

Katarzyna BIERNAT
Waldemar KOZŁOWSKI
Stefan WÓJTOWICZ
Maciej ZAWISTOWSKI

TESTER PANELI FOTOWOLTAICZNYCH

STRESZCZENIE *Elektrownie fotowoltaiczne składają się z paneli łączonych elektrycznie w układzie szeregowo-równoległym. Naturalny produkcyjny rozrzut technologiczny powoduje różnice w użytecznych parametrach elektrycznych. W Zakładzie Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych Instytutu Elektrotechniki opracowano tester paneli fotowoltaicznych z przeznaczeniem do kontroli dostaw przed trwałą instalacją na konstrukcji mechanicznej. Tester może być także wykorzystany do kontroli finalnej w procesie produkcyjnym. Podano architekturę funkcjonalną urządzenia oraz przeprowadzono analizę pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych w funkcji oświetlenia. Przeprowadzono analizę niepewności pomiaru.*

Słowa kluczowe: *Panele fotowoltaiczne, elektrownie słoneczne, pomiar charakterystyk paneli PV*

DOI: 10.5604/01.3001.0010.0038

1. WPROWADZENIE

Kontrola jakości paneli fotowoltaicznych polega przede wszystkim na sprawdzeniu charakterystyk zależności prądu i napięcia od mocy napromieniowania. Na poziomie producenta jest to element procesu prowadzonego na stacji prób finalnych. Na poziomie integratora elektrowni fotowoltaicznej sprawdzanie paneli fotowoltaicznych ma na celu wykrycie ewentualnych niesprawności, uszkodzeń w czasie transportu oraz innych niezgodności ze specyfikacją techniczną wyrobu.

mgr inż. Katarzyna BIERNAT, mgr Waldemar KOZŁOWSKI, dr inż. Stefan WÓJTOWICZ
e-mail: [frako-info; panwalko]@o2.pl

FRAKO-TERM, Toruń, ul. Morwowa 6, 87-100 Toruń

mgr inż. Maciej ZAWISTOWSKI
e-mail: m.zawistowski@iel.waw.pl

Instytut Elektrotechniki, ul. M. Pożaryskiego 28, 04-703 Warszawa

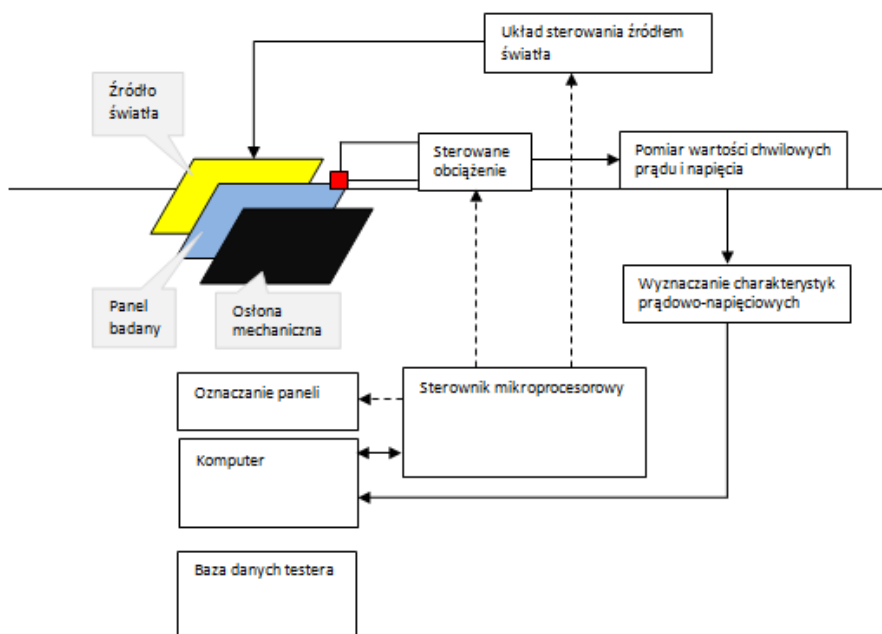
PRACE INSTYTUTU ELEKTROTECHNIKI, ISSN-0032-6216, LXIV, zeszyt 276, 2017

Badania własne i udostępniane przez producentów wykazały, że istnieją różnice parametrów między konkretnymi egzemplarzami paneli nawet tej samej serii produkcyjnej. Wykazano także, że selekcja i sposób doboru paneli według indywidualnych parametrów oraz łączenie paneli w gałęzie szeregowo i równoległe ma istotny wpływ na sprawność elektrowni [1].

