

## Ocena modelu obliczeniowego pracy instalacji fotowoltaicznej w oparciu o wyniki pomiarów

Magdalena Jaromin\*  
*Instytut Techniki Ciepłej, Politechnika Śląska*

e-mail: jaromin.magdalena1@gmail.com

**Słowa kluczowe:** instalacja fotowoltaiczna, moduły fotowoltaiczne, model matematyczny, energia elektryczna, symulacje numeryczne.

### Streszczenie

Niniejsza praca związana jest z produkcją elektryczności przez panele fotowoltaiczne. Omówiono budowę i zasadę działania ogniw fotowoltaicznych, jak również wady i zalety systemów fotowoltaicznych. W ramach niniejszej pracy opracowano uproszczony model obliczeniowy służący do wyznaczenia prognozowanej produkcji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznej. Model uwzględnia wpływ natężenia promieniowania słonecznego oraz temperatury pracy ogniw fotowoltaicznych na efektywność produkcji elektryczności. Model ten wykorzystano do obliczeń instalacji fotowoltaicznej zlokalizowanej w Katowicach. Uzyskane wyniki zostały następnie porównane z wynikami pomiarów zbieranych przez pierwszy rok użytkowania rzeczywistej instalacji paneli fotowoltaicznych zamontowanej na domu jednorodzinnym w miejscowości Orzesze (woj. śląskie).

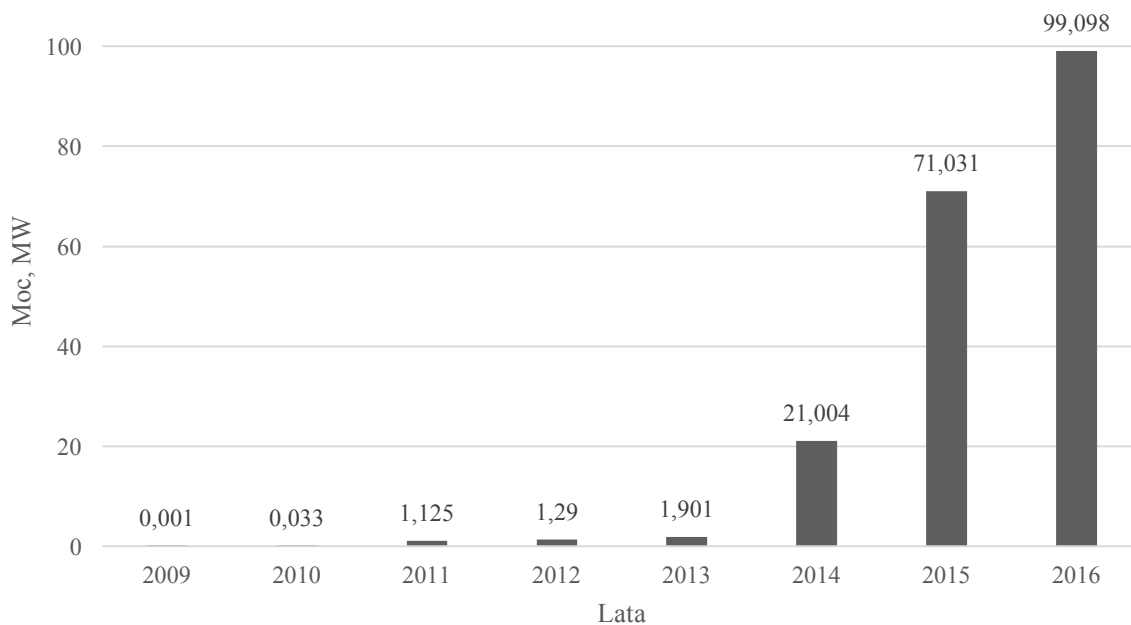
---

\* Rozdział przygotowano podczas pracy nad projektem dyplomowym inżynierskim wykonywanym przez autora w Instytucie Techniki Ciepłej na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej, pod opieką Dra inż. Tomasza Burego.

# 1 Wprowadzenie

Fotowoltaika jako dziedzina techniki zajmuje się wytwarzaniem prądu elektrycznego z promieniowania słonecznego przy zastosowaniu zjawiska fotowoltaicznego, które zostało dokładnie omówione w podpunkcie 1.3.

Pomimo przyzwyczajenia społeczeństwa do wytwarzania energii elektrycznej z konwencjonalnych źródeł, energetyka fotowoltaiczna staje się coraz bardziej popularna i ma coraz większe grono zwolenników również w Polsce, co obrazuje rysunek 1.



Rysunek 1: Moc zainstalowana w Polsce w instalacjach fotowoltaicznych [1].

Do roku 2013 przyrost wytwarzania energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych w kraju był dosyć duży: zainstalowana moc wahała się od 0,001 do 1,901 MW, a zmiany mocy (określane rok do roku) były nawet czterdziestokrotne. Istotnie również zmieniła się moc zainstalowana między rokiem 2013 i 2014, bo aż dziesięciokrotnie. Od roku 2014 widać znaczny wzrost mocy zainstalowanej, do aż 99,098 MW w 2016 roku, co daje około pięciokrotny wzrost mocy w ciągu trzech lat. Dynamika przyrostu mocy zainstalowanej w instalacjach fotowoltaicznych w Polsce spada zatem, ale ciągle są to jednak zmiany na poziomie kilkudziesięciu procent rok do roku, a więc duże.

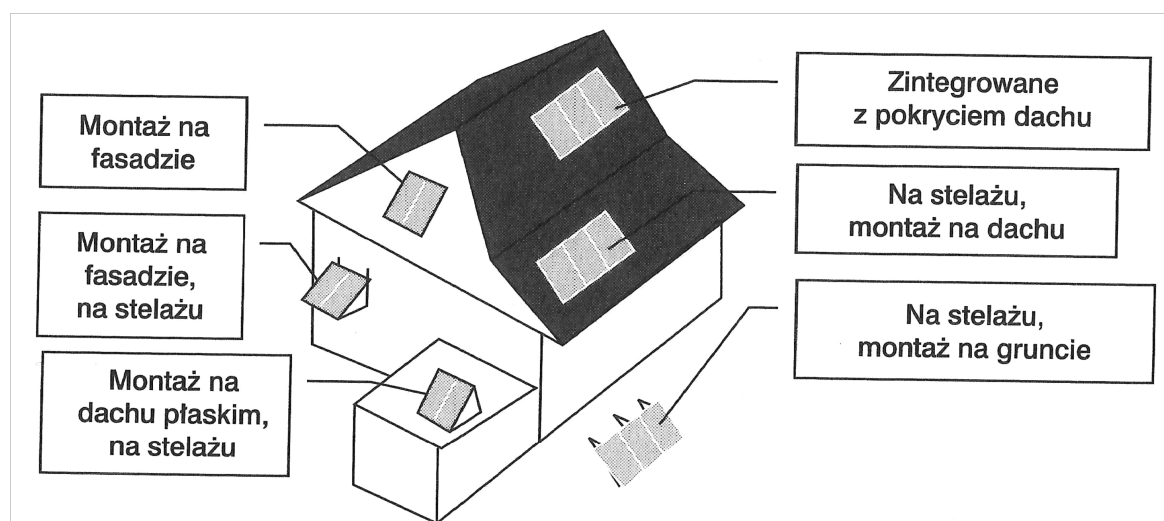
Chcąc zrozumieć dynamiczny rozwój fotowoltaiki warto poznać przyczyny tego zjawiska. Analizując np. argumenty ekologiczne na pewno należy wspomnieć o zredukowaniu ilości szkodliwych zanieczyszczeń w powietrzu związanych z wykorzystywaniem paliw kopalnych, co skutkuje ograniczeniem zachorowań wśród ludności i zmniejszeniem efektu cieplarnianego

z czego wnioskować można, że fotowoltaika jest przyjazna dla człowieka i środowiska w jakim on żyje. Warto też wspomnieć, że energetyka słoneczna jest niewyczerpalna i zapewnia podwyższenie bezpieczeństwa energetycznego kraju. Biorąc również pod uwagę możliwość stale rosnącej ceny energii elektrycznej zabezpieczamy się dzięki posiadaniu własnego źródła jej produkcji. [2]

## 1.1 Cechy systemów fotowoltaicznych

Zaczynając od zalet stosowania instalacji fotowoltaicznych warto zwrócić uwagę na fakt, że istnieje możliwość sprzedaży wytworzonej energii elektrycznej do sieci, co oznacza dla producenta dodatkową korzyść. Pomimo, że podczas montażu jest to ingerencja w system elektroenergetyczny nie powoduje to uszkodzeń sieci i podczas późniejszej współpracy jest całkowicie bezpieczne [2].

