

Pomiary elektryczne modeli laboratoryjnych turbiny wiatrowej i ogniwa PV

Tomasz Jarmuda, Grzegorz Trzmiel, Dorota Typańska

1. Wprowadzenie

Odnawialne źródła energii, takie jak wiatr i Słońce, mają coraz większe znaczenie w gospodarce energetycznej Unii Europejskiej. Na koniec 2012 roku łączna moc zainstalowanych ogniw słonecznych na świecie wynosiła 100 GW, natomiast turbin wiatrowych 282,5 GW. Należy jednak pamiętać, że efektywność wytwarzania energii elektrycznej w elektrowniach solarnych i wiatrowych jest bardzo uzależniona od warunków atmosferycznych panujących w określonej lokalizacji geograficznej.

Wiatr jest zjawiskiem stochastycznym, określonym przez dwa podstawowe parametry: kierunek i prędkość. Prędkość wiatru zmienia się w czasie w szerokim zakresie, co utrudnia wykorzystanie jego potencjału energetycznego do wytworzenia energii elektrycznej. Dodatkowo, zależnie od lokalizacji geograficznej, wyróżnić można charakterystyczne trendy zmian przebiegów prędkości wiatru. W strefie klimatycznej Polski średnia prędkość wiatru jest większa w miesiącach jesienno-zimowych, niż w pozostałych okresach roku. Podobnie wyższe wartości prędkości wiatru są zazwyczaj w nocy niż w ciągu dnia.

W przypadku promieniowania słonecznego ważnym czynnikiem wpływającym na wielkość generowanej energii jest cykl dobowy. Panele fotowoltaiczne wytwarzają energię tylko w dzień, a na ograniczenie ich zdolności wytwórczej mają wpływ dodatkowo niekorzystne warunki meteorologiczne, jak np. zachmurzenie. Również w okresie rocznym obserwowane są deterministyczne trendy zmian średniomiesięcznej gęstości promieniowania słonecznego. Energia elektryczna wytwarzana przez układ fotowoltaiczny jest ściśle skorelowana z parametrami strukturalnymi i technicznymi modułu fotowoltaicznego PV oraz z funkcją orientacji przestrzennej, która uwzględnia kąt nachylenia ogniwa PV względem źródła światła [3, 4, 10].

Elektrownie wykorzystujące jedno odnawialne źródło energii są uzależnione od nieprzewidywalnych czynników klimatycznych, które powodują okresowość produkcji energii i jej znaczną zmienność [8]. Rozwiązaniem umożliwiającym częściową likwidację negatywnych cech losowej zmienności energii wiatru i Słońca jest budowa hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej [7].

Badania laboratoryjne dotyczą możliwości uzysku jak największej ilości energii elektrycznej z modelu turbiny wiatrowej oraz modelu ogniwa PV. Badania laboratoryjne są bardzo ważne i potrzebne, gdyż umożliwiają wykonywanie wielu symulacji pomiarowych, wpływających na otrzymanie jak najlepszych wyników. Pomiary te mogą dać dużo informacji o badanym układzie, co w konsekwencji może pozytywnie wpłynąć na rzeczywisty układ i osiągnięcie jak najlepszych wyników co do

Streszczenie: W artykule autorzy zaprezentowali możliwości wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii, jakimi są wiatr i Słońce. W pracy zaprezentowano wyniki badań laboratoryjnych urządzeń wytwarzających energię elektryczną z odnawialnych źródeł energii na przykładzie modelu turbiny wiatrowej i modelu ogniwa PV. W opracowaniu przeanalizowano wpływ ustawienia kąтового łopaty modelu siłowni wiatrowej na wartość mocy wyjściowej generatora, a także przebadano wpływ kąta nachylenia modułu fotowoltaicznego (PV) polikrystalicznego względem źródła światła na wybrane parametry pracy.

