

Adam MROZIŃSKI<sup>1</sup>

## BADANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ LABORATORYJNEJ INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ

W artykule przedstawiono zagadnienie wykorzystania w Polsce i w Europie instalacji fotowoltaicznych (PV). Systemy PV będą miały w niedalekiej przyszłości znaczny udział w globalnej produkcji energii elektrycznej. Będzie to istotnie wpływało na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz na poprawę stanu środowiska naturalnego. W pracy przedstawiono budowę laboratoryjnej instalacji PV zlokalizowanej na WIM UTP w Bydgoszczy. W instalacjach PV coraz większe znaczenie mają systemy zarządzania energią. Zastosowany na stanowisku badawczym system PowerRouter (system PV 3w1) maksymalnie optymalizuje wykorzystanie energii elektrycznej w instalacji. Do urządzenia można bezpośrednio podłączyć odbiorniki, sieć zewnętrzną, panele fotowoltaiczne oraz akumulatory. PowerRouter można podłączyć także do Internetu w celu zdalnej rejestracji mierzonych danych. Współczesne systemy monitorujące pozwalają wykryć źródło problemu i szybko naprawić usterkę. W artykule przedstawiono system Solar-Log™. System ten umożliwia monitorowanie aktualnej produkcji energii, prędkość wiatru, temperatury zewnętrznej otoczenia i modułów, napromieniowania słonecznego oraz nawet parametrów poszczególnych stringów modułów PV. System można podłączyć także do Internetu w celu generowania wykresów poszczególnych parametrów instalacji PV. Autor zaprezentował także budowę stanowiska badawczego do badań efektywności modułów PV. Stanowisko to jest przykładem próby rozwiązania problemu badań modułów w warunkach rzeczywistych. Oprócz badań charakterystyk modułów PV różnego typu na stanowisku możliwa jest również analiza wpływu zacieniania na efektywność badanego modułu.

**Słowa kluczowe:** odnawialne źródła energii, efektywność, fotowoltaika

### 1. Wprowadzenie

Rynek branży OZE (w tym dział fotowoltaiki) w Europie cały czas się rozwija. Biorąc np. pod uwagę zatrudnienie w branży odnawialnych źródeł energii w Unii Europejskiej (27 państw) w 2012 r. obejmowało ono około 1.220.000 bezpośrednich i pośrednich stanowisk pracy.

---

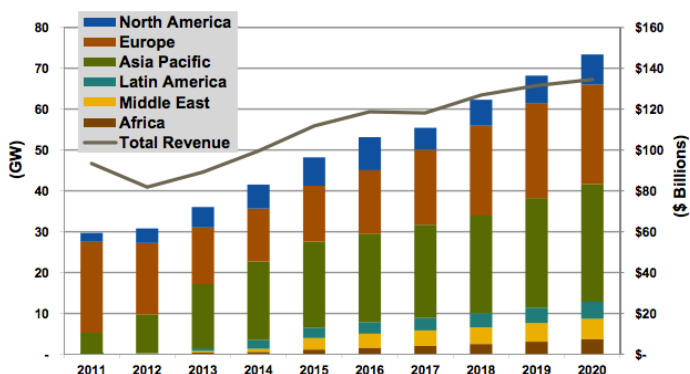
<sup>1</sup> Dr inż. Adam Mroziński, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, 85-789 Bydgoszcz, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, tel.: 52 340 84 53, adamroz@utp.edu.pl, www.amrozinski.utp.edu.pl, www.oze.utp.edu.pl

Najwięcej pracowników w 2012 r. zatrudniano w sektorze energetyki wiatrowej (0,30 mln bezpośrednich i pośrednich stanowisk pracy), a następnie w branżach paliw z biomasy stałej (0,28 mln miejsc pracy), fotowoltaiki (0,25 mln miejsc pracy) i biopaliw (0,11 mln miejsc pracy) [5, 6, 8].

