

EXTREMUM AIR FLOW CONTROL FOR PEM FUEL CELL SYSTEM

Arkadiusz Małek, Mirosław Wendeker

Lublin University of Technology
Department of Internal Combustion Engines and Transport
36 Nadbystrzycka St., 20-618 Lublin, Poland
phone/fax: +48 53 81 258
e-mail: a.malek@pollub.pl

Abstract

The air supply method of the cathode side of the fuel cell can contribute to improvement of the system performance. A fuel cell is a stochastic object. Application an adaptive extremum control with bi-parameter identification provides to automatical adjusting the parameters of a controller to actual characteristics of an object. In this paper was described air flow control of the fuel cell in order to determine and hold the maximal value of net power produced by the fuel cell stack, regardless of changes of the parameters of the object of control and its outer environment. The presented control algorithm can be used for other types of fuel cells systems of both high and low power. Proposed algorithm control can be used in other systems of fuel cells, both small as and high-power. Research confirmed the possibility of the use of the extreme control for finding of points work of fuel cell with the maximum power net. The algorithm containing the function of the adaptation was in a position to realize put aim control. If the adaptive algorithm in its basic form is in a position to learn and realize put aim control then the further heuristic extension of the algorithm can only improve it activity. Further possibilities of the development stand before the adaptive algorithm which uses the information a priori on the characterization of the control object.

Keywords: fuel cell, adaptive control, extremum control, control algorithm

STEROWANIE EKSTREMALNE PRZEPLYWEM POWIETRZA W SYSTEMIE OGNIW PALIWOWYCH TYPU PEM

Streszczenie

Sposób zasilania w tlen strony katodowej ogniwa paliwowego istotnie wpływa na jego żywotność i efektywność wykorzystania energii chemicznej wodoru. Ogniwo paliwowe jest obiektem stochastycznym. Zastosowanie adaptacyjnego sterowania ekstremalnego z identyfikacją dwuparametryczną umożliwia dostosowanie się algorytmu sterowania do aktualnej charakterystyki ogniwa paliwowego. W referacie opisano sterowanie powietrzem zasilającym ogniwo w celu określenia i stabilizacji pracy systemu w punkcie maksymalnej mocy netto bez względu na zmieniające się właściwości ogniwa paliwowego i jego otoczenia. Zaproponowany algorytm sterowania może być zastosowany w innych systemach ogniw paliwowych, zarówno małej jak i dużej mocy. Badania potwierdziły możliwość zastosowania sterowania ekstremalnego do odnajdywania punktów pracy ogniwa paliwowego z maksymalną mocą netto. Algorytm zawierający funkcję adaptacji był w stanie zrealizować postawiony cel sterowania. Jeżeli algorytm adaptacyjny w swojej podstawowej formie jest w stanie uczyć się i realizować postawiony cel sterowania to dalsza heurystyczna rozbudowa algorytmu może tylko poprawić jego działanie. Dalsze możliwości rozwoju stoją przed algorytmem adaptacyjnym, który wykorzystuje informacje a priori o charakterystyce obiektu sterowania.

Słowa kluczowe: ogniwo paliwowe, sterowanie ekstremalne, sterowanie adaptacyjne, algorytm sterowania

1. Wprowadzenie

Zwiększanie wydajności, sprawności to stała tendencja obserwowalna w sektorze energetycznym. Na skutek kurczenia się zasobów paliw kopalnianych ludzkość zmuszona jest do oszczędnego korzystania z nich. Mimo nieustannych udoskonaleń współczesne pojazdy z napędem benzynowym wykorzystują efektywnie zaledwie 20-25% zawartej w paliwie energii. Zostaną one

w przyszłości zastąpione ogniwami paliwowymi. Ogniwo paliwowe jest urządzeniem elektrochemicznym, w którym następuje łączenie wodoru z tlenem pochodzącym z powietrza. Produktami reakcji są: elektryczność, ciepło i woda. W czasie pracy ogniwa paliwowego nie zachodzi spalanie w płomieniu, tak więc nie wydzielają się liczne, związane z takim procesem zanieczyszczenia. W ogniwie paliwowym następuje bezpośrednia zamiana energii chemicznej paliwa na energię elektryczną. Taka zamiana pozwala na lepsze wykorzystanie energii chemicznej zawartej w paliwie. Systemy ogniw paliwowych optymalizuje się w celu uzyskiwania jak największej sprawności. Można to czynić na wiele sposobów, przede wszystkim poprzez odpowiedni dobór komponentów do budowy takiego systemu oraz efektywne sterowanie nimi. W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu wydatku powietrza na moc generowaną przez ogniwo paliwowe typu PEM. Udowodniono również, że wprowadzenie do algorytmu sterowania ogniwem paliwowym funkcji adaptacji pozwala na odnalezienie punktu pracy z maksymalną mocą netto. Oznacza to możliwie efektywne wykorzystanie energii chemicznej zawartej w paliwie.

