

Porównanie metod MPPT paneli fotowoltaicznych (P&O, IC, Fuzzy Logic) w środowisku Matlab Simulink

Streszczenie: Wiele technik śledzenia maksymalnego punktu pracy (MPPT) paneli fotowoltaicznych zostało do tej pory opracowanych. Jednakże najbardziej powszechne metody to: P&O (Perturb and Observe), IC (Incremental Conductivity) oraz Fuzzy Logic. W artykule tym zaprezentowano porównanie metod P&O, IC oraz Fuzzy Logic pod względem sprawności działania przy zmieniających się warunkach nasłonecznienia oraz stałej temperaturze pracy.

Abstract: Many techniques for tracking the maximum power point (MPPT) of photovoltaic panels have been developed so far. However, the most common methods are: P & O (perturb and Observe), IC (Incremental Conductivity) and Fuzzy Logic. This article presents a comparison between P&O and Fuzzy Logic methods in terms of efficiency, when changing some weather conditions at a constant temperature. **A comparison between P&O and Fuzzy Logic methods for tracking the maximum power point**

Słowa kluczowe: Fotowoltaika, MPPT, P&O, Fuzzy Logic

Key words: PV systems, MPPT, P&O, Fuzzy Logic

doi:10.12915/pe.2014.01.16

Wstęp

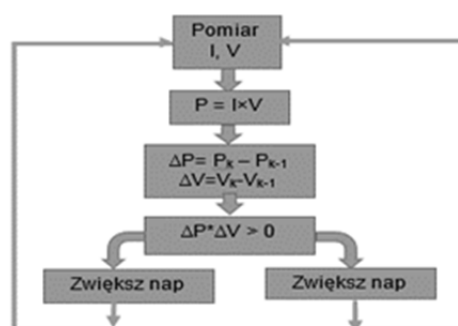
W dobie rosnącego zapotrzebowania na energię elektryczną prowadzone są badania nad alternatywnymi źródłami energii. Jednym z wielu dostępnych, odnawialnych źródeł jest energia otrzymywana z paneli fotowoltaicznych. Zainteresowanie tego rodzaju energią wzrasta, ponieważ jest to źródło powszechnie dostępne i stosunkowo łatwo przetwarzalne. Poza niewątpliwymi zaletami panele fotowoltaiczne charakteryzują się również dość niskim poziomem przetwarzania energii na poziomie 17% oraz znaczną zależnością dostarczonej energii od panujących warunków atmosferycznych. Ze względu na wymienione własności oraz nieliniową charakterystykę $I=f(U)$ w PV stosuje się algorytmy MPPT (Maximum Power Point Tracking) [1,2,3] w celu uzyskania maksymalnej mocy przy zmieniających się warunkach atmosferycznych (promieniowanie, temperatura). W ciągu ostatnich lat opracowano wiele metod śledzenia MPPT [4], jednak do najbardziej rozpowszechnionych należą:

- Perturb and Observe (P&O)
- Incremental Conductivity (IC)
- Fuzzy Logic.

W artykule tym wyjaśniono zasadę działania algorytmów przedstawionych metod osiągnięcia maksymalnego punktu pracy (MPPT) fotoogniwa dla niskiego, średniego, wysokiego oraz skokowej zmiany poziomu nasłonecznienia dla stałej wartości temperatury. Przedstawiono też schematy blokowe zasady działania metod MPPT oraz zaprezentowano algorytmy sterowania P&O, IC oraz Fuzzy Logic zrealizowanych w środowisku Matlab Simulink. Symulacje przeprowadzone zostały dla modułu SunPower SPR-305-WHT ($V_{OC}=64.2$, $I_{SC}=5.96$, $V_{MP}=54.7$, $I_{MP}=5.58$). Dokonano również porównania wymienionych metod pod kątem dynamiki odpowiedzi na skokową zmianę poziomu nasłonecznienia a także przeanalizowano wpływ liczby reguł na charakterystykę MPPT Fuzzy Logic dla 9 i 25 reguł.