W Zakładzie Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych Instytutu Elektrotechniki opracowano tester paneli fotowoltaicznych, który wyznacza podstawowe parametry paneli w czasie kontroli dostaw. Instalator elektrowni, znając indywidualne parametry modułów PV może dokonać badań symulacyjnych, na podstawie których możliwa jest optymalizacja pracy elektrowni mająca na celu poprawę sprawności konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

2. ARCHITEKTURA FUNKCJONALNA TESTERA PVP-TEST

Tester jest automatycznym urządzeniem przeprowadzającym badanie paneli fotowoltaicznych w układzie ze sterowanym źródłem natężenia oświetlenia, rozumianym, jako ilość energii promieniowania elektromagnetycznego w jednostce czasu padającego prostopadle na jednostkowe pole tej powierzchni. Operator mocuje mechanicznie panel na stanowisku i wykonuje niezbędne połączenie elektryczne. Badanie przeprowadzane jest z pomiarem temperatury na stanowisku.



Rys. 1. Struktura funkcjonalna testera paneli fotowoltaicznych

W skład testera wchodzi następujące komponenty (rys. 1):

- sterowane obciążenie elektryczne,
- układ do pomiaru wartości chwilowych prądu i napięcia,
- mikroprocesorowy system do wyznaczania charakterystyk prądowo-napięciowych,
- sterownik realizujący sekwencje ustawiania warunków pomiaru,
- komputer realizujący algorytm badania,
- układ oznaczania paneli po badaniu,
- baza danych testera, każdy panel posiada indywidualny zestaw charakterystyk.

Program sterownika mikroprocesorowego realizuje procedurę badawczą w sposób automatyczny. Dla ustawionej wartości natężenia oświetlenia (sterowane źródło światła), zmieniane jest obciążenie elektryczne. Wartości chwilowe napięcia i prądu są zbierane i zapamiętywane. Dla przyjętego modelu matematycznego paneli [2] obliczane są charakterystyki prądowo-napięciowe. Wyniki pomiarów są poddawane ocenie i archiwizacji. Panele otrzymują indywidualne metryczki.

3. POMIAR WARTOŚCI CHWILOWYCH PRĄDU, NAPIĘCIA I MOCY

System pomiarowy testera umożliwia wyznaczanie charakterystyk prądowo-napięciowych paneli fotowoltaicznych zgodnie z modelem pomiaru opisanym poniżej. Badanie może być przeprowadzone dla zmieniającego się natężenia oświetlenia testowanych obiektów. Model pomiaru uwzględnia błędy wprowadzane przez zastosowaną metodę badania, błędy pomiarów wartości chwilowych oraz błędy wyznaczania numerycznej wartości wielkości wyjściowych. Błędy mają charakter losowy i opisywane są rozkładami gęstości prawdopodobieństwa.

Napięcie i prąd są próbkowane a wartości chwilowe poddawane są konwersji analogowo-cyfrowej. Wcześniej sygnały pomiarowe są kondycjonowane w celu usunięcia zakłóceń i dopasowania zakresów zmian do wejścia konwertera a/c o rozdzielczości 12 bitów. Próbkki zbierane są w kolejnych punktach czasowych co 1 ms. Model pomiaru napięcia w punkcie czasowym k dany jest wzorem:

$$u_{Sk} = u_{Sk0} + u_{Snk} \quad (1)$$

gdzie:

- u_{Sk} – napięcie chwilowe w k -tym kroku przy oświetleniu S ,
- u_{Sk0} – składowa stała napięcia chwilowego w k -tym kroku przy oświetleniu S ,
- u_{Skn} – zmienna losowa zakłócająca napięcia chwilowe w k -tym kroku przy oświetleniu S .