Wartość gospodarczą odnośnie wdrażania odnawialnych źródeł energii w 27 państwach członkowskich Unii Europejskiej w 2012 r. ocenia się na prawie 130 mld euro (lekki spadek ponieważ ocena szacunkowa dla 2011 r. to 141 mld euro). Najwyższe obroty w 2012 r. można przypisać kolejno energetyce wiatrowej (34,4 miliardów euro), fotowoltaice (30,8 mld euro) i paliwom z biomasy stałej (27,7 mld euro) [8].

W 2012 r. końcowe zużycie energii ze źródeł odnawialnych brutto znacznie wzrosło. Całkowity udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2012 r. wyniósł 14,0% w porównaniu do 12,9% w 2011 roku [8].

Produkcję energii z odnawialnych źródeł energii w 2012 r. oszacowano na 763.5 TWh, w tym udział energii elektrycznej wynoszący 23.4%. W ciągu ostatnich 10 lat, energetyka fotowoltaiczna 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).



Rys. 1. Wzrost rynku fotowoltaiki na świecie, na podstawie [6], [7], [8]

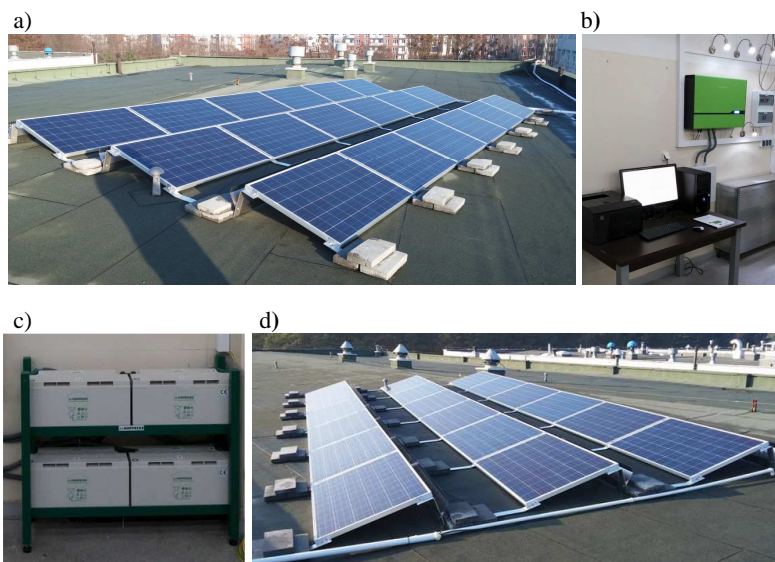
Fig. 1. Market growth of photovoltaic in the world, based on [6], [7], [8]

Branża 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 nawet konserwatywny wzrost rynku na poziomie 25% rocznie, w 2030 roku 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, 8].

## 2. Laboratoryjna instalacja fotowoltaiczna na WIM UTP

Laboratoryjną instalację fotowoltaiczną, funkcjonującą na budynku Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy przedstawiono na rysunku 2. W instalacji zastosowano polikrystaliczne moduły fotowoltaiczne o mocy całkowitej 3000 W. Zamocowano je na dachu budynku hali technologicznej WIM-UTP pod kątem 20 stopni.



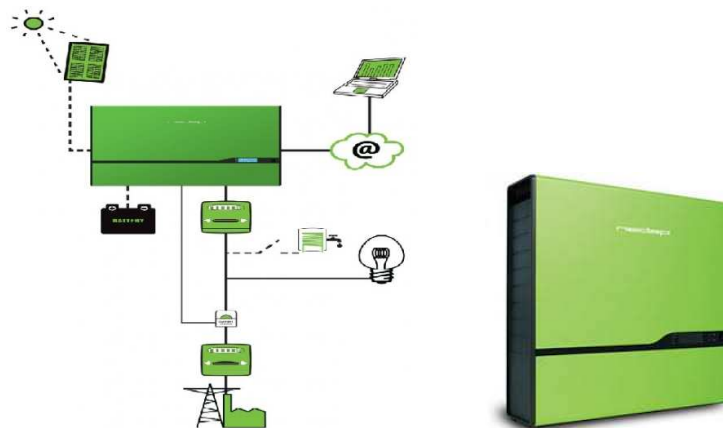
Rys. 2. Instalacja fotowoltaiczna na WIM UTP w Bydgoszczy: a, d- moduły PV, b- system pomiarowy, c- bank akumulatorów

