

Identyfikacja modelu przedziałowego kąta elewacji orientowanego ogniwa słonecznego

Streszczenie. W pracy omówiono opis dynamiki kąta elewacji orientowanego ogniwa słonecznego z wykorzystaniem przedziałowego równania stanu. Omówiono również metodę identyfikacji przedziałowych parametrów modelu na podstawie przebiegu czasowego odpowiedzi skokowej rzeczywistego obiektu. Zastosowanie proponowanej metody identyfikacji pokazano na przykładzie rzeczywistego laboratoryjnego ogniwa słonecznego.

Abstract. In the paper a description of dynamics an elevation angle for oriented PV system with the use of an interval state space equation is discussed. A step response based identification method for the considered model was also presented. An example of the identification for experimental PV system was also presented. **(An identification of interval model an elevation angle in oriented PV system)**

Słowa kluczowe: orientowane ogniwa słoneczne, systemy przedziałowe, identyfikacja

Keywords: Oriented PV systems, interval systems, identification.

doi:10.12915/pe.2014.08.57

Uwagi wstępne

Synteza algorytmu sterowania orientowanym ogniwem fotowoltaicznym (PV) wymaga znajomości modelu matematycznego, opisującego dynamikę tego obiektu. W przypadku rozważanego systemu dynamicznego najbardziej istotna jest znajomość modeli dynamiki obu kątów orientacji ogniwa, czyli kąta elewacji oraz kąta azymutu.

Wcześniejsze badania autorów (zob. np. [10]) wykazały, że kąt azymutu jest stosunkowo prosty do opisu, natomiast znacznie trudniejszy do zamodelowania jest kąt elewacji ogniwa.

W rozważanym wypadku kąt elewacji jest zależny od wielu czynników częściowo losowych (np. warunki atmosferyczne, obecność śniegu na ogniwach), a częściowo trudnych do opisu i bardzo komplikujących model (np. nieliniowości wynikające z konstrukcji części mechanicznej ogniwa).

Z powyższych względów do opisu dynamiki kąta elewacji rozważanego ogniwa słonecznego zastosowano model przedziałowy. Jest on z jednej strony stosunkowo prosty, a z drugiej pozwala na poprawny opis zachowania się rozważanego systemu dynamicznego w różnych warunkach.

Zagadnienia identyfikacji dynamiki orientowanych systemów PV nie są zbyt często omawiane w literaturze, najbardziej zbliżona tematyka jest omawiana w pracy [4]. Problematyka identyfikacji systemów przedziałowych jest prezentowana częściej, jako przykład można podać prace: [4], [5], [6], [8], [9], [11], [12]. Dokładny opis eksperymentu identyfikacyjnego dla rozważanego układu można znaleźć w pracy [10], więcej informacji o doświadczalnej stacji fotowoltaicznej na Wydziale EAIIB AGH można znaleźć w pracach [1], [2], [3].

W niniejszej pracy zostaną omówione następujące zagadnienia:

- Doświadczalny system fotowoltaiczny i układ pomiarowy,
- Wyniki pomiarów i ich interpretacja,
- Przedziałowe równanie stanu dla rozważanego systemu dynamicznego,
- Identyfikacja modelu przedziałowego dla systemu doświadczalnego,

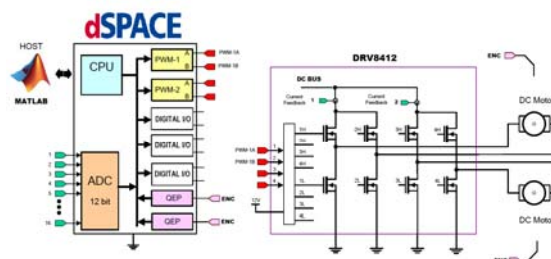
Doświadczalny system fotowoltaiczny i układ pomiarowy

Rozważany w pracy doświadczalny system fotowoltaiczny jest przedstawiony na rysunku 1, a jego dokładny opis można znaleźć w pracach: [1],[2],[3], [10]. Jest to dwuosiowy układ nadążny, pozwalający na ustawianie modułów fotowoltaicznych prostopadłe do padających promieni słonecznych niezależnie od pory dnia, w każdym dniu roku.



