



Bartosz SOLIŃSKI¹, Monika STOPA¹

Analiza produkcji energii elektrycznej przez moduł fotowoltaiczny w warunkach rzeczywistych i symulowanych

Streszczenie. Efektywność energetyczna modułów fotowoltaicznych stanowi jeden z najważniejszych aspektów przekładających się na sferę ekonomiczną przedsięwzięcia związanego z instalacją modułów fotowoltaicznych. Na efektywność modułów i wielkość energii elektrycznej produkowaną na drodze konwersji fotowoltaicznej w modułach fotowoltaicznych ma wpływ wiele czynników zarówno wewnętrznych, związanych z samą budową modułu i jego parametrami technicznymi, jak i zewnętrznych, związanych z infrastrukturą energetyczną, w skład której wchodzi okablowanie i inwertery, oraz z warunkami klimatycznymi panującymi w miejscu lokalizacji instalacji energetycznej i usytuowania modułów związanych z orientacją oraz kątem nachylenia modułów fotowoltaicznych. Instalacja modułów fotowoltaicznych powinna być poprzedzona i uwarunkowana wykonaniem analiz szacujących ilość wytworzonej energii, a więc analiz produkcji energii elektrycznej, które to pomogą wskazać optymalne rozwiązanie dostosowane do danych warunków. W artykule przedstawiono analizę porównawczą wielkości wytwarzanej energii w warunkach rzeczywistych oraz symulowanych. Analiz dokonano na podstawie badań przeprowadzonych w Laboratorium Monitoringu Energii Wiatrowej i Słonecznej AGH, danych z baz nasłonecznienia oraz oprogramowania komputerowego do szacowania zasobów energetycznych. Badaniu poddano korelację natężenia promieniowania słonecznego padającego na moduł fotowoltaiczny oraz mocy uzyskanej przez moduł. Porównano ilość wytworzonej przez moduł energii elektrycznej w warunkach rzeczywistych oraz symulowanych z dwóch źródeł. Dokonano także porównania i analizy ilości wyprodukowanej energii modułu z uwzględnieniem symulowanych różnych kątów jego nachylenia.

Słowa kluczowe: moduł fotowoltaiczny, odnawialne źródła energii, efektywność energetyczna

The analysis of photovoltaic module energy production in real and simulated conditions

Abstract: The energy efficiency of photovoltaic modules is one of the most important aspects in energetic and economic aspects of the project related to system installations. The efficiency of modules and the electricity produced

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

by photovoltaic conversion in solar modules is affected by many factors, both internal, related to the module structure itself and its technical and external factors related to the energy infrastructure, which includes: cabling, inverters, climate conditions prevailing at the micro-installation location and the orientation and angle of inclination of the solar modules. The installation of photovoltaic modules should be preceded by an energy efficiency analysis, which will help to indicate the optimal solution adapted to the given conditions. The article presents a comparative analysis of the amount of energy produced under real and simulated conditions. Analyses were made on the basis of research carried out in the Wind and Solar Energy Laboratory located at the AGH University of Science and Technology, data from solar irradiation data-bases and computer software for estimating energy resources. The study examined the correlation of the solar irradiation on the modules and the amount of electricity generated in the photovoltaic module. The electricity produced by the module was compared under real conditions and simulated based on two sources of data. The comparison and analysis of the amount of energy of the module were also made, taking simulated different angles of the module's inclination into account.

Keywords: photovoltaics module, renewable energy sources, energy efficiency

Wprowadzenie

Wielkość energii, jaka dociera na powierzchnię ziemi w ciągu roku znacząco przewyższa potrzeby energetyczne całego świata. Jednak ze względu na swój rozproszony charakter odznacza się ona cyklicznością dobową i roczną, i jest uwarunkowana terytorialnie, klimatycznie. Energię promieniowania słonecznego na drodze konwersji fotowoltaicznej można przekształcić w energię elektryczną, poprzez wykorzystanie ogniwa fotowoltaicznego (Lewandowski 2006; Klugmann-Radziemska 2010; Soliński i in. 2015).

