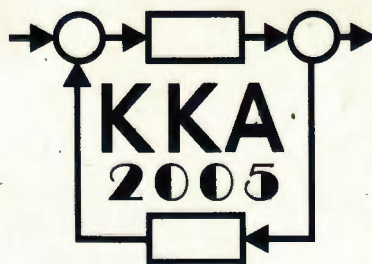


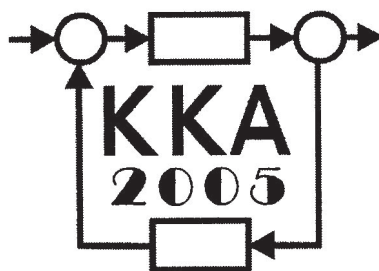
# **XV Krajowa Konferencja Automatyki**

## **Tom I**



**Redaktorzy:  
Zdzisław Bubnicki  
Roman Kulikowski  
Janusz Kacprzyk**

# XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom I



Redaktorzy:  
Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK

## **ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

## **WSPÓŁORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

## **WSPÓLORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **KOMITET PROGRAMOWY**

Przewodniczący  
Zastępca Przewodniczącego

Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI

## **CZŁONKOWIE**

Stanisław BAŃKA  
Mikołaj BUSŁOWICZ  
Ryszard GESSING  
Jakub GUTENBAUM  
Stanisław KACZANOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Józef KORBICZ  
Krzysztof KOZŁOWSKI  
Krzysztof KUŹMIŃSKI  
Krzysztof MALINOWSKI  
Antoni NIEDERLIŃSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Stanisław SKOCZOWSKI  
Jerzy ŚWIĄTEK  
Ryszard TADEUSIEWICZ  
Krzysztof TCHOŃ  
Jan WĘGLARZ

Michał BIAŁKO  
Władysław FINDEISEN  
Henryk GÓRECKI  
Jerzy JÓZEFczyk  
Tadeusz KACZOREK  
Jerzy KLAMKA  
Zbigniew KOWALSKI  
Juliusz L. KULIKOWSKI  
Kazimierz MALANOWSKI  
Wojciech MITKOWSKI  
Władysław PEŁCZEWSKI  
Leszek RUTKOWSKI  
Roman SŁOWIŃSKI  
Andrzej ŚWIERNIAK  
Piotr TATJIEWSKI  
Leszek TRYBUS  
Andrzej P. WIERZBICKI

## **KOMITET ORGANIZACYJNY**

Przewodniczący  
Zastępcy Przewodniczącego

Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Stanisław KACZANOWSKI  
Tadeusz KACZOREK  
Krzysztof MALINOWSKI  
Roman OSTROWSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Dariusz WAGNER  
Jan STUDZIŃSKI  
Jan W. OWSIŃSKI

Członkowie

Sekretarze naukowi

**ISBN 83-89475-00-6**

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk  
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

# IDENTYFIKACJA I ROZPOZNAWANIE

## IDENTYFIKACJA MASY OBIEKTU W ZAWIESZENIU MAGNETYCZNYM

Adam PIŁAT

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki  
Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: ap@ia.agh.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę identyfikacji ciężaru obiektu lewitującego w zawieszeniu magnetycznym. Dla opracowanego modelu matematycznego zaprojektowano regulator cyfrowy stabilizujący obiekt lewitujący w zadanym położeniu. Eksperymenty przeprowadzono w czasie rzeczywistym korzystając ze zintegrowanego środowiska MATLAB/Simulink. Na podstawie znanych parametrów układu i wielkości mierzonych dokonano estymacji masy zawieszono obiektu. Korzystając z charakterystyk opisujących układ oszacowano zakres zmian identyfikowanego parametru. Podjęto również dyskusję dotyczącą dokładności pomiarowej. Przedstawione wyniki eksperymentalne dają podstawę do dalszych modyfikacji pod względem praktycznych zastosowań.

**Słowa kluczowe:** magnetyczne zawieszenie, identyfikacja parametrów, sterowanie cyfrowe w czasie rzeczywistym.

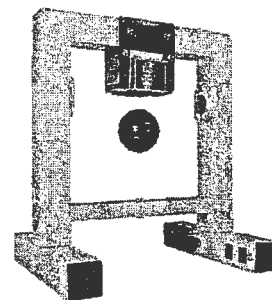
### 1. WSTĘP

W układach wykorzystujących zawieszenia magnetyczne [1] zachodzi potrzeba określenia ciężaru obiektu lewitującego lub zmian własności środowiska go otaczającego. Może ona służyć celom pomiarowym, identyfikacyjnym [2] lub do odpowiedniego doboru strategii sterowania mającej na celu zapewnienie wymaganych własności dynamicznych zawieszenia [3].