Fig. 2. Photovoltaic installation on the "WIM UTP" in Bydgoszcz: a, d- PV modules, b- measurement system, c- battery bank

W instalacji wykorzystano inwerter hybrydowy PowerRouter firmy Nedap Energy Systems. Inwerter tego typu jest w pełni zintegrowanym system zarządzania energią elektryczną. Instalacje fotowoltaiczne zbudowane w oparciu o ten inwerter umożliwiają stworzenie własnej sieci dla zrównoważenia energii produkowanej przez ogniwa fotowoltaiczne i energii konsumowanej na potrzeby własne.

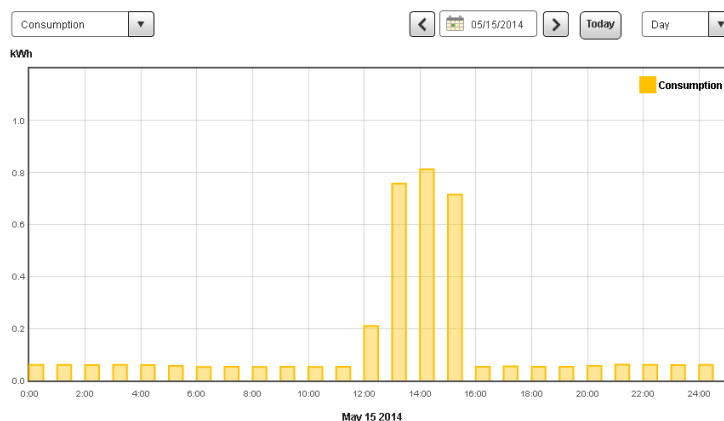
Uniwersalność urządzenia pozwala na podłączenie do niego w prosty sposób modułów fotowoltaicznych, odbiorników i banku akumulatorów. Automatyka inwertera hybrydowego pozwala na skonfigurowanie instalacji tak, aby wytworzona w ogniwach fotowoltaicznych energia była zużywana natychmiast, przechowywana w akumulatorach do późniejszego wykorzystania, a po naładowaniu akumulatorów i w przypadku braku odbioru energia może być oddawana do sieci. Ponadto inwerter można podłączyć do sieci Ethernet i dzięki portalowi internetowemu [mypowerrouter.com](http://mypowerrouter.com) (po zalogowaniu) można mieć wgląd na parametry pracy instalacji z dowolnego miejsca na Ziemi. Reasumując schemat działania zintegrowanego systemu fotowoltaicznego 3 w 1 wygląda w sposób następujący (rys. 3):

- a) wytworzona w modułach PV energia elektryczna jest dostarczana do PowerRouter'a,
- b) w razie potrzeby zasilania dowolnego odbiornika domowego, energia pobierana jest z PowerRouter'a,
- c) niewykorzystana energia elektryczna zostaje zgromadzona w systemie baterii akumulatorów,
- d) w przypadku zapotrzebowania na energię i braku słońca system wykorzystuje energię z baterii akumulatorów,
- e) w przypadku powstania nadwyżki energii, której nie można wykorzystać ani zakumulować oddaje się ją do sieci (jeśli system oczywiście jest podłączony do sieci),
- f) za pomocą portalu internetowego [www.mypowerrouter.com](http://www.mypowerrouter.com) w każdej chwili można monitorować i zarządzać produkcją i zużyciem energii (rys. 4).



