

DOI: 10.5604/20830157.1148045

# IMPLEMENTACJA ALGORYTMU STEROWANIA ROZMYTEGO DO UTRZYMYWANIA MAKSYMALNEGO PUNKTU PRACY ELEKTROWNI FOTOWOLTAICZNEJ

Maciej Zawistowski, Stefan Wójtowicz

Instytut Elektrotechniki

**Streszczenie.** Ze względu na swoje nieliniowe charakterystyki prądu  $I$  i napięcia  $U$ , elektrownia fotowoltaiczna powinna być wyposażona w algorytm śledzenia maksymalnego punktu wydajności. Pozwala to na uzyskiwanie maksymalnych wartości energii w szerokim spektrum zmieniających się warunków oświetlenia. Obecnie istnieje wiele algorytmów wyznaczania maksymalnego punktu pracy elektrowni fotowoltaicznej, celem artykułu jest przedstawienie metody wyznaczania trajektorii punktu maksymalnej wydajności elektrowni fotowoltaicznej za pomocą sterowania rozmytego.

**Słowa kluczowe:** sterowanie rozmyte, systemy fotowoltaiczne, śledzenie maksymalnego punktu pracy

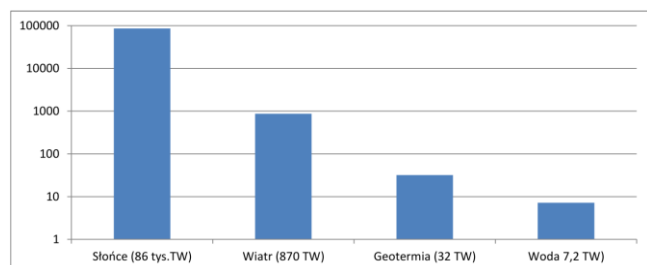
## IMPLEMENTATION OF FUZZY CONTROL ALGORITHM FOR PHOTOVOLTAIC ARRAY MAXIMUM POWER POINT TRACKING

**Abstract.** Due to the non-linear characteristics of the current  $I$  and voltage  $U$ , a PV plant should be equipped with a maximum power point tracking algorithm. This allows obtaining the maximum amount of energy in a large range of illumination. Presently there are many algorithms for determining the maximum operating point of the photovoltaic power plant. This paper is aimed to present the determination of the maximum operating point of the photovoltaic power plant using fuzzy control.

**Keywords:** fuzzy control, photovoltaic systems, maximum power point trackers

### Wstęp

Zainteresowania energią ze źródeł odnawialnych wynika ze wzrostu zapotrzebowania na energię rozwijających się gospodarek współczesnego świata oraz większej troski o środowisko naturalne. Energia odnawialna może być pozyskiwana z różnych źródeł takich jak np. słońce, opady, fale i pływy morskie, geotermia czy biomasa [3]. Na wykresie (rys. 1), zostały przedstawione cztery najważniejsze zasoby energii odnawialnej, wraz z teoretyczną ilością energii, jaka może być dzięki nim wytworzona [6].



Rys. 1. Podstawowe źródła energii odnawialnej na ziemi wraz z szacunkowymi wartościami mocy dostarczonymi w ciągu roku

Fotowoltaika jest obiecującą technologią bezpośredniego przetwarzania energii słonecznej na energię elektryczną i stanowi jeden z głównych kierunków badań w energetyce odnawialnej. Widoczna jest poprawa sprawności energetycznej, zmniejszenie kosztów wytwarzania paneli. Należy sądzić, że elektrownie fotowoltaiczne będą jednym z głównych elementów energetyki rozproszonej w następnych kilku dekadach.

Energia uzyskiwana z zestawu paneli fotowoltaicznych w elektrowni zależy przede wszystkim od parametrów oświetlenia, temperatury oraz obciążenia elektrycznego. Przy stałym oświetleniu istnieje taki punkt na charakterystyce obciążenia, w którym występuje maksimum mocy oddawanej. Zmiana parametrów oświetlenia powoduje, że przy stałym obciążeniu impedancyjnym energia pobierana z zestawu paneli nie jest maksymalna. W takiej sytuacji nie ma możliwości ustawienia prądu obciążenia w punkcie optymalnym na stałe.