Zakłada się, że zakłócenia mają charakter losowy. Rozkład gęstości prawdopodobieństwa zakłóceń napięciowych oznaczono $f_u(u_{Snk})$. Do oszacowania niepewności

pomiaru oprogramowanie testera dopuszcza przyjmowanie dowolnego rozkładu gęstości prawdopodobieństwa, choć przyjmuje się, że rozkład normalny najlepiej oddaje charakter zmian napięcia zakłóceń. Wtedy rozrzut napięcia wliczany do niepewności pomiaru wartości chwilowej napięcia charakteryzuje odchylenie standardowe σ_u . Pomiar prądu wykonywany jest pośrednio przez pomiar napięcia na oporniku wzorcowym, stąd model pomiaru prądu:

$$i_{Sk} = \frac{u_{Rk}}{R} = i_{S0k} + i_{Snk} \quad (2)$$

gdzie:

i_{Sk} – prąd chwilowy w k -tym kroku przy mocy napromieniowania S ,

u_{Rk} – spadek napięcia na oporniku wzorcowym w k -tym kroku,

R – wartość opornika wzorcowego,

i_{S0k} – składowa stała prądu chwilowego w k -tym kroku przy mocy napromieniowania S ,

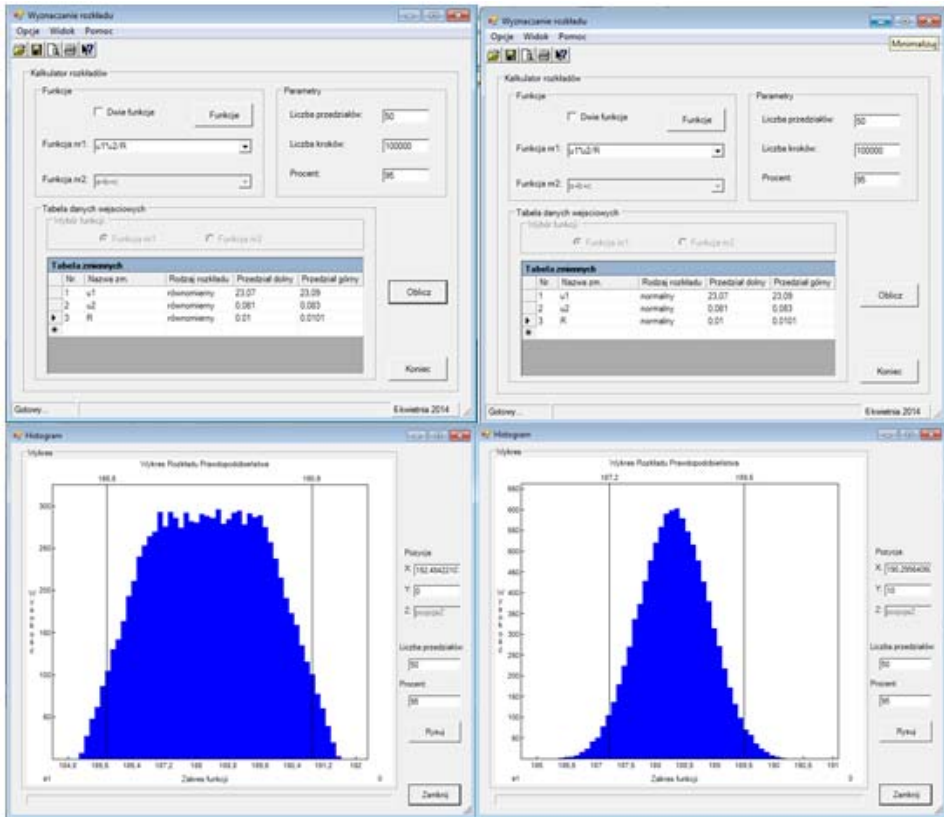
i_{Snk} – zmienna losowa zakłócająca prądu chwilowego w k -tym kroku przy mocy napromieniowania S .

Moc chwilowa wyznaczana jest, jako iloczyn wartości chwilowych prądu i napięcia dla każdego punktu k .

$$P_{Sk} = u_{Sk} i_{Si} = (u_{S0k} + u_{Snk}) \cdot (i_{S0k} + i_{Snk}) = (u_{S0k} + u_{Snk}) \cdot \frac{u_{Rk}}{R} \quad (3)$$