Rys. 3. Działanie zintegrowanego systemu fotowoltaicznego 3 w 1 - PR30SB-BS/S24, na podstawie [9]

Fig. 3. Working of integrated photovoltaic system 3in1 - PR30SB-BS/S24, based on [9]



Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów pracy instalacji via mypowerrouter.com

Fig. 4. Example results of parameters measurements of installation work via mypowerrouter.com

### 3. Monitoring parametrów instalacji fotowoltaicznej

Systemy monitoringu są obecnie nieodłącznym elementem instalacji fotowoltaicznych. Pomagają utrzymać maksymalną wydajność systemu oraz wskazywać ewentualne usterki już na początkowym etapie działania instalacji. Dzięki temu uniknąć przestojów w produkcji energii elektrycznej. Obecnie dla inwestora nie są istotne tylko sumaryczne dane energetyczne całego systemu, ale również dane chwilowe i bardziej szczegółowe - np. parametry stringów modułów PV.

Analizowana instalacja fotowoltaiczna została wyposażona w system monitoringu Solar-Log<sup>TM</sup>. System ten umożliwia monitorowanie:

- aktualnej produkcji energii i prędkość wiatru,
- temperatury zewnętrznej otoczenia i temperatury modułów,
- napromieniowania słonecznego,
- zużytej energii spoza systemu z własnej produkcji,
- wzrostu wydajności skumulowanej oraz zaplanowanej,
- energii oddawanej przez instalacje po stronie AC inwertera,
- produkcji energii dla wybranego okresu,
- maks. wydajności i zaplanowanej produkcji w wybranym okresie,
- stosunku zaplanowanej produkcji do faktycznej,
- parametrów na zdalnym komputerze oraz urządzeniach mobilnych,
- monitorowanie stringów modułów PV.

Po zarejestrowaniu swojego urządzenia typu Solar-Log i podłączeniu go do Internetu można się zalogować na <http://home.solarlog-web.pl> do swojego systemu układu pomiarowego i mieć dostęp bieżących oraz wstecznych danych instalacji fotowoltaicznej. Przykład zarejestrowanych danych instalacji fotowoltaicznej zlokalizowanej na WIM -UTP w Bydgoszczy przedstawiono na rysunku 5.

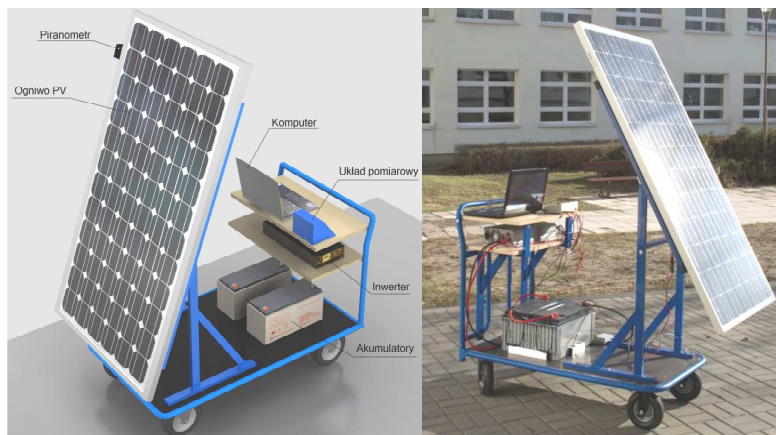


Rys. 5. Wykorzystany w instalacji Solar-Log300 oraz przykładowe wyniki pomiarów, na podstawie [10]

Fig. 5. Used in installation Solar-Log300 and example results of measurements, based on [10]

#### 4. Weryfikacja jakości modułów fotowoltaicznych

Na WIM UTP w Bydgoszczy funkcjonuje również stanowisko do badań modułów fotowoltaicznych (Rys. 6). W skład wyposażenia stanowiska wchodzi: badany moduł fotowoltaiczny, inwerter o mocy ciągłej 1,5kW z wbudowaną ładowarką sieciową, akumulatory żelowe 12V/100 Ah (2szt.), układ pomiarowy, obciążenie rezystancyjne do badania ogniwa oraz komputer PC.