Uzyskanie maksymalnej wydajności elektrowni fotowoltaicznej wiąże się z koniecznością śledzenia punktu MPP

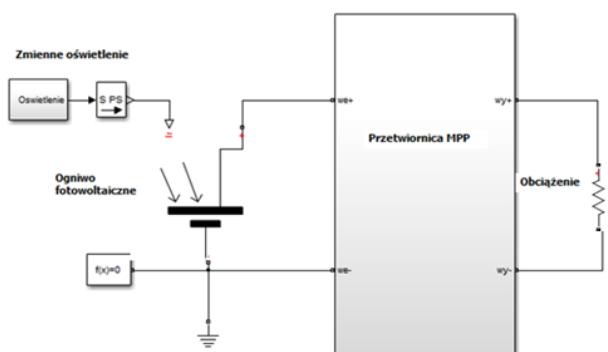
(Maximum Power Point). Opracowano kilka algorytmów śledzenia (MPPT), które są realizowane w systemach mikroprocesorowych. Skuteczny algorytm P&O (perturb and observe) jest rozwijany i stosowany dla różnych elektrowni fotowoltaicznych [7]. Jest to algorytm iteracyjny, którego działanie polega na pomiarze prądu i napięcia, wyznaczaniu mocy i dążeniu do MPP. Rozwój tej metody obejmuje zastosowanie analizy statystycznej do modelowania zmian środowiska [1] oraz sterowania rozmytego [5].

W pracy przedstawiono model algorytmu z rodziny P&O i przeprowadzono badania symulacyjne w środowisku Matlab.

### 1. Opis układu

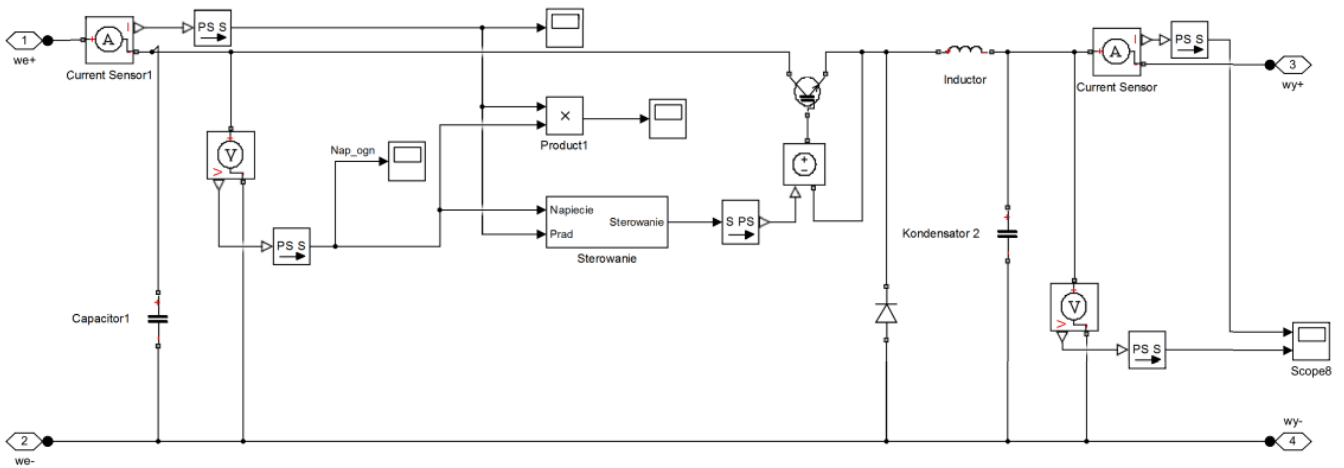
W artykule przedstawiono rozszerzony i udoskonalony algorytm z rodziny P&O i przeprowadzono badania symulacyjne jego implementacji w środowisku Matlab. Jego struktura została odwzorowana w środowisku Matlab (rys. 2). W skład układu wchodzi następujące komponenty funkcjonalne:

- ogniwo fotowoltaiczne,
- przetwornica MPP,
- obciążenie,
- układ zadawania warunków oświetlenia ogniwa fotowoltaicznego.