Systemy fotowoltaiczne są również bardzo uniwersalne. Niezależnie od tego czy będą zamontowane na domu jednorodzinnym, hali przemysłowej, gruncie, czy fasadzie budynku, na rynku jest stosowane tak wiele rozwiązań montażowych, że bez problemu można zainstalować system tam, gdzie będzie on potrzebny. Przykładowe sposoby montażu zostały przedstawione na rysunku 2. W razie wzrostu zapotrzebowania na energię elektryczną bez problemu można również instalację dostosować do aktualnych potrzeb i ją rozbudować, ponieważ technologia montażu jest prosta i stosunkowo szybka [3].



Rysunek 2: Sposoby montażu paneli fotowoltaicznych [4].

Kolejną zaletą jest na pewno brak konieczności stosowania klasycznych paliw do produkcji energii elektrycznej, ponieważ do czerpania korzyści z instalacji wystarczy promieniowanie słoneczne, które w przeciwieństwie do paliw kopalnych nie ma negatywnego wpływu na środowisko. Jest ekologiczne i przede wszystkim darmowe, w związku z czym unika się konieczności magazynowania i transportu klasycznego paliwa oraz utylizacji odpadów procesu konwersji (spalania) takiego paliwa.

Obawa przed zbyt dużą ilością pochmurnych i zamglonych dni jest nieuzasadniona, ponieważ współczesne instalacje fotowoltaiczne działają również i produkują energię elektryczną przy promieniowaniu rozproszonym, niemniej jednak warto mieć na uwadze, że natężenie promieniowania słonecznego bardzo wpływa na moc modułu.

Panele fotowoltaiczne przez brak stosowania części mechanicznych są również mniej podatne na wszelkie uszkodzenia i awarie oraz pracują bez wytwarzania hałasu. Ich wygląd również można dostosować tak, by instalacja wyglądała estetycznie. Wśród wielu modeli (i kolorów) na rynku na pewno można wybrać zadowalające rozwiązanie. Chociaż oczywiście kwestia estetyki powinna być ostatnim problemem podczas doboru instalacji fotowoltaicznej.

Systemy fotowoltaiczne stosowane są również w transporcie, gdzie potrafią zasilać znaki drogowe, oznaczenia dróg czy lotnisk. Fotowoltaika jest również bardzo przydatna w medycynie w krajach Trzeciego Świata, gdzie systemy tego typu stosowane w polowych lecznicach zasilać chłodnie zapewniają bezpieczne przechowywanie leków i szczepionek.

Jak każda technologia, tak i fotowoltaika posiada również pewne wady. Należy do nich na pewno czas zwrotu inwestycji i cena, która na szczęście z roku na rok staje się coraz niższa i przez to bardziej przystępna.

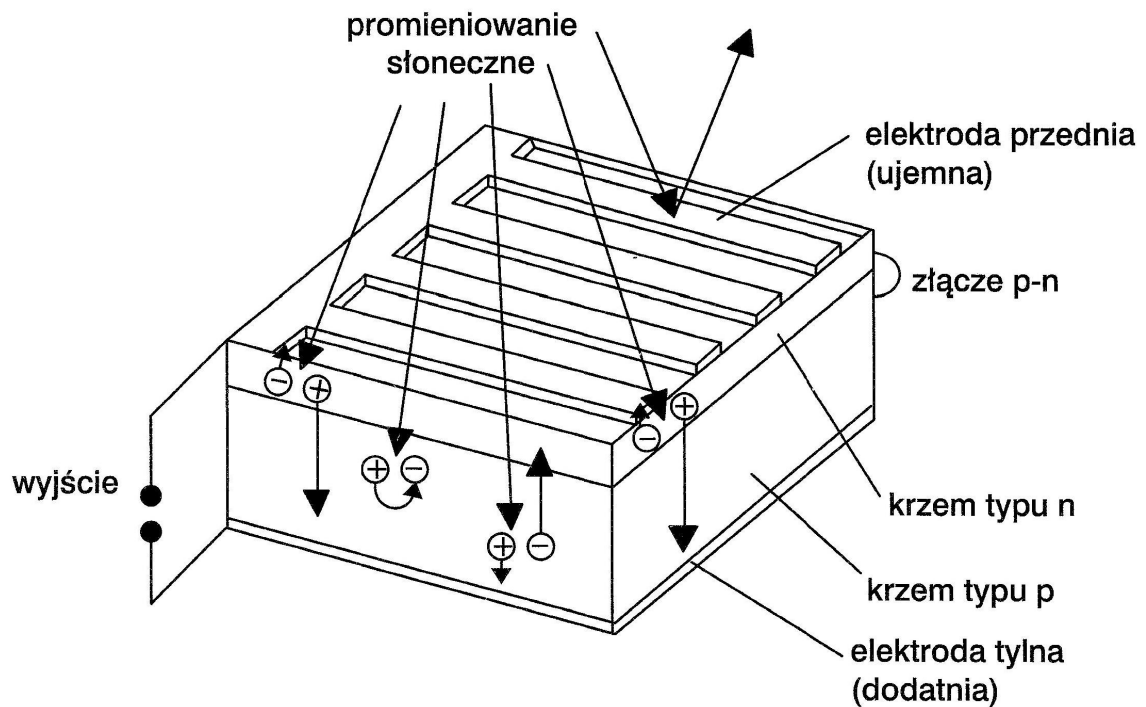
Kolejnym z problemów systemów fotowoltaicznych jest również niewystarczające nasłonecznienie w niektórych godzinach. Są to głównie poranki i wieczory, kiedy to w przypadku domów zapotrzebowanie jest największe, a produkcja niższa. Można ten problem jednak zniwelować przez stosowanie systemów magazynowania, przez odpowiednie pozycjonowanie powierzchni czynnej instalacji (na zachód i wschód) lub przez korzystanie z opcji net metering, która polega na odprowadzaniu nadwyżki wyprodukowanej energii elektrycznej do sieci energetycznej, a kolejno podczas jej niedostatków możliwości poboru płacąc tylko za przesył.

## 1.2 Budowa ogniwa fotowoltaicznego

Ogniwo fotowoltaiczne zbudowane jest z następujących elementów:

- elektrody przedniej ujemnej
- płytki krzemowej typu n
- złącza p-n
- płytki krzemowej typu p
- elektrody tylnej dodatniej

Dokładne rozmieszczenie wymienionych elementów przedstawia rysunek 3.