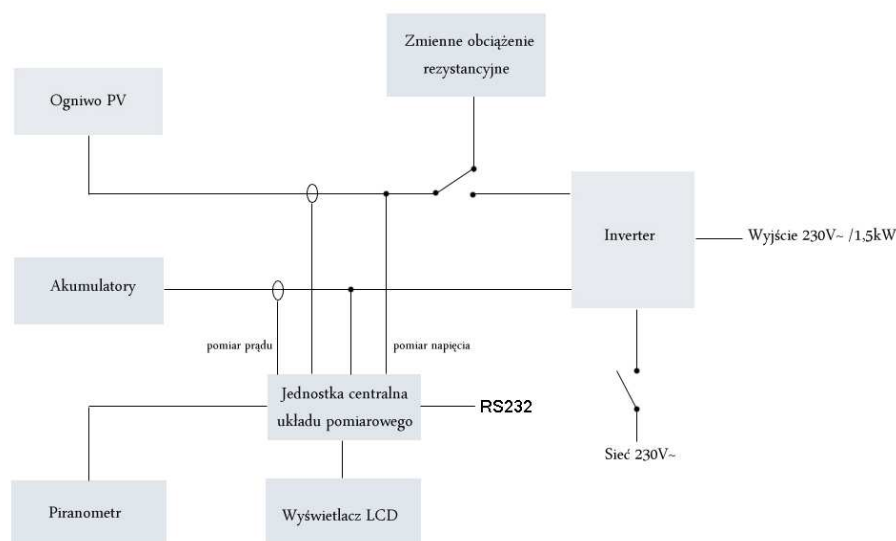
Rys. 6. Budowa stanowiska badawczego [4], [5]

Fig. 6. Test stand construction [4], [5]

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. 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. 7):

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



Rys. 7. Schemat blokowy instalacji [4], [5]

Fig. 7. Block diagram of installation [4], [5]

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/m<sup>2</sup> (rozdzielczość 2 W/m<sup>2</sup>, +/- 5%).

Wszystkie mierzone parametry są przetwarzane na postać cyfrową i wyświetlane na wyświetlaczu LCD. Dodatkowo układ umożliwia przesyłanie da-

nych 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  $0,1 \Omega$ .

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 pochylecia ogniwa i różnych wartościach promieniowania słonecznego.

Przykład wykresu charakterystyk dla badanego modułu fotowoltaicznego przedstawiono na rysunku 8.

Oprócz badań charakterystyk modułów możliwa jest również analiza wpływu zacieniania na efektywność badanego modułu.



Rys. 8. Przykład charakterystyki modułu fotowoltaicznego [4], [5]

Fig. 8. Example of photovoltaic module characteristic [4], [5]

## 5. Wnioski

Olbrzymi postęp w technologii modułów i systemów fotowoltaicznych, a także funkcjonujące w Europie systemy wsparcia, wskazują, że źródła fotowoltaiczne mogą mieć w niedalekiej przyszłości znaczny udział w globalnej produkcji energii elektrycznej, co miałyby istotny wpływ na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, a zatem na poprawę stanu środowiska naturalnego.

Dzięki zastosowanemu systemowi typu PowerRouter maksymalnie udało się zoptymalizować wykorzystanie energii elektrycznej. PowerRouter w zależności od sytuacji "decyduje" czy zużywać energię na bieżąco, oddawać ją do sieci czy też magazynować w akumulatorach. Do urządzenia można bezpośrednio podłączyć odbiorniki, sieć zewnętrzną, panele fotowoltaiczne oraz akumulatory. PowerRouter można podłączyć do Internetu, aby uzyskać podgląd na wszystkie parametry systemu (np. uzyski systemu fotowoltaicznego, pobór energii, wydajność, poziom naładowania akumulatorów). PowerRouter można zdalnie aktualizować w zakresie oprogramowania i funkcji. Można także dokonywać zmian podczas pracy całego systemu.