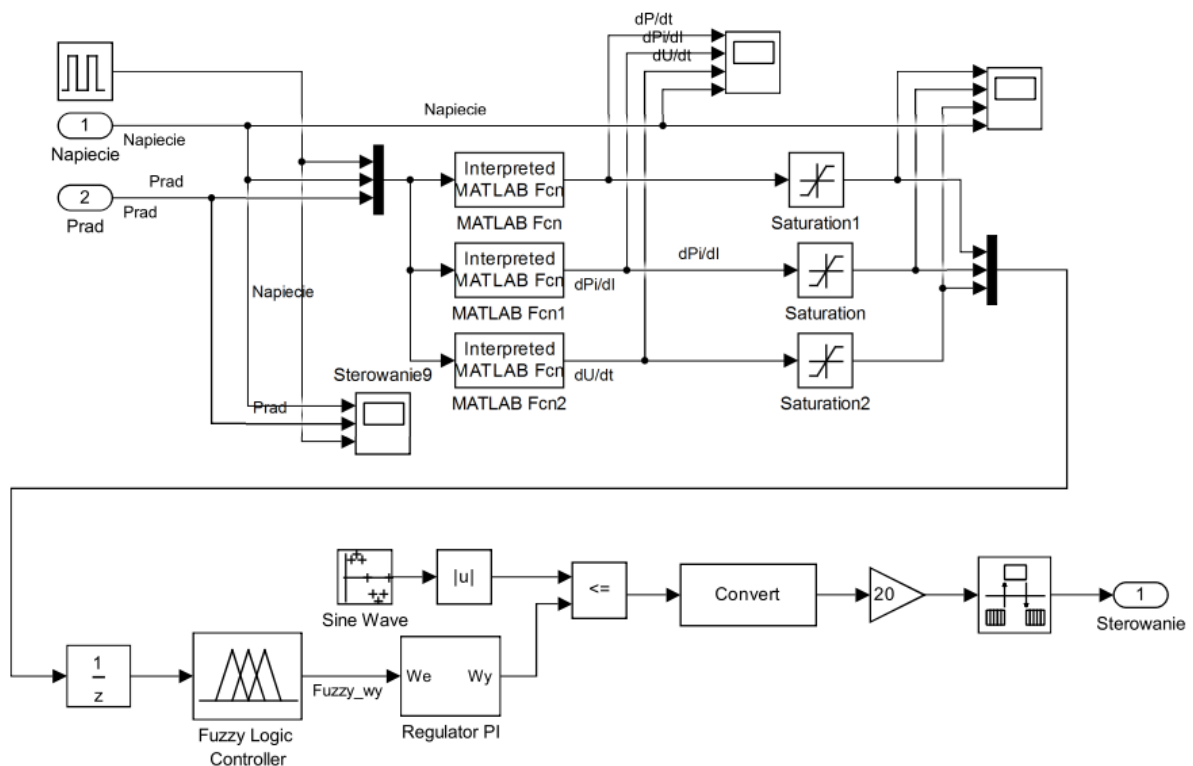


Rys. 2. Schemat badanego układu

Powyższy układ pozwala na osiągnięcie przez ogniwo fotowoltaiczne maksymalnego punktu pracy, przy zmiennej wartości oświetlenia, dla zadanego obciążenia.



Rys. 3. Schemat przetwornicy MPP



Rys. 4. Schemat sterowania tranzystorem przetwornicy MPP

## 2. Przetwornica MPP

Przetwornica MPP utrzymuje ogniwo fotowoltaiczne w punkcie maksymalnej wydajności. Jej model pokazany jest na rysunku 3. Struktura układu jest zbliżona do klasycznej przetwornicy obniżającej [2].

Kondensator wejściowy  $C_1$  jest ładowany bezpośrednio z ogniwa fotowoltaicznego. Po przekroczeniu napięcia powyżej maksymalnego punktu pracy, zostaje otwarty tranzystor T, przez co rozładowywany jest kondensator wejściowy, a ładowany kondensator wyjściowy  $C_2$ . Po spadku napięcia poniżej maksymalnego punktu pracy, tranzystor T zostaje zamknięty i powtarza się cykl ładowania kondensatora wejściowego  $C_1$ . Tranzystor T jest sterowany z modulatora PWM poprzez blok sterowania, pokazany na rysunku 4.