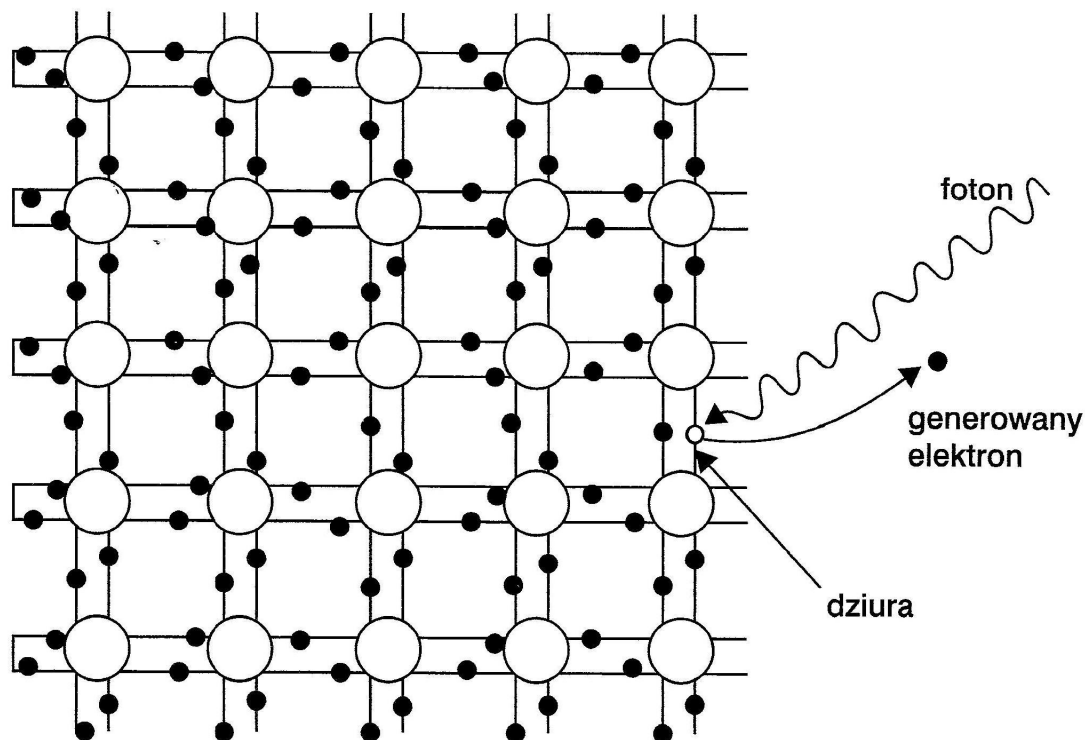


Rysunek 3: Schemat budowy ogniwa fotowoltaicznego [4].

### 1.3 Zasada działania ogniwa fotowoltaicznego

Podstawą działania ogniw fotowoltaicznych jest zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne. Polega ono na procesie absorpcji energii promieniowania słonecznego, gdzie w miejscu występowania złącza p-n część elektronów walencyjnych z atomów składających się na sieć krystaliczną półprzewodnika zostaje wybita ze swojego miejsca. Jest to tzw. generacja pary nośników elektron-dziura. Następnie występuje rozdzielenie nośników w półprzewodniku (elektronów i dziur), które kolejno poruszają się w przeciwnych kierunkach w wyniku działania pola elektrycznego w obszarze złącza. Efektem takiego zjawiska jest pojawienie się napięcia na zaciskach ogniwa. Jeżeli do ogniwa przyłączony zostanie odbiornik, w wyniku czego zamknie się obwód elektryczny, to spowoduje to przepływ prądu elektrycznego. Powstałe w wyniku tego natężenie prądu jest proporcjonalne do natężenia promieniowania słonecznego oraz powierzchni rozpatrywanego ogniwa fotowoltaicznego [5].

Sposób powstawania par dziura-elektron przedstawiono na rysunku 4.



Rysunek 4: Schemat powstawania par dziura-elektron [4].

#### 1.4 Podział fotoogniw krzemowych

Najpopularniejszym rodzajem fotoogniw słonecznych są ogniwa krzemowe, ponieważ krzem jest materiałem łatwo dostępnym w dużych ilościach w naturze. Bazujące na krzemie półprzewodniki są przyjazne dla środowiska i nietoksyczne. Dodatkowo tzw. wafle krzemowe są łatwe do obróbki i formowania w kształty.

Ogniwa krzemowe dzielimy na trzy grupy [4]:

- Monokrystaliczne:

Są wykonane na bazie monokryształu krzemu, który zapewnia najwyższą sprawność konwersji energii słonecznej na elektryczną utrzymującą się na stałym poziomie przez wiele lat. Posiadają uporządkowaną strukturę na całej powierzchni fotoogniwa. Ogniwa monokrystaliczne wykorzystywane są głównie w instalacjach, gdzie wysoka cena nie gra tak dużej roli jak zapewnienie wysokiej sprawności i żywotności.

- Polikrystaliczne:

Ta grupa fotoogniw nie potrzebuje wytwarzania dużych jednorodnych kryształów. W związku z tym proces produkcyjny jest uproszczony, a koszty zmniejszone. Przez niejednorodność struktury fotoogniw nie będzie możliwe uzyskanie aż takiej wysokiej sprawności i trwałości jak w przypadku fotoogniw monokrystalicznych. Do zalet ogniw polikrystalicznych należy zaliczyć cenę, która jest zdecydowanie niższa.

- Amorficzne:

Ogniwa wykonane w tej technologii są cienkowarstwowe. Powstają przez napyłanie cienkich warstw na izolowane podłoże, którym zazwyczaj jest szklana płyta. Ich sprawność jest niewielka, ale nie jest to przeszkodą do stosowania ich w zegarkach, kalkulatorach i innych urządzeniach, ponieważ ich cena jest zdecydowanie najniższa.

## 1.5 Cel i zakres pracy

Celem pracy było stworzenie modelu obliczeniowego służącego do wyliczenia prognozowanej produkcji energii elektrycznej z rzeczywistej instalacji fotowoltaicznej znajdującej się na domu jednorodzinnym w Orzeszu w województwie śląskim oraz przybliżeniu sylwetki urządzeń należących do tej instalacji. Podczas analizy wykorzystano z danych dostosowanych do miejsca, w którym instalacja się znajduje [6].

## 2 Opis instalacji

Analizowana instalacja fotowoltaiczna znajduje się w miejscowości Orzesze. Na rysunku 5 przedstawiono rozmieszczenie analizowanej instalacji fotowoltaicznej na domu jednorodzinnym. Jest ona zamontowana na pokryciu dachu, w związku z czym jest estetyczna, a ilość energii, która jest produkowana jest większa, ponieważ nie występują zacielenia paneli przez drzewa czy budynki. Do zalet takiego umiejscowienia należy również utrudniony dostęp dla osób postronnych, więc prawdopodobieństwo kradzieży lub dewastacji jest niewielkie. Dostęp taki można odebrać z drugiej strony jako wadę, z uwagi na czynności konserwacyjno-serwisowe. Instalacja fotowoltaiczna jest jednak niemal bezobsługowa, więc nie stanowi to problemu.

Rozpatrywana instalacja składa się z 24 paneli fotowoltaicznych o łącznej, nominalnej mocy zainstalowanej wynoszącej 6720 W, które zamontowane są pod kątem 45° do powierzchni poziomej.



Rysunek 5: Układ analizowanych paneli fotowoltaicznych.

Najważniejszymi elementami wchodzącymi w skład omawianej instalacji są:

- Panele fotowoltaiczne [7]

W instalacji wykorzystano panele monokrystaliczne KIOTO SOLAR 280 Wp w wersji BLACK, których dane zestawiono poniżej:

- Temperatura pracy:  $+80^{\circ}\text{C}$  do  $-40^{\circ}\text{C}$
- Wymiary z ramą:  $1666\text{ mm} \times 992\text{ mm} \times 40\text{ mm}$
- Waga z ramą: 19,50 kg

Przykładową charakterystykę mocy otrzymanej do natężenia promieniowania słonecznego paneli monokrystalicznych przedstawiono na rysunku 7. Dzięki niej można zauważyć, że panele monokrystaliczne będą produkowały energię elektryczną, gdy natężenie promieniowania słonecznego będzie wynosić minimum  $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ .

- Falownik [8]

Do przetworzenia prądu stałego (DC) na zmienny (AC) wykorzystano trójfazowy falownik Fronius SYMO 6.0 – 3 – M którego dane przedstawiono poniżej:

- Moc znamionowa: 6000 W
- Maksymalna moc wyjściowa: 6000 VA



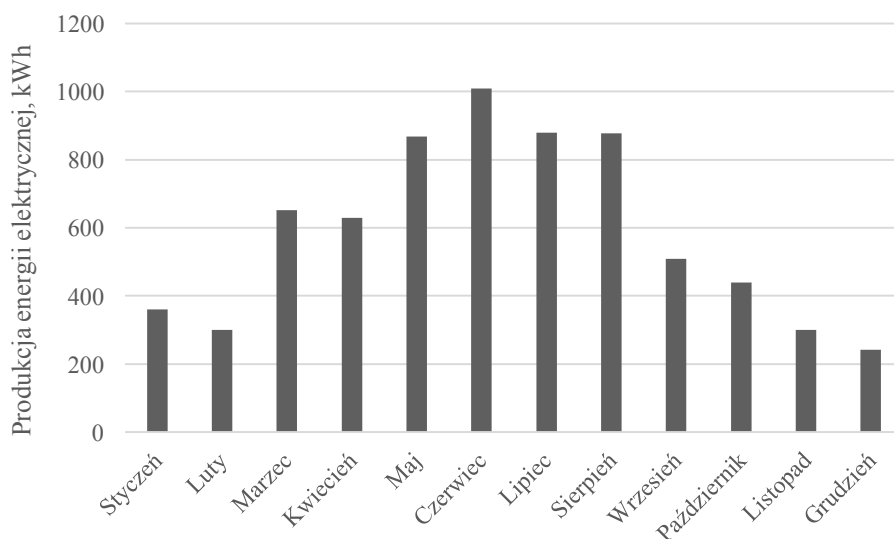
- Wymiary (wys./szer./gł.): 645/431/204 mm
- Waga: 19,9 kg
- Koncepcja falownika: beztransformatorowa
- Zakres temperatury otoczenia:  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3 Wyniki pomiarów analizowanej instalacji fotowoltaicznej

Rozpatrywana instalacja została opomiarowana przez właścicieli, co pozwala na zbieranie danych pomiarowych dotyczących natężenia prądu oraz napięcia produkowanego przez panele, a także ilości produkowanej energii elektrycznej. Dane dotyczące tego ostatniego parametru zestawiono w tabeli 1 oraz przedstawiono graficznie na rysunku 6 dla każdego miesiąca w ciągu pierwszego roku użytkowania instalacji (tj. listopad 2016-październik 2017).

Tabela 1: Wyniki pomiarów produkcji elektryczności uzyskane z instalacji.

Miesiąc	Wartość	Jednostka
Styczeń	361,00	kWh
Luty	301,00	
Marzec	651,00	
Kwiecień	630,06	
Maj	868,19	
Czerwiec	1008,57	
Lipiec	879,32	
Sierpień	878,00	
Wrzesień	509,79	
Październik	439,35	
Listopad	300,00	
Grudzień	243,00	



Rysunek 6: Rzeczywista produkcja energii elektrycznej z analizowanej instalacji.

Na podstawie zestawionych w tabeli 1 danych oraz wygenerowanego wykresu można stwierdzić, że najbardziej korzystnym miesiącem w produkcji energii elektrycznej był miesiąc czerwiec, w którym instalacja wyprodukowała 1008,57 kWh, a najbardziej niekorzystnym miesiącem był grudzień, dla którego otrzymano wynik 243 kWh. Poza niewielkimi wahaniami produkcji w początkowych miesiącach roku (styczeń – kwiecień) otrzymany obraz jest typowy dla instalacji solarnych eksploatowanych w Polsce.

#### 4 Model obliczeniowy

Moc elektryczna z jaką pracuje ogniwo fotowoltaiczne zależy oczywiście od natężenia promieniowania słonecznego, które pada na powierzchnię tegoż ogniwa. Oprócz natężenia promieniowania słonecznego istotnym parametrem wpływającym na produkcję elektryczności przez panele fotowoltaiczne jest ich temperatura. Rosnąca temperatura powoduje spadek mocy z jaką pracuje moduł fotowoltaiczny. W standardowych warunkach testowych (STC) moduły fotowoltaiczne bada się przy natężeniu promieniowania wynoszącym  $1000 \frac{W}{m^2}$  oraz przy utrzymaniu ich temperatury na poziomie  $25^{\circ}C$ . W rzeczywistych warunkach pracy natężenia promieniowania słonecznego jest zmienne, a naturalne chłodzenie modułu przez otaczające powietrze nie wystarcza w przypadku dni o dobrym nasłonecznieniu. Stąd też panele fotowoltaiczne pracujące w Polsce mogą rozgrzewać się nawet do temperatury przekraczającej  $70^{\circ}C$ . Przygotowując model obliczeniowy oba wspomniane aspekty zostały wzięte pod uwagę.

## 4.1 Metodyka badań

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano dane Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa dotyczące pomiarów meteorologicznych dla miasta Katowice [6]. Jest to lokalizacja geograficznie najbliższa Orzesza. Dla każdej godziny w roku korzystano z następujących danych:

- Temperatura termometru suchego
- Całkowite natężenie promieniowania słonecznego na powierzchnię o wybranej orientacji i kącie nachylenia do poziomu

Wykonując model obliczeniowy obrano następujące założenia:

- Lokalizacja: Katowice
- Orientacja geograficzna umiejscowienia instalacji: południe
- Kąt pomiędzy panelami fotowoltaicznymi, a powierzchnią poziomą:  $45^\circ$
- Powierzchnia panelu fotowoltaicznego:  $A = 1,63 \text{ m}^2$
- Temperatura odniesienia,  $t_o = 25^\circ\text{C}$
- Nominalna temperatura pracy ogniwa fotowoltaicznego  $NOCT = 45^\circ\text{C}$
- Spadek mocy paneli przypadający na 1 stopień Celsjusza:  $\Delta P = 0,0037 \frac{1}{^\circ\text{C}}$

## 4.2 Algorytm obliczeń

Obliczenia w projekcie wykonano osobno dla każdej godziny w ciągu roku co daje 8760 zestawów danych.

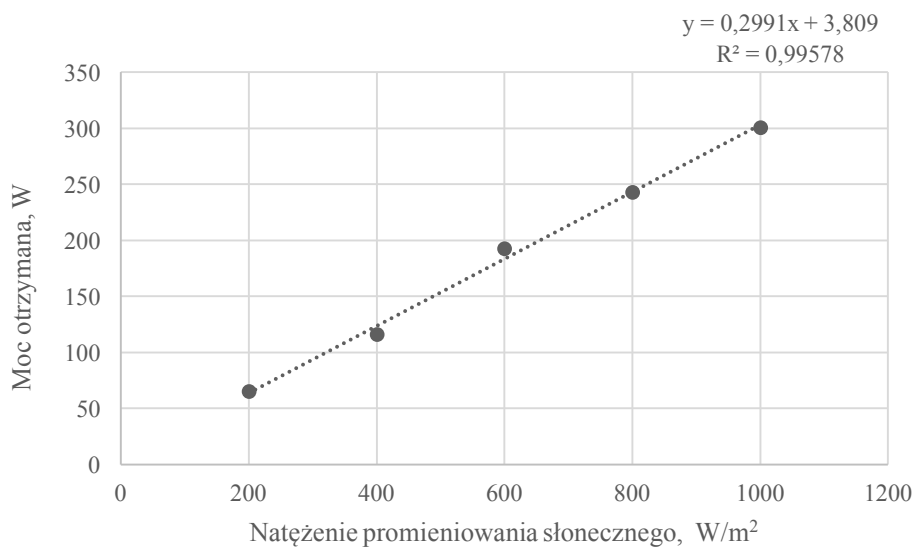
W pierwszej kolejności wybrano, z zebranych danych, godziny w roku, dla których natężenie promieniowania słonecznego jest większe od  $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . Jest to spowodowane tym, że zgodnie z zależnością mocy od promieniowania słonecznego dla paneli monokrystalicznych zestawionej w tabeli nr 2 moduł nie produkuje mocy przy niższej wartości natężenia promieniowania.

Tabela 2: Charakterystyka mocy paneli monokrystalicznych w funkcji natężenia promieniowania słonecznego [9].