Ilość mocy zainstalowanej w systemach fotowoltaicznych na świecie i także w Polsce ma tendencję wzrostową. W 2017 roku w instalacjach fotowoltaicznych na świecie zainstalowano 97 GW mocy, co daje łączną ilość mocy zainstalowanej w PV w wysokości 400 GW. W porównaniu do roku 2016, w 2017 zaobserwowano 32% wzrost mocy zainstalowanej. Najwięcej mocy w instalacjach fotowoltaicznych w 2017 roku zainstalowano w Chinach (53 GW), na drugim miejscu znalazły się Stany Zjednoczone (11 GW), a na trzecim Japonia (7 GW). Analizując łączną liczbę mocy zainstalowanej w instalacjach PV w poszczególnych krajach świata, pierwsze miejsce zajmują Chiny (łączna moc zainstalowana 130 GW), a kolejne miejsca należą do Stanów Zjednoczonych (51 GW), Japonii (49 GW) i Niemiec (42 GW) (BP Statistical... 2018).

W Polsce w roku 2016 łączna moc zainstalowana w systemach fotowoltaicznych wyniosła 199 MW, z czego 100 MW zostało zainstalowane w mikroinstalacjach, czyli instalacjach do 40 kW instalowanych najczęściej w gospodarstwach domowych (Rynek... 2017). Mikroinstalacje PV o mocy do 10 kW zamontowane w gospodarstwach domowych stanowiły ponad 90% wszystkich zainstalowanych przez prosumentów (Rynek... 2017).

Celem artykułu jest porównanie wielkości wytworzonej energii elektrycznej modułu fotowoltaicznego uzyskanej w warunkach rzeczywistych oraz symulowanych. Analizie zostały poddane uzyski energetyczne w jednym z badanych modułów fotowoltaicznych zainstalowanych w Laboratorium Wiatrowo-Słonecznym AGH, a do porównania wielkości uzysków szacowanych (warunki symulowane) wykorzystano bazy PV-GIS oraz bazy z oprogramowania DDS-CAD.

1. Efektywność energetyczna modułu fotowoltaicznego

Ogniwa fotowoltaiczne, z których zbudowane są moduły, składają się z warstw, do których należą (Klugmann-Radziemska 2010):

- elektroda dodatnia,
- półprzewodnikowe warstwy krzemu typu p o ładunku dodatnim oraz typu n o ładunku ujemnym,
- powłoka przeciwodblaskowa,
- elektroda ujemna.

Przekształcenie energii promieniowania słonecznego na energię słoneczną, jest możliwe dzięki zastosowaniu półprzewodników. Pod wpływem docierającej energii promieniowania słonecznego, na granicy półprzewodników typu p i n , powstaje złącze pn . Energia docierająca do złącza generuje w nim pary elektron–dziura. Dzięki złączu $p-n$ możliwa jest dyfuzja ładunków dodatnich z obszaru p do n oraz elektronów ujemnych z obszaru n do p . Dzięki wytworzonej różnicy potencjałów po zamknięciu obwodu elektrycznego płynie prąd.

Standardowy system fotowoltaiczny podłączony do sieci elektrycznej, czyli *on-grid*, składa się z modułów fotowoltaicznych i inwertera. Wytworzony w modułach fotowoltaicznych prąd stały jest następnie zamieniany na prąd zmienny w inwerterze. Prąd zmienny odbierany jest następnie przed odbiorniki (urządzenia zainstalowane np. w gospodarstwie domowym) lub trafia do sieci energetycznej.

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

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

gdzie:

- η_{PV} – sprawność modułu PV [%],
- A_{PV} – całkowita powierzchnia modułu [m^2],
- G_c – natężenie promieniowania słonecznego na płaszczyznę modułu.

Sprawność modułu wyznacza się poprzez:

$$\eta_{PV} = \eta_m \cdot \eta_{pc} \cdot P_f \quad (2)$$

gdzie:

- η_{pc} – sprawność przetwarzania mocy przez inwerter,
- P_f – współczynnik mówiący, jaką powierzchnię modułu zawiera powierzchnia czynna ogniw,
- η_m – współczynnik sprawności modułu.