Na podstawie pomiarów wartości chwilowych prądu i napięcia wyznaczane są wartości  $\frac{dP}{dt}$ ,  $\frac{dP}{dt}$ ,  $\frac{dI}{dt}$ , które stanowią dane wejściowe do modułu logiki rozmytej, gdzie podejmowana jest decyzja o zmianie wartości współczynnika wypełnienia PWM.

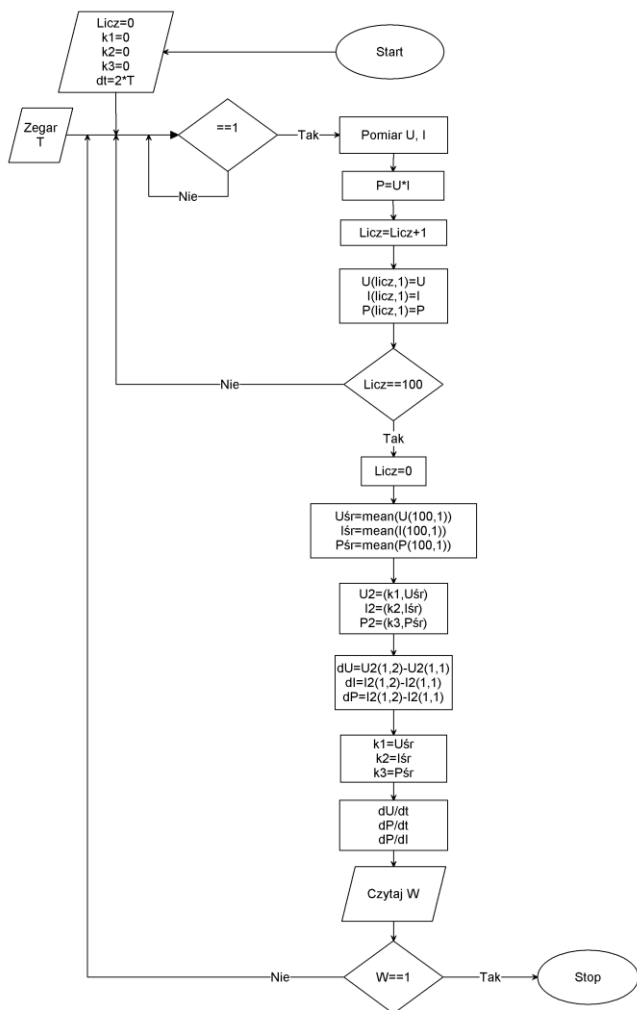
## 3. Algorytm wyznaczania pochodnych

Znane sposoby utrzymywania ogniwa fotowoltaicznego w maksymalnym punkcie pracy można podzielić na dwie grupy. Do pierwszej należą metody pośrednie polegające na pomiarze prądu zwarcia lub napięcia rozwarcia. Są one mało efektywne i nie uwzględniają takich cech jak zmiana charakterystyk w miarę starzenia się ogniwa. Do drugiej grupy należą metody bezpośrednie zapewniające dużo większą sprawność przetwarzania w zmiennych warunkach oświetlenia. Zastosowany w artykule algorytm wyznaczania maksymalnego punktu pracy opiera się na wyznaczeniu pochodnej zmiany mocy ogniwa w funkcji prądu. Ze względu na możliwe błędy pomiarowe lub obliczeniowe dodatkowo został zastosowany układ logiki rozmytej, który uwzględnia pochodną mocy w czasie oraz pochodną zmiany napięcia w czasie. Wyznaczanie pochodnych sygnałów napięcia i prądu odbywa się zgodnie z diagramem (rys. 5). Na podstawie otrzymanych wyników poprzez zastosowanie reguł rozmytych, podejmowana jest decyzja o tym czy zwiększyć czy zmniejszyć wartość współczynnika wypełnienia PWM.