Rys. 1. Doświadczalny orientowany system fotowoltaiczny

Zakresy ruchu w osiach azymutu i elewacji pozwalają na pełne śledzenie pozornego ruchu Słońca po nieboskłonnie dla położenia geograficznego Krakowa. Do pozycjonowania ogniwa w obu osiach (azymut i elewacja) wykorzystano silniki prądu stałego z przekładniami. W przypadku sterowania kątem elewacji konstrukcja układu powoduje nieliniową zależność pomiędzy wysuwem silownika i kątem elewacji, co komplikuje budowę modelu matematycznego układu.



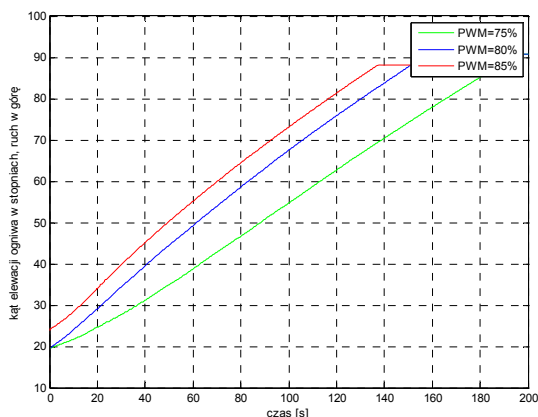
Rys. 2. Uproszczony schemat układu pomiarowego

Schemat układu pomiarowego i metoda pomiarowa zostały dokładnie omówione w pracy [10]. Uproszczony schemat układu pomiarowego zastosowanego w eksperymentach identyfikacyjnych pokazano na rysunku 2.

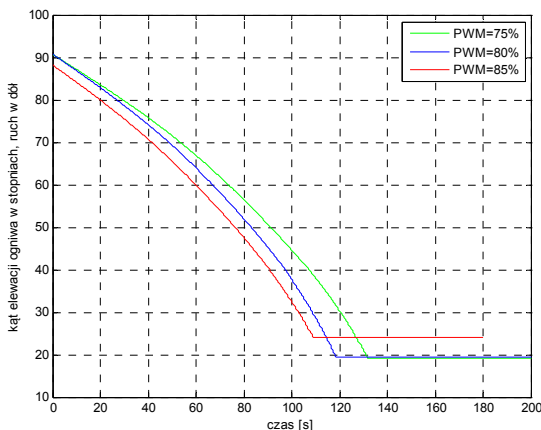
Podczas identyfikacji wyznaczono czasowe przebiegi kąta elewacji i azymutu ogniwa. W dalszej części niniejszej pracy będziemy się zajmować wyłącznie kątem elewacji.

Wyniki pomiarów i ich interpretacja

Podczas analizy wyników pomiarów (Rys.3 i 4) okazało się, że poprawny opis rozważanego obiektu wymaga budowy oddzielnych modeli nie tylko dla układów sterowania azymutem i elewacją, lecz także należy osobno rozważyć każdy z kierunków ruchu: w górę i w dół. Na podstawie wyników pomiarów omówionych w pracy [10] można zauważyć, że kąt elewacji jest nieliniową funkcją czasu.



Rys. 3. Przebieg czasowy kąta elewacji ogniwa przy ruchu w górę otrzymany bezpośrednio z pomiaru.



Rys. 4. Przebieg czasowy kąta elewacji ogniwa przy ruchu w dół otrzymany bezpośrednio z pomiaru.

Analiza przebiegów czasowych kąta elewacji podczas ruchu w obie strony pokazanych na rysunkach 3 i 4 wskazuje, że parametry modeli opisujących oba kierunki ruchu powinny być różne.

