

**Marcin JASTRZĘBSKI, Jacek KRÓL**

INSTYTUT AUTOMATYKI, ZAKŁAD TEORII STEROWANIA, POLITECHNIKA ŁÓDZKA,  
ul. B. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź

## Realizacja adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania w układzie sterowania poziomem cieczy

Dr inż. Marcin JASTRZĘBSKI

Jest pracownikiem naukowo dydaktycznym w Zakładzie Teorii Sterowania Instytutu Automatyki Politechniki Łódzkiej. Prowadzi badania nad zastosowaniem metod sztucznej inteligencji w układach sterowania. Jego zainteresowania naukowe to teoria sterowania i przetwarzanie sygnałów.



e-mail: marcin.jastrzebski@p.lodz.pl

Mgr inż. Jacek KRÓL

Doktorant Zakładu Teorii Sterowania Instytutu Automatyki Politechniki Łódzkiej. Jednocześnie projektant systemów automatyki przemysłowej w branży papierniczej. Rozpoczyna badania nad sterowaniem predykcijnym obiektów przemysłowych. Jego główne zainteresowania to sterowanie obiektami nieliniowymi.



e-mail: jacek.krol@o2.pl

### Streszczenie

Artykuł dotyczy realizacji adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania w czasie rzeczywistym, w układzie sterowania o konfiguracji rozproszonej. Przedstawiono ideę, rozwój oraz strukturę adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania (ang. adaptive backstepping). Wyprowadzono prawo sterowania i zamieszczono badania symulacyjne dla zadania stabilizacji poziomu cieczy w kaskadowo połączonym układzie zbiorników. Wyniki otrzymane w układzie rzeczywistym pokazują efektywność działania zrealizowanego algorytmu i potwierdzają celowość jego implementacji na regulatorze DCS.

**Słowa kluczowe:** adaptacyjny algorytm wstecznego całkowania, rozproszony system sterowania (DCS).

### Realization of adaptive backstepping algorithm in level control system

#### Abstract

The paper presents results of implementation of an adaptive backstepping algorithm for controller design in a distributed control system (DCS). The first part (Section 1) describes the idea the of adaptive backstepping algorithm [7, 8]. The next section presents the controlled system described by Eqs. (1, 2) (Fig. 1) and a control algorithm (3-16) stabilizing the liquid level  $x_2$  on setpoint  $y$ . The Lyapunov method was used for deriving control laws. The complete control algorithm with parameter adaptation rules for adjustment of the valves characteristics (Fig. 2) is given by (17-22, 24). Parameters  $k_1$  and  $k_2$  used in the algorithm were tuned in Simulink. The simulation results are shown in Figs. 3, 4. The real time results (Figs. 5, 6) prove the algorithm effectiveness and confirm usability of its implementation in a DCS controller. The Simulink file, the control program for a controller VE3006 realized in the environment DeltaV (fmx) and screen shots showing that implementation of the described control is not a difficult task, are available at: <http://zts.p.lodz.pl/zasoby/marcinjastrzebski/pak2011.zip>.

**Keywords:** adaptive backstepping, distributed control system (DCS).

## 1. Wstęp

Współczesny rozwój przemysłu sprawia, iż procesy technologiczne charakteryzują się dużą wydajnością i złożonością struktury. Konkurencyjność wśród największych potentatów przemysłowych wymusza stosowanie coraz nowocześniejszych, bezpieczniejszych i niezawodnych systemów sterowania oraz zarządzania produkcją [1]. Niezawodność otrzymać możemy poprzez zastosowanie odpowiedniej struktury obiektowej systemu oraz algorytmu regulacji. Uniwersalność i wszechstronność jaką niosą systemy rozproszone DCS (ang. Distributed Control System) [2, 3], predysponują je do tego zadania.

Adaptacyjny algorytm wstecznego całkowania (ang. adaptive backstepping) jest rozwijany od ponad 15 lat i jest uważany za jedną z najbardziej skutecznych metod sterowania układami nieliniowymi [4]. Ideę algorytmu można przedstawić następująco [5].