W momencie startu algorytmu, dla danych początkowych, po sprawdzeniu stanu zegara wykonuje się pomiar wartości prądu i napięcia. Następnie z otrzymanych wartości jest wyznaczana wartość mocy chwilowej, oraz zwiększana jest wartość licznika.

Otrzymywane wartości są zapisywane, jako kolejne elementy wektorów. Po wykonaniu 100 pomiarów wartość licznika jest zerowana oraz wyznaczane są wartości średnie prądu, napięcia i mocy. Otrzymane wartości średnie są przechowywane w dwuelementowych wektorach. W pierwszym elemencie są wartości średnie z poprzednich stu pomiarów, zaś w drugim z aktualnych.

W kolejnym kroku wartości te są od siebie odejmowane, wyznaczając zmianę napięcia, prądu i mocy. Po obliczeniu różnicy wartości średnie z drugiego elementu wektora są przypisywane do pierwszego, oraz wyznaczane są wartości pochodnych. W kolejnym kroku sprawdzana jest wartość W. Poprzez ten parametr na diagramie (rys. 5) rozumieć można zewnętrzny sygnał np. wyłącznika serwisowego.



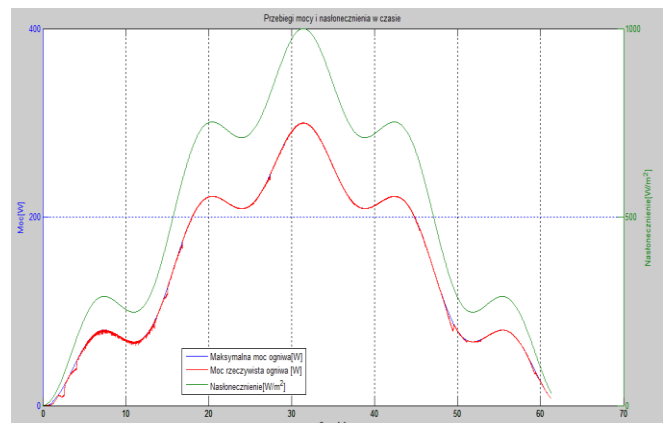
Rys. 5. Schemat wyznaczania wartości pochodnych, wykorzystywanych w sterowaniu rozmytym

#### 4. Wyniki

Opracowany model został poddany badaniom symulacyjnym. Sprawdzone zachowanie układu przy zmiennym oświetleniu w przedziale 0-1000 W/m<sup>2</sup>. Reakcję układu na gwałtowne zmiany oświetlenia zbadano stosując pobudzenie skokiem jednostkowym z rejestracją odpowiedzi.

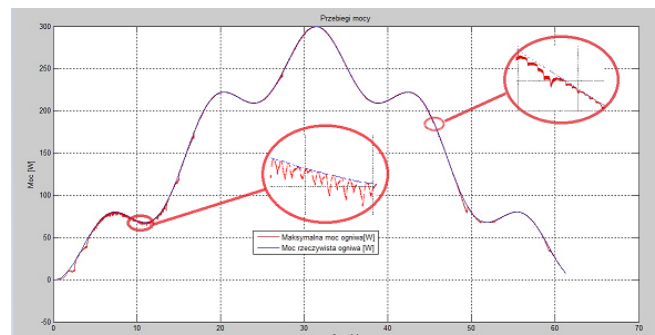
#### 4.1. Wyniki symulacji dla zmiennego oświetlenia

Na rysunkach poniżej (rys. 6-8) została przedstawiona odpowiedź układu na zmienne nasłonecznienie w zakresie 0-1000 W/m<sup>2</sup>.