Przedziałowe równanie stanu dla rozważanego systemu dynamicznego

W rozważanym przypadku dokładny opis kinematyki i dynamiki rozważanego obiektu jest dość złożony (przyp. [4]) i w celu budowy modelu uproszczonego, opisującego kąt elewacji w przestrzeni stanu przyjmujemy następujące założenia:

- Jako zmienne stanu przyjmujemy: kąt elewacji ogniwa $\varphi(t)$ oraz prędkość kątową ruchu ogniwa $v(t)$ przy ruchu w dół lub w górę,
- jako sygnał sterowania $u(t)$ przyjmujemy sygnał PWM podawany na silnik napędzający mechanizm podniesienia,
- jako wyjście obiektu przyjmujemy kąt elewacji ogniwa, gdyż on jest bezpośrednio dostępny do pomiaru.
- Kąt elewacji ogniwa jest nieliniową funkcją kąta położenia wału silnika napędowego, nieliniowości wynikają z konstrukcji układu napędowego.
- Parametry równania stanu opisującego obiekt są zależne od:
 - Współczynnika wypełnienia sterującego sygnału PWM,
 - wartości kąta elewacji,
 - bieżących warunków atmosferycznych podczas pracy ogniwa.
- Wszystkie występujące w układzie nieliniowości, niestacjonarność i niepewności parametrów zostaną opisane przedziałowymi parametrami równania stanu.

Wektor stanu dla rozważanego systemu przyjmujemy następujący:

$$(1) \quad x(t) = \begin{bmatrix} \varphi(t) \\ v(t) \end{bmatrix} \in R^2$$

W (1) $\varphi(t)$ oznacza kąt elewacji ogniwa, $v(t)$ oznacza prędkość ruchu ogniwa. W najprostszym przypadku w ogniwie można wskazać następujące zależności pomiędzy położeniem i prędkością ruchu ogniwa:

$$(2) \quad v(t) = \dot{\varphi}(t)$$

Z kolei pomiędzy sygnałem sterującym i prędkością ruchu części ruchomej ogniwa występuje następująca, bardzo uproszczona (pominięcie nieliniowości) zależność:

$$(3) \quad v(t) + T_1 \dot{v}(t) = ku(t)$$

W (3) T_1 oznacza stałą czasową napędu i przekładni, k oznacza współczynnik proporcjonalności, $u(t)$ oznacza sygnał sterujący. Zarówno T_1 , jak i k są w rozważanym wypadku nieliniowe i zależne od: kąta elewacji ogniwa φ oraz losowych czynników zewnętrznych, np. atmosferycznych. Z tego względu wartości tych parametrów zostaną opisane liczbami przedziałowymi:

$$(4) \quad T_1 = [T_1, \bar{T}_1] \\ k = [\underline{k}, \bar{k}]$$

Oba przedziałowe parametry obiektu budują wektor niepewnych parametrów obiektu q , a wszystkie wektory q budują zbiór niepewnych parametrów obiektu Q :

$$(5) \quad Q = \left\{ q \in I(R^2) : q = [T_1, k]^T \right\}$$

Zbiór (5) może być interpretowany jako prostokąt na płaszczyźnie R^2 , którego wierzchołki są zdefiniowane następująco:

$$(6) \quad q_{ll} = [T_1; \underline{k}]^T, \quad q_{lh} = [T_1; \bar{k}]^T \\ q_{hl} = [\bar{T}_1; \underline{k}]^T, \quad q_{hh} = [\bar{T}_1; \bar{k}]^T$$

Wierzchołki (6) tworzą zbiór q_w :

$$(7) \quad q_w = \{q_{ll}, q_{lh}, q_{hl}, q_{hh}\}$$

Zauważmy, że zbiór Q może być jednoznacznie zdefiniowany poprzez podanie współrzędnych jego wierzchołków (6).