Obiekt sterowania jest dzielony na podsystemy. W pierwszym podsystemie wybiera się tzw. sterowanie wirtualne (zmienna stanu lub funkcja zmiennych stanu) i buduje się algorytm zmian tego sterowania, który pozwala na zrealizowanie śledzenia zadanych trajektorii przez wyjście obiektu. Zakłada się, że nieznane parametry są stałe i występują w równaniu dynamiki błędu w postaci liniowej, pomnożone przez znane tzw. macierze regresji. Wirtualne sterowanie wykorzystuje przybliżone wartości nieznanymi parametrów otrzymane z różniczkowych praw adaptacji. Kolejny podsystem jest sterowany w analogiczny sposób by zapewnić odtwarzanie zadanych wartości wirtualnego sterowania dla poprzedniego podsystemu. Ostatecznie wyznacza się prawdziwe sterowanie obiektu. Innym sposobem przybliżenia idei adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania może być porównanie go do algorytmu regulacji kaskadowej, w którym odpowiednikami wielkości zadanych wyznaczanych przez regulatory podrzędne będą sterowania wirtualne, a za eliminację błędów w stanie ustalonym zamiast części całkującej regulatora, będą odpowiadać prawa adaptacji estymat nieznanymi parametrów. Kolejnym podobieństwem w obydwu algorytmach jest sposób działania w sytuacji wejścia sygnału sterującego na ograniczenia. W regulatorze typu PI stosowany jest mechanizm anti-windup, w algorytmie adaptacyjnym zatrzymywany jest proces adaptacji parametrów [6].

Realizacja adaptacyjnych algorytmów sterowania w systemach DCS opisywana była m.in. w [7, 8]. Nie dotyczy one jednak realizacji adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania. W artykule zaprezentowano wyniki działania adaptacyjnego algorytmu wstecznego całkowania zaimplementowanego w sterowniku przeznaczonym do pracy w konfiguracji rozproszonej (DCS). Obiektem regulacji był układ dwóch zbiorników połączonych kaskadowo.

## 2. Prawo sterowania

Należy określić sterowanie  $Q$  pompą nalewającą ciecz do zbiornika górnego tak, aby poziom cieczy  $x_2$  w zbiorniku stabilizował się na zadanej wartości  $y$ . Obiekt (rys. 1) jest opisany równaniami:

$$\dot{x}_1 = \frac{Q}{S_1} - \frac{d_1 \cdot Q_1(x_1)}{S_1} \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{Q_1(x_1)}{S_2(x_2)} - \frac{d_2 \cdot Q_2(x_2)}{S_2(x_2)} \quad (2)$$

gdzie:  $Q$  jest sterowaniem,  $S_1$  to przekrój prostokątnego, górnego zbiornika,  $S_2$  to przekrój zbiornika dolnego o kształcie trapezu,  $d_1 \cdot Q_1$  to wypływ cieczy ze zbiornika górnego, zależny od poziomu cieczy w zbiorniku,  $d_2 \cdot Q_2$  to wpływ cieczy ze zbiornika dolnego, zależny od poziomu cieczy w zbiorniku.

W przypadku bezbłędnie zidentyfikowanych i odtworzonych zależności wypływów  $Q_1$  i  $Q_2$ , współczynniki korygujące  $d_1$  i  $d_2$  byłyby równe 1 i mechanizm adaptacji byłby zbędny. Błędy modelowania, brak powtarzalności eksperymentu, uzależniony m.in. od wystąpienia lub nie wiru przy zaworze, a także zmiany stopnia otwarcia zaworów sugerują wprowadzenie mechanizmu adaptacji tych parametrów.



Rys. 1. Układ dwóch zbiorników  
Fig. 1. Two tank system

W pierwszym kroku wybieramy funkcję Lapunowa postaci

$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2\gamma_2}\tilde{d}_2^2, \quad (3)$$

gdzie:  $e = y - x_2$ , jest uchybem między różniczkowalną wartością zadaną  $y$ , a poziomem w drugim zbiorniku  $x_2$ ,  $\tilde{d}_2 = d_2 - \hat{d}_2$  to błąd estymaty parametru skojarzonego z wypływem  $Q_2$ ,  $\gamma_2$  to współczynnik odpowiedzialny za szybkość adaptacji estymaty  $\hat{d}_2$ . Pochodna systemowa funkcji Lapunowa będzie równa:

$$\dot{V} = e\dot{e} + \frac{1}{\gamma_2}\tilde{d}_2\dot{\tilde{d}}_2 = e\left(\dot{y} - \frac{Q_1}{S_2(x_2)} + \frac{d_2Q_2}{S_2(x_2)}\right) + \frac{1}{\gamma_2}\tilde{d}_2\dot{\tilde{d}}_2. \quad (4)$$