Wartość sprawności modułu można wyznaczyć poprzez:

$$\eta_m = \eta_r [1 - \alpha_T (T_c - T_r)] \quad (3)$$

gdzie:

- η_r – sprawność referencyjna modułu,
- α_T – współczynnik efektywności temperaturowej,
- T_r – temperatura referencyjna ogniwa,
- T_c – średniomiesięczna temperatura ogniwa.

Podstawowymi parametrami technicznymi modułów fotowoltaicznych, które są wyznaczone laboratoryjnie i zmienne w zależności od technologii wykonania modułów są (Soliński i in. 2015):

- P_{mpp} [W_p] – Moc w punkcie mocy maksymalnej lub szczytowej: uzyskiwana przez moduły PV w optymalnych warunkach nasłonecznienia (STC 1000 w/m²).
- U_{mpp} [V_{mp}] – Napięcie w punkcie mocy maksymalnej: uzyskiwane w optymalnych warunkach (STC 1000 w/m²) przez moduł PV pracujący pod obciążeniem lub podłączony do odbioru prądu.
- I_{mpp} [A_{mp}] – Prąd w punkcie mocy maksymalnej: uzyskiwany w optymalnych warunkach (STC 1000 w/m²) przez moduł PV pracujący pod obciążeniem lub podłączony do odbioru prądu.
- V_{oc} [V_{dc}] – Napięcie rozwarcia: napięcie maksymalne uzyskiwane w optymalnych warunkach (STC 1000 w/m²) przez moduł PV pracujący bez obciążenia, bez odbioru prądu z modułu.
- I_{sc} [A] – Prąd zwarcia: prąd maksymalny uzyskiwany w optymalnych warunkach (STC 1000 w/m²) przez moduł PV pracujący bez obciążenia, bez odbioru prądu.
- α_T [%/°C] – Współczynnik sprawności temperaturowej.
- β_M [%] – Współczynnik strat mocy beta.

Wiedząc, że moc ogniwa fotowoltaicznego w ustalonych warunkach można wyznaczyć ze wzoru:

$$P_{mpp} = U_{mpp} \cdot I_{mpp} \quad (4)$$

na podstawie wyżej wymienionych parametrów i przedstawionych wzorów (1–4) można wyznaczyć moc chwilową uzyskiwaną przez moduł przy określonym natężeniu promieniowania G_c , danym kącie pochylenia i orientacji modułu fotowoltaicznego względem kierunku N-S oraz uwzględnieniem strat temperaturowych α_T ze wzoru:

$$P_{PVi} = \left(\frac{U_{mpp} \cdot I_{mpp} \cdot G_c}{1000} \right) \cdot (1 - (T_c - 25) \cdot \alpha_T) \quad (5)$$

gdzie:

- P_{PVi} – moc chwilowa [W],
- T_c – temperatura pracy w chwili i [°C].

2. Metodyka badań i zbiory danych klimatycznych

Badaniu poddano wielkość uzyskanej energii elektrycznej przez moduł fotowoltaiczny o mocy 250 W, którego parametry przedstawiono w tabeli 1.

TABELA 1. Parametry badanego modułu fotowoltaicznego

TABLE 1. Parameters of the tested photovoltaic module

Parametr	Wartość
Technologia	Polikrystaliczny
Wymiary [mm]	65,7 × 39,4 × 1,378
Waga [kg]	41,9
Ilość modułów	60
Materiał obudowy	Aluminium
P_{mpp} [W]	227,1
V_{mpp} [V]	29,89
I_{mpp} [A]	8,45
V_{oc} [V]	37,78
I_{sc} [A]	8,94
β_M [%]	15

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych producenta.