Niepewność pomiaru wartości chwilowych oszacowana jest metodą symulacyjną z zastosowaniem oryginalnego programu [3]. Program wyznacza rozkład gęstości prawdopodobieństwa wielkości wyjściowej p_{Sk} jako $f(p_{Sk})$. Zastosowana jest metoda propagacji rozkładów [3] wielkości wejściowych u_{Sk}, u_{Rk}, R według modelu opisanego zależnością (3). Obliczenia wykonywane są metodą Monte Carlo. Tak otrzymana funkcja rozkładu gęstości prawdopodobieństwa wielkości wyjściowej p_{Sk} pozwala określić niepewność standardową i rozszerzoną dla każdej wartości charakterystyk. W ten sposób charakterystykom przypisywany jest pewien rozrzut wynikający z zastosowanej metody pomiarowej (przedział na poziomie ufności 0,95). Uwzględnianie rozrzutu charakterystyk ma wpływ na dobór paneli w połączeniach szeregowo-równoległych elektrowni fotowoltaicznej. Przykładowe wyniki oszacowania niepewności pomiaru wartości chwilowej mocy w procesie testowania (rys. 2) pokazują różnice kształtu rozkładu gęstości prawdopodobieństwa w zależności od charakteru przyjętych rozkładów wielkości wejściowych. Rozkłady prostokątne wielkości wejściowych przyjmowane są wówczas, gdy błędy pomiaru szacowane są granicami zmian. Przyjmowanie rozkładów wielkości wejściowych powinno być dokonane zgodnie z zasadami metrologicznymi [4].

Wyniki pomiarów, które są umieszczane w bazie danych testera, zawierają wartości zmierzonych wielkości i ich niepewności rozszerzone. Informacje te są wykorzystywane w procesie dobierania charakterystyk do zestawów paneli o możliwie zbliżonych parametrach.

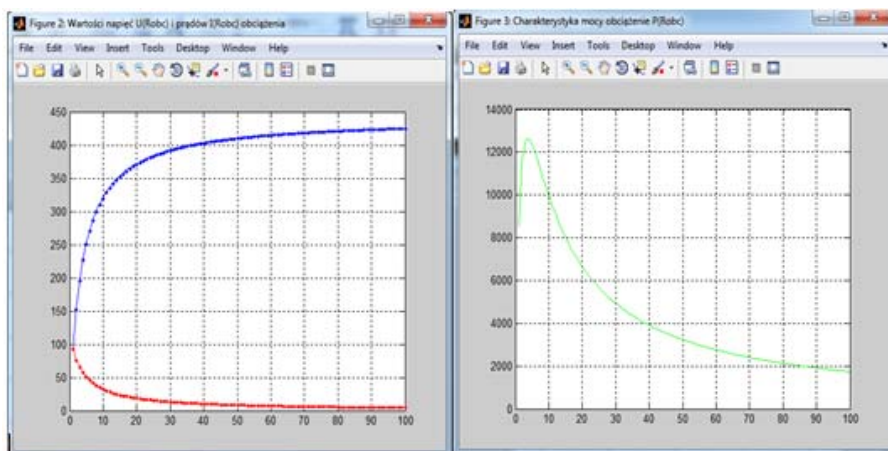


Rys. 2. Wyniki oszacowania niepewności pomiaru (przedziału dla poziomu ufności 0,95) wartości chwilowej mocy w procesie testowania dla modelu z: a) prostokątnymi rozkładami gęstości prawdopodobieństwa zmiennych (po lewej), b) normalnymi rozkładami zmiennych (po prawej)

4. WYZNACZANIE CHARAKTERYSTYK

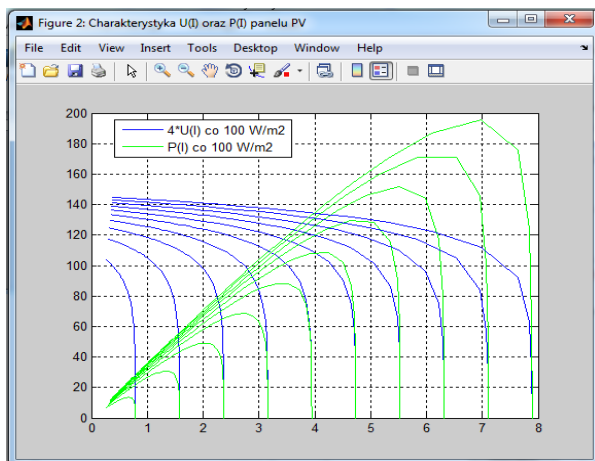
Z punktu widzenia aplikacji istotne są charakterystyki zawierające informacje o zależności napięcia i prądu od oświetlenia. Na podstawie zmierzonych wartości chwilowych przy zmienianym natężeniu oświetlenia wyznaczane są charakterystyki dla każdego badanego obiektu lub dla połączonych obiektów w układzie szeregowo-równoległym.