Wprowadzamy wirtualne sterowanie  $Q_{1z}$  – zadany wypływ ze zbiornika pierwszego i podstawiamy  $d_2 = \hat{d}_2 + \tilde{d}_2$ , wtedy

$$\dot{V} = e\left(\dot{y} - \frac{Q_1}{S_2(x_2)} + \frac{\tilde{d}_2Q_2}{S_2(x_2)} + \frac{\hat{d}_2Q_2}{S_2(x_2)} + \frac{Q_{1z}}{S_2(x_2)} - \frac{Q_{1z}}{S_2(x_2)}\right) + \frac{1}{\gamma_2}\tilde{d}_2\dot{\tilde{d}}_2. \quad (5)$$

Jeżeli wirtualne sterowanie określimy jako

$$Q_{1z} = (\dot{y} + k_1e) \cdot S_2(x_2) + \hat{d}_2Q_2, \quad (6)$$

to

$$\dot{V} = e\left(-\frac{Q_1}{S_2(x_2)} + \frac{\tilde{d}_2Q_2}{S_2(x_2)} + \frac{Q_{1z}}{S_2(x_2)} - k_1e\right) + \frac{1}{\gamma_2}\tilde{d}_2\dot{\tilde{d}}_2. \quad (7)$$

Po wprowadzeniu uchybu wypływu cieczy  $z = Q_{1z} - Q_1$  i podstawieniu  $\tilde{d}_2 = -\hat{d}_2$ , co jest prawdą przy założeniu stałości parametru  $d_2$ , otrzymamy

$$\dot{V} = -k_1e^2 + \frac{ez}{S_2(x_2)} + e\frac{\tilde{d}_2Q_2}{S_2(x_2)} - \frac{1}{\gamma_2}\tilde{d}_2\dot{\tilde{d}}_2. \quad (8)$$

Określenie prawa adaptacji estymaty  $\hat{d}_2$  jako

$$\dot{\hat{d}}_2 = \frac{\gamma_2 \cdot e \cdot Q_2}{S_2(x_2)}, \quad (9)$$

doprowadzi nas do

$$\dot{V} = -k_1e^2 + \frac{ez}{S_2(x_2)}. \quad (10)$$

W drugim kroku obliczeń wybieramy funkcję Lapunowa postaci

$$V = \frac{1}{2}e^2 + \frac{1}{2}z^2 + \frac{1}{2\gamma_2}\tilde{d}_2^2 + \frac{1}{2\gamma_1}\tilde{d}_1^2, \quad (11)$$

kórej pochodna systemowa będzie równa

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -k_1e^2 + \frac{ez}{S_2(x_2)} + z\dot{z} + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{d}_1\dot{\tilde{d}}_1 = \\ &= -k_1e^2 + \frac{ez}{S_2(x_2)} + z\left(\dot{Q}_{1z} - \frac{\partial Q_1}{\partial x_1}\left(\frac{Q}{S_1} - \frac{d_1 \cdot Q_1}{S_1}\right)\right) + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{d}_1\dot{\tilde{d}}_1 = \\ &= -k_1e^2 + z\left(\frac{e}{S_2(x_2)} + \dot{Q}_{1z} - \frac{\partial Q_1}{\partial x_1}\left(\frac{Q}{S_1} - \frac{\hat{d}_1 \cdot Q_1}{S_1}\right)\right) + \\ &\quad + z\frac{\partial Q_1}{\partial x_1}\frac{\tilde{d}_1 \cdot Q_1}{S_1} + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{d}_1\dot{\tilde{d}}_1. \end{aligned} \quad (12)$$

Po wyborze sterowania

$$Q = S_1 \frac{k_2z + \frac{e}{S_2(x_2)} + \dot{Q}_{1z}}{\frac{\partial Q_1}{\partial x_1}} + \hat{d}_1 \cdot Q_1, \quad (13)$$

pochodna systemowa przyjmie postać

$$\dot{V} = -k_1e^2 - k_2z^2 + z\frac{\partial Q_1}{\partial x_1}\frac{\tilde{d}_1 \cdot Q_1}{S_1} + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{d}_1\dot{\tilde{d}}_1, \quad (14)$$

co przy założeniu  $\dot{\tilde{d}}_1 = -\hat{d}_1$  sugeruje prawo adaptacji estymaty  $\hat{d}_1$  według zależności

$$\dot{\hat{d}}_1 = \frac{\gamma_1 \cdot z \cdot Q_1}{S_1} \frac{\partial Q_1}{\partial x_1}. \quad (15)$$