Wytwarzanie siły elektromagnetycznej zapewniającej lewitację w polu grawitacyjnym zależy od masy obiektu. Dlatego też każdy siłownik elektromagnetyczny charakteryzuje między innymi maksymalny ciężar i odległość lewitującego obiektu. Parametry te są zapewniane podczas konstruowania układu wykonawczego siłownika.

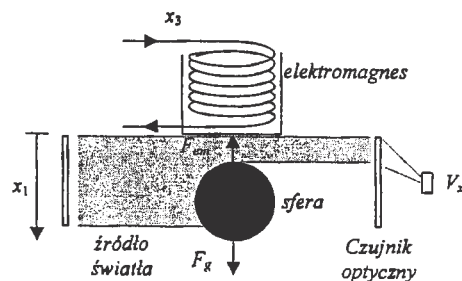
### 2. OPIS MAGNETYCZNEGO ZAWIESZENIA

Laboratoryjny system zawieszenia magnetycznego [4] składa się z podstawowych elementów: siłownika elektromagnetycznego, źródła i detektora światła, obiektu ferromagnetycznego (rys. 1). Działanie systemu polega na wytworzeniu odpowiedniej wartości siły elektromagnetycznej celem zrównoważenia siły grawitacji działającej na obiekt (rys. 2). Sygnałem sterującym jest sygnał PWM o stałej częstotliwości lecz zmiennym wypełnieniu.



Rys. 1. Laboracyjny system zawieszenia magnetycznego.

System zawieszenia magnetycznego umożliwia wykonywanie pomiaru: odległości obiektu od powierzchni siłownika oraz wartości prądu płynącego przez cewkę.



Rys. 2. Zasada działania zawieszenia magnetycznego.

System zawieszenia magnetycznego jest modelowany za pomocą układu równań różniczkowych postaci:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\frac{F_{em}}{m} + g \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{f_i(x_1)}(k_i u + c_i - x_3) \end{aligned} \quad (1)$$

Siła elektromagnetyczna jest funkcją nieliniową zależną od prądu cewki i odległości obiektu od powierzchni siłownika:

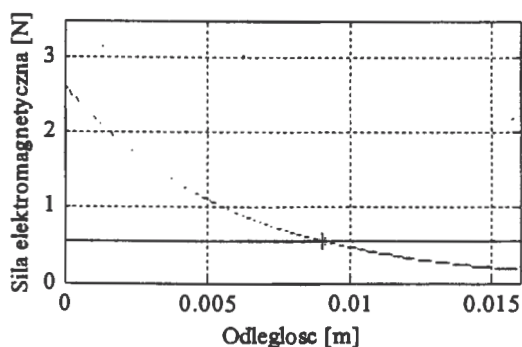
$$F_{em} = x_3^2 \frac{F_{emP1}}{F_{emP2}} \exp\left(-\frac{x_1}{F_{emP2}}\right) \quad (2)$$

Wpływ obecności obiektu na siłownik elektromagnetyczny jest modelowany za pomocą funkcji  $f_i$ . Oddziaływanie to

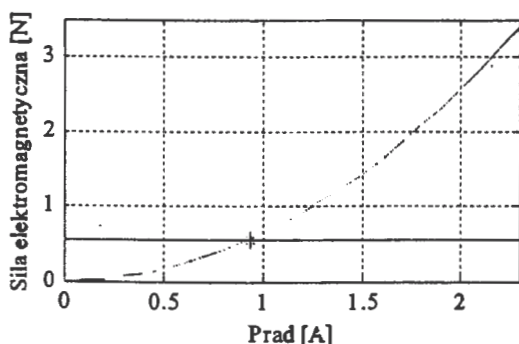
jest obserwowane w bliskim otoczeniu ( $x_1 < 5 \cdot 10^{-3}$  m) siłownika.

$$f_i(x_1) = \frac{f_{iP1}}{f_{iP2}} \exp\left(-\frac{x_1}{f_{iP2}}\right) \quad (3)$$

Ograniczenia zmiennych stanu i sterowania wynikające z konstrukcji systemu laboratoryjnego wynoszą:  $x_1 \in [0, 0.016]$  m,  $x_2 \in [-1.82, 0.56]$  m/s,  $x_3 \in [0.04, 2.38]$  A,  $u \in [0.005, 1]$ . Zależność siły elektromagnetycznej od położenia obiektu oraz od płynącego przez cewkę prądu przedstawiają rys. 3 i 4. Dodatkowo na wykresach przedstawiono siłę ciężkości dla masy 0.0571 kg. Siła ta równoważona jest przez siłę elektromagnetyczną w zaznaczonych punktach: dla odległości 0.009 m i wartości prądu 0.9098 A.