Po uwzględnieniu (1)-(3) przedziałowe równanie stanu dla rozważanego systemu ma postać następującą:

$$(8) \quad \begin{aligned} \dot{x}(t, q) &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_1} \end{bmatrix} x(t, q) + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{k}{T_1} \end{bmatrix} u(t) \\ y(t, q) &= [1 \quad 0] x(t, q) \end{aligned}$$

Macierz trzycyjna e^{At} dla układu (8) jest równa:

$$(9) \quad e^{At} = \begin{bmatrix} 1(t) & T_1 \left(1(t) - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \\ 0 & e^{-\frac{t}{T_1}} \end{bmatrix}$$

Współczynnik wypełnienia sygnału PWM równy k_{PWM} i przyjmujący wartości z zakresu 0.0 – 1.0 może być w rozważanym wypadku traktowany jako amplituda skoku jednostkowego podawanego na wejście rozważanego obiektu. Wtedy pełne rozwiązanie równania stanu (pochodzące zarówno od warunków początkowych, jak i od wymuszenia) przyjmuje następującą postać:

$$(10) \quad \begin{bmatrix} \varphi(t, q) \\ v(t, q) \end{bmatrix} = e^{At} x_0 + k k_{PWM} \begin{bmatrix} -T_1 1(t) + t + T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} \\ 1(t) - e^{-\frac{t}{T_1}} \end{bmatrix}$$

W (10) e^{At} oznacza macierz trzycyjną opisaną przez (9) a x_0 opisany przez (11) oznacza wektor warunków początkowych na obie zmienne stanu:

$$(11) \quad x_0 = \begin{bmatrix} \varphi_0 \\ v_0 \end{bmatrix}$$

W (11) φ_0 oznacza początkowy kąt elewacji, a v_0 początkową prędkość ruchu ogniwa.

Na podstawie (8) i (10) można też podać analityczny wzór na przebieg czasowy wyjścia systemu, którym jest kąt elewacji ogniwa:

$$(12) \quad \begin{aligned} y(t, q) = \varphi(t, q) &= \varphi_0 1(t) + T_1 \left(1(t) - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) v_0 + \\ &+ k k_{PWM} \cdot \left(-T_1 1(t) + t + T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} \right) \end{aligned}$$

Jeżeli przypomnimy, że trajektoria czasowa wyjścia systemu opisana przez (12) jest funkcją czasu i przedziałowych parametrów modelu, to może ona być interpretowana jako naturalna inkluzja przedziałowa funkcji rzeczywistej, opisującej tę trajektorię i „związa się” do niej, jeżeli przedziały q „związają się” do liczb rzeczywistych.

Model przedziałowy (8), (10), (12) powinien z jednej strony poprawnie opisać cały zakres przewidywalnej niepewności parametrów obiektu, a z drugiej strony – nie

powinien być zbyt „obszerny”, gdyż jego dokładność i przydatność będzie w takiej sytuacji zbyt mała (jest to zresztą jedna z głównych wad podejścia przedziałowego w modelowaniu systemów dynamicznych).

Powyższe rozważania mają prostą interpretację geometryczną. Załóżmy, że wykres trajektorii czasowej inkluzji przedziałowej (12) może być interpretowany jako sektor na płaszczyźnie R^2 , oznaczony jako $\phi(q)$. Sektor ten jest jednoznacznie ograniczony przez przebiegi funkcji (12) dla wartości wierzchołkowych wektora niepewnych parametrów, opisanych przez (6) i jest on zdefiniowany następująco:

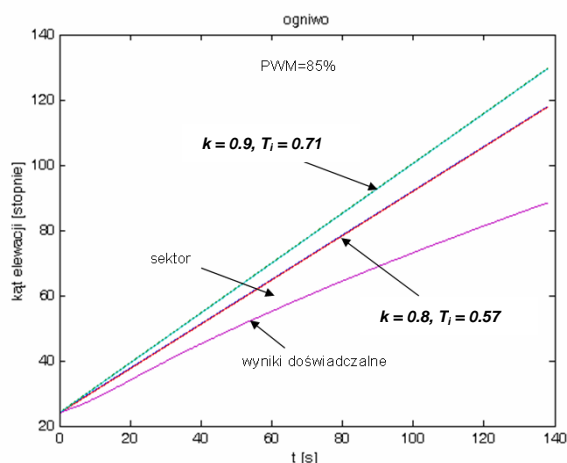
$$(13) \quad \phi(t, q) = \int_0^{\infty} \overline{y(t, q)} dt - \int_0^{\infty} \underline{y(t, q)} dt$$

gdzie:

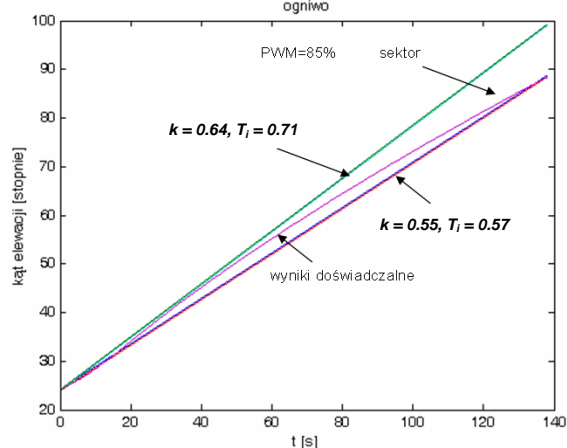
$$(14) \quad \begin{aligned} \overline{y(t, q)} &= \sup_Q (y(t, q)) \\ \underline{y(t, q)} &= \inf_Q (y(t, q)) \end{aligned}$$

W sytuacji rzeczywistej horyzont czasowy pomiaru zawsze przyjmuje skończoną wartość i wtedy sektor (13), (14) jest opisany następująco:

$$(15) \quad \phi(t, q) = \int_0^{t_f} \overline{y(t, q)} dt - \int_0^{t_f} \underline{y(t, q)} dt$$



Rys. 5. Niepoprawnie dobrany sektor $\phi(q)$



Rys. 6. Poprawnie dobrany sektor $\phi(q)$

W (15) t_f oznacza końcowy czas pomiaru. Poprawnie dobrany do wyników doświadczalnych sektor $\phi(q)$ opisany przez (15) powinien spełniać następujące warunki:

- Powinien zawierać wszystkie eksperymentalne odpowiedzi skokowe,
- Powinien być możliwie „najwyższym” ograniczeniem dla tych odpowiedzi.

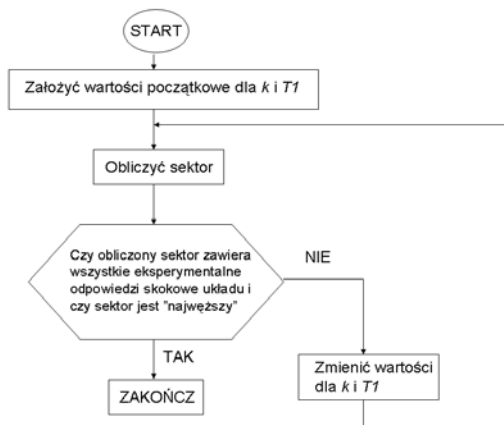
Ilustracją powyższych rozważań są rysunki 5 i 6.

Identyfikacja modelu przedziałowego polega w rozważanym wypadku na poprawnej identyfikacji sektora $\phi(q)$, co sprowadza się do poprawnej identyfikacji wierzchołków zbioru niepewnych parametrów modelu Q opisanych przez (6). W związku z tym funkcja kosztu opisująca model przedziałowy (8) – (12) może być przyjęta wprost jako wartość całki (15) przy założeniu, że musi być spełniony warunek (13):