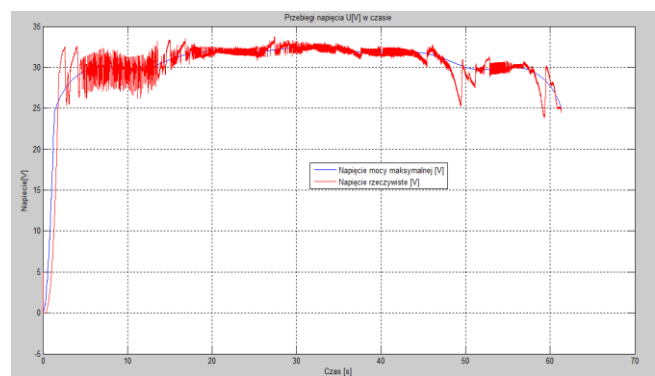


Rys. 6. Przebieg mocy maksymalnej, mocy rzeczywistej oraz nasłonecznienia w czasie

Na rysunku 6 charakter chwilowych zmian oświetlenia przedstawia krzywa oznaczona kolorem zielonym. Punkt mocy maksymalnej w każdym punkcie czasu prezentuje krzywa koloru niebieskiego. Moc wyjściową układu oznaczono kolorem czerwonym.



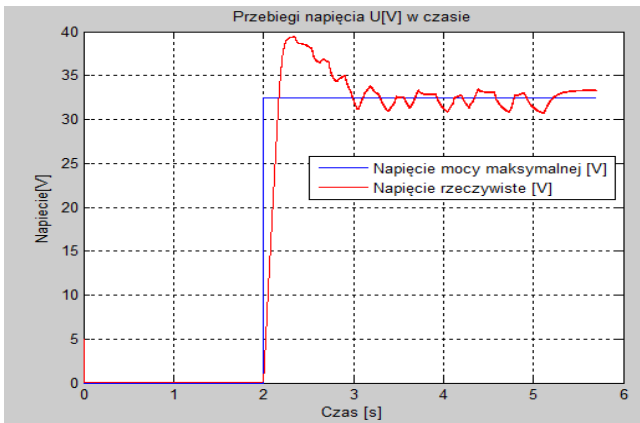
Rys. 7. Przebieg mocy maksymalnej ogniwa, oraz mocy rzeczywistej oddawanej przez układ w czasie (z powiększeniem dwóch fragmentów (wycinków))



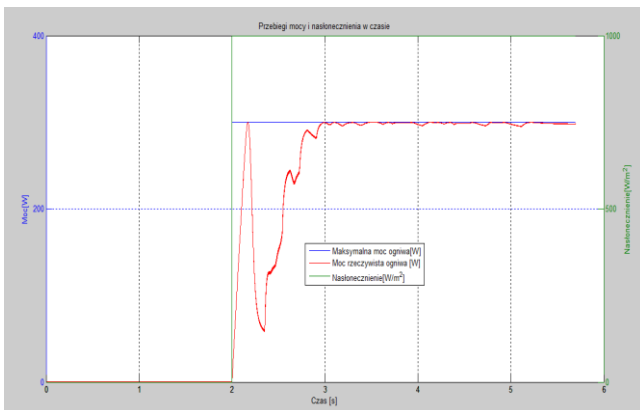
Rys. 8. Przebiegi napięcia maksymalnego punktu pracy, oraz napięcie rzeczywiste ogniwa

#### 4.2. Odpowiedź układu na skok jednostkowy

Zbadano również odpowiedź układu na skokową zmianę nasłonecznienia. W chwili t=2s wartość ta zmieniła się z 0 na 1000 W/m<sup>2</sup>. Na poniższych rysunkach (rys. 9 i 10) zostały przedstawione przebiegi napięcia i mocy ogniwa. Po czasie około 1s układ stabilizuje się a napięcie zaczyna oscylować w okolicach maksymalnego punktu pracy.



Rys. 9. Przebiegi napięcia maksymalnego punktu pracy, oraz napięcie rzeczywiste ogniwa przy skoku jednostkowym



Rys. 10. Przebiegi napięcia maksymalnego punktu pracy, oraz napięcie rzeczywiste ogniwa przy skoku jednostkowym

## 5. Wnioski

Jak widać na powyższych rysunkach, układ działa poprawnie, oscylując wokół maksymalnego punktu pracy. Już po około 1s przy skoku jednostkowym układ stabilizuje się.