2. Idea sterowania powietrzem zasilającym ogniwo paliwowe

Przedmiotem badań był moduł Nexa firmy Ballard, który jest pierwszym komercyjnym ogniwem paliwowym.

Podczas poboru prądu elektrycznego z ogniwa paliwowego wykorzystywany jest tlen zasilający katodę. Wprowadzono pojęcie chwilowego współczynnika nadmiaru powietrza λ , który jest definiowany jako:

$$\lambda = \frac{W_{\text{pow,wlot}}}{W_{\text{pow,reakcji}}} [-]. \quad (1)$$

Ilość powietrza na wlocie do katody $W_{\text{pow,wlot}}$ jest mierzona za pomocą objętościowego przepływomierza powietrza. Ilość powietrza potrzebnego do reakcji $W_{\text{pow,reakcji}}$ jest obliczana z natężenia prądu stosu I_{st} z wykorzystaniem równania elektrochemicznego:

$$W_{\text{pow,reakcji}} = \frac{M_{\text{pow}}}{q_{O_2}} \cdot \frac{nI_{st}}{F \cdot 4} \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right], \quad (2)$$

$$W_{\text{pow,reakcji,NEXA}} = 0,86 \cdot I_{st} \left[\frac{\text{l}}{\text{min}} \right]$$

gdzie: n jest liczbą ogniw w stosie, F jest liczbą Faradaya (96485 C), M_{pow} jest masą molową powietrza, zaś q_{O_2} jest objętościowym udziałem tlenu w powietrzu.

Duży wydatek powietrza, a co za tym idzie wysoka wartość współczynnika λ , poprawia moc stosu ogniw N_{st} i moc netto N_{net} . Jednak po przekroczeniu optymalnej wartości następuje bardzo szybki spadek N_{net} spowodowany zwiększonym zapotrzebowaniem mocy na napęd sprężarki N_{ss} (rysunek 1). Zatem moc potrzebna do napędu sprężarki jest stratą bierną dla systemu ogniw paliwowych.

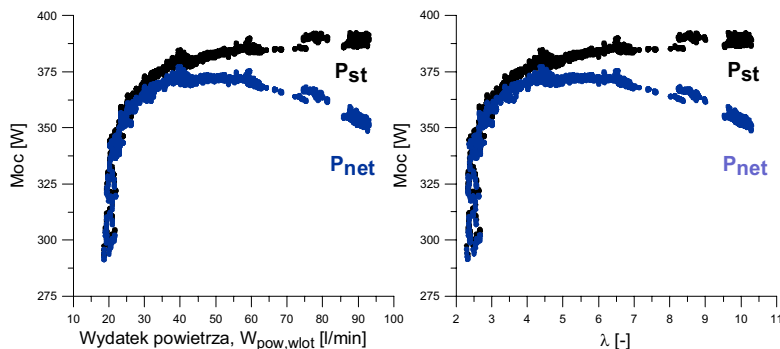
3. Sformułowanie problemu sterowania i stanowisko badawcze

Można stwierdzić, że ogniwo paliwowe jest obiektem zmieniającym w czasie swoje właściwości. Szereg zjawisk fizycznych i chemicznych w nim zachodzących wiąże wiele sprzężeń zwrotnych i zapętleń. Jego parametry pracy zależą również od warunków otoczenia (temperatura, ciśnienie i wilgotność powietrza). Także każde ogniwo paliwowe posiada inne właściwości tuż po opuszczeniu taśmy produkcyjnej.

