



Adam MROZIŃSKI, Józef FLIZIKOWSKI, Andrzej TOMPOROWSKI,
Marek MACKO

STANOWISKO DO BADAŃ EFEKTYWNOŚCI MODUŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH

Streszczenie

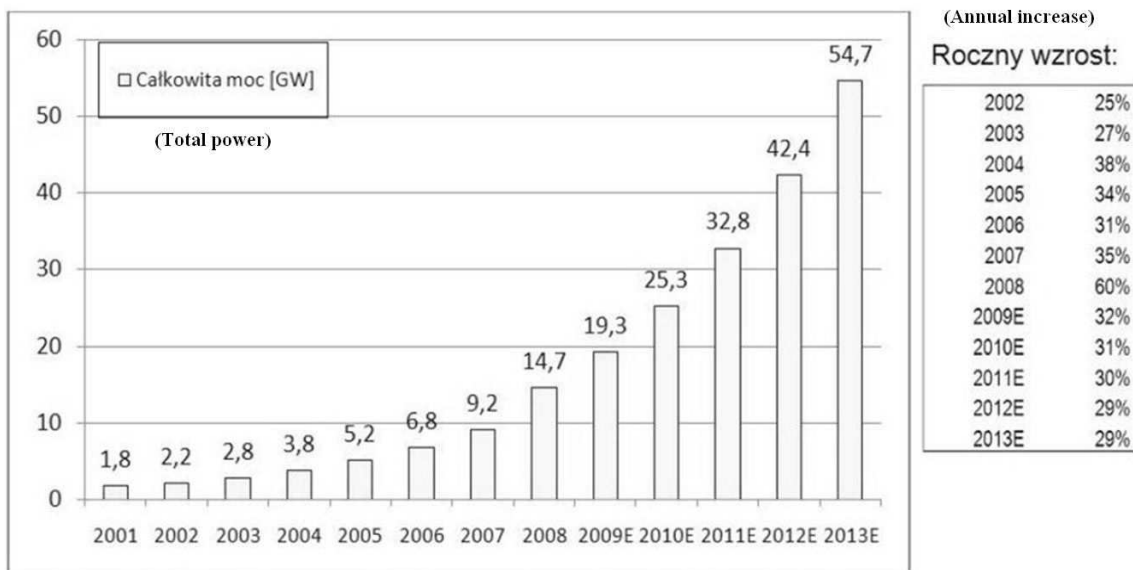
W artykule przedstawiono zagadnienie wykorzystania instalacji fotowoltaicznych do wytwarzania odnawialnej energii elektrycznej. W pracy scharakteryzowano rynek instalacji fotowoltaicznych w Polsce i w Europie. Autorzy zaprezentowali budowę stanowiska badawczego do badań efektywności modułów fotowoltaicznych.

WSTĘP

W ciągu ostatnich 10 lat, energetyka słoneczna PV to jedna z najszybciej rozwijających się gałęzi gospodarki, ze średnim rocznym tempem wzrostu powyżej 35%. Dynamika wzrostu produkcji modułów fotowoltaicznych często przyrównywana jest do dynamiki wzrostu przemysłu mikro-elektronicznego w początkowym okresie jego rozwoju (Rys. 1). PV jest najdynamiczniej rozwijającym się sektorem obok informatyki i biotechnologii. Nawet w 2006 roku, gdy wystąpił chwilowy niedobór krzemu, zainstalowano więcej systemów PV niż w latach poprzednich. Zakładając konserwatywny wzrost rynku na poziomie 25% rocznie, w 2030 wartość przemysłu półprzewodnikowego związanego z sektorem PV przekroczy 175 bilionów Euro [4, 5, 6].

Rynek PV osiągnął już około 40 GW mocy zainstalowanej. Mimo tak znaczącego przyrostu energia elektryczna wytwarzana przez źródła fotowoltaiczne stanowi zaledwie niecały 1% światowej podaży energii. Według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii, do roku 2050 energia elektryczna wytwarzana przez instalacje fotowoltaiczne mogłaby wynosić 11% w skali globalnej [1, 2].