Tester obsługiwany jest przez oprogramowanie PVP CAD 2014 (Photovoltaic Plant CAD) [2]. Oprogramowanie ma charakter badawczy i powstało do modelowania, symulacji i projektowania elektrowni fotowoltaicznych.



Rys. 3. Charakterystyka zależności napięcia i prądu od obciążenia (po lewej) oraz charakterystyka zależności mocy od wartości obciążenia (po prawej)

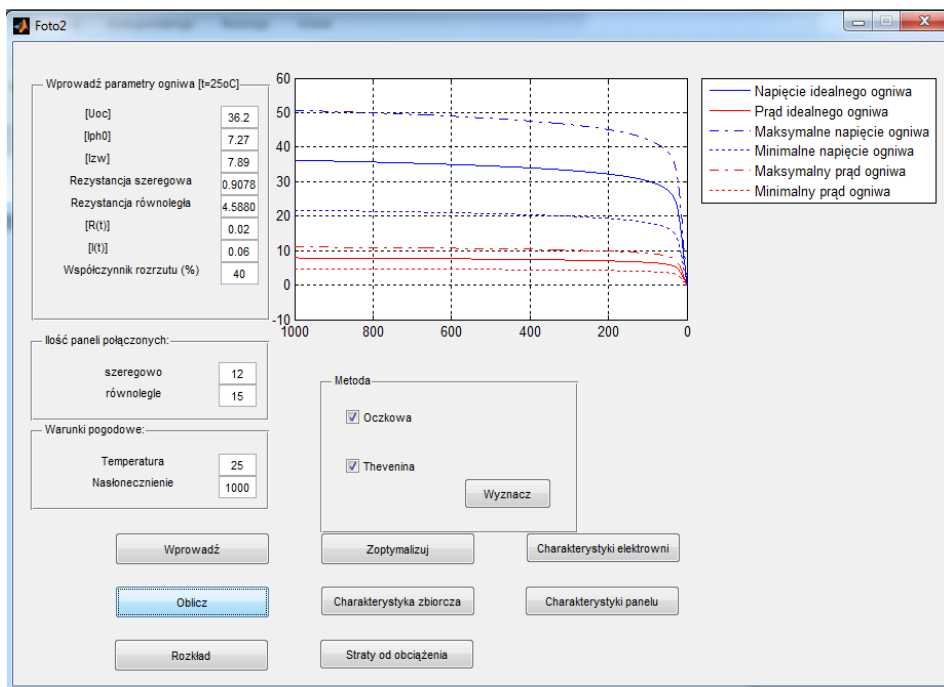
Charakterystyki zależności napięcia na zaciskach obciążenia rezystancyjnego oraz prądu płynącego przez rezystancję obciążenia od wartości tej rezystancji rejestrowane są (rys. 3 po lewej) w zakresie istotnych zmian wartości prądu. Moc wyznaczana jest w każdym punkcie ustawianej rezystancji obciążenia (rys. 3 po prawej). Po wykonaniu całego programu badania, dla każdej przewidzianej wartości natężenia oświetlenia, tworzone są charakterystyki prądowo-napięciowe.



Rys. 4. Charakterystyki prądowo-napięciowe oraz charakterystyki mocy w zależności od natężenia oświetlenia

Zmiany wartości mocy, jako iloczynu wartości chwilowych prądu i napięcia w funkcji natężenia oświetlenia (rys. 4) są przedstawione, jako charakterystyki pozwalające oszacować położenie punktu mocy maksymalnej. Właśnie ta charakterystyka jest najistotniejsza z punktu widzenia sterowania

elektrownią fotowoltaiczną. Znajomość tych charakterystyk dla indywidualnych paneli może być wykorzystana do kompletowania i rozmieszczania paneli w połączeniach szeregowo-równoległych elektrowni. Dobieranie paneli o zbliżonych parametrach poprawia sprawność zestawu. Program wizualizacji testera umożliwia przeglądanie parametrów paneli w sposób graficzny na ekranie monitora (rys. 5).