Badania w warunkach rzeczywistych zostały przeprowadzone w laboratorium wiatrowo-słonecznym AGH, które powstało w 2014 roku. Jest ono wyposażone w elektrownię hybrydową wiatrowo-słoneczną z zasobnikiem akumulatorowym i w jej skład wchodzi poniższe elementy:

- cztery moduły fotowoltaiczne zamontowane na stelażu aluminiowym,
- dwa moduły fotowoltaiczne zainstalowane na układach nadążnych *solartrack*, jedno- i dwuosiowym,
- dwie turbiny wiatrowe, jedną o pionowej, drugą o poziomej osi obrotu
- układ do badania baterii ogniwo laboratoryjnych, wykonanych w różnych technologiach.

Moc znamionowa układu to 2,1 kW (6 paneli fotowoltaicznych po 250 W i dwie turbiny wiatrowe o mocy 300 W każda). Elektroenergetyczną część laboratorium stanowią:

- inwertery sieciowe modułów fotowoltaicznych z funkcją *MPPT* (algorytmem śledzenia maksymalnego punktu pracy panelu fotowoltaicznego),
- inwertery sieciowe turbin wiatrowych,
- licznik dwukierunkowy energii elektrycznej.

Badania prowadzono w okresie od czerwca do sierpnia 2016 roku. Położenie i nachylenie modułu zamontowanego na stelażu aluminiowym jest dane przez dwa parametry: wartość inklinacji wynosi 40° i orientacji w stosunku do kierunku S, która wynosi 0° . Badany moduł przedstawiono na rysunku 1 (drugi od lewej strony).



Rys. 1. Moduły fotowoltaiczne w laboratorium AGH
Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Photovoltaic modules in the AGH Wind and Solar Laboratory

Dane uzyskane w laboratorium AGH porównano następnie do danych z bazy portalu PV-GIS oraz oprogramowania DDS-CAD.

- W badaniach wykorzystano więc trzy zbiory danych:
- dane Laboratorium Wiatrowo-Słonecznego AGH,
 - bazy danych PV-GIS,
 - bazy danych programu DDS-CAD.

Baza danych PV-GIS

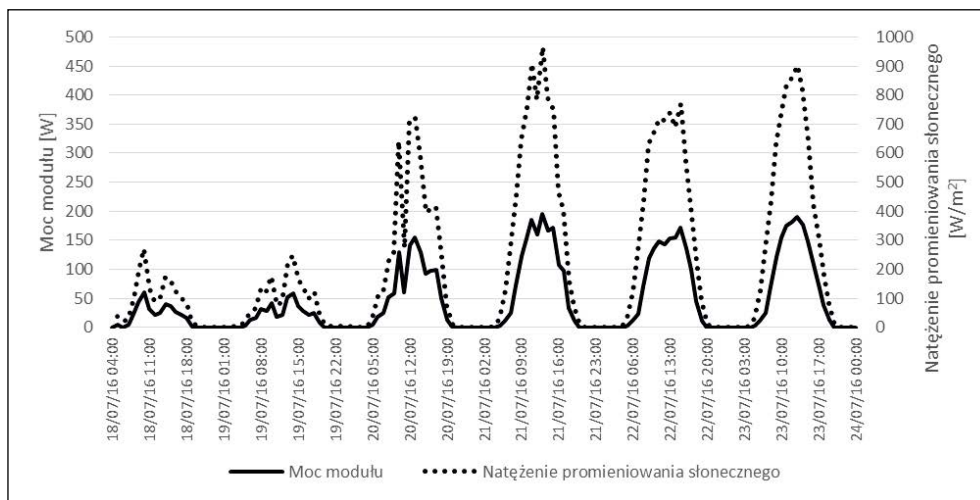
Baza *Photovoltaic Geographical Information System* zawiera mapy nasłonecznienia w Europie. Pozwala określić wielkość natężenia promieniowania słonecznego w ujęciu dziennym i godzinowym oraz umożliwia oszacowanie produkcji energii elektrycznej w instalacji fotowoltaicznej w określonym położeniu geograficznym. Baza PV-GIS pozwala określić dla danej lokalizacji geograficznej m.in. parametry takie jak: średnie roczne i miesięczne nasłonecznienie, średnią miesięczną temperaturę powietrza oraz optymalne nachylenie modułu fotowoltaicznego.

Baza danych z programu DDS-CAD

DDS-CAD jest oprogramowaniem wspomagającym projektowanie instalacji fotowoltaicznych zintegrowanych z budynkiem. Możliwe jest wybranie modułów fotowoltaicznych, zestawienie ich w jedną instalację i dobranie inwertera. Dzięki naniesieniu modułu na projekt cyfrowy budynku (dachu) uwzględniający jego położenie geograficzne i orientację wobec kierunku N-S oraz kąt nachylenia modułu można wyznaczyć symulowaną wielkość wytworzonej energii w ustalonej konfiguracji instalacji fotowoltaicznej. Do wykonania obliczeń oprogramowanie to wykorzystuje rozszerzenie *Polysun* korzystające z danych klimatycznych *Meteonorm* pochodzących z ponad 8000 stacji meteorologicznych zlokalizowanych na całym świecie.

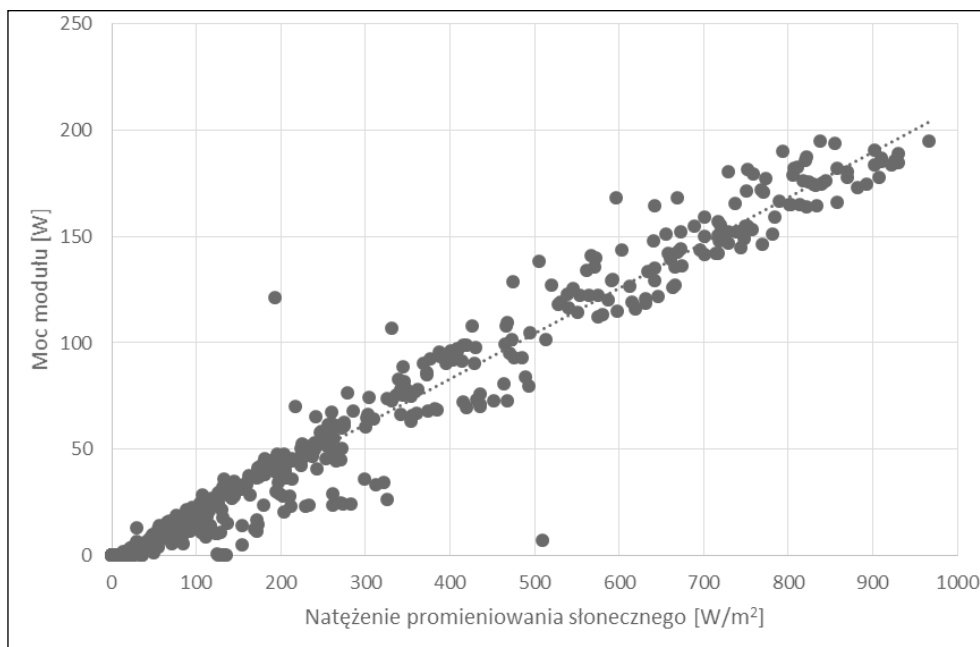
3. Dyskusja otrzymanych rezultatów badań

Analizę uzyskanych wyników rozpoczęto od zbadania korelacji pomiędzy wartością natężenia promieniowania słonecznego i uzyskiwaną moc w badanym module fotowoltaicznym. Na rysunku 2 przedstawiono graficzne porównanie natężenia promieniowania słonecznego oraz uzyskanej mocy modułu w okresie sześciu wybranych dni, zestawiając na nim średnie wielkości godzinowe. Jak można zauważyć wraz ze wzrostem natężenia promieniowania słonecznego w poszczególnych godzinach doby, następuje wzrost mocy modułu fotowoltaicznego. Natomiast na rysunku 3 ukazano diagram korelacji, który przedstawia korelację między wartością natężenia promieniowania słonecznego a mocą badanego modułu fotowoltaicznego. Współczynnik korelacji wynosi: $r = 0,98$, co oznacza, że istnieje silna



Rys. 2. Natężenie promieniowania słonecznego i moc uzyskiwana przez badany moduł
Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Solar irradiation and electricity production



Rys. 3. Korelacja natężenia promieniowania słonecznego i mocy modułu

Fig. 3. Correlation of solar irradiation and photovoltaic module power

korelacja dodatnia między tymi dwiema wielkościami – co oczywiście potwierdza występowanie zależności funkcyjnej w znanych formułach matematycznych, przedstawionych we wzorach (1–5). Analizując rysunek 3, zauważono też występowanie dwóch wartości odstających, które usunięto ze zbioru danych wykorzystywanego w dalszych analizach.

Następnie dokonano analizy porównawczej wielkości wytworzonej energii w warunkach rzeczywistych i symulowanych. W tabeli 2 pokazano wielkość wytworzonej energii w miesiącach: czerwiec, lipiec i sierpień:

- w warunkach rzeczywistych – dane z modułu fotowoltaicznego laboratorium AGH,
- dane z bazy PV-GIS,
- dane z symulacji w programie DDS-CAD.

Można zauważyć, że w warunkach rzeczywistych badany moduł wytworzył więcej energii niż można było oszacować zgodnie z PV-GIS oraz więcej niż oszacowano w oprogramowaniu DDS-CAD (rys. 4).

Zmienność wieloletnia nasłonecznienia w Krakowie mierzona w stosunku do średniej wieloletniej sięga -11% do $+8\%$ (Matuszko 2014) a wahania w poszczególnych miesiącach są jeszcze większe. Jak da się zauważyć, w bazie PV-GIS niedoszacowane zostały wartości energii w każdym badanym miesiącu, może to wynikać z faktu, że badaniu poddano jedynie dane z jednego roku (2016) a baza PV-GIS zawiera uśrednione dane wieloletnie.

Kolejną analizę porównawczą z uwzględnieniem zadanych kątów nachylenia modułu wykonano korzystając z danych bazy PV-GIS. W tabeli zestawiono wielkości wyprodukowane

TABELA 2. Wielkość wytworzonej energii elektrycznej

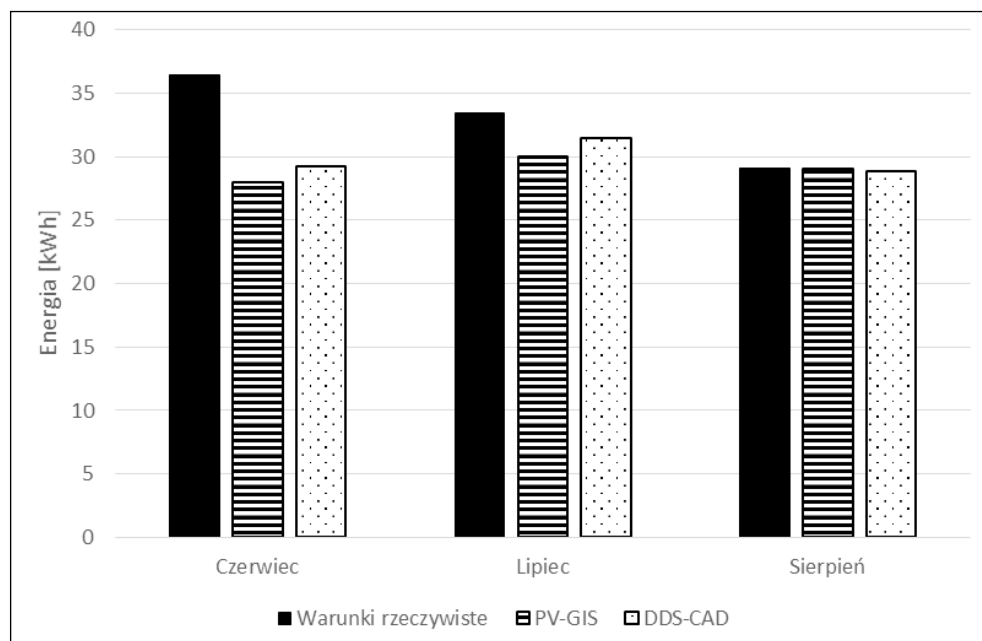
TABLE 2. Electricity generated

Ilość wytworzonej energii [kWh], nachylenie modułu 40°			
	Warunki rzeczywiste	PV-GIS	DDS-CAD
Czerwiec	36,4	28	29,2
Lipiec	33,5	30	31,5
Sierpień	29,1	29	28,9