Ostatecznie funkcja Lapunowa uprości się do postaci

$$\dot{V} = -k_1e^2 - k_2z^2. \quad (16)$$

Podsumowując powyższe wyprowadzenia, algorytm sterowania można opisać wzorami:

$$Q = S_1 \frac{k_2z + \frac{e}{S_2(x_2)} + \dot{Q}_{1z}}{\frac{\partial Q_1}{\partial x_1}} + \hat{d}_1 \cdot Q_1, \quad (17)$$

$$z = Q_{1z} - Q_1, \quad (18)$$

$$e = y - x_2, \quad (19)$$

$$Q_{1z} = (\dot{y} + k_1 e) \cdot S_2 + \hat{d}_2 Q_2, \quad (20)$$

$$\dot{\hat{d}}_1 = \frac{\gamma_1 \cdot z \cdot Q_1}{S_1} \frac{\partial Q_1}{\partial x_1}, \quad (21)$$

$$\dot{\hat{d}}_2 = \frac{\gamma_2 \cdot e \cdot Q_2}{S_2(x_2)}. \quad (22)$$

### 3. Otrzymane wyniki

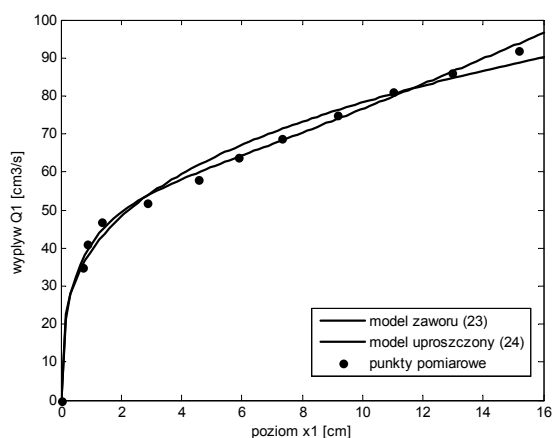
W pierwszej części eksperymentów praktycznych zmierzono zbiorniki oraz przeprowadzono identyfikację pompy i zaworów odpływowych. Otrzymane wyniki to  $S_1=85,75 \text{ cm}^2$ ,  $S_2=2,016 \cdot x_1+86,1 \text{ cm}^2$ . Charakterystykę wydajności pompy w funkcji zasilania, opartą o 6 równomiernie rozłożonych punktów w zakresie od 0 do 150,5  $\text{cm}^3/\text{s}$  cechuje współczynnik korelacji liniowej na poziomie  $r=0,9973$ . Zaproponowano dwa modele zaworu. Pierwszy z nich, dokładniejszy, o błędzie modelowania RMSE równym 1,43  $\text{cm}^3/\text{s}$  został wykorzystywany do zamodelowania obiektu w programie Simulink pakietu Matlab i był opisany równaniem

$$Q_1 = -0.5389 \cdot x_1^2 + 6.9422 \cdot x_1^{1.5} - 29.005 \cdot x_1 + 63.568 \cdot x_1^{0.5}. \quad (23)$$

Drugi model (24),

$$Q_1 = 39.229 \cdot x_1^{0.3} \quad (24)$$

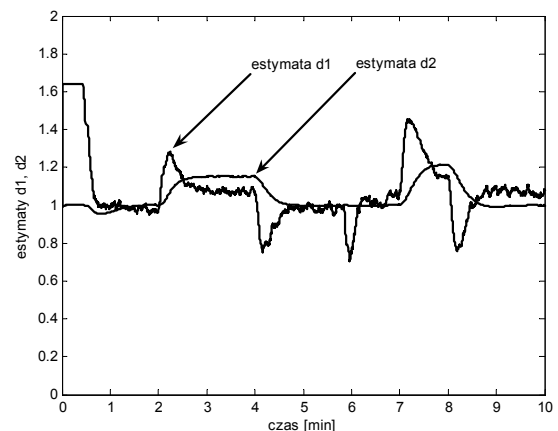
uproszczony o błędzie 2,45  $\text{cm}^3/\text{s}$  wykorzystano w algorytmie sterowania. Ponieważ zawory w obydwu zbiornikach są tego samego typu, to zależności (23,24) zastosowano także do wyznaczenia wypływu  $Q_2(x_2)$ . Punkty pomiarowe i wyniki modelowania zaworów zostały pokazane na rysunku 2.