Natężenie promieniowania, $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$	Moc elektryczna, W
1000	300
800	242
600	192
400	115
200	64

Zgodnie z tym założeniem wyliczono, że z 8760 godzin tylko w ciągu 2026 panele będą produkowały energię elektryczną. Oznacza to, że w ciągu 77% roku nie będziemy korzystać z dobrodziejstw instalacji.

Do wyznaczenia chwilowej mocy elektrycznej wykorzystano dane z tabeli 2, na podstawie, której stworzono punktowy wykres przedstawiony na rysunku nr 7 wraz z naniesioną na niego linią trendu.



Rysunek 7: Charakterystyka mocy elektrycznej analizowanych paneli monokrystalicznych w funkcji natężenia promieniowania słonecznego.

Z linii trendu otrzymano wzór funkcji:

$$y = 0,2991x + 3,809 \quad (1)$$

której współczynnik determinacji jest równy:

$$R^2 = 0,99578 \quad (2)$$

Korzystając z zależności (1) gdzie za x podstawiono wartość natężenia promieniowania słonecznego  $I$  otrzymano wartości chwilowej mocy elektrycznej panelu fotowoltaicznego  $P_0$ .

Następnie wyliczono temperaturę modułu bazując na tzw. nominalnych warunkach pracy modułu fotowoltaicznego. Nominalne warunki pracy określa natężenie promieniowania słonecznego wynoszące  $800 \frac{W}{m^2}$  oraz temperatura otoczenia równa  $20^{\circ}C$ . Zakłada się, że przy tych warunkach pracy temperatura modułu jest równa NOCT (Nominal Operating Cell Temperature), która przyjmuje typowo wartości z zakresu  $(42-48)^{\circ}C$ . Temperatura modułu pracującego w warunkach rzeczywistych zależy od temperatury otoczenia i aktualnego natężenia promieniowania [10]:

$$t_m = t_{ts} + \frac{(NOCT - 20) \cdot i}{800} \quad (3)$$

gdzie:

$t_m$  - temperatura modułu,  $^{\circ}C$

$t_{ts}$  - temperatura termometru suchego,  $^{\circ}C$

$i$  - całkowite natężenie promieniowania słonecznego,  $\frac{W}{m^2}$

Kolejno wyznaczono różnicę temperatury  $\Delta t$ :

$$\Delta t = |t_o - t_m| \quad (4)$$

gdzie:

$t_o$  - temperatura odniesienia wynosząca  $25^{\circ}C$

Następnie wyliczono poprawki mocy:

$$\varepsilon = \Delta P \cdot P_0 \cdot \Delta t \quad (5)$$

gdzie:

$\varepsilon$  - poprawka mocy,  $W$

$\Delta P$  - spadek mocy przypadający na  $^{\circ}C$ ,  $\frac{1}{^{\circ}C}$

$P_0$  - moc bez poprawki,  $W$

W kolejnym kroku wyliczono moc  $P$  w zależności od temperatury modułu  $t_m$ :

Gdzie w przypadku, gdy  $t_m > t_o$  to moc  $P$ :

$$P = P_0 - \varepsilon \quad (6)$$

natomiast gdy  $t_m < t_o$  to moc  $P$ :

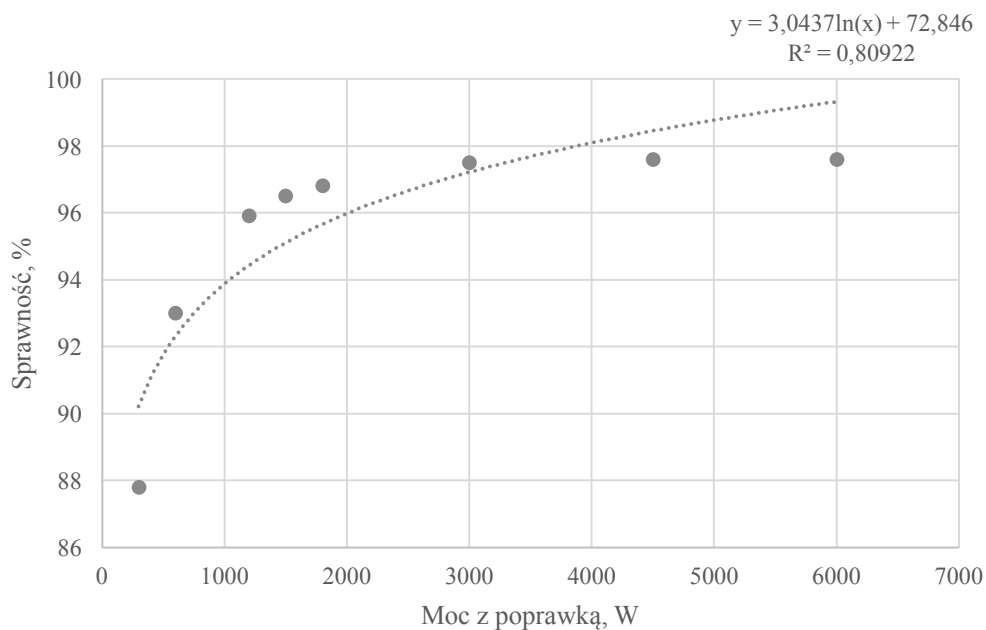
$$P = P_0 + \varepsilon \quad (7)$$

Kolejno wyznaczono sprawności falownika w zależności od mocy korzystając z danych z tabeli nr 3:

Tabela 3: Moc falownika oraz sprawności [8].

Moc, W	Sprawność, %
300	87,8
600	93,0
1200	95,9
1500	96,5
1800	96,8
3000	97,5
4500	97,6
6000	97,6

I na jej podstawie utworzono wykres charakterystyki sprawności falownika przedstawiony na rysunku 8.



Rysunek 8: Zależność sprawności od mocy falownika.

Prowadząc linię trendu na rysunku nr 8 otrzymano jej wzór:

$$y = 3,0437 \ln(x) + 72,846 \quad (8)$$

dzięki któremu uzyskano wartości sprawności falownika w zależności od mocy panelu.

Do obliczenia rzeczywistej mocy elektrycznej użytecznej  $P_R$  w analizowanych warunkach pomnożono wartości mocy elektrycznej otrzymywanej z paneli fotowoltaicznych  $P$  przez sprawność falownika wyznaczoną z zależności (8).

### 4.3 Przykładowy tok obliczeń dla wybranej godziny

Przykładowo, dla jednej serii pomiarowej (7 maja, godzina 13:00) zgodnie z omówionymi w podpunkcie 4.2 etapami poniżej obliczono poszukiwane wartości. W tabeli 4 zestawiono dane potrzebne do obliczeń:

Tabela 4: Dane potrzebne do wyliczenia produkcji z dnia 7 maja godziny 13.00.

	Symbol	Wartość	Jednostka
Miesiąc	$M$	5	–
Dzień	$D$	7	–
Godzina	$h$	13	–
Temperatura termometru suchego	$t_{ts}$	9,3	°C
Całkowite natężenie promieniowania słonecznego	$i$	332,5	$\frac{W}{m^2}$

Zgodnie z zależnością (1) wyznaczono moc bez poprawki  $P_0$ :

$$P_0 = 0,2991 \cdot 332,5 + 3,809 = 103,26 \text{ W}$$

Kolejno, wykorzystując równanie (3) otrzymano temperaturę modułu  $t_m$ :

$$t_m = 9,3 + \frac{(45 - 20) \cdot 332,5}{800} = 19,69 \text{ °C}$$

Chcąc wyznaczyć różnicę temperatury  $\Delta t$  pomiędzy temperaturą odniesienia, a temperaturą modułu wykorzystano zależność (4):

$$\Delta t = |25 - 19,69| = 5,31 \text{ °C}$$

Poprawkę mocy  $\varepsilon$  określono odwołując się do (5):

$$\varepsilon = 0,0037 \cdot 103,26 \cdot 5,31 = 2,03 \text{ W}$$

Kolejno znając wartości:

$$t_m = 19,69 \text{ °C i } t_0 = 25 \text{ °C}$$



i stosując się do zależności (6) i (7) określono moc  $P$ :

$$P = 103,26 + 2,03 = 105,29 \text{ W}$$

Następnie wyznaczono sprawność falownika w zależności od generowanej mocy wykorzystując wzór (8):

$$\eta = 3,0437 \ln(105,29) + 72,846 = 87 \%$$

Poniżej w tabeli 5 zestawiono obliczone wartości dla wybranej serii pomiarowej:

Tabela 5: Otrzymane wyniki z dnia 7 maja godziny 13.00.