Perturb and Observe P&O

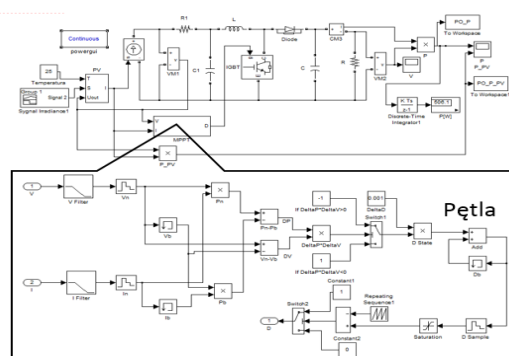
Algorytm Perturb and Observe zmienia wartość napięcia panelu fotowoltaicznego w zależności od panujących warunków atmosferycznych (poziomu nasłonecznienia oraz temperatury) [5]. Zmieniając poziom napięcia, sprawdza czy wartość mocy wydzielona przez ogniwo jest większa od mocy z poprzedniego kroku. Blokowy algorytm sterowania przedstawiony został na rys. 1.



Rys. 1. Algorytm sterowania MPPT zrealizowany metodą P&O

Główną zaletą metody Perturb and Observe jest prosty algorytm, a co za tym idzie łatwość implementacji w układzie sterowania.

Natomiast główną wadą tej metody jest ciągła oscylacja wokół maksymalnego punktu pracy fotoogniwa. Zwiększając krok, czas osiągnięcia MPP jest krótszy kosztem większych oscylacji. Zmniejszenie kroku powoduje mniejsze oscylacje wokół MPP, lecz układ wolniej reaguje na zmiany nasłonecznienia, przez co dłużej dochodzi do MPP. Wpływ zmiany kroku pętli przedstawiony został na rysunku nr. 4. Na rys. 2 przedstawiono realizację algorytmu sterowania metodą P&O zrealizowaną w środowisku Matlab Simulink [6].



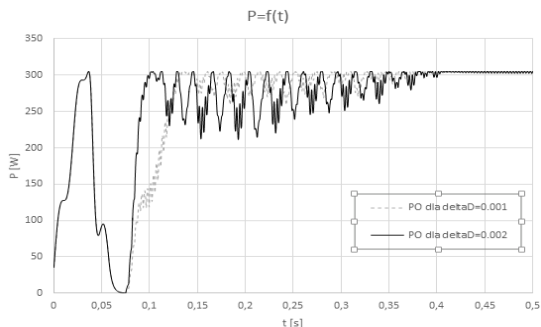
Rys. 2. Algorytm P&O zrealizowany w Simulinku

Algorytm działania polega na cyklicznym sprawdzaniu znaku iloczynu $\Delta P * \Delta V$. W zależności od tego, czy wartość

iloczynu jest większa lub mniejsza od zera (1), to współczynnik $\Delta D=0.001$ odpowiednio jest mnożony przez 1 lub -1:

- (1) Jeśli $\Delta P \cdot \Delta V > 0$ to $\Delta D * (-1)$
 Jeśli $\Delta P \cdot \Delta V < 0$ to $\Delta D * 1$

W pętli następuje dodawanie lub odejmowanie wartości z kolejnych kroków. Sygnałem wyjściowym wypracowanym przez algorytm MPPT metodą P&O jest zadana wartość napięcia panelu fotowoltaicznego. Układ MPPT tak zmienia poziom napięcia, aby moc dostarczona przez PV była maksymalna dla danego poziomu promieniowania. Na rysunku 3 przedstawiono wykres mocy PV dla różnych wartości kroków ΔD



Rys. 3. Wpływ zmiany kroku na wartość mocy dostarczonej przez panel fotowoltaiczny

Większa wartość współczynnika ΔD prowadzi do większych oscylacji w okolicy MPP.

Incremental conductance

Metoda konduktancji przyrostowej polega na pomiarze wartości i znaku ilorazu dP/dV dla interwału czasowego. pomiędzy pomiarami. Na rysunku 7 przedstawiono charakterystyki $P=f(V)$. Dla $dP/dV > 0$ nachylenie charakterystyki jest dodatnie, dla $dP/dV < 0$ nachylenie jest ujemne, natomiast dla $dP/dV = 0$ nachylenie charakterystyki jest zerowe.