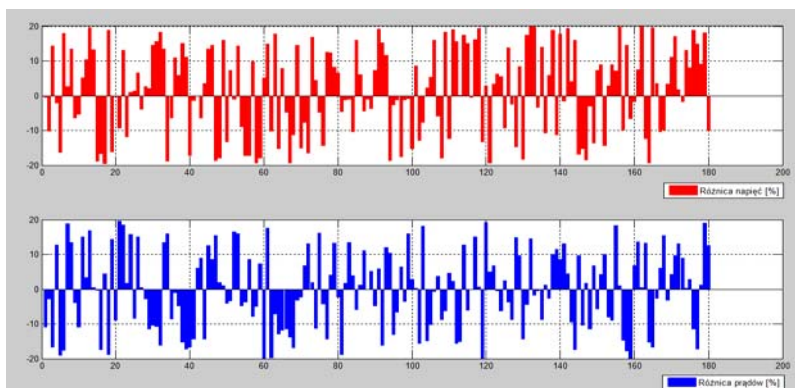
Rys. 5. Aplikacja badań symulacyjnych

Zbadane panele są oznaczane. Eliminowane są te, które nie spełniają zagwarantowanych przez producentów parametrów. Pozostałe będą mogły być użyte do tworzenia elektrowni fotowoltaicznej. Dla każdego modułu PV charakterystyki są przechowywane w bazie danych. Na tej podstawie mogą być tworzone dowolne kombinacje elektrycznych połączeń szeregowo-równoległych między panelami. Charakterystyki całej elektrowni są badane w modelu symulacyjnym z zastosowaniem specjalnej aplikacji (rys. 5). Instalator elektrowni na podstawie wyników testów dokonuje selekcji paneli według parametrów. Do wyboru odpowiednich paneli na podstawie parametrów służą zestawienia (rys. 6).

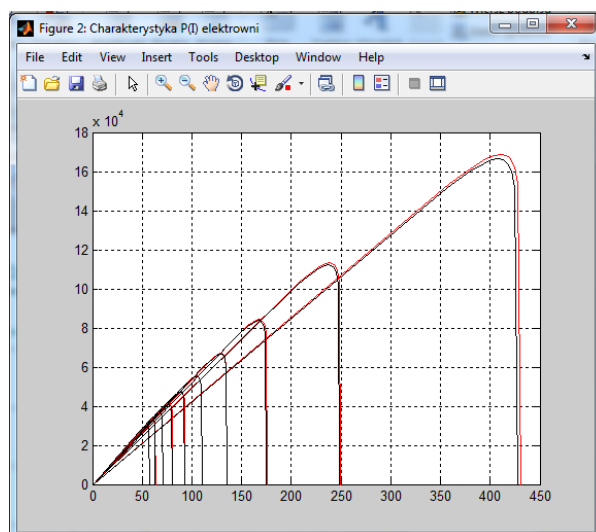
Przy modelowaniu układów połączeń wielu paneli prognozowanie charakterystyk łącznych uwzględnia niepewność pomiarów wartości chwilowych, oraz niepewność wprowadzaną przez przetwarzanie danych.

Osobnym zagadnieniem jest uwzględnianie niepewności wynikającej z oddziaływania wielkości wpływających na pomiar, przede wszystkim zadawania i sterowania warunkami oświetlenia. Niepewność metody badania zastosowanej do testowania powinna być oszacowana zgodnie z zasadami metrologicznymi obowiązującymi dla metod badawczych.

Z praktycznego punktu widzenia najistotniejsze jest oszacowanie współrzędnych punktu MPP (Maximum Power Point) dla całego zestawu paneli w elektrowni dla określonego natężenia promieniowania słonecznego (rys. 7). Znajomość tych charakterystyk pozwala oszacować przybliżoną produkcję energii elektrycznej dla zadanego profilu zmian oświetlenia.



Rys. 6. Przykładowe wyniki badań 180 paneli pokazujące różnice procentowe napięć i prądów dla wzorców normalnych warunków oświetlenia i temperatury



Rys. 7. Charakterystyki mocy dla całej elektrowni fotowoltaicznej

5. WNIOSKI

Celem kontroli jakości paneli fotowoltaicznych jest wyeliminowanie paneli niespełniających warunków technicznych dostawy, oraz zbadanie charakterystyk rzeczywistych paneli. Opracowany tester wykonuje badania oraz na podstawie zmierzonych charakterystyk pozwala na badanie symulacyjne dowolnych kombinacji połączeń szeregowo-równoległych w projektowanej elektrowni. Pomiaru wykonywane

są przy sterowanym natężeniu promieniowania. Znajomość charakterystyk każdego dostarczonego panelu pozwala lepiej dobierać zestawy. Urządzenie przeznaczone jest do kontroli dostaw, lecz może być zastosowane do kontroli międzyoperacyjnej i końcowej u producentów. Dalsze prace prowadzone w Zakładzie Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych Instytutu Elektrotechniki zmierzają do rozbudowy oprogramowania i stworzenia kompletnego systemu projektowania i optymalizacji elektrowni fotowoltaicznych.