Moc bez poprawki	$P_0$	103,26	W
Temperatura modułu	$t_m$	19,69	°C
Różnica temperatury	$\Delta t$	5,31	°C
Poprawka mocy	$\varepsilon$	2,03	W
Moc	$P$	105,28	Wh
Sprawność falownika	$\eta$	87	%

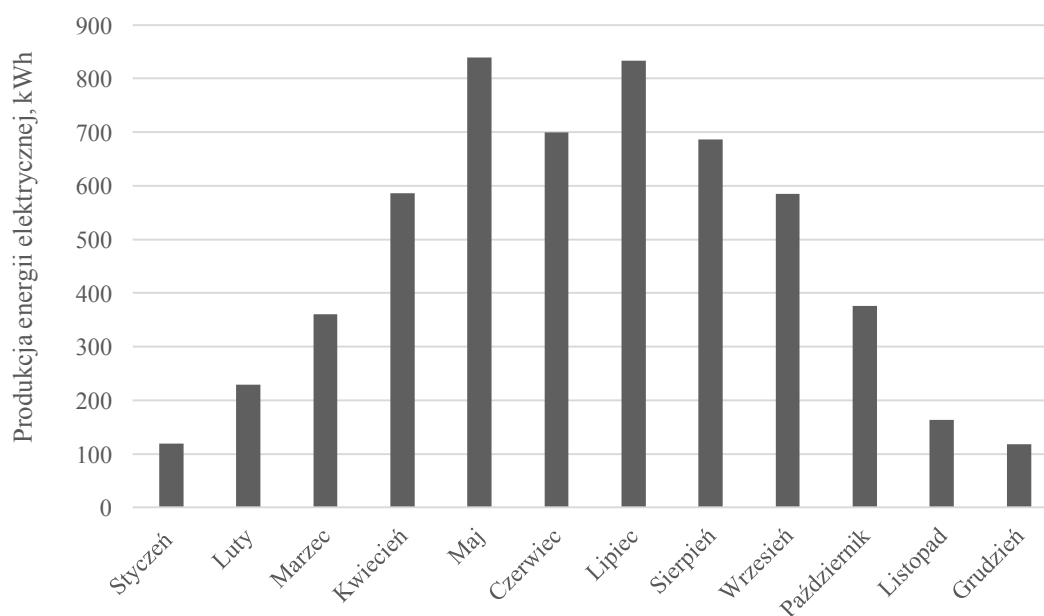
#### 4.4 Wyniki z symulacji

W tabeli 6 przedstawiono produkcję energii elektrycznej w poszczególnych miesiącach roku obliczoną za pomocą opracowanego modelu obliczeniowego.

Tabela 6: Produkcja elektryczności w rozpatrywanej instalacji otrzymana na podstawie modelu obliczeniowego.

Miesiąc	Wartość	Jednostka
Styczeń	119,26	kWh
Luty	228,88	
Marzec	360,85	
Kwiecień	586,78	
Maj	839,02	
Czerwiec	700,15	
Lipiec	833,40	
Sierpień	686,49	
Wrzesień	585,30	
Październik	376,12	
Listopad	162,92	
Grudzień	118,51	

Graficzne przedstawienie uzyskanych wyników obliczeniowych zaprezentowano na rysunku 9.



Rysunek 9: Wyniki symulacji.

Analizując otrzymane wartości stwierdzono, że najbardziej korzystnym pod kątem produkcji energii elektrycznej miesiącem jest maj, dla którego szacowane jest osiągnięcie wartości produkcji 839,02 kWh oraz lipiec, dla którego wartość produkcji wynosi 833,40 kWh. Najbardziej niekorzystne wyniki osiągnięto dla grudnia i stycznia, gdzie wynoszą one odpowiednio 118,51 kWh i 119,26 kWh.

Dobowe wyniki dla maja zestawiono w tabeli 7:

Tabela 7: Dienne wyniki w maju.

Dzień	Wartość	Jednostka	Dzień	Wartość	Jednostka
1	0,00	kWh	16	43,43	kWh
2	0,00		17	51,44	
3	23,72		18	37,89	
4	18,00		19	33,21	
5	34,71		20	30,58	
6	8,52		21	39,31	
7	11,38		22	40,23	
8	31,38		23	45,38	
9	23,82		24	32,15	
10	29,43		25	38,66	
11	13,77		26	34,89	
12	18,11		27	35,77	
13	20,00		28	17,50	
14	21,27		29	29,15	
15	38,62		30	32,14	
		31	4,56		

Z danych wynika, że tylko dla dwóch dni w ciągu tego miesiąca wystąpił deficyt natężenia promieniowania słonecznego, co skutkowało brakiem w produkcji energii elektrycznej.

Przeciwieństwem miesiąca maj jest grudzień, dla którego wyniki przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8: Dzielne wyniki w grudniu.

Dzień	Wartość	Jednostka	Dzień	Wartość	Jednostka
1	0,00	kWh	16	0,00	kWh
2	0,00		17	1,76	
3	16,10		18	11,14	
4	3,42		19	0,00	
5	9,53		20	0,00	
6	0,00		21	0,00	
7	0,00		22	5,94	
8	0,00		23	14,40	
9	0,00		24	5,98	
10	0,00		25	0,00	
11	21,49		26	3,87	
12	9,06		27	0,00	
13	0,00		28	2,01	
14	0,00		29	0,00	
15	0,00		30	0,00	
		31	13,81		

Z zestawienia powyżej widać, że aż dla 18 dni instalacja nie będzie produkowała energii elektrycznej. Jest to 58% całego miesiąca.

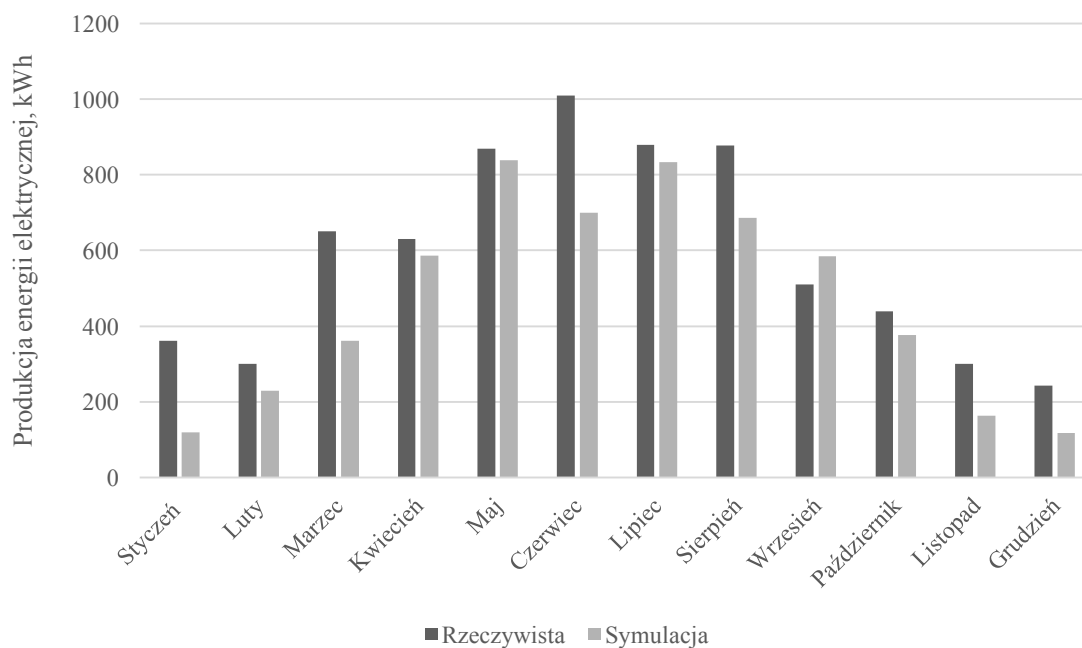
## 5 Porównanie pomiarów rzeczywistych i otrzymanych z modelu obliczeniowego.