- $dP/dV > 0$ z lewej strony MPPT ($V < V_{MPPT}$)
 (2) $dP/dV < 0$ z prawej strony MPPT ($V > V_{MPPT}$)
 $dP/dV = 0$ w punkcie MPPT ($V = V_{MPPT}$)

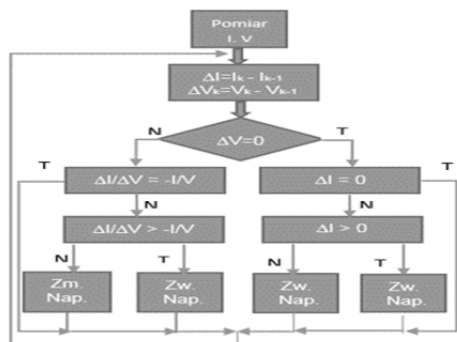
Zgodnie z równaniem $P=I \cdot V$, krzywą mocy $P=f(V)$ w punkcie pracy można przedstawić jako:

(3) $\frac{dP}{dV} = I \cdot \frac{dV}{dV} + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0$

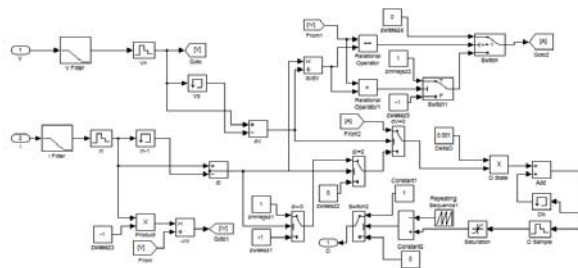
Zależności (2) można przedstawić jako:

- $dI/dV < -I/V$ z prawej strony MPPT
 (4) $dI/dV = -I/V$ w punkcie MPPT
 $dI/dV > -I/V$ z lewej strony MPPT

Na rysunku 4 przedstawiono blokowy algorytm sterowania IC [6], a na rysunku 5 realizację algorytmu IC w środowisku Matlab Simulink.



Rys. 4. Algorytm sterowania MPPT zrealizowany metodą IC

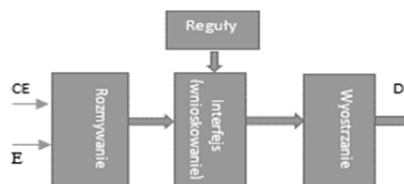


Rys. 5. Algorytm IC zrealizowany w Simulinku

Zgodnie z równaniem (4) oraz algorytmem przedstawionym na rysunku 4 prąd i napięcie są mierzone, a ich wartości są przechowywane z obecnego i poprzedniego kroku. Następnie sprawdzany jest warunek $\Delta V=0$ - jeśli jest prawdziwy (T), to badany jest warunek $\Delta I=0$. Jeżeli również jest prawdziwy, układ nie podejmuje żadnych zmian działania. Jeśli $\Delta V \neq 0$, sprawdzany jest warunek $\Delta I/\Delta V = -I/V$ i jeśli jest prawdziwy, układ również nie podejmuje żadnych zmian działania. W pozostałych przypadkach napięcie panelu fotowoltaicznego jest zwiększane lub zmniejszane.

Fuzzy Logic

Regulatory rozmyte są coraz częściej stosowane w aplikacjach realizujących sterowanie odnawialnymi źródłami energii [8]. Główną przewagą regulatorów rozmytych nad tradycyjnymi jest łatwość implementacji, ponieważ nie wymagają znajomości transmitancji układu, wymagają natomiast wiedzy eksperckiej na temat sterowanego obiektu. Zasadę działania regulatora rozmytego można przedstawić w trzech krokach: rozmywanie, interferencja z bazą reguł oraz wyostrzenie. Wymienione komponenty oraz schemat blokowy przedstawione zostały na rys. 6.



Rys. 6. Regulator Fuzzy Logic PI

Zaproponowany regulator działa na zasadzie rozmytego regulatora PI. Na przedstawionym schemacie blokowym zmienne $E(k)$ -uchyb (5) obliczony jako iloraz $\Delta P/\Delta V$ oraz $CE(k)$ -zmiana uchybu (6) poddawane są rozmywaniu. Polega to na określeniu stopnia przynależności danej wartości wielkości wejściowej do każdego z odpowiednich jej zbiorów rozmytych pokrywających zakres możliwych wartości wejściowych. Po określeniu stopnia przynależności dane poddawane są wnioskowaniu. W oparciu o bazę reguł, obliczana zostaje wynikowa funkcja przynależności. Funkcja ta następnie poddawana jest wyostrzeniu. Polega to na przekształceniu rozmytego zbioru będącego wynikiem wnioskowania na wartość ostrą D . Wyostrzenie odbywa się metodą środka ciężkości (COA) opisaną zależnością (7).