Do zjawisk mających największy wpływ na niepowtarzalność pracy ogniwa paliwowego można zaliczyć:

- naturalne starzenie się materiałów, z których zostało wykonane ogniwo,
- chwilowe „zatrucie” elektrod powodowane zanieczyszczeniami substratów reakcji,
- zjawisko zatapiania anody,

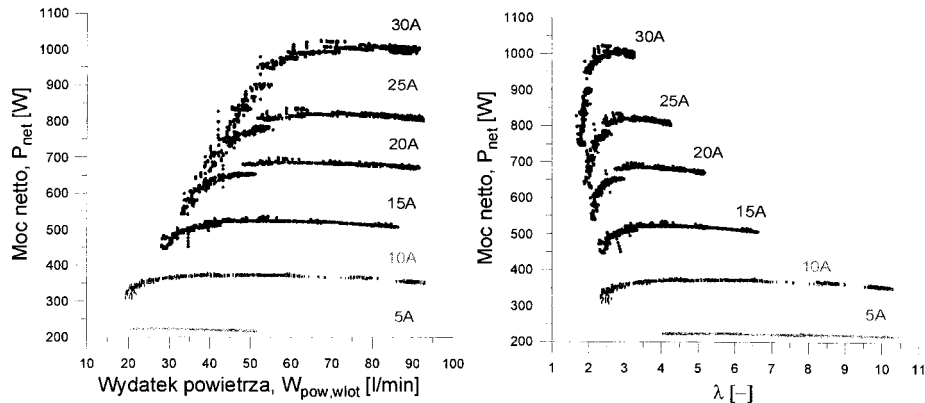
różnice w wymiarach kolektorów zasilających powodowane rozrzutem wymiarów w zakresie tolerancji, a mające wpływ na dynamikę przepływu substratów.



Rys. 1. Zależność mocy stosu ogniwi i mocy netto od wydatku powietrza i współczynnika nadmiaru powietrza λ dla obciążenia 10 A

Fig. 1. The fuel cell stack power and net power at different air flow and air excess ratio λ by stack current of 10A

Badania wstępne wykazały, że dla poszczególnych obciążeń prądowych stosu ogniwi, istnieje optymalna wartość współczynnika nadmiaru powietrza λ , której odpowiada maksimum mocy netto N_{net} (rysunek 2).



Rys. 2. Zależność mocy netto systemu ogniwi paliwowych od wydatku powietrza i współczynnika nadmiaru powietrza λ

Fig. 2. The fuel cell stack system net power at different stack current and different air flow and air excess ratio λ

Wprowadzając wskaźnik jakości oparty na maksymalizacji mocy netto produkowanej przez ogniwo oraz stosując algorytmy śledzące i utrzymujące pracę ogniwa w punkcie optymalnym można liczyć na poprawę sprawności ogniwa.

Celem sterowania jest odnalezienie i utrzymanie maksymalnej wartości mocy netto produkowanej przez stos ogniwi paliwowych w aktualnych warunkach pracy.

W celu przejścia kontroli nad wydatkiem powietrza wytwarzanego przez sprężarkę konieczne było stworzenie sterownika w układzie master-slave (rysunek 3). Za funkcję związane z

procesem rozpoczynania i kończenia pracy systemu ogniwi paliwowych oraz funkcje bezpieczeństwa odpowiadał sterownik oryginalny. W celu przeprowadzenia badań został wykonany sterownik badawczy, który współpracując z regulatorem prędkości obrotowej silnika bezszczotkowego, zmieniał wydatek pompy powietrza. W tym samym czasie do wyjścia sterującego sterownika oryginalnego został podłączony inny silnik bezszczotkowy. Takie rozwiązanie umożliwiło testowanie różnych metod sterowania wydatkiem powietrza bez względu na procedury zapisane na stałe w pamięci sterownika oryginalnego. Sterownik badawczy zbierał informacje dotyczące aktualnego stanu systemu, a następnie po przekonwertowaniu na sygnał cyfrowy wykorzystywał je do obliczenia wartości sterującej dla następnego kroku czasowego. Podstawę sterownika badawczego stanowił układ scalony zawierający 32-bitowy procesor i szereg wejść i wyjść zarówno analogowych jak i cyfrowych. Ze względu na dostępność i szybkość obliczeń do napisania oprogramowania sterownika badawczego zostało wykorzystane środowisko C++. Sterownik badawczy kontaktował się z panelem sterowania umieszczonym na komputerze przenośnym za pomocą łącza RS 232. Umożliwiło to archiwizację danych na dysku twardym komputera a także wykorzystanie mocy obliczeniowej procesora komputera przenośnego.