Słowa kluczowe: pomiary elektryczne, turbina wiatrowa, ogniwo PV

🇬🇧 ELECTRICAL MEASUREMENTS OF LABORATORY MODELS OF THE WIND TURBINE AND PV CELL

Abstract: In this article the authors present the production of electricity from renewable energy sources, which are wind and Sun. This paper presents the results of laboratory facilities producing electricity from renewable energy sources by the example of the wind turbine and PV cell model. The study analyzed the effect of angular blades of a wind turbine model for the output power of the generator, and examined the impact of the angle of the photovoltaic module (PV) polycrystalline relative to the light source to the selected operating parameters.

Keywords: electrical measurements, wind turbine, PV cell

wartości generowanej mocy wyjściowej przez turbinę wiatrową i ogniwo PV. W artykule przedstawiono dwie analizy. Pierwsza analiza dotyczy wpływu ustawienia kąтового łopaty modelu siłowni wiatrowej [9] na wartość mocy wyjściowej generatora dla siedmiu ustawień kątowych łopat w zakresie od 0° do 90°, zmiennych co 15° [5]. Druga analiza dotyczy wpływu kąta nachylenia modułu fotowoltaicznego (PV) polikrystalicznego względem źródła światła na wybrane parametry pracy dla trzech wariantów kąta nachylenia modułu słonecznego: 30°, 60°, 90° [6]. Zaproponowany przez autorów artykuł ma charakter naukowo-dydaktyczny. Przeprowadzone ćwiczenie laboratoryjne posiada właściwości edukacyjne i jest przeznaczone do dydaktyki w zakresie odnawialnych źródeł energii dla studentów na kierunkach elektrotechnika i energetyka.

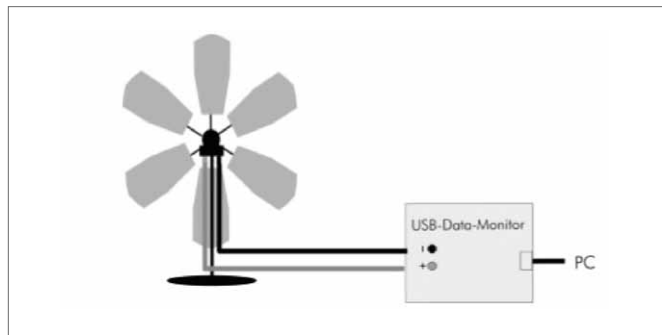
2. Układy pomiarowe

Moduł zarządzający zestawu Clean Energy Trainer był używany podczas badań laboratoryjnych jako urządzenie pomiarowe oraz jako symulator. Dzięki modułowi zarządzającemu z interfejsem USB oraz odpowiedniemu oprogramowaniu Clean Energy Trainer przeprowadzono symulację zmiany obciążenia badanego układu pomiarowego. Pomiarów elektrycznych modeli laboratoryjnych turbiny wiatrowej i ogniwa PV dokonano zatem bez użycia mierników magnetoelektrycznych, co mogłoby wpłynąć na błąd względny i bezwzględny pomiaru.

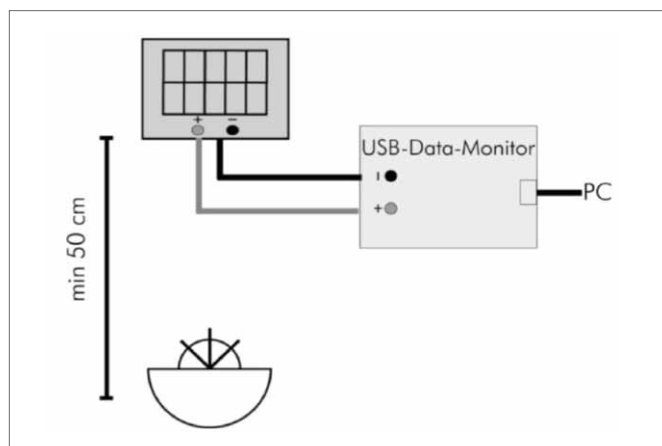
2.1. Stanowisko pomiarowe z turbiną wiatrową