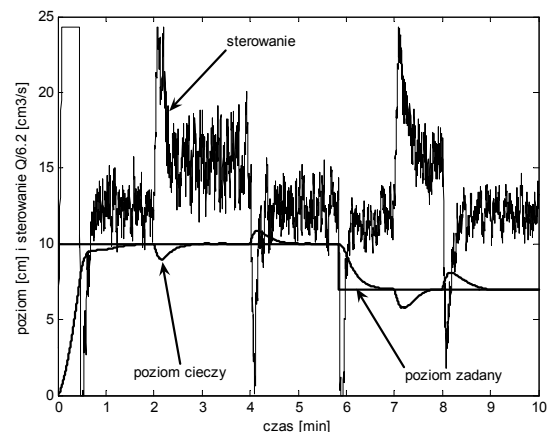
Rys. 2. Charakterystyka zaworu odpływowego  $Q_1=f(x_1)$   
Fig. 2. Drain valve characteristics  $Q_1=f(x_1)$

W algorytmie sterowania (17-22) występują parametry  $\gamma_1=\gamma_2=0,01$  określające szybkość działania praw adaptacji oraz wzmocnienia  $k_1=0,1$  i  $k_2=0,5$ . Wartości te dobrano w drodze symulacji, której wyniki zostały pokazane na rysunkach 3 i 4. Odchylenie poziomu cieczy od wartości zadanej w chwilach 2, 4, 7, 8 [min] wynikają z otwarcia bądź zamknięcia dodatkowego zaworu. Szum występujący w sygnale sterującym wynika z zakłócenia sygnałów  $x_1$ ,  $x_2$  zmienną losową o rozkładzie równomiernym z przedziału  $(-0,3;0,3)$  cm. Wykresy na rysunkach 5 i 6 prezentują

wyniki zebrane podczas działania rzeczywistego zestawu zbiorników ze sterownikiem VE3006 firmy Emerson. Do algorytmu sterowania (17-22) zrealizowanego w środowisku DeltaV wprowadzono trzy modyfikacje. Pierwsza z nich polegała na zatrzymaniu zmian adaptowanych parametrów ( $\gamma_1=\gamma_2=0$ ), gdy sygnał sterujący  $Q$  wychodził poza ograniczenia 0-150,5  $\text{cm}^3/\text{s}$ . Druga polegała na ograniczeniu pochodnej sygnału  $Q_{1z}$  obliczanej numerycznie. Brak takiego ograniczenia powodował szybkie przełączanie sygnału sterującego między wartościami 0 i 150,5 co było wynikiem wzmocnienia szumów zawartych w pomiarze wysokości cieczy w zbiorniku. Trzecią modyfikacją była projekcja 9, polegająca na ograniczeniu adaptowanych parametrów do przedziału 0-1,8. Miało to na celu uniknięcie gwałtownego wzrostu estymat podczas początkowej fazy procesu regulacji.



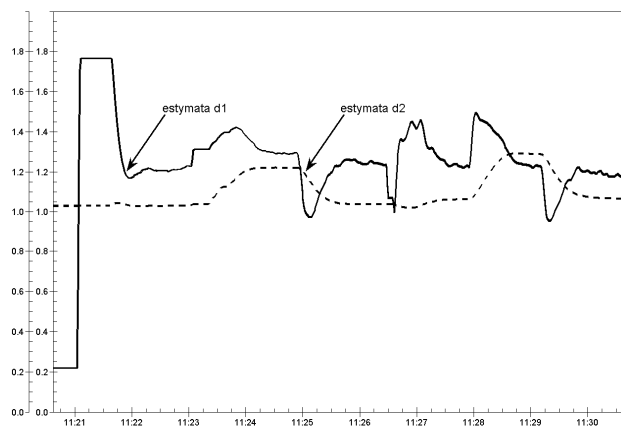
Rys. 3. Estymaty parametrów  $d_1$  i  $d_2$  (wyniki symulacji)  
Fig. 3. Estimated parameters  $d_1$  i  $d_2$  (simulation results)