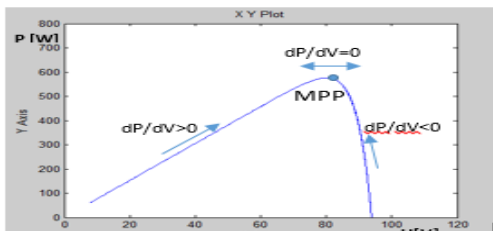
(5) $E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)}$

(6) $CE(k) = E(k) - E(k-1)$

(7) $D = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)}$

gdzie: $P_{pv}(k)$ – moc w k-tym kroku, $P_{pv}(k-1)$ – moc w kroku $k-1$, $\mu(D_j)$ – stopień przynależności do zbioru, D_j – wartość zmiennej wyjściowej, n – liczba aktywnych reguł.

Uchyb $E(k)$ odzwierciedla położenie punktu pracy obciążenia. Jeśli $E(k) > 0$, punkt obciążenia znajduje się po lewej stronie charakterystyki. W przypadku gdy $E(k) < 0$, punkt obciążenia znajduje się po prawej stronie charakterystyki, podczas gdy zmienna $CE(k)$ odzwierciedla kierunek przesuwania się punktu obciążenia. W punkcie MPP wartość błędu i jego zmiany jest równa zero, zaś zmienna D (wartość wyostrzona z regulatora) jest współczynnikiem dodawanym lub odejmowanym w pętli. Wartość wyjściowa pętli jest wartością zadającą poziom napięcia panelu fotowoltaicznego. Na rysunku 7 przedstawiono położenie punktu obciążenia w zależności od wartości ilorazu dP/dV .



Rys. 7. $P=f(U)$ dla zależności dP/dV

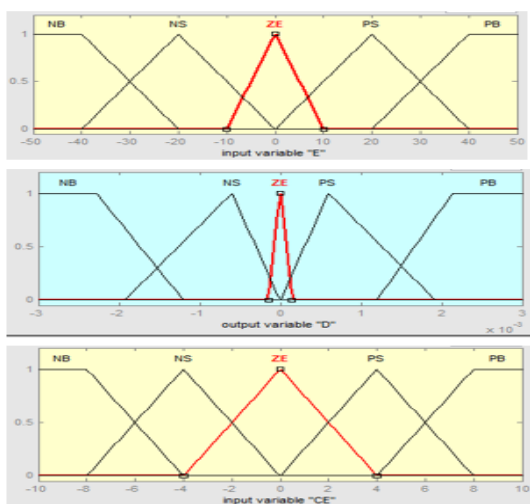
MPPT metodą Fuzzy Logic

Układ regulatora MPPT [9,10] Fuzzy Logic zbudowany jest w oparciu o metodę wnioskowania Mamdaniego. Na podstawie wiedzy eksperckiej zdefiniowano tabelę reguł.

Tabela 1. Tablica 25 reguł

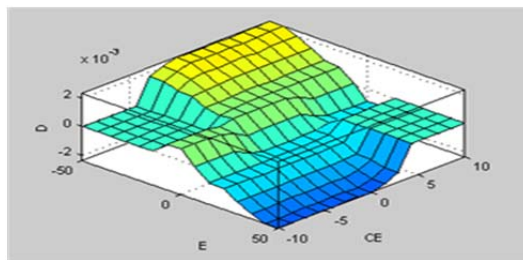
E \ CE	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	ZE	ZE	PB	PB	PB
NS	ZE	ZE	PS	PS	PS
ZE	PS	ZE	ZE	ZE	NS
PS	NS	NS	NS	ZE	ZE
PB	NB	NB	NB	ZE	ZE

Zbiory przynależności E, CE oraz D przedstawiono na rysunku 8



Rys. 8. Zbiory przynależności E, D, CE dla 25 reguł

Powierzchnia sterowania dla 25 reguł przedstawiona została na rysunku 9.

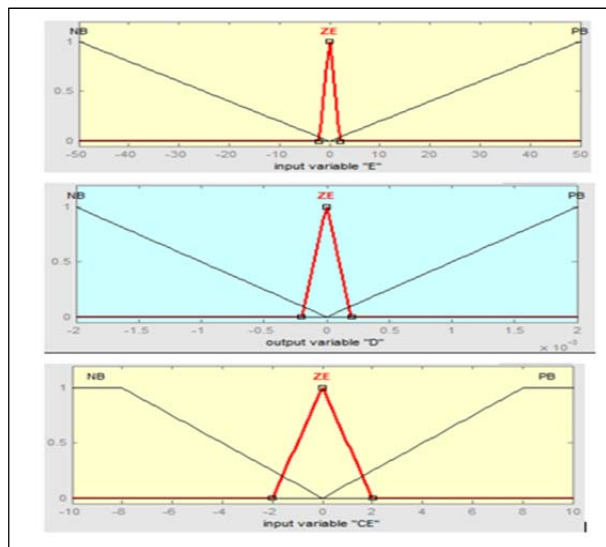


Rys. 9. Powierzchnia sterowania dla 25 reguł

W tabeli nr 2. oraz rysunku 10 przedstawiono parametry regulatora Fuzzy Logic dla trzech zbiorów przynależności zmiennych E, CE, D oraz dziewięciu reguł [11].