$$(16) \quad I(q) = \phi(t, q)$$

Identyfikacja modelu przedziałowego

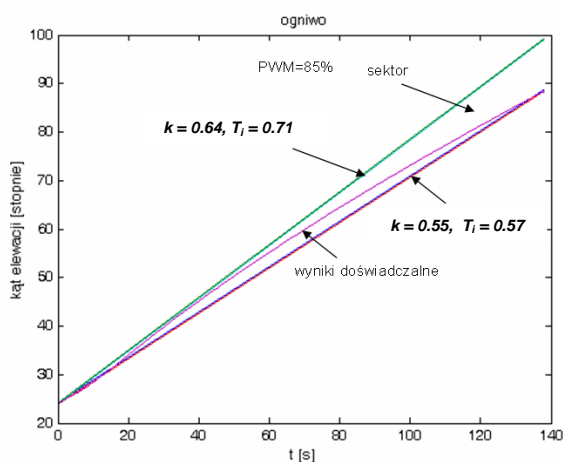
Identyfikacja parametrów modelu przedziałowego opisanego przez (1)-(12), którego jakość jest opisana funkcją kosztu (16) może być wykonana na podstawie wyników doświadczalnych i z użyciem środowiska MATLAB/SIMULINK. Algorytm identyfikacji pokazany jest na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat blokowy algorytmu identyfikacji parametrów modelu.

Identyfikacja modelu kąta elewacji podczas ruchu w górę

Wyniki identyfikacji przeprowadzonej metodą opisaną powyżej pokazane są na rysunku 8, wartości przedziałów wyznaczonych zgodnie z algorytmem są opisane w tabeli nr 1.



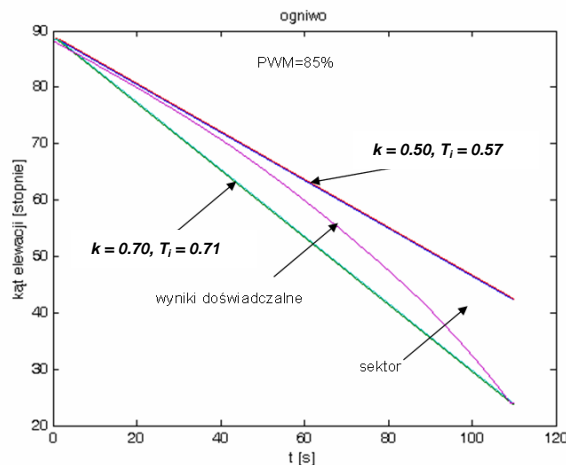
Rys. 8. Przebieg czasowy kąta elewacji oraz zidentyfikowany sektor $\phi(q)$ podczas ruchu w górę.

Tabela 1. Parametry modelu przedziałowego dla ruchu w górę.

Parametr	Przedział wartości
T_i [s]	[0.57, 0.71]
k	[0.55, 0.64]

Identyfikacja modelu kąta elewacji podczas ruchu w dół

Zmiana kąta elewacji podczas ruchu w dół jest również opisana modelem przedziałowym (8)-(12), natomiast parametry przedziałowe będą w tym wypadku inne, niż podczas ruchu w górę i mogą one być wyznaczone na podstawie przebiegów czasowych przedstawionych na rys.4.



Rys. 9. Przebieg czasowy kąta elewacji oraz zidentyfikowany sektor $\phi(q)$ podczas ruchu w dół.

Tabela 2. Parametry modelu przedziałowego dla ruchu w dół.

Parametr	Przedział wartości
T_i [s]	[0.57, 0.71]
k	[0.5, 0.7]

Na podstawie wszystkich przedstawionych powyżej wykresów można stwierdzić, że parametry modelu przedziałowego rozważanego w niniejszej pracy zostały dobrane poprawnie.

Uwagi końcowe

Uwagi końcowe do pracy mogą być sformułowane następująco:

- Model przedziałowy opisany przez (8) - (12), którego parametry zostały zidentyfikowane metodą proponowaną w niniejszej pracy poprawnie opisuje dynamikę kąta elewacji rozważanego orientowanego systemu ogniw słonecznych.
 - Zastosowanie podejścia przedziałowego opisanego w niniejszej pracy pozwala na stosunkowo proste i dokładne zamodelowanie obiektu trudnego do opisu z wykorzystaniem modelu dokładnego.
- Praca została sfinansowana ze środków NCN, umowa nr 6693/B/T02/2011/40.