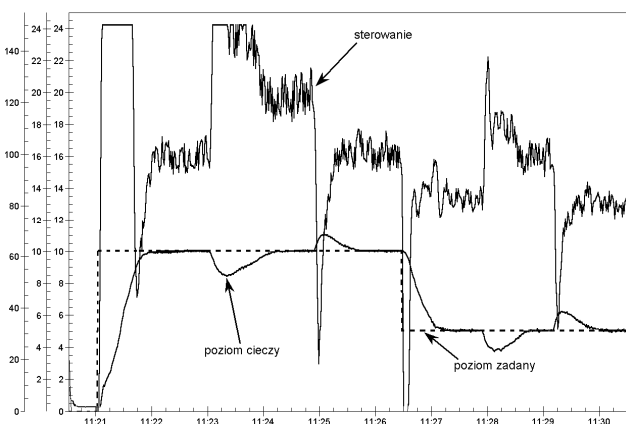
Rys. 4. Poziom zadany  $y$  i aktualny  $x_2$  oraz z sygnał sterujący  $Q$  (wyniki symulacji)  
Fig. 4. Reference  $y$ , actual level  $x_2$  and control  $Q$  (simulation result)

### 4. Wnioski

Otrzymane wyniki pokazały, że adaptacyjny algorytm wstecznego całkowania jest skuteczny i że możliwe jest jego zaimplementowanie w regulatorze przeznaczonym do pracy w systemie DSC. Wskazano korzyści płynące z wykorzystania modelu układu w zadaniu strojenia parametrów algorytmu. Plik symulujący działanie układu w programie Simulink (\*.mdl), program sterujący dla sterownika VE3006 zrealizowany w środowisku DeltaV (\*.fhx) oraz zrzuty ekranu pokazujące, że zrealizowanie opisanego sterowania nie jest zadaniem trudnym, można pobrać ze strony: <http://zts.p.lodz.pl/zasoby/marcinjastrzebski/pak2011.zip>.



Rys. 5. Estymaty parametrów  $d_1$  i  $d_2$  (układ rzeczywisty)  
 Fig. 5. Estimated parameters  $d_1$  i  $d_2$  (real time results)



Rys. 6. Poziom zadany  $y$  i aktualny  $x_2$  oraz z sygnał sterujący  $Q$  (układ rzeczywisty)  
 Fig. 6. Reference  $y$ , actual level  $x_2$  and control  $Q$  (real time result)

## 5. Literatura

- [1] Marcos M., Estevez E.: Formal Modelling of Industrial Distributed Control Systems, 2005.
- [2] Lewis R.: Design of distributed control systems in the next millennium, Computing & Control Engineering Journal. IET, 2002, Tom 8. strony 148-152.
- [3] Grega W.: Prawdziwy czas w rozproszonych układach sterowania. Pomiary Automatyka Robotyka, 2009, nr 12, strony 10-16.
- [4] Krstic M., Kanellakopoulos I., Kokotovic P.: Nonlinear and Adaptive Control Design. John Wiley and Sons, 1995.
- [5] Kabziński J.: Zastosowanie algorytmu wstecznego całkowania do regulacji prędkości silnika z zagłębionymi magnesami trwałymi. Przegląd Elektrotechniczny, Wydawnictwo Sigma-NOT, Warszawa, 2010.
- [6] Kabziński J.: Adaptacyjne sterowanie manipulatorem z ograniczeniem momentu. XV Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym, SENE 2011.
- [7] Grega W., Rotter P.: Regulacja adaptacyjna dla rozproszonego układu sterowania. Automatyka AGH, 2002, T.6, strony 219-235.
- [8] Tutaj A.: Adaptacyjny układ regulacji z predyktorem Smitha z możliwością zastosowania w systemach rozproszonych. Automatyka AGH, 2008, T. 12, strony 211-231.
- [9] Ikhouane F., Krstic M.: Adaptive Backstepping with Parameter Projection: Robustness and Asymptotic Performance. Automatica, Vol 34, No. 4, pp. 429-435, 1998.

otrzymano / received: 20.04.2011

przyjęto do druku / accepted: 02.02.2012

artykuł recenzowany / revised paper

## INFORMACJE

### Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.