Dzięki rozwiązaniom prawnym i administracyjnym wsparcie instalacji odnawialnych źródeł energii w tym i fotowoltaiki przy użyciu programu feed-in tariff (FiT) spowodowały dominację krajów europejskich w światowym rynku fotowoltaicznym. Liderem tego rynku od lat są Niemcy, gdzie moc systemów fotowoltaicznych zainstalowana wyniosła 17,3 GW w 2010r. - przewyższając roczny przyrost energetyki wiatrowej! W krajach, które wprowadziły system FiT nastąpił zauważalny wzrost zainstalowanych systemów fotowoltaicznych. Rynek systemów fotowoltaicznych nowych państw członkowskich UE wzrósł z 485 MW w roku 2009 do 2165 MW w roku 2010 [8, 9, 10].



Rys. 1. Rynek systemów fotowoltaicznych na świecie [5, 6]

Należy oczekiwać, że po wprowadzeniu ustawy o OZE w Polsce również w naszym kraju będziemy obserwować przyrost ilości systemów fotowoltaicznych. Według informacji podanych przez Urząd Regulacji Energetyki (URE), w Polsce funkcjonuje 1,1 MW elektrowni PV, a liczba ta jest przede wszystkim efektem uruchomienia farmy słonecznej w Wierchosławicach o mocy 1 MW. Dane URE nie uwzględniają co prawda systemów fotowoltaicznych typu off grid, które nie są podłączone do sieci energetycznej, jednak także potencjał autonomicznych instalacji PV jest w naszym kraju mały, choć bardzo rozwojowy.

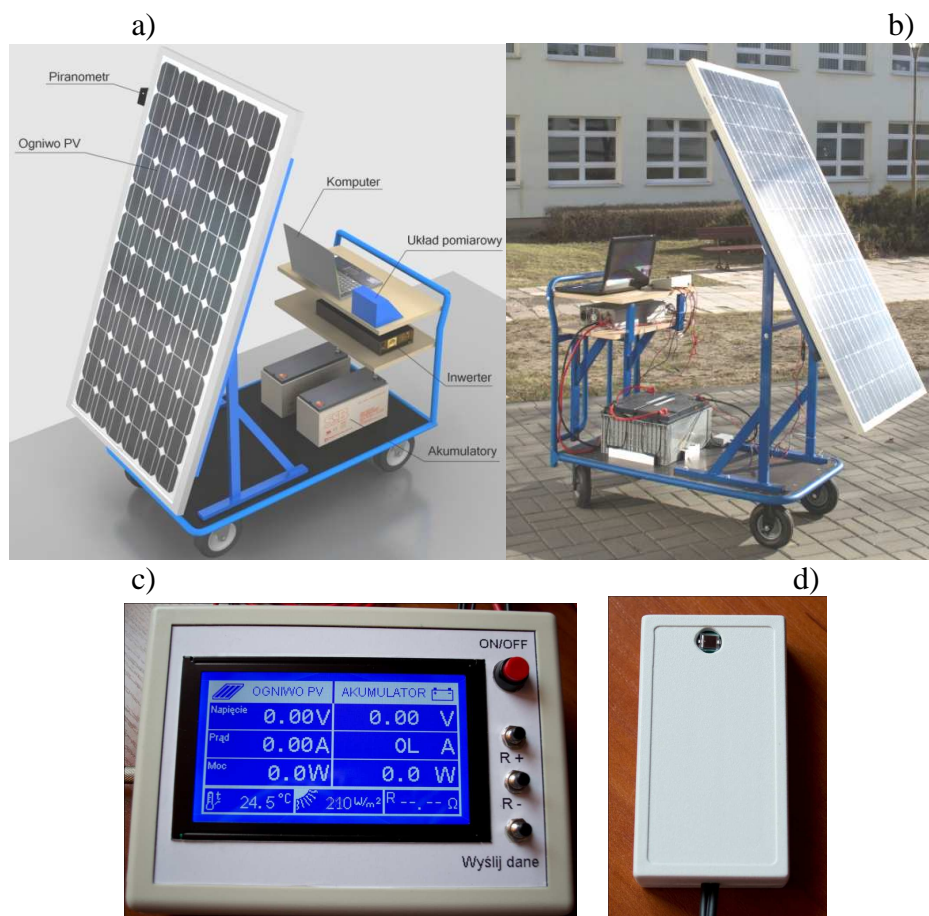
Szczególne możliwości rozwojowe układów fotowoltaicznych można wskazać w urządzeniach ustawionych w odległych od sieci przyłączeniowych miejscach, gdzie podłączenie do linii energetycznej byłoby zbyt kosztowne. Instalacje fotowoltaiczne mogą być więc stosowane w urządzeniach branży logistycznej i transportowej takich jak: parkometry, telefony alarmowe, tymczasowe znaki drogowe, i automatyczne bramki i sygnaly.