Pomiarowe i obliczeniowe wyniki produkcji elektryczności zestawiono w tabeli 9.

Tabela 9: Produkcja energii elektrycznej w analizowanej instalacji - zestawienie danych pomiarowych i otrzymanych z symulacji.

Miesiąc	Produkcja energii elektrycznej		Jednostka
	Rzeczywista	Z symulacji	
Styczeń	361,00	119,26	kWh
Luty	301,00	228,88	
Marzec	651,00	360,85	
Kwiecień	630,06	586,78	
Maj	868,19	839,02	
Czerwiec	1008,57	700,15	
Lipiec	879,32	833,40	
Sierpień	878,00	686,49	
Wrzesień	509,79	585,30	
Październik	439,35	376,12	
Listopad	300,00	162,92	
Grudzień	243,00	118,51	

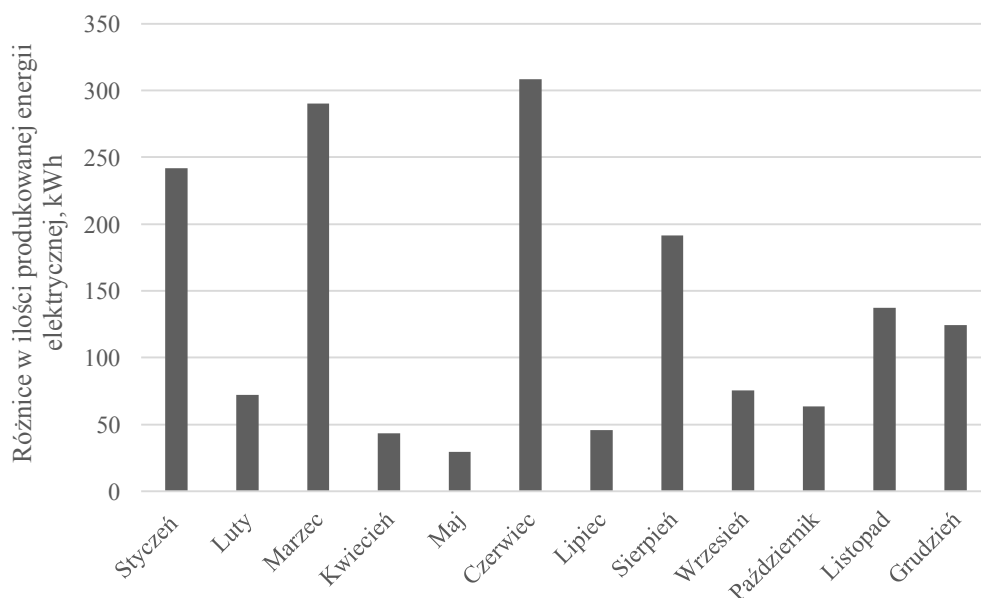
Wyniki przedstawiono również graficznie na rysunku 10.



Rysunek 10: Porównanie danych rzeczywistych i otrzymanych z symulacji.

Porównując otrzymane wyniki zauważono, że praktycznie dla każdego miesiąca w roku (poza wrześniem) uzyskano z symulacji mniejsze wartości w stosunku do pomiarów.

Chcąc wyznaczyć różnice pomiędzy rzeczywistymi danymi, a wartościami otrzymanymi z symulacji utworzono wykres 11.



Rysunek 11: Różnice w ilości produkowanej energii elektrycznej rzeczywistej i wyznaczonej z modelu.

Z zebranych danych wywnioskowano, że najmniejsze różnice pomiędzy symulacją, a rzeczywistą produkcją energii elektrycznej uzyskano w miesiącu maju, ponieważ jest to różnica 29,17 kWh oraz w kwietniu i lipcu, gdzie otrzymano kolejno różnice 43,28 kWh i 45,92 kWh. Największe różnice zanotowano w miesiącu czerwcu 308,42 kWh, marcu 290,15 kWh i styczniu 241,74 kWh.

Na różnice pomiędzy wynikami otrzymanymi z symulacji, a rzeczywistymi wpływ mogą mieć zastosowane założenia. Istotnym parametrem jest na pewno minimalna wartość natężenia promieniowania słonecznego, przy której moduł zaczyna produkować elektryczność. Znaczenie mogła mieć również założona lokalizacja do obliczeń w modelu, ponieważ korzystano z danych dla Katowic, pomimo że instalacja znajduje się w mieście Orzesze. Kolejnym założeniem była wartość  $NOCT = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , która wpływała na całościowy tok obliczeń.

Analizując otrzymane wyniki wyznaczono roczne wartości produkcji energii elektrycznej. Wartości te zestawiono w tabeli 10.

Tabela 10: Zestawienie wartości rocznej produkcji energii elektrycznej z pomiarów rzeczywistych i wartości otrzymanych z symulacji.

Produkcja energii elektrycznej		Jednostka
Rzeczywista	Z symulacji	
7069,28	5597,68	kWh

Zgodnie z tabelą 10 można zauważyć, że wartość otrzymana z symulacji jest mniejsza od wartości rzeczywistej. Różnica ta wynosi 1471,60 kWh i jest to 20,82% całkowitej produkcji energii z rzeczywistych pomiarów. Jest to wartość bardzo istotna.

Ocena efektywności produkcji energii elektrycznej w analizowanym układzie nie jest przedmiotem niniejszej pracy, ale szacunkowo została określona jako stosunek ilości wyprodukowanej energii elektrycznej do ilości energii promieniowania słonecznego otrzymanego przez powierzchnię czynną rozpatrywanych modułów (24 jednostki po  $1,6\text{ m}^2$  każda, czyli  $38,4\text{ m}^2$ ). Pozwoli to na dodatkową ocenę jakości opracowanego modelu obliczeniowego.

Jeżeli dla danych meteorologicznych dla Katowic [6] zliczona zostanie całkowita ilość energii promieniowania słonecznego, to na powierzchnię  $38,4\text{ m}^2$  w ciągu roku padnie 42177 kWh. W tym układzie średnia efektywność produkcji elektryczności określona pomiarowo wyniesie 16,8%. Efektywność obliczeniowo przewidywanej produkcji elektryczności to 13,3%. Tworząc model obliczeniowy przyjęto, że panele zaczynają produkować elektryczność, jeżeli natężenie promieniowania słonecznego wynosi przynajmniej  $200\text{ W/m}^2$ . Ilość energii promieniowania słonecznego określona przy takim ograniczeniu to 33916 kWh, co daje efektywności produkcji elektryczności równe 20,8% i 16,5% odpowiednio dla danych pomiarowych i obliczeniowych. Podawana przez producenta sprawność paneli fotowoltaicznych to 16,94% dla warunków nominalnych [7]. Najbliżej tej wartości jest wynik pomiarów, ale bez ograniczenia co do minimalnego natężenia promieniowania słonecznego. Jest oczywistym, że wybicie elektronów z ich pierwotnej lokalizacji w strukturze półprzewodnika wymaga fotonów światła o energii większej

od szerokość tzw. przerwy energetycznej złącza. Zatem ogniwo nie może pracować przy do-  
wolnie małym natężeniu światła. Uwzględniając to ograniczenie przez przyjęcie progowego  
natężenia promieniowania słonecznego na poziomie  $200 \text{ W/m}^2$  uzyskano sprawność na pozio-  
mie ponad 20% dla danych pomiarowych. Jako że sprawność podawana przez producenta dla  
warunków standardowych testowych nie przekracza 17%, a uzyskanie takich warunków w cza-  
sie rzeczywistej pracy modułu jest praktyczne niemożliwe, to uzyskana sprawność wydaje się  
mało wiarygodna. W takim układzie uzasadnionym jest założenie, że model obliczeniowy daje  
wyniki wiarygodne.

