zwiększenie dokładności obliczeń jest możliwe poprzez wykorzystanie danych klimatycznych pochodzących z pomiarów własnych lub lokalnych stacji meteorologicznych, rejestrujących między innymi irradiancję, temperaturę i prędkość wiatru. Efektem obliczeń jest obszerna analiza techniczno-finansowa inwestycji.

W przypadku analizowanej instalacji o mocy nominalnej 3 kW wyniki symulacji okazały się korzystne dla inwestora ze względu na zwiększoną rzeczywistą produkcję w stosunku do wartości zakładanej na etapie projektowania. Wyjątkiem okazał się miesiąc październik, w którym wartość produkowanej energii elektrycznej jest o około 43% niższa od prognozowanej.

Średnia wartość energii elektrycznej, wyznaczona dla pełnego roku pomiarowego, na podstawie wyników pomiarów i analizy symulacyjnej, wynosi odpowiednio 250,7 kWh i 236,4 kWh. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej oraz wyznaczonych wartości błędów MBE% stwierdzono niedoszacowanie o około 6% wartości energii elektrycznej w stosunku do wartości zmierzonej. Wartość parametru RMSE%, przekraczająca 22%, wskazuje na występowanie takich miesięcy w całym okresie pomiarowym, dla których stwierdza się znaczne rozbieżności pomiędzy wynikiem pomiarów i obliczeń (miesiąc maj, wrzesień, październik). W przeważającej części okresu z wykorzystaniem programu symulacyjnego uzyskano dobre odwzorowanie rzeczywistej produkcji energii elektrycznej dla analizowanego przypadku.

LITERATURA

- [1] Augustine C., Nabuchi M., Empirical models for the correlation of global solar radiation with meteorological data for Enugu, Nigeria, *The Pacific Journal of Science and Technology*, 1, 2009, p. 693- 700.
- [2] Bugała A., Bednarek K., Kasprzyk L., Tomczewski A., Statistical analysis of the electric energy production from photovoltaic conversion using mobile and fixed constructions, *EEMS 2017, E3S Web of Conferences* 19, 2017, p. 1-6, DOI: 10.1051/e3sconf/20171901002.
- [3] Bugała A., Jastrzębska G., Janczak D., Dach J., Boniecki P., The influence of the wavelength and intensity of solar radiation on the power characteristics generated by the photovoltaic modules in tracking system, *16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference SGEM 2016, Vienna, Austria, 2016*, p. 337-344.
- [4] Bugała A., Frydrychowicz-Jastrzębska G., Janczak D., Czekala W., Dach J., Zaborowicz M., Mathematical modelling of solar radiation for photovoltaic conversion, *2nd International Conference on Energy and Environment: Bringing together Engineering and Economics, ICEE 2015, Guimarães, Portugal, 2015*, p. 721-727.
- [5] Bugała A., Frydrychowicz-Jastrzębska G., Zbytek Z., Dach J., Janczak D., Long – term performance evaluation of a fixed and solar follow – up systems with modified astronomical positioning in Polish conditions, *International Conference on Frontiers of Sensors Technologies (ICFST 2016), MATEC Web of Conferences, 12-14 March 2016, Hong Kong, China, 59, 2016*.
- [6] Frydrychowicz-Jastrzębska G., Bugała A., Modeling the Distribution of Solar Radiation on a Two-Axis Tracking Plane for Photovoltaic Conversion, *Energies* 8, 2015, p. 1025-1041, doi:10.3390/en8021025.
- [7] Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G., Analysis of the influence of shading by horizon of PV cells on the operational parameters of a photovoltaic system, *Przegląd Elektrotechniczny*, 4, 2014, p. 78-80, DOI:10.12915/pe.2014.04.17.
- [8] Głuchy D., Kurz D., Trzmiel G., Studying the impact of orientation and roof pitch on the operation of photovoltaic roof tiles, *Przegląd Elektrotechniczny*, 6, 2013, p. 281-283.
- [9] Kasprzyk L., Tomczewski A., Bednarek K., Bugała A., Minimisation of the LCOE for the hybrid power supply system with the lead-acid battery, *EEMS 2017, E3S Web of Conferences, No 19, 2017, p. 1-6, DOI: 10.1051/e3sconf/20171901030*.
- [10] Maddala G. S., *Ekonometria*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2014.
- [11] Rabiej M., *Analizy statystyczne z programami Statistica i Excel*, Wydawnictwo Helion, 2017.
- [12] Sobczyk M., *Statystyka*, wyd. 5, PWN, Warszawa 2016.
- [13] Trzmiel G., Determination of a mathematical model of the thin-film photovoltaic panel (CIS) based on measurement data, *Eksploatacja i Niezawodność*, 19 (4), 2017, p. 516-521.
- [14] Zeliaś A., *Metody statystyczne*, Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 2000.
- [15] www.solargis.com.

ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC GRID INSTALLATIONS PERFORMANCE USING SIMULATION SOFTWARE

The paper presents a comparative analysis of the energy efficiency of a photovoltaic installation connected to a power grid carried out on the basis of daily energy production and computer simulation. Forecasting of the energy profit was carried out using the PVSol software, which allows estimating the temporary production of electricity, taking into account local climate data and the phenomenon of shading the object. On the basis of the obtained measurement and simulation results, the correlation of the value of the measured value with the determination of selected parameters of the statistical analysis was determined. The conducted analysis may be particularly useful at the stage of planning the return time of investment outlays as well as in the case of economic analyzes.

(Received: 16.02.2018, revised: 10.03.2018)