Tabela 2. Tablica dla 9 reguł

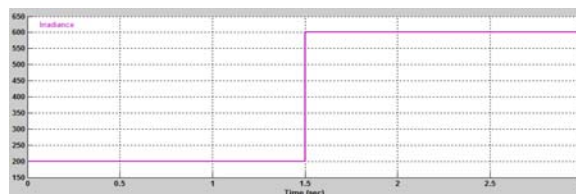
E \ CE	NB	ZE	PB
NB	ZE	PB	PB
ZE	PS	ZE	NS
PB	NB	NB	ZE



Rys. 10. Zbiory przynależności E, D, CE dla 9 reguł

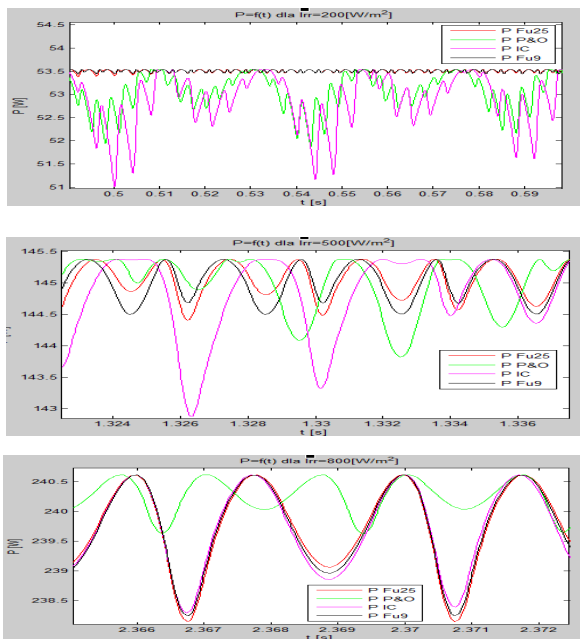
Badania Symulacyjne

Badania symulacyjne przeprowadzono dla trzech poziomów nasłonecznienia: 200, 500, 800 [W/m²], oraz skokowej zmiany z 200 na 600 [W/m²]. Na rysunku 11 przedstawiono teoretyczny sygnał skokowej zmiany nasłonecznienia.



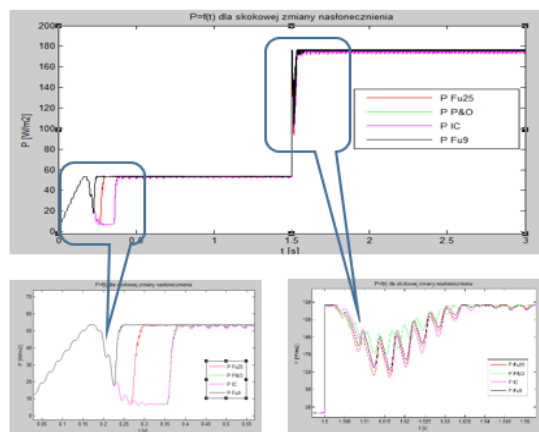
Rys. 11. Sygnał skokowej zmiany poziomu nasłonecznienia [W/cm²]

Badania symulacyjne wykonano dla sterowania metodą P&O, IC, Fuzzy Logic (dla 5 zbiorów przynależności i 25 reguł) oraz Fuzzy Logic (dla 3 zbiorów przynależności i 9 reguł). Na rysunku 12 przedstawiono porównanie wymienionych metod sterowania MPPT dla poziomu nasłonecznienia 200, 500 oraz 800 [W/m²].



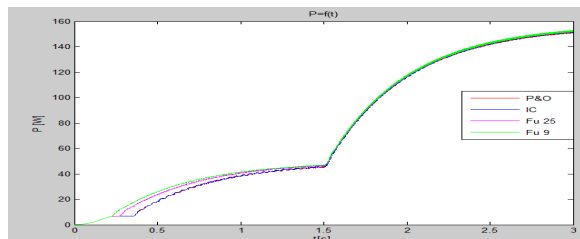
Rys. 12. MPPT dla $I_{rr} = 200$, $I_{rr} = 500$, $I_{rr} = 800$ [W/m^2]

Natomiast na rysunku 13 porównano przedstawione metody dla skokowej zmiany poziomu nasłonecznienia przedstawionego na rysunku 11.