Źródło: opracowanie własne.

wanej energii przy kątach nachylenia modułu 45°, 40°, 30°, 0° i 90° oraz ich porównanie do wartości uzyskanych w warunkach rzeczywistych przy kącie nachylenia modułu 40° w miesiącach: czerwiec, lipiec i sierpień.

Można zauważyć, że największa sumaryczna ilość energii od czerwca do sierpnia, zgodnie z szacunkami PV-GIS, mogła zostać wytworzona przy kącie nachylenia 30°, przy czym wartości te i tak są niższe od wartości energii wytworzonej w warunkach rzeczywistych przez moduł podczas badania.



Rys. 4. Wielkość wytworzonej energii elektrycznej według różnych zbiorów danych klimatycznych

Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Electricity generated according to different climat data sets

TABELA 3. Porównanie ilości wytworzonej energii elektrycznej w różnych wariantach nachylenia modułów

TABLE 3. Comparison of the electricity generated in different variants of the module inclination

Miesiąc	Warunki rzeczywiste	PV-GIS				
	40°	45°	40°	30°	0°	90°
Czerwiec	36,4	27,2	28	29,2	29,6	14,2
Lipiec	33,5	29,2	30	31,1	30,9	15,7
Sierpień	29,1	28,6	29	29,4	26,9	17,9

Źródło: opracowanie własne.

Zakończenie

Analizując dane uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań natężenia promieniowania słonecznego, wielkości mocy i energii uzyskanych z badanego modułu o mocy 250 W wykonanych w laboratorium AGH, widzimy, że istnieje silne i ścisłe powiązanie (silna korelacja dodatnia) między uzyskiwaną wielkością mocy przez moduł a natężeniem promieniowania słonecznego odpowiadające charakterystyce energetycznej badanego modułu. W miesiącach letnich roku 2016, czyli najbardziej optymalnych do wytwarzania energii elektrycznej, wystąpiły sprzyjające warunki do produkcji energii elektrycznej w modułach fotowoltaicznych. Wielkości uzyskiwanej energii były wyższe niż szacowane długoterminowe uzyski energetyczne z wykorzystaniem baz danych PV-GIS oraz w symulacji wykonanej przy wykorzystaniu oprogramowania DDS-CAD. Badania dotyczące symulacji zmiennego kąta nachylenia wskazały także na możliwe optymalne nachylenie modułów w miesiącach letnich, które wyniosło około 30 stopni.

Dzięki wykorzystaniu odpowiednich baz danych i oprogramowania możliwe jest zasympulowanie wielu wariantów obliczeniowych, co następnie może przełożyć się na efektywne rozplanowanie modułów fotowoltaicznych w planowanej instalacji fotowoltaicznej. Dalsze badania planowane przez autorów skupią się na analizie danych z modułu fotowoltaicznego w kolejnych latach w celu uwzględnienia zmienności długoterminowej i porównania jej z wielkościami wytworzonej energii elektrycznej uzyskiwanymi na podstawie innych baz danych klimatycznych.

Literatura

BP Statistical Review of World Energy 2018. 67th edition.

Klugmann-Radziemska, E. 2010. *Fotowoltaika w teorii i praktyce*. Legionowo: Wyd. BTC.

Lewandowski, W. 2006. *Proekologiczne odnawialne źródła energii*. Warszawa: Wyd. Naukowo-Techniczne.

Markwart, T. 2000. *Solar electricity*. 2nd ed., Wiley, USA.

Matuszko, D. 2014. Long term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration. *International Journal of Climatology* t. 34, s. 228–234.

Rynek Fotowoltaiki w Polsce 2017. Warszawa: Instytut Energetyki Odnawialnej.

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.