Rys. 3. Schemat przepływu informacji na stanowisku badawczym
Fig. 3. The test bed information flow diagram

4. Algorytm adaptacyjny z identyfikacją dwuparametryczną

Idea sterowania adaptacyjnego

Do spełnienia celu sterowania wykorzystano sterowanie ekstremalne. Termin ten oznacza zastosowanie odpowiedniego algorytmu szukania ekstremum (minimum lub maksimum) wskaźnika jakości, który charakteryzuje pracę systemu [1]. W niniejszym przypadku został obrany wskaźnik jakości w postaci mocy netto generowanej przez system ogniwi paliwowych. Zadaniem algorytmu sterowania było odnalezienie i utrzymanie pracy systemu z maksymalną mocą netto bez względu na zmieniające się właściwości obiektu sterowania i jego otoczenia.

Zastosowanie adaptacyjnego sterowania ekstremalnego z identyfikacją dwuparametryczną umożliwia dostosowanie algorytmu sterowania do obiektu. Adaptacja potrzebna jest wówczas, gdy z powodu niepewności projektant nie może zaprojektować algorytmu tak, by działał on w sposób optymalny dla konkretnego obiektu i zakłóceń lub gdy obiekt zmienia się a dane przyjęte na etapie projektowania po pewnym czasie przestają być aktualne.

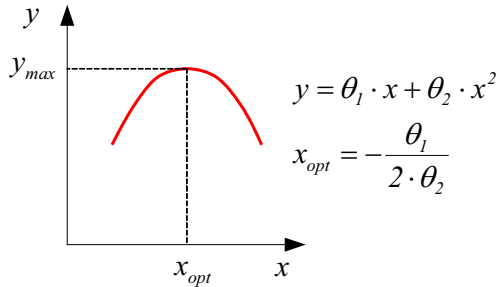
Opis algorytmu adaptacyjnego z identyfikacją dwuparametryczną

W niniejszym referacie model mocy netto wytwarzanej przez stos ogniwi paliwowych jest zapisany za pomocą następującej zależności:

$$y = \theta_1 \cdot x + \theta_2 \cdot x^2. \quad (3)$$

Zadaniem algorytmu sterowania jest wyznaczenie (estymacja) takich wartości współczynników θ_1 i θ_2 , które odpowiadają maksymalnej mocy netto (rysunek 4):

$$x_{opt} = -\frac{\theta_1}{2 \cdot \theta_2}. \quad (4)$$



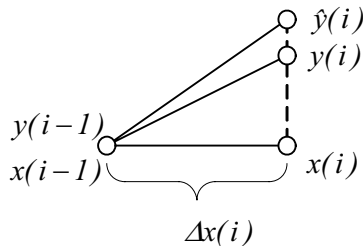
Rys. 4. Sposób wyznaczania maksimum funkcji wykładniczej drugiego stopnia
Fig. 4. Finding the maximum of exponential function of second order

Na podstawie modelu obliczane jest sterowanie optymalne:

$$x(i) = -\frac{\theta_1(i-1)}{2 \cdot \theta_2(i-1)} + \zeta(RND - 0.5) \quad (5)$$

gdzie: RND – jest wartością losową z zakresu 0 – 1 o równym prawdopodobieństwie wystąpienia poszczególnych wartości, zaś ζ jest współczynnikiem wielkości zaburzenia wielkości sterującej $x(t)$.

W przypadku, gdy charakterystyka własności systemu jest modelowana poprzez równanie kwadratowe (3), bardzo pomocne jest skorzystanie z metody przyrostowej – rysunek 5. Zastosowanie jej pozwala na zmniejszenie ilości niewiadomych występujących w równaniach algorytmu w porównaniu z metodą opartą na obliczeniach wartości absolutnych [2]. W ten sposób wyeliminowana zostaje wartość absolutna mocy netto $y(t)$. To pozostawia już tylko dwa parametry do estymacji i sprawia, że rekursywna estymacja jest szybsza i bardziej skuteczna.