Dotychczasowa praca z układem monitorującym Solar-Log<sup>TM</sup> pozwoliła bardzo efektywnie zarządzać analizowaną instalacją fotowoltaiczną na WIM UTP w Bydgoszczy. Zamiast kilku systemów monitoringu, Solar-Log<sup>TM</sup> oferuje jedno rozwiązanie, niezależnie od marki stosowanych inwerterów. Współczesne systemy monitorujące pozwalają wykryć źródło problemu i szybko naprawić usterkę. Jest to możliwe dzięki ciągłej komunikacji pomiędzy np. Solar-Log<sup>TM</sup> i inwerterem (lub inwerterami dla dużych instalacji), podczas której są one badane pod kątem nieprawidłowości. O ewentualnych odchyleniach system powiadamia poprzez SMS lub e-mail. Takie rozwiązanie pozwala błyskawicznie wyeliminować problemy.

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

## Literatura

- [1] Pluta Z.: Słoneczne instalacje energetyczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [2] Waclawek M., Rodziewicz T.: Ogniwa słoneczne - wpływ środowiska naturalnego na ich pracę. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2011.
- [3] Szymański B.: Instalacje Fotowoltaiczne. Wydanie II. Wydawnictwo Geosystem Burek, Kotyza s.c., Kraków 2013.
- [4] 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 badaw-

- cze - prognozy, Prace komisji ekologii i ochrony środowiska BTN, tom VI, Bydgoszcz 2012, str. 249-256.
- [5] Mroziński A., Skibowski M.: Badanie efektywności modułów fotowoltaicznych. Rozdział w monografii pt. V Eko-Euro-Energia Inżynieria Odnawialnych Źródeł Energii pod redakcją A. Mrozińskiego, Wydawnictwo Fundacji Rozwoju Mechatroniki, ISBN 978-83-932977-6-4, Bydgoszcz 2012, str. 88-107
- [6] Mroziński A.: Recykling ogniw fotowoltaicznych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Nr 5/2010, Vol. 49 (41), str. 85-86
- [7] Lewandowski W.M.: Proekologiczne źródła energii odnawialnej, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [8] Źródło: EurObserv'ER, www.eurobserv-er.org, 2014
- [9] Materiały techniczne systemu fotowoltaicznego 3w1 - PR30SB-BS/S24
- [10] Materiały techniczne układu monitorującego Solar-LogTM<sup>300</sup>

## RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF LABORATORY PHOTOVOLTAIC INSTALLATION

### Summary

In the paper problem of photovoltaic installations (PV) using in Poland and Europe were presented. PV systems will be have in near future considerable contribution in global electric energy production. It will be this influenced indeed onto limitation of greenhouses' gases emission and onto improvement of natural environment state. In the paper building of laboratory photovoltaic installation on the "WIM UTP" in Bydgoszcz. In PV installations have larger meaning systems of management energy more and more. Applied on the test stand PowerRouter system (system PV 3in1) optimizes utilization of electric energy in installation. To device it was been possible to directly connect receiver sets, external net, PV panels and batteries. PowerRouter it were been possible to connect to Internet also in aim of remote registration of measured dates. Present monitoring systems permit detections source of problem and repair fault quickly. In article system Solar-LogTM was introduced. System this makes possible monitoring of current production of energy, speed of wind, external temperatures of surroundings and modules, sunny irradiating as well as even individual string parameters of modules PV. The author also was presented test stand to investigations of working efficiency of photovoltaic modules. Test stand is example of test solution of investigations in real conditions. Beside investigations of characters of modules possible of different type on position PV is analysis of shading onto efficiency of studied module also.

**Keywords:** renewable energy source, efficiency, photovoltaic

DOI:10.7862/rb.2014.102

*Przesłano do redakcji: 21.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*