LITERATURA

- [1] Chojnacki J., Teneta J., Więckowski Ł. (2007) „System pomiaru parametrów środowiskowych na potrzeby monitorowania instalacji fotowoltaicznych”, Mat Konferencyjne: Kongres Metrologii „Metrologia – narzędzie poznania i droga rozwoju” : Kraków 9–13 września 2007, T. 1, s. 338-341. Wyd SIMP W-a 2007.
- [2] Chojnacki J., Teneta J., Więckowski Ł. (2008) „Potential of application of photovoltaic systems in urban environments example of the city of Krakow” Proc. Of 23rd European photovoltaic solar energy conference, Valencia, Spain, 1–5 September 2008 s. 3374–3377

- [3] Chojnacki J., Teneta J., Więckowski Ł. (2009) *Two years' experience in monitoring of a small Grid-connected photovoltaic power station* Proc. of 24th European photovoltaic solar energy conference and exhibition 21–24 September 2009, s.4061-4064.
- [4] M.N.M. Hussain, A.M. Omar, P. Saidin, A.A.A. Samat, Z. Hussain (2012) *“Identification of Hammerstein-Weiner System for Normal and Shading Operation of Photovoltaic System”* International Journal of Machine Learning and Computing, Vol. 2, No. 3, June 2012
- [5] J.S. Lew, K. B. Lim (2000) *“Robust Control of Identified Reduced-Interval Transfer Function”* IEEE Trans. Cont Sys. Techn Vol. 8, No. 5, september 2000, pp. 833-841.
- [6] P.S.V. Nataraj, G. Sardar (2000) *„Template generation for continuous transfer functions using interval analysis”*. Automatica 01/2000; 36:111-119.
- [7] Krzysztof Oprzędkiewicz, Janusz Teneta *„Problemy sterowania optymalnego zespołem orientowanych ogniw fotowoltaicznych”*, Automatyka : półrocznik Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie ISSN 1429-3447, 2011 t. 15 z. 2 s. 381–388.
- [8] D. Schaich , R. King , U.Keller , M. Chantler (1999) *“Interval Identification - a Modelling and Design Technique for Dynamic Systems”* RQ99 13th Int Workshop Qualitative Reasoning June 6-9 1999, Loch Awe Scotland.
- [9] I. Škrjanca, S. Blažica, O. Agamennoni (2005) *“Identification of dynamical systems with a robust interval fuzzy model”*, Automatica, 41 (2005) 327 – 332
- [10] J. Teneta, M. Zaczyk, K.Oprzędkiewicz, Ł. Więckowski, W. Głowacz (2012) *„Metoda pomiarów parametrów orientowanego ogniwa słonecznego”*, Pomiary, Automatyka i Robotyka 2012 nr 9, s. 74–79.
- [11] C. Yeroğlu, M. M. Özyetkin, N. Tan (2010) *“Frequency Response Computation of Fractional Order Interval Transfer Functions”* International Journal of Control, Automation, and Systems (2010) 8(5):1009-1017.
- [12] G. Zhang, J. Chen, Z. Li (2010) *“Identification of interval models for a class of uncertain systems via linear programming”* American Control Conference (ACC), 2010 June 30 2010–July 2 2010.

Autorzy: dr hab. inż. Krzysztof Oprzędkiewicz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: kop@agh.edu.pl; mgr inż. Witold Głowacz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków e-mail: wglowacz@agh.edu.pl ; dr inż. Mieczysław Zaczyk, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: mza@agh.edu.pl, dr inż. Janusz Teneta, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: romus@agh.edu.pl, mgr inż. Łukasz Więckowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Automatyki i Inżynierii Biomedycznej, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: wieckow@agh.edu.pl.