Rys. 5. Graficzne zobrazowanie metody przyrostowej
Fig. 5. Graphical presentation of the incremental method

W metodzie tej przyrosty poszczególnych wartości można zapisać za pomocą następujących wzorów:

$$\Delta \hat{y}(i) = \hat{y}(i) - y(i-1), \quad (6)$$

$$\Delta x(i) = x(i) - x(i-1), \quad (7)$$

$$\Delta x^2(i) = x^2(i) - x^2(i-1) \quad (8)$$

Wykorzystując te zależności szacowana jest moc efektywna:

$$\Delta\hat{y}(i) = \theta_1(i-1) \cdot \Delta x(i) + \theta_2(i-1) \cdot \Delta x^2(i) \quad (9)$$

oraz wartość efektywna:

$$\hat{y}(i) = y(i-1) + \theta_1(i-1) \cdot \Delta x(i) + \theta_2(i-1) \cdot \Delta x^2(i) + 0.01(RND - 0.5) \quad (10)$$

gdzie: RND – sygnał zaburzający, który jest wartością losową z zakresu 0 – 1 o równym prawdopodobieństwie wystąpienia poszczególnych wartości.

Z pomiaru otrzymywana jest rzeczywistą wartość $y(i)$. Następnie obliczany jest błąd szacowania:

$$e(i) = y(i) - \hat{y}(i) \quad (11)$$

i przeskalowane są wartości K , L , P i θ według wzorów:

$$L_1 = P_{11}(i-1) \cdot x(i) + P_{12}(i-1) \cdot x^2(i) \quad (12)$$

$$L_2 = P_{21}(i-1) \cdot x(i) + P_{22}(i-1) \cdot x^2(i)$$

$$l = L_1 \cdot x(i) + L_2 \cdot x^2(i), \quad (13)$$

$$K_1 = \frac{L_1}{\beta + 1} \quad (14)$$

$$K_2 = \frac{L_2}{\beta + 1}$$

$$\begin{aligned} \theta_1(i) &= \theta_1(i-1) - K_1 \cdot e(i) \\ \theta_2(i) &= \theta_2(i-1) - K_2 \cdot e(i) \end{aligned} \quad (15)$$

$$P_{11}(i) = \frac{P_{11}(i-1) - \frac{L_1^2}{\beta + 1}}{\beta}$$

$$P_{12}(i) = \frac{P_{12}(i-1) - \frac{L_1 \cdot L_2}{\beta + 1}}{\beta}$$

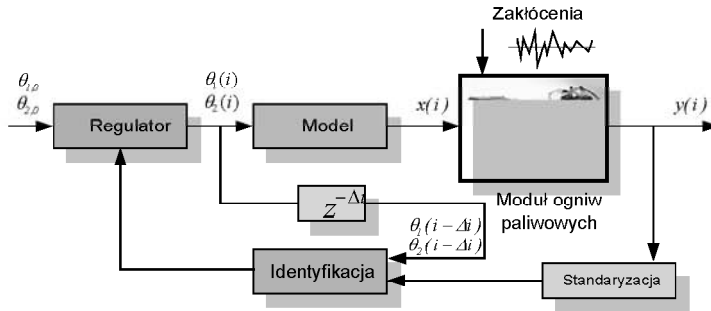
$$P_{21}(i) = \frac{P_{21}(i-1) - \frac{L_1 \cdot L_2}{\beta + 1}}{\beta}$$

$$P_{22}(i) = \frac{P_{22}(i-1) - \frac{L_2^2}{\beta + 1}}{\beta} \quad (16)$$

Na podstawie modelu wyznacza się sterowanie optymalne dla kolejnego kroku czasowego:

$$x(i+1) = -\frac{\theta_1(i)}{2 \cdot \theta_2(i)} + \zeta(RND - 0.5). \quad (17)$$

Sterowanie adaptacyjne jest próbą rozwiązania problemu szybkiego przestrajania regulatora – rysunek 6. Istotą takiego sterowania polega na automatycznym dopasowaniu parametrów regulatora do zmieniających się właściwości obiektu regulacji i jego otoczenia tak, aby zapewnić większą odporność układu na zaistniałe zmiany [3].