## 6. Wnioski

- Systemy fotowoltaiczne zyskują na popularności, ponieważ są coraz łatwiej dostępne,  
a ich koszt maleje w związku z czym większa liczba osób jest w stanie sobie na nie  
pozwolić.
- Fotowoltaika z racji tego, że jest traktowana jako odnawialne źródło energii oraz dzięki  
swym ekologicznym korzyściom i wymogom Unii Europejskiej jest promowana przez  
władze miast, które zachęcają społeczeństwo do zakupu instalacji przez dodatkowe  
wsparcie finansowe.
- Chcąc uzyskać najwyższą sprawność najlepszym rozwiązaniem będą panele monokry-  
staliczne.
- Do utworzenia modelu obliczeniowego korzystano z danych meteorologicznych dla Ka-  
towic, a nie dla Orzesza w związku z czym otrzymane wyniki mogą nie być do końca  
prawidłowe.
- Z powodu trudności znalezienia niektórych informacji dotyczących urządzeń wchodzą-  
cych w skład analizowanej instalacji korzystano z wielu założeń:
  - minimalne natężenie promieniowania słonecznego dla którego panel będzie pro-  
dukował energię elektryczną wynosi  $200 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$
  - Normalna temperatura pracy ogniwa fotowoltaicznego została przyjęta jako  
 $45^\circ\text{C}$
  - Spadek mocy paneli fotowoltaicznych przypadający na 1 stopień Celsjusza wy-  
nosił  $0,0037 \frac{1}{^\circ\text{C}}$
- Korzystając z pomiarów dla rzeczywistej instalacji zestawionych w punkcie 3 zauwa-  
żono, że najbardziej korzystnym miesiącem był czerwiec, w którym otrzymano 1008,57  
kWh, a najgorszym grudzień z wynikiem 243 kWh. Są to wyniki typowe i oczekiwane  
dla warunków helioenergetycznych w Polsce.



- Analizując wartości otrzymane z symulacji wywnioskowano, że sytuacja jest inna w stosunku do pomiarów, gdyż w miesiącu czerwcu nie osiągnięto największej produkcji energii elektrycznej. Najlepsze wyniki produkcyjne osiągnięto w maju i lipcu z wartościami kolejno 839,03 kWh i 833,40 kWh. Jeżeli chodzi o najmniejszą produkcję w ciągu roku uzyskano ją również dla grudnia (118,51 kWh), jednak z dwukrotnie mniejszą wartością w stosunku do pomiarów rzeczywistych.
- Zgodnie z zestawionymi wartościami w punkcie 5 zauważono, że wartości uzyskane z modelu symulacyjnego są mniejsze w stosunku do pomiarów rzeczywistych. Odwrotna sytuacja jest tylko w przypadku września, kiedy to wartość uzyskana z modelu jest większa.
- Porównując wartości produkcji energii elektrycznej z rzeczywistej instalacji, a wynikami z symulacji wyznaczono rozbieżność w wysokości 1471,60 kWh, co daje 20,82% całkowitej produkcji energii elektrycznej z rzeczywistych pomiarów.
- Oceniając jakość opracowanego modelu można ogólnie wnioskować o dobrej zgodności wyników przewidywanych obliczeniowo oraz pomiarowych. Nie można jednak pominąć, istotnych miejscami różnic szczególnie w miesiącach zimowych oraz największą w czerwcu. Należy, jednakże pamiętać, że pomiary zostały zrealizowane w ciągu pierwszego roku działania instalacji i obejmowały właśnie tylko rok czasu pracy. W fazie rozruchu instalacji można zatem domniemywać wystąpienie chwilowych zakłóceń wpływających na całościowy obraz pracy systemu. Z drugiej strony ważne jest, że dane meteorologiczne wykorzystane do modelowania to dane uśrednione za 30 lat obserwacji. Statystycznie zatem mogą wystąpić istotne różnice warunków helioenergetycznych w krótszych okresach czasu, np. w ciągu analizowanego jednego roku pracy.
- Podsumowując przeprowadzone analizy można pokusić się o stwierdzenie, że przyjęty sposób modelowania i symulacji pracy instalacji fotowoltaicznej daje wyniki racjonalne i jakościowo, a w dużym zakresie również ilościowo, zbieżne z rezultatami pomiarów. Elementem przemawiającym na korzyść opracowanego modelu jest analiza efektywności produkcji elektryczności przez rozważaną instalację przedstawiona na końcu punktu 5.

## Literatura

[1] Dane mocy zainstalowanej, strona internetowa *Urzędu Regulacji Energetyki*, <https://www.ure.gov.pl/pl/rynki-energii/energia-elektryczna/odnawialne-zrodla-ener/potencjal-krajowy-oze/5753,Moc-zainstalowana-MW.html>, dostęp 10 października 2017r. ,

[2] W. M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwo WNT, Warszawa (2012),

[3] Przydatne informacje, strona internetowa EasySolar, <http://easysolar.pl/ogniwa-fotowoltaiczne-wady-i-zalety>, dostęp 12 listopada 2017r. ,

- [4] E. Klugmann-Radziemska, *Fotowoltaika w teorii i praktyce*, Wydawnictwo BTC, Legionowo (2010),
- [5] Materiały dydaktyczne, D. Węcel, *Badanie ogniw fotowoltaicznych*,
- [6] Dane klimatyczne, strona internetowa *Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa*, [http://mib.gov.pl/2-Wskazniki\\_emisji\\_wartosci\\_opalowe\\_paliwa.htm](http://mib.gov.pl/2-Wskazniki_emisji_wartosci_opalowe_paliwa.htm), dostęp 16 lipca 2017r. ,
- [7] Dane techniczne paneli fotowoltaicznych, *KIOTO SOLAR*, [http://www.kiotosolar.com/de/assets/media/downloads/produktdatenblaetter/strom/Deutsch/KIOTO\\_SOLAR\\_DB\\_POWER60\\_DE.pdf](http://www.kiotosolar.com/de/assets/media/downloads/produktdatenblaetter/strom/Deutsch/KIOTO_SOLAR_DB_POWER60_DE.pdf), dostęp 17 października 2017r. ,
- [8] Dane techniczne falownika, *Fronius*, <http://www.fronius.com/en/photovoltaics/products/all-products/inverters/fronius-symo/fronius-symo-6-0-3-m>, dostęp 17 listopada 2017r. ,
- [9] Wartości charakterystyk, strona internetowa *AXITEC*, <http://www.axitecsolar.com/en/solar-modules.html>, dostęp 15 października 2016r. ,
- [10] I. Góralczyk, R.Tytka, *FOTOWOLTAIKA-Urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne*, Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków (2015).

# **Evaluation of the computational model of photovoltaic plant operation based on the results of measurements**

Magdalena Jaromin

**Key words:** photovoltaic installation, photovoltaic modules, mathematical model, electricity, numerical simulations.

## **Abstract**

This work is related to the production of electricity by photovoltaic panels. The construction and operation of photovoltaic cells as well as the advantages and disadvantages of photovoltaic systems are discussed. As part of this work, a simplified calculation model was developed to determine the forecasted production of electricity from a photovoltaic plant. The model takes into account the influence of solar radiation intensity and the temperature of photovoltaic cells on the efficiency of electricity production. This model was used to calculate the photovoltaic installation located in Katowice. The obtained results were then compared with the results of measurements collected during the first year of use of the actual installation of photovoltaic panels installed on a single-family house in the town of Orzesze (Silesian Voivodeship).