Rys. 13. Moc fotoogniwa dla skokowej zmiany poziomu nasłonecznienia

Moc wydzieloną na obciążeniu przekształtnika DC-DC przedstawiono na rysunku 14.



Rys. 14 Moc wyjściowa przekształtnika

Tabela 3. Moc dostarczona przez PV dla skokowej zmiany nasłonecznienia (rys. 11)

Fu 25	Fu 9	IC	P&O
226.9 [W]	228.8 [W]	222.6 [W]	222.2 [W]

Wnioski

Na podstawie przedstawionych wyników można stwierdzić, iż dla poziomu nasłonecznienia $I_{rr}=200$ i 500 [W/m^2] metody Fuzzy Logic Fu_9 (9 reguł) oraz Fu_25 (25 reguł) charakteryzują się znacznie mniejszymi oscylacjami w porównaniu do P&O i IC, natomiast dla $I_{rr}=800$ [W/m^2] metody P&O oraz IC wykazują mniejsze oscylacje w porównaniu do Fuzzy Logic. Porównano również metody MPPT dla skokowej zmiany poziomu nasłonecznienia I_{rr} (rys. 12). Wykresy otrzymane dla skokowej zmiany I_{rr} (rys. 14, rys. 15) przedstawiają znacznie szybszą reakcję metod FLC na zachodzące zmiany, co powoduje zwiększenie mocy dostarczonej do odbiornika (tabela 3). Dokonano również porównania sterowania śledzeniem MPPT za pomocą regulatora Fuzzy Logic dla 25 i 9 reguł sterowania. Na podstawie otrzymanych charakterystyk można stwierdzić iż, regulator FLC przy dziewięciu regułach charakteryzuje się szybszą reakcją na zmianę nasłonecznienia oraz mniejszymi oscylacjami w porównaniu do pozostałych sposobów regulacji. Reasumując, sterując algorytmem MPPT z wykorzystaniem regulatora FLC zbudowanym w oparciu o 9 reguł, uzyskuje się największą moc przy zmiennym poziomie nasłonecznienia.

LITERATURA

- [1] H.Altas, A.M.Sharaf, "A photovoltaic array simulation model for MATLAB-Simulink GUI Environment," Proc. Of International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP'07, May 21-23, 2007, Capri, Italy
- [2] A. Durgadevi, S. Arulselvi and S.P.Natarajan. „Study and Implementation of Maximum Power Point Tracking (MPPT) Algorithm for Photovoltaic Systems”
- [3] Kazimierz Buczek, Wiesława Malska, Sebastian Benar, „Wykorzystanie programu PSIM do modelowania małej elektrowni słonecznej”, Przegląd Elektrotechniczny, 2011/8
- [4] David Sanz Morales „Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications”
- [5] D.K. Sharma, G. Purohit „Advanced Perturbation and Observation (P&O) based Maximum Power Point Tracking (MPPT) of a Solar Photo-Voltaic System”
- [6] Siva Gensh Malla, IIT Bhubaneswar, India. „PV System With MPPT”
- [7] Zhou Xuesong, Song Daichun, Ma Youjie, Cheng Deshu Tianjin University of Technology Tianjin, China. „The simulation and design for MPPT of PV system Based on Incremental Conductance Method”
- [8] Abdullah M. Noman, Khaled E. Addoweesh, and Hussein M. Mashaly. „A Fuzzy Logic Control Method for MPPT of PV Systems”
- [9] H.E.A. Ibrahim „Comparison Between Fuzzy and P&O Control for MPPT for Photovoltaic System Using Boost Converter”
- [10] G. Balasubramanian, S. Singaravelu „Fuzzy logic controller for the maximum power point tracking in photovoltaic system”
- [11] C. S. Chin1, P. Neelakantan, H. P. Yoong, K. T. K. Teo „Fuzzy Logic Based MPPT for Photovoltaic Modules Influenced by Solar Irradiation and Cell Temperature”

Autorzy: mgr inż. Paweł Surma, ICN Polfa Rzeszów S.A., Dział ds. Informatyki, ul. Przemysłowa 2, 35-959 Rzeszów, e-mail: pawel-s3@o2.pl