LITERATURA

1. Rekioua D., Matagne E.: Optimization of Photovoltaic Power Systems. Springer-Verlag, London 2012.
2. Villalva M. G., Gazoli J. R., Filho E. R.: Comprehensive Approach to Modeling and simulation of Photovoltaic Arrays. IEEE Transactions on Power Electronic, vol. 24, nr 5, s. 1189-1208, maj 2009.
3. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Supplement 1, Numerical Methods for the Propagation of Distributions, 2004.
4. Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik. Główny Urząd Miar, Warszawa 1995.
5. Wójtowicz S.: UM2012 (Uncertainty of Measurement). Program niepublikowany. Zakład Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych. Instytut Elektrotechniki. Warszawa 2012.
6. Wójtowicz S., Zawistowski M.: PVP CAD 2014 (Photovoltaic Plant CAD). Program niepublikowany. Instytut Elektrotechniki. Warszawa 2014.

Przyjęto do druku dnia 10.03.2017 r.

TESTER FOR PHOTOVOLTAIC PANELS

Katarzyna BIERNAT, Waldemar KOZŁOWSKI,
Stefan WÓJTOWICZ, Maciej ZAWISTOWSKI

ABSTRACT *Photovoltaic power plants consist of panels electrically connected in series-parallel arrangement. Natural scattering of technological production leading to differences in electrical parameters. Department of Measurement and Diagnostic Systems, Electrotechnical Institute developed tester for photovoltaic panels intended to control the delivery before permanent installation for mechanical position. The tester can also be used to final control the manufacturing process. The functional architecture of the device are given and an analysis of measuring current-voltage characteristics as a function of illumination. Was performed analysis of measurement uncertainty.*

Keywords: *Photovoltaic panels, solar power, the measurement characteristics of the PV panels*



Mgr Katarzyna BIERNAT – Dyrektor ds. Rozwoju w przedsiębiorstwie Frako-Term. Zarządza projektami Badawczo-Rozwojowymi i wdrożeniami nowych technologii. Obecnie specjalizuje się w badaniach związanych z odnawialnymi źródłami energii i stacjami ładowania pojazdów. Jest autorką i współautorką kilkudziesięciu artykułów i referatów. Brała udział w komitetach organizacyjnych konferencji krajowych i międzynarodowych.

Mgr Waldemar KOZŁOWSKI – Prezes przedsiębiorstwa Frako-Term. Absolwent fizyki na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika. Zajmuje się zagadnieniami wykorzystania przemysłowego kriogeniki i nadprzewodnictwa. Bierze udział w pracach badawczych, rozwojowych i wdrożeniowych związanych z elektromagnesami nadprzewodnikowymi, separacją magnetyczną, zasobnikami energii elektrycznej. Współpracuje z czołowymi jednostkami naukowymi w kraju i za granicą.



Dr inż. Stefan S. WÓJTOWICZ – Frako-Term, Toruń. Zainteresowania związane z systemami diagnostycznymi, odnawialnymi źródłami energii, e-mobilnością. Autor i współautor ponad 200 publikacji, książek, monografii, artykułów i referatów. Brał udział w komitetach naukowych konferencji krajowych i międzynarodowych. Prowadził warsztaty i seminaria z zakresu niepewności pomiarów, wzorcowania, pojazdów elektrycznych i inteligentnego opomiarowania.

Mgr inż. Maciej ZAWISTOWSKI – absolwent wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, pracownik Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, doktorant Politechniki Warszawskiej. Autor i współautor kilkunastu artykułów i opracowań. Specjalizuje się w badaniach symulacyjnych zagadnień energetyki rozproszonej, inteligentnego opomiarowania, odnawialnych źródeł energii oraz sterowaniem pojazdów elektrycznych.



IEI, Warszawa 2017. Nakład: 80 egz. Ark. wyd. 5,83. Ark. druk. 4,31. Pap. of. kl. III. 80 g.

Oddano do druku w maju 2017 r. Druk ukończono w maju 2017 r.

Redakcja – Instytut Elektrotechniki, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne