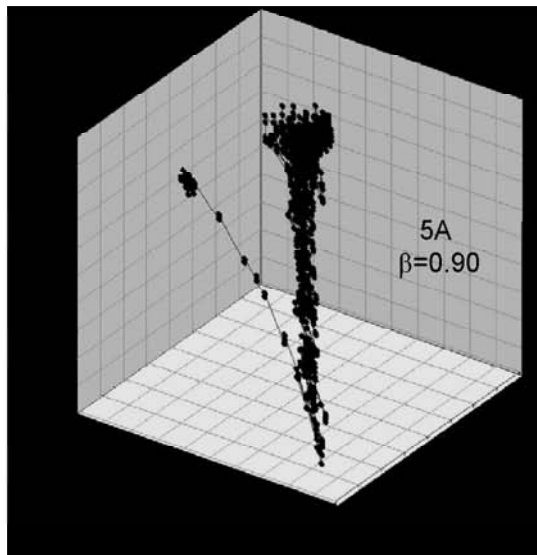


Rys. 6. Schemat adaptacyjnego sterowania ogniwem paliwowym
 Fig. 6. Fuel cell stack adaptive control flowchart

5. Wyniki badań algorytmu adaptacyjnego z identyfikacją dwuparametryczną

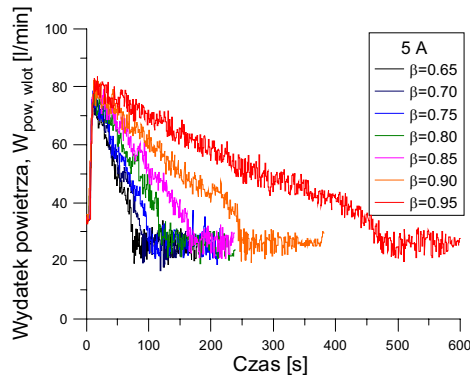
Badania polegały na zadaniu sterownikowi warunków początkowych θ_1 i θ_2 bardzo odległych od wartości optymalnych. Wywołało to zmianę prędkości obrotowej silnika elektrycznego sprężarki na obroty odpowiadające bardzo dużym wydatkom powietrza (ponad 80 l/min). Z tego poziomu następowało stopniowe zmniejszanie prędkości obrotowej aż do uzyskania maksymalnej mocy dla tego poziomu obciążenia.

Ścieżkę algorytmu sterującego w celu poszukiwania optimum mocy netto przedstawia rysunek 7.



Rys. 7. Trajektorja algorytmu sterującego w celu poszukiwania optimum mocy netto
 Fig. 7. Record of the algorithm's iterations in search of maximum net power

Szybkość odnajdowania wartości optymalnej współczynnika λ zależy również od współczynnika szybkości uczenia się β , który charakteryzuje pracę algorytmu adaptacyjnego – rysunek 8. Wartość współczynnika β ma ogromny wpływ na właściwości regulatora a tym samym na jakość regulacji. Dla małej wartości β algorytm regulacji działa bardzo „nerwowo”, jednak czas potrzebny do odnalezienia optimum jest bardzo krótki. Praca układu z większymi współczynnikami β charakteryzuje się większą stabilnością i odpornością na wszelkiego rodzaju zakłócenia w stanach ustalonym. W stanach dynamicznych algorytmy te są wolniejsze co skutkuje dłuższym okresem osiągnięcia stabilizacji.



Rys. 8. Wpływ współczynnika β na szybkość regulacji
Fig. 8. Relationship between β and speed of the controller's response

6. Wnioski

Badania potwierdziły możliwość zastosowania sterowania ekstremalnego do odnajdywania punktów pracy ogniwa paliwowego z maksymalną mocą netto. Algorytm zawierający funkcję adaptacji był w stanie zrealizować postawiony cel sterowania. Jeżeli algorytm adaptacyjny w swojej podstawowej formie jest w stanie uczyć się i realizować postawiony cel sterowania to dalsza heurystyczna rozbudowa algorytmu może tylko poprawić jego działanie. Dalsze możliwości rozwoju stoją przed algorytmem adaptacyjnym, który wykorzystuje informacje *a priori* o charakterystyce obiektu sterowania. Dzięki temu w każdej chwili aktualny punkt pracy może być szybko na niej zlokalizowany. Może to być wykorzystane przy zastosowaniu metodologii sterowania wykorzystującej charakterystyki startowe.

Literatura:

- [1] Bubnicki, Z., *Teoria i algorytmy sterowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2002.
- [2] Wellstead, P. E., Scotson, P. G., *Self-tuning extremum control* IEE Proceedings, Vol. 137, Pt. D, No. 3, MAY 1990.
- [3] Wendeker, M., Taccani, R., Małek, A., Czarnigowski, J., Adaptive control of the fuel cell system, International Conference HYPOTHESIS V, Porto Conte, Sardinia, Włochy 7-10 września 2003.