Stanowisko pomiarowe składa się z turbiny wiatrowej, ogniwa PV, modułu zarządzającego z interfejsem USB oraz laptopa. Turbina wiatrowa wytwarza energię elektryczną z energii wiatru. W zestawie Clean Energy Trainer wymuszenie w układzie wprowadza wentylator o mocy znamionowej $P = 110$ W, który symuluje wiatr. Badania laboratoryjne dotyczą wykonywania pomiarów napięcia i natężenia prądu elektrycznego z pomocą modułu zarządzającego z interfejsem USB. Na rysunku 1 przedstawiono sposób podłączania turbiny wiatrowej do modułu zarządzającego z interfejsem USB oraz do PC lub laptopa.

W skład schematu pomiarowego, przedstawionego na rysunku 1 wchodzi: turbina wiatrowa; wentylator; 2 przewody: czerwony (+), czarny (-); komputer z zainstalowanym i uruchomionym oprogramowaniem Clean Energy Trainer; moduł zarządzający z interfejsem USB (*USB-Data-Monitor*); przewód USB.



Rys. 1. Podłączanie turbiny wiatrowej [2]



Rys. 2. Przygotowanie modułu słonecznego do eksperymentów [2]

2.2. Stanowisko pomiarowe z ogniwem PV

Moduł słoneczny wytwarza energię elektryczną z energii słonecznej. W zestawie Clean Energy Trainer wymuszenie w układzie wprowadza lampa halogenowa o mocy znamionowej $P = 50$ W, która symuluje Słońce. Badania laboratoryjne dotyczą wykonywania pomiarów napięcia i natężenia prądu elektrycznego z pomocą modułu zarządzającego z interfejsem USB. Na rysunku 2 przedstawiono sposób przygotowania modułu słonecznego oraz wykonywania badań eksperymentalnych za pomocą modułu zarządzającego z interfejsem USB.

W skład schematu pomiarowego, przedstawionego na rysunku 2 wchodzi: moduł słoneczny polikrystaliczny; lampa halogenowa jako źródło światła; 2 przewody: czerwony (+), czarny (-); komputer z zainstalowanym i uruchomionym oprogramowaniem Clean Energy Trainer; moduł zarządzający z interfejsem USB (*USB-Data-Monitor*); przewód USB.

3. Pomiar dla modelu turbiny wiatrowej

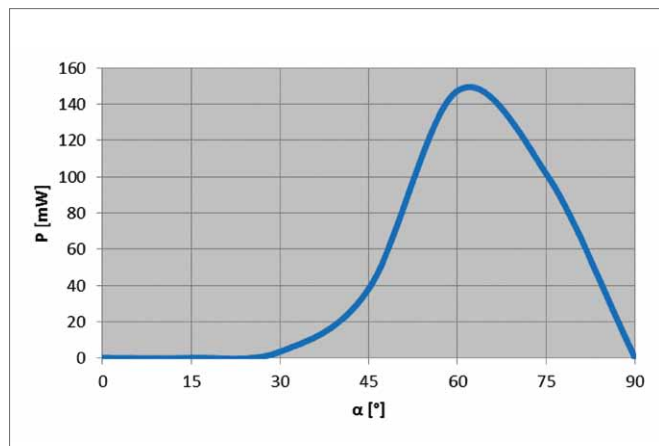
Przeprowadzona analiza dotyczy wpływu ustawienia kąтового łopaty modelu siłowni wiatrowej na wartość mocy wyjściowej generatora dla siedmiu ustawień kątowych łopat w zakresie od 0° do 90° , zmienianych co 15° . Pomiarów i obliczeń zostały wykonane dla turbiny wiatrowej o poziomej osi obrotu i 6 prostych łopatach wirnika. Za pomocą wentylatora zasympulowano rzeczywistą prędkość wiatru $w = 7$ m/s przy takim samym obciążeniu $R = 8 \Omega$ dla każdego ustawienia kąтового, zgodnie z charakterystyką mocy oddanej przez turbinę w funkcji parametru α tzn. $P = f(\alpha)$, pokazaną na rysunku 3.

Wybrane parametry użytkowe badanej turbiny wiatrowej dla ustawienia kąтового łopat w zakresie $\alpha = \langle 0^\circ \div 90^\circ \rangle$ zaprezentowano w tabeli 1.

Na rysunku 3 przedstawiono charakterystykę $P = f(\alpha)$ dla kątów $\alpha = \langle 0^\circ \div 90^\circ \rangle$ zmienianych co 15° .

Na rysunku 4 zaprezentowano charakterystyki $I = f(U)$ i $P = f(U)$ dla kąta $\alpha = 60^\circ$ przy zmiennym obciążeniu.

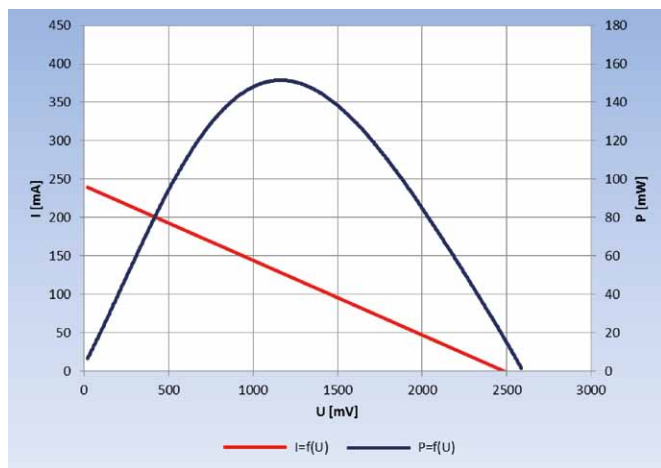
Przeprowadzone pomiary pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że najbardziej optymalne ustawienie kątowe łopat wirnika turbiny wiatrowej wynosi $\alpha = 60^\circ$, gdyż wtedy generator uzyskuje największą moc wyjściową. Dla ustawień kątowych łopat o wartościach: $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ turbina wiatrowa nie generuje mocy wyjściowej. Moc wyjściowa generatora



Rys. 3. Charakterystyka $P = f(\alpha)$ dla $\alpha = \langle 0^\circ \div 90^\circ \rangle$ co 15°

Tabela 1. Wybrane parametry użytkowe badanej turbiny wiatrowej dla ustawienia kąтового łopaty w zakresie $\alpha = <0^\circ\div 90^\circ>$

α deg	U_{oc} mV	MPP mW	I mA	U mV	P mW
-			dla $R = 8 \Omega$		
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	664,22	4,50	20,28	170,08	3,45
45	1453,49	43,11	70,05	542,98	38,04
60	2587,86	164,38	140,10	1050,87	147,23
75	3480,76	121,88	110,61	919,82	101,74
90	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00



Rys. 4. Charakterystyki: $I = f(U)$ i $P = f(U)$ dla $\alpha = 60^\circ$

wzrasta wraz ze wzrostem ustawienia kąтового łopaty w zakresie $\alpha = <30^\circ\div 60^\circ>$, natomiast w zakresie $\alpha = <60^\circ\div 90^\circ>$ moc wyjściowa generatora maleje wraz ze wzrostem położenia łopaty.

4. Pomiary dla modelu ogniwa PV

Przeprowadzona analiza dotyczy wpływu kąta nachylenia modułu fotowoltaicznego (PV) polikrystalicznego na wybrane parametry pracy dla trzech wariantów kąta nachylenia modułu słonecznego: 30° , 60° , 90° względem źródła światła. W pracy zaprezentowano wyniki pomiarów natężenia prądu oraz napięcia oraz wyniki obliczeń mocy i rezystancji dla trzech wariantów

kąta nachylenia modułu słonecznego polikrystalicznego względem źródła światła, ponieważ moduł ten posiada 3-stopniową regulację położenia względem źródła światła. Obliczenia sprawności fotoogniwa przeprowadzono dla powierzchni czynnej ogniwa o wartości $S = 0,032 \text{ m}^2$. Każdemu kątowi nachylenia modułu odpowiadała taka sama wartość gęstości mocy promieniowania $E = 200 \text{ W/m}^2$.

Współczynnik wypełnienia charakterystyki został obliczony wg wzoru 1.

$$FF = \frac{P_{max}}{U_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (1)$$

gdzie:

FF – współczynnik wypełnienia [-];

P_{max} – moc maksymalna [W];

U_{oc} – napięcie stanu jałowego [V];

I_{sc} – prąd stanu zwarcia [A].

Sprawność fotoogniwa obliczono wg wzoru 2.

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \cdot S} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

η – sprawność ogniwa [%];

P_{max} – moc maksymalna [W];

E – gęstość mocy promieniowania [W/m^2];

S – powierzchnia czynna ogniwa [m^2].

Wyniki pomiarów i obliczeń dla wybranych kątów (30° , 60° , 90°) nachylenia modułu PV względem źródła światła zaprezentowano w tabeli 2.

Na rysunkach 5–7 przedstawiono charakterystyki $I = f(U)$, $P = f(U)$, $P = f(R)$ z zaznaczeniem punktów mocy maksymalnej MPP. Z przedstawionych wykresów wynika, że moc rośnie wraz ze wzrostem kąta nachylenia względem źródła światła w opisywanym zakresie kątów. Na rysunku 7 zaprezentowano charakterystyki mocy w funkcji zmiennej rezystancji obciążenia $P = f(R)$. Z wykresów wynika, że rezystancja optymalna fotoogniwa R_{opt} ,

Tabela 2. Wyniki pomiarów i obliczeń dla wybranych kątów (30°, 60°, 90°) nachylenia modułu PV względem źródła światła

α deg	I_{sc} mA	U_{oc} mV	MPP mW	R_{opt} Ω	FF -	η %
30	62,68	2065,20	90,28	31,59	0,70	3,52
60	143,79	2041,57	224,69	13,12	0,77	8,76
90	162,22	2128,61	258,11	12,81	0,75	10,06

przy której występuje moc maksymalna MPP, maleje wraz ze wzrostem kąta nachylenia względem źródła światła.

Przeprowadzone pomiary pozwalają jednoznacznie stwierdzić, że najbardziej optymalne ustawienie kąta nachylenia modułu fotowoltaicznego (PV) polikrystalicznego względem źródła światła wynosi $\alpha = 90^\circ$, gdyż wtedy sprawność fotoogniwa jest najwyższa i wynosi $\eta = 10,06\%$. Dla $\alpha = 30^\circ$ sprawność fotoogniwa wynosi $\eta = 3,52\%$, natomiast dla $\alpha = 60^\circ$ sprawność fotoogniwa wynosi $\eta = 8,76\%$. Ostatecznie można stwierdzić, że sprawność fotoogniwa wzrasta wraz ze wzrostem kąta nachylenia względem źródła światła z uwzględnieniem kątów z przedziału od 0° do 90° .

5. Wnioski

5.1. Wyniki dla modelu turbiny wiatrowej

Pomiary elektryczne modelu laboratoryjnego turbiny wiatrowej dotyczyły wpływu ustawienia łopatek modelu siłowni wiatrowej na wartość mocy wyjściowej generatora dla siedmiu ustawień kątowych łopatek w zakresie od 0° do 90° , zmienianych co 15° , i pozwoliły uzyskać następujące wyniki:

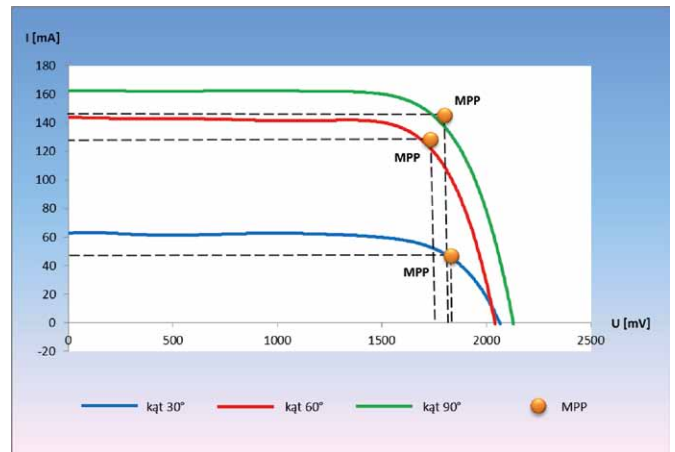
1. Najbardziej optymalne ustawienie kątowe łopatek wirnika turbiny wiatrowej wynosi $\alpha = 60^\circ$, gdyż wtedy generator uzyskuje największą moc wyjściową.
2. Dla ustawień kątowych łopatek o wartościach: $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 15^\circ$, $\alpha = 90^\circ$, turbina wiatrowa nie generuje mocy wyjściowej.
3. Moc wyjściowa generatora wzrasta wraz ze wzrostem ustawienia kątowego łopatek w zakresie $\alpha = <30^\circ \div 60^\circ>$.
4. Moc wyjściowa generatora maleje wraz ze wzrostem ustawienia kątowego łopatek w zakresie $\alpha = <60^\circ \div 90^\circ>$.
5. Charakterystyka prądowo-napięciowa $I = f(U)$ turbiny wiatrowej dla $\alpha = 60^\circ$ ma charakter liniowy.
6. Charakterystyka mocy $P = f(U)$ turbiny wiatrowej dla $\alpha = 60^\circ$ ma charakter paraboliczny.

Zalety zestawu z turbiną wiatrową to:

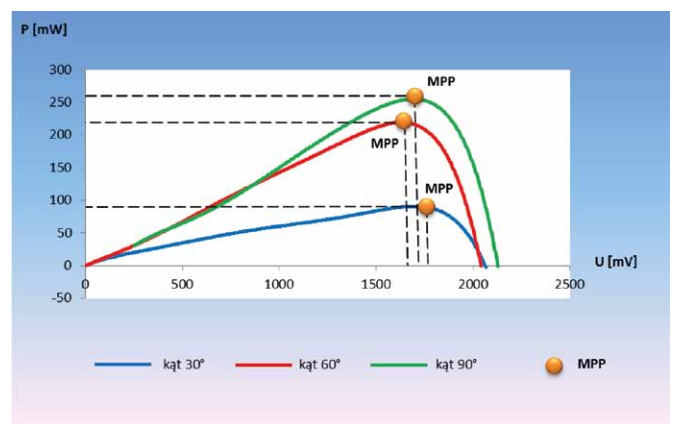
- Możliwość zmiany kąta nachylenia łopatek turbiny wiatrowej.
- Możliwość zmiany liczby łopatek turbiny wiatrowej.
- Możliwość zmiany prędkości wiatru ze względu na 3-stopniową regulację wentylatora.
- Możliwość umieszczania barier terenowych, wpływających na zmianę prędkości wiatru z wentylatora.

Wady zestawu z turbiną wiatrową to:

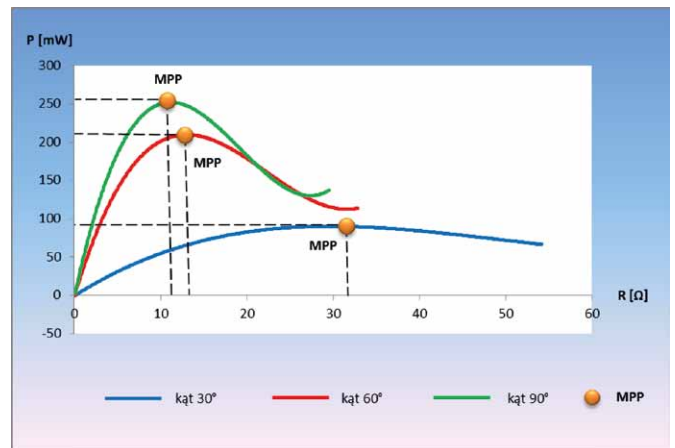
- Brak możliwości zmiany kształtu łopatek turbiny wiatrowej np. na zakrzywione zgodnie i przeciwnie.
- Brak możliwości stochastycznej zmiany prędkości wiatru.



Rys. 5. Charakterystyki prądowo-napięciowe $I = f(U)$



Rys. 6. Charakterystyki mocy $P = f(U)$



Rys. 7. Charakterystyki $P = f(R)$

5.2. Wyniki dla modelu ogniwa PV

Pomiary elektryczne modelu laboratoryjnego ogniwa PV dotyczyły wpływu kąta nachylenia modułu fotowoltaicznego (PV) polikrystalicznego względem źródła światła w zakresie od 0° do 90° na wybrane parametry pracy dla trzech wariantów kąta nachylenia modułu słonecznego: 30° , 60° , 90° i pozwoliły uzyskać następujące wyniki:

1. Prąd zwarciový fotoogniwa I_{sc} zmienia się proporcjonalnie do zmiany kąta nachylenia względem źródła światła [1].
2. Napięcie biegu jałowego U_{oc} jest w niewielkim stopniu zależne od zmiany kąta nachylenia względem źródła światła [1].

3. Punkt mocy maksymalnej MPP wzrasta wraz ze wzrostem kąta nachylenia względem źródła światła.
4. Rezystancja optymalna fotoogniwa R_{opt} maleje wraz ze wzrostem kąta nachylenia względem źródła światła.
5. Współczynnik wypełnienia FF jest w niewielkim stopniu zależny od zmiany kąta nachylenia względem źródła światła.
6. Sprawność fotoogniwa wzrasta wraz ze wzrostem kąta nachylenia względem źródła światła (w opisywanym zakresie kątów).

Zalety zestawu z ogniwo PV to:

- Możliwość zmiany kąta nachylenia modułu polikrystalicznego względem źródła światła.
- Możliwość dołączenia drugiego modułu polikrystalicznego poprzez zastosowanie połączenia szeregowego lub równoległego dwóch ogniw PV.
- Możliwość zmiany natężenia oświetlenia poprzez zastosowanie kilku źródeł światła.
- Możliwość umieszczenia barier terenowych, wpływających na efekt zacienienia ogniwa PV.

Wady zestawu z ogniwo PV to:

- Brak możliwości porównania parametrów pracy modułu polikrystalicznego z modułem monokrystalicznym i amorficznym.
- Brak możliwości porównania parametrów pracy badanego układu stacjonarnego z układem nadążnym.

5.3. Możliwości układu laboratoryjnego

Badany system hybrydowy „Czysta Energia – zestaw duży” jest to unikalny i dobrze wyposażony zestaw służący do eksperymentowania z energią słoneczną i wiatrową. Olbrzymią zaletą kompletu jest oprogramowanie „Clean Energy Trainer” umożliwiające symulacje różnych wariantów zasilania, obciążenia oraz komputerową obróbkę wyników doświadczeń. Właściwie opracowany program eksperymentów znacznie zwiększa walory dydaktyczne zestawu.

Możliwości zestawu i przykładowe eksperymenty to:


- Wizualizacja parametrów pracy w formie wykresów i tabeli.
- Ręczna i automatyczna generacja krzywych charakterystycznych.
- Symulacja różnych profili źródeł zasilania i obciążenia.
- Możliwość osobnego używania każdego ze źródeł energii (moduł solarny, turbina wiatrowa).
- Optymalna adaptacja źródeł energii odnawialnej.
- Wyznaczanie efektywności i strat mocy modułu solarnego i turbiny wiatrowej.

Przedstawiony układ pomiarowy z modelem turbiny wiatrowej i modelem ogniwa PV może być przeznaczony do dydaktyki w zakresie odnawialnych źródeł energii dla studentów na kierunku elektrotechnika i energetyka. Oprócz ogromnych walorów dydaktycznych zestawu, uzyskane wyniki można aproksymować dla układów większej mocy, choć będzie wtedy popełniany pewien błąd. Należałoby wprowadzić pewne poprawki w badanym układzie pomiarowym, jak i w samych pomiarach,

jak np. zastosować stochastyczny charakter wymuszeń. Oznacza to, że badany system hybrydowy może być przeznaczony nie tylko do dydaktyki w zakresie elektrotechniki czy energetyki, ale także z pewnymi zmianami, może być stosowany z powodzeniem do prowadzenia badań dla rzeczywistych układów dużej mocy, co wskazuje na naukowo-dydaktyczny cel publikacji.

Literatura

- [1] CHOJNACKI J.: *Odnawialne i niekonwencjonalne źródła energii. Poradnik*. Wydawca TARBONUS, Kraków 2008.
- [2] *Clean Energy Trainer: Instrukcja obsługi*. Wydawnictwo Helio-centris, Berlin, kwiecień 2011.
- [3] FRYDRYCHOWICZ-JASTRZĘBSKA G., BUGAŁA A.: *Comparison of the efficiency of solar modules operating with a two-axis follow-up system and with a fixed mount system*. „Przegląd Elektrotechniczny” 1/2014, s. 63–65.
- [4] FRYDRYCHOWICZ-JASTRZĘBSKA G., BUGAŁA A.: *Sun tracking in PV Systems Aspects, Monograph Computer Applications in Electrical Engineering*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012, s. 333–346.
- [5] JARMUDA T., TRZMIEL G.: *Wpływ kąta nachylenia modułu polikrystalicznego względem światła na wybrane parametry pracy*. XXXVII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC-SPETO 2014, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice–Ustroń, 21–24.05.2014, s. 42.
- [6] JARMUDA T., TRZMIEL G.: *Wpływ ustawienia kątownego łopaty modelu turbiny wiatrowej na wartość mocy wyjściowej generatora*. XXXVII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw Elektrotechniki i Teorii Obwodów IC-SPETO 2014, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice–Ustroń, 21–24.05.2014, s. 52.
- [7] NAWROWSKI R., TOMCZEWSKI A., JARMUDA T.: *Koncepcja optymalizacji struktury hybrydowej elektrowni solarno-wiatrowej*, Academic Journals, Computer Applications in Electrical Engineering, (Nr 79), Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2014, s. 131–139.
- [8] OSTROWSKI J.: *Analiza dostępnych na rynku modeli turbin wiatrowych*. 2010.
- [9] STEFANIAK A.: *Systemy hybrydowe odnawialnych źródeł energii*. „Czysta Energia” 11(147)/2013, s. 22–23.
- [10] TENETA J., WIĘCKOWSKI Ł.: *Czasowa charakterystyka produkcji energii elektrycznej w nadążnych systemach PV*. II Krajowa Konferencja Fotowoltaiki. Upowszechnianie osiągnięć polskiej oraz światowej fotowoltaiki w procesie kształcenia na poziomie wyższym, Krynica-Zdrój, 12–15 Maj 2011.

-  mgr inż. Tomasz Jarmuda – Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska, e-mail: tomasz.jarmuda@put.poznan.pl;
 dr inż. Grzegorz Trzmieł – Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska, e-mail: grzegorz.trzmieł@put.poznan.pl;
 mgr inż. Dorota Typańska – Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska, e-mail: dorota.typanska@put.poznan.pl