Panele fotowoltaiczne przy określonych warunkach zewnętrznych posiadają punkt pracy, w którym do obciążenia dostarczana jest maksymalna moc. Punkt ten oznaczany jest jako punkt maksymalnej mocy (MPP). Kluczowym zagadnieniem sterowania rzeczywistej elektrowni fotowoltaicznej jest śledzenie i utrzymywanie punktu mocy maksymalnej. Praca w tym punkcie gwarantuje najwyższą możliwą sprawność elektrowni. Pojedyncze panele elektrowni składają się na system szeregowo-równoległy. Nierównomierne oświetlenie oraz rozrzut technologiczny charakterystyk powodują różnice w parametrach elektrycznych.

Przedstawiony artykuł jest elementem prac prowadzonych w Zakładzie Systemów Pomiarowo-Diagnostycznych Instytutu Elektrotechniki, które zmierzają do rozbudowy oprogramowania

i stworzenia kompletnego systemu projektowania i optymalizacji elektrowni fotowoltaicznych. Sterowanie punktem pracy przez zmianę prądu obciążenia prowadzi do poprawy efektywności energetycznej elektrowni. Przedstawiony model pozwala na opracowanie praktycznego algorytmu, który może być skutecznie implementowany w układzie mikroprocesorowym. Zaletą modelu probabilistycznego, ze sterowaniem rozmytym jest uwzględnianie niepewności wnoszonej przez niedokładność torów pomiarowych. Reguły decyzyjne oparte na badaniu prawdopodobieństwa spełnienia warunków logicznych dobrze modelują rzeczywiste sytuacje występujące w systemie sterowania punktem pracy elektrowni fotowoltaicznej.

## Literatura

- [1] Al-Attrash H., Batarseh I., Rustom K.: Statistical modelling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments, Applied Power Electronics Conf Exposition, APEC'05 IEEE, vol. 3, 2005, 1773.
- [2] Erickson R.W.: Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering: DC-DC Power Converters, Department of Electrical and Computer Engineering University of Colorado Boulder, CO 80309-0425.
- [3] Herzog A.V., Lipman T.E., Kammen D.M.: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS) Forerunner Volume: Perspectives and Overview of Life Support Systems and Sustainable Development, Part 4C. Energy Resource Science and Technology Issues in Sustainable Development-Renewable Energy Source.
- [4] Santos L.J.L., Antunes F., Chehab A., Cruz C.: A maximum power point tracker for PV systems using a high performance boost converter, Solar Energy 80(7):772, 2006.
- [5] Won C-Y, Kim D.H., Kim S.C., Kim W.S., Kim H-S: A new maximum power point tracker of photovoltaic arrays using fuzzy controller. 25th annual IEEE power electronics specialists conference, vol. 396, 1994.
- [6] [http://tchie.uni.opole.pl/PECO12\\_2/PL/ZarembaRodziewicz\\_PECO12\\_2.pdf](http://tchie.uni.opole.pl/PECO12_2/PL/ZarembaRodziewicz_PECO12_2.pdf)
- [7] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Odnawialne\\_%C5%BAr%C3%B3d%C5%82a\\_energii](http://pl.wikipedia.org/wiki/Odnawialne_%C5%BAr%C3%B3d%C5%82a_energii)

**Dr inż. Stefan Wójtowicz**

e-mail: s.wojtowicz@iel.waw.pl

Dr inż. Stefan S. Wójtowicz jest absolwentem Politechniki Szczecińskiej. Po ukończeniu studiów pracował jako asystent i adiunkt w Instytucie Automatyki na Wydziale elektrycznym. Od wielu lat pracuje w Instytucie Elektrotechniki w Warszawie. Jego zainteresowania naukowe koncentrują się wokół problemów pomiarów i diagnostyki. Jest autorem ponad 150 publikacji, w tym monografii i książek. W Instytucie Elektrotechniki pełnił funkcje kierownicze. Jest ekspertem w organizacjach naukowych i inżynierskich.

**Mgr inż. Maciej Zawistowski**

e-mail: maciek.zawistowski@poczta.onet.pl

Maciej Zawistowski, od 2014r. absolwent wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej, od 2013r. członek Instytutu Elektrotechniki w Międzyzlesiu.



otrzymano/received: 07.12.2014

przyjęto do druku/accepted: 03.02.2015