1. BUDOWA STANOWISKA BADAWCZEGO

Zaprojektowane i zbudowane na wydziale Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy stanowisko (Rys. 2) do badań modułów fotowoltaicznych ma charakter mobilny. Za podstawę pod konstrukcję wsporczą posłużył typowy platformowy wózek magazynowy. Wspornik, na którym zamontowane jest ogniwo umożliwia regulację kąta elewacji do 70°. Jako że stanowisko jest mobilne nie przewidziano oddzielnej regulacji kąta azymutu. W skład wyposażenia stanowiska wchodzi:

- moduł fotowoltaiczny (monokrystaliczny) o mocy 180Wp przy napięciu 36V i prądzie 5A (1szt.),
- inwerter o mocy ciągłej 1,5kW z wbudowaną ładowarką sieciową (1szt.),
- akumulatory żelowe 12V/100 Ah (2szt.),
- układ pomiarowy, obciążenie rezystancyjne do badania ogniwa, komputer PC.

Powyższe elementy tworzą na stanowisku instalację fotowoltaiczną typu off grid z możliwością doładowywania akumulatorów z sieci energetycznej. Inwerter może pracować w dwóch trybach. W pierwszym moduł PV doładowuje akumulator i zasila jednocześnie przetwornice. W drugim przypadku inwerter działa jak UPS czyli awaryjne źródło zasilania.



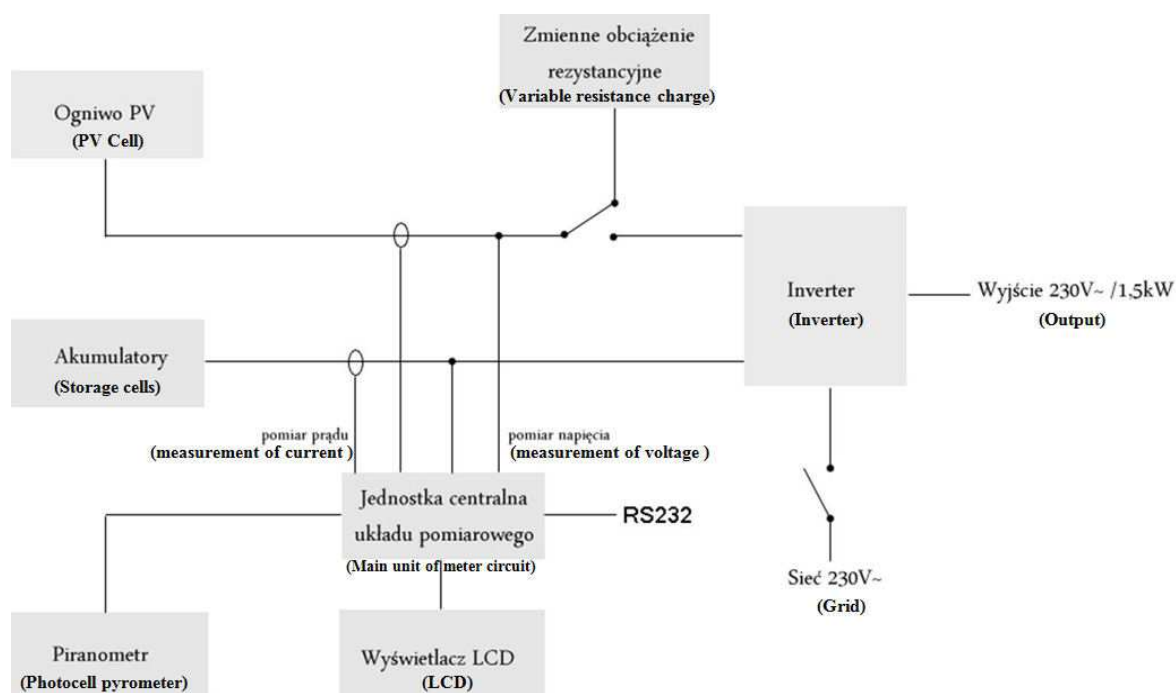
Rys. 2. Stanowisko badawcze: a) schemat, b) widok ogólny, c) wyświetlacz, d) piranometr [12]

Bezpośrednio do inwertera można podłączyć odbiornik przy pomocy typowego gniazda wtykowego 230V~. Do instalacji podłączony jest system monitorujący parametry pracy. System ten został zaprojektowany i wykonany od podstaw. W jego skład wchodzi (Rys. 3):

- piranometr w którym w roli sensora zastosowana została fotodioda BPW34 ze względu na liniową charakterystykę irradiaacja-fotoprąd,
- woltomierze do pomiaru napięcia na ogniwie oraz akumulatorach,
- amperomierze do pomiaru prądu ogniwa i akumulatora.

Pomiar prądu akumulatora ze względu na znaczne jego wartości odbywa się pośrednio przy pomocy czujnika Halla. Wszystkie mierzone parametry pracy instalacji to:

- napięcie na ogniwie PV w zakresie 0-100 V (rozdzielczość 0,1 V ,+/- 5%),
- prąd ogniwa PV w zakresie 0-10 A (rozdzielczość 0,01 A ,+/-5%),
- napięcie akumulatora w zakresie 0-100 V (rozdzielczość 0,1 V ,+/- 5%)
- prądu akumulatora w zakresie do 100 A (-100 do -0,5 / +0,5 do +100 , +/-5%),
- moc pobierana z ogniwa PV oraz akumulatora,
- temperatura ogniwa PV (-55°C do +125°C ,rozdzielczość 0,5°),
- energia promieniowania słonecznego w zakresie 0-2000 W/m² (rozdzielczość 2 W/m² ,+/-5%).



Rys. 3. Schemat blokowy instalacji [12]

2. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Wszystkie mierzone parametry są przetwarzane na postać cyfrową i wyświetlane na wyświetlaczu LCD. Dodatkowo układ umożliwia przesyłanie danych do komputera PC. Dane te są automatycznie wstawiane do arkusza kalkulacyjnego Excel w celu ich późniejszej analizy i przygotowania wykresów. Jako że stanowisko ma służyć również do badania samych ogniw fotowoltaicznych zostało wyposażone w zmienne obciążenie rezystancyjne. Aby ograniczyć koszty wykonano obciążenie w dość niekonwencjonalny sposób. Zbudowane zostało z trzydziestu rezystorów o rezystancji $0,3 \Omega$ w formie drabinki oraz trzydziestu tranzystorów MOSFET o rezystancji przewodzenia $0,1 \Omega$ [2, 8, 9, 12].

Konstrukcja taka umożliwia zmianę rezystancji w zakresie od $0,4 \Omega$ do $9,1 \Omega$. Zmiana odbywa się za pomocą przycisków na panelu obok wyświetlacza LCD. Informacja o aktualnie ustawionym oporze jest również przesyłana do komputera. Zastosowane moce rezystorów pozwalają na wyznaczanie charakterystyk paneli o wartości prądu mocy maksymalnej I_{mp} do 6 A. Umożliwia to wyznaczanie charakterystyk prądowo-napięciowych przy różnych kątach pochylenia ogniwa i różnych wartościach promieniowania słonecznego [10, 11].

Przykład wykresu charakterystyk dla badanego modułu fotowoltaicznego przedstawiono na rysunku 4 oraz w tabeli 1.



Rys. 4. Przykład charakterystyki badanego modułu fotowoltaicznego uzyskanego na stanowisku pomiarowym [12]

Tab. 1. Przykładowe wyniki pomiarów dla badanego modułu fotowoltaicznego

LP	U - aku [V]	U - pv [V]	I - pv [A]	I - aku [A]	P - pv [W]	P - aku [W]	Irradiacja [W/m ²]	Temp [oC]
1	0,00	9,80	4,12	OL	40,30	0,00	476,00	44,00
2	0,00	11,30	4,19	OL	47,30	0,00	480,00	44,00
3	0,00	13,00	4,20	OL	54,50	0,00	482,00	44,00
4	0,00	12,60	3,77	OL	47,50	0,00	472,00	44,00
5	0,00	13,80	3,76	OL	51,80	0,00	470,00	44,00
6	0,00	15,00	3,76	OL	56,30	0,00	468,00	44,00
7	0,00	16,20	3,74	OL	60,50	0,00	466,00	44,50
8	2,20	17,40	3,72	OL	64,70	0,00	464,00	44,50
9	0,00	18,70	3,71	OL	69,30	0,00	464,00	44,50
10	0,00	19,90	3,70	OL	73,60	0,00	462,00	44,50
11	0,00	21,30	3,65	OL	77,70	0,00	458,00	44,50
12	2,40	22,10	3,59	OL	79,30	0,00	458,00	44,50
13	0,00	22,60	3,47	OL	78,40	0,00	460,00	44,50
14	1,60	23,20	3,38	OL	78,40	0,00	460,00	44,50
15	0,00	24,30	3,37	OL	81,80	0,00	458,00	44,50
16	0,00	25,20	3,33	OL	83,90	0,00	458,00	44,50
17	0,00	26,00	3,29	OL	85,50	0,00	456,00	44,50
18	0,00	26,90	3,26	OL	87,60	0,00	450,00	44,50
19	0,00	28,00	3,26	OL	91,20	0,00	456,00	44,00
20	0,00	29,10	3,25	OL	94,50	0,00	458,00	44,00
21	0,00	30,10	3,23	OL	97,20	0,00	460,00	44,00
22	0,00	31,20	3,24	OL	101,00	0,00	464,00	44,00
23	0,00	32,20	3,22	OL	103,60	0,00	464,00	44,00
24	0,00	33,00	3,21	OL	105,90	0,00	462,00	44,00
25	0,00	33,90	3,20	OL	108,40	0,00	464,00	44,00
26	0,00	34,80	3,18	OL	110,7	0,00	464,00	44,00
27	0,00	35,50	3,15	OL	111,8	0,00	464,00	44,00
28	0,00	36,80	3,12	OL	114,8	0,00	462,00	44,00
29	0,00	37,70	2,98	OL	112,3	0,00	462,00	44,00
30	0,00	38,10	2,82	OL	107,4	0,00	464,00	44,00
31	0,00	39,10	2,71	OL	106,0	0,00	462,00	44,00
32	0,00	40,80	2,54	OL	103,6	0,00	464,00	44,00
							Średnia irradiacja	Średnia temperatura
							463,5	44,19

Źródło: Bibliografia [6, 12]

W przedstawionym stanowisku badawczym źródłem napięcia był generator fotowoltaiczny, a połączone ze sobą wzajemnie oporniki, zmiennym obciążeniem. Podczas badania modułu fotowoltaicznego wielokrotnie zmieniano rezystancję w zakresie od $0,4 \Omega$ do $9,1 \Omega$. Co więcej do mierzenia natężenia prądu I , płynącego w wyjściowym obwodzie, wykorzystano podłączony uprzednio amperomierz, a do mierzenia napięcia U , woltomierz. Miało to na celu zasymulowanie charakterystyk prądowo-napięciowych dla różnych kątów pochylenia modułu fotowoltaicznego. Ponadto wpłynęło to na określenie wymienionej wyżej charakterystyki dla różnych bądź zmieniających się wartości promieniowania słonecznego.

W wyniku szczegółowego badania modułu fotowoltaicznego, polegającym na stopniowym zmienianiu rezystancji oraz poprzez skrupulatne zbieranie danych przez przyrządy pomiarowe połączone z komputerem, zbiór mierzonych wartości zapisano w formie tabelarycznej. Na jej podstawie sporządzono szczegółowy wykres charakterystyki prądowo-napięciowej. Analizując go można dostrzec pewne charakterystyczne zależności. Mianowicie wraz ze wzrostem napięcia modułu, maleje natężenie prądu z niego płynące. Doskonale to ukazuje niebieska krzywa na wykresie przedstawionym na rysunku 4. Ponadto zachodzi także kolejna zależność, która określa moc ogniwa. Na przedstawionym powyżej rysunku przedstawia ją krzywa oznaczona kolorem czerwonym, która pokazuje, iż wraz z równoczesnym wzrostem natężenia oraz napięcia ogniwa, wzrasta uzyskiwana z niego moc. I tak dla wartości napięcia i natężenia odpowiednio wynoszących $36,80 \text{ V}$ i $3,65 \text{ A}$, badany moduł osiąga swój maksymalny punkt pracy MPP (ang. Maximum Power Point) wynoszący $114,8 \text{ W}$. Punkt ten scharakteryzować go można jako iloczyn prądu I oraz napięcia V , dla których pole prostokąta (o wierzchołku leżącym na charakterystyce prądowo-napięciowej) jest możliwie największe. Odnaleziony w wyniku badania maksymalny punkt pracy, jaki osiąga badany moduł firmy SUNTECH, określa więc wartości charakterystyczne napięcia oraz natężenia, przy których będzie on pracować z największą mocą, a jego eksploatacja będzie uzasadniona ekonomicznie.

PODSUMOWANIE

Ministerstwo Gospodarki zaprezentowało w tym roku propozycje współczynników korygujących jednostkową wartość świadectw pochodzenia, które mają obowiązywać dla poszczególnych technologii OZE w nowym systemie wsparcia dla energetyki odnawialnej, który wejdzie w życie po przyjęciu nowej ustawy o OZE. Fotowoltaika wg tego projektu posiada najwyższy wskaźnik (równy 2.8 dla instalacji powyżej 100 kW). Może to oznaczać, że instalacje tego przy tym poziomie dofinansowania, zaczną się opłacać w Polsce, podobnie jak ma to miejsce w Niemczech czy Hiszpanii.

Zaproponowane stanowisko do badań efektywności modułów fotowoltaicznych jest przykładem próby rozwiązania problemu badań modułów w warunkach rzeczywistych. Realizowane badania umożliwią porównywanie modułów oferowanych na rynku nie tylko z punktu widzenia ich mocy szczytowej.

TEST STAND TO EFFECTIVNES INVESTIGATIONS OF PHOTOVOLTAIC MODULES

Abstract

In the paper problem of photovoltaic installations to renewable electric energy production were presented. In the paper was carried out characteristic of photovoltaic

installation market in Poland and in Europe. The authors were presented test stand to investigations of working efficiency of photovoltaic modules.

BIBLIOGRAFIA

1. Jastrzębska G.: *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, wyd. II, Warszawa 2009.
2. Klugman-Radziemska E.: *Odnawialne źródła energii*. Przykłady obliczeniowe, Wyd. IV, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2011.
3. Lewandowski W.M.: *Proekologiczne odnawialne źródła Energii*. Wydanie IV. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 2010.
4. Ligus M.: *Efektywność inwestycji w odnawialne źródła energii*. Wydawnictwo CeDeWu. Warszawa 2010.
5. Mroziński A.: *Recykling ogniw fotowoltaicznych*. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Nr 5/2010, Vol. 49 (41), str. 85-86.
6. Mroziński A.: *Wspomaganie komputerowe projektowania instalacji solarnych*. Ekologia i Technika, Vol. 109, nr 6 (2010), str. 368-378.
7. Nowak W., Stachel A.A., Borsukiewicz-Gozdur A.: *Zastosowania odnawialnych Źródeł Energii*. Wydawnictwo Naukowe Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2008.
8. Olchowik J.M.: *Cienkie warstwy w strukturach baterii słonecznych*. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004.
9. Pluta Z.: *Słoneczne instalacje energetyczne*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
10. Praca zbiorowa: *Odnawialne i niekonwencjonalne źródła energii*. Poradnik, TARBONUS 2008.
11. Sanetra J.: *Efekt fotowoltaiczny w organicznych ogniwach słonecznych - wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Naukowe Politechniki Krakowskiej, Kraków 2006.
12. Skibowski M., Mroziński A.: *Badanie efektywności działania modułów fotowoltaicznych do wytwarzania odnawialnej energii elektrycznej*. Zbiór rozpraw pod redakcją J.K. Garbacza: Diagnostowanie stanu technicznego środowiska, Metody badawcze - prognozy, Prace komisji ekologii i ochrony środowiska BTN, tom VI, Bydgoszcz 2012, str. 249-256.

Autorzy:

Dr inż. Adam Mroziński - Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej; 85-789 Bydgoszcz; Al. Prof. S. Kaliskiego 7. Tel.: 52 3408453, Fax: 52 3408255, e-mail: adammmroz@utp.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Józef Flizikowski - Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej; 85-789 Bydgoszcz; Al. Prof. S. Kaliskiego 7. Tel.: 52 3408293, Fax: 52 3408255, e-mail: fliz@utp.edu.pl

Dr inż. Andrzej Tomporowski - Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej; 85-789 Bydgoszcz; Al. Prof. S. Kaliskiego 7. Tel.: 52 3408255, Fax: 52 3408255, e-mail: atomporowski@utp.edu.pl

Dr inż. Marek Macko - Uniwersytet Kazimierza Wielkiego, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, ul. K. Chodkiewicza 30; 85-064 Bydgoszcz. Tel.: 52 3419330, Fax: 52 3414773, e-mail: mackomar@ukw.edu.pl