Rys. 3. Siły elektromagnetyczna w funkcji odległości.



Rys. 4. Siła elektromagnetyczna w funkcji prądu.

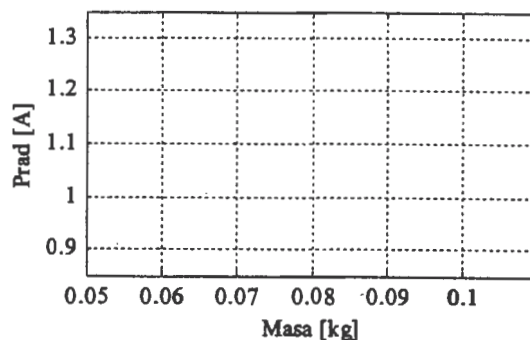
Na podstawie nieliniowych równań stanu (1) można wyznaczyć punkty równowagi, a z ich postaci analityczną formułę określającą masę lewitującego obiektu w odległości  $x_{10}$  przy wartości prądu  $x_{30}$ .

$$m = F_{em0} \cdot g^{-1} \quad (4)$$

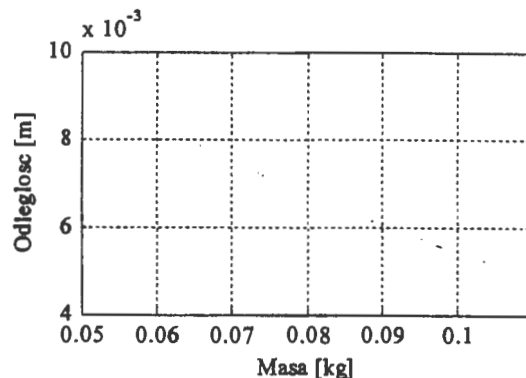
### 3. ANALIZA SYSTEMU NA POTRZEBY IDENTYFIKACJI MASY

Formuła (4) pozwala jednoznacznie wyznaczyć masę obiektu lewitującego na podstawie znajomości formuły (2) oraz mierzonych wartości położenia i prądu w punkcie

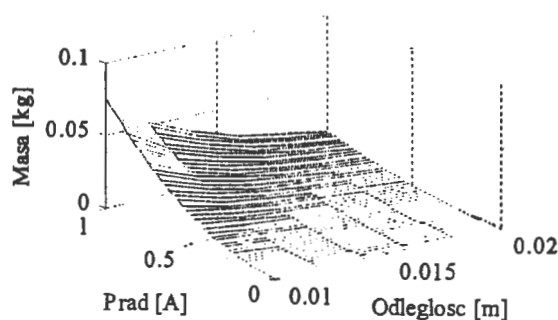
stabilizacji. System magnetycznej lewitacji powinien zapewnić pomiar masy w przypadku jej zmiany. Na rys. 5 przedstawiono wartości prądu w cewce wymagane do zapewnienia stabilizacji obiektów o różnych masach w zadanym położeniu. Rys. 6 pokazuje zmianę wymaganą położenia wskutek zmiany masy obiektu przy niezmienności wartości prądu. Na podstawie powyższych rozważań można zauważyć, że siła przyciągania zwiększa się wraz ze zmniejszaniem się odległości. Jednocześnie zwiększa się dynamika układu zawieszenia magnetycznego.



Rys. 5. Wymagana zmiana prądu przy zmianie masy dla stabilizacji obiektu w zadanym położeniu.



Rys. 6. Zmiana wymaganej odległości obiektu przy stałej wartości prądu wskutek zmieniającej się masy.



Rys. 7. Punkty równowagi systemu magnetycznego zawieszenia przy zmiennej masie.

Zmiana warunków pracy spowodowana zmianą masy wpływa na wybór układu sterowania. W niniejszej pracy

rozważony zostanie regulator PID stabilizujący sferę w zadanym położeniu.

#### 4. STEROWANIE

Przyjmując następujące założenia: lewitacja obiektu będzie odbywała się w odległości ok. 0.009 m, co niesie możliwość przyjęcia  $f_i = const$ , zmiana stanu będzie w zachodząc w małym otoczeniu punktu pracy można przyjąć aproksymację modelu nieliniowego w zadanym punkcie stabilizacji modelem liniowym

##### 4.1 Model liniowy

Przyjmując w/w założenia oraz spełniając ograniczenia modelu (1) można dokonać linearyzacji w zadanym punkcie pracy i otrzymać model liniowy:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \alpha & 0 & \beta \\ 0 & 0 & \gamma \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$C^T = [1 \quad 0 \quad 0], D = 0$$

Stosując sterowanie cyfrowe [5] z okresem próbkowania  $T_0$  można wyznaczyć model dyskretny układu (5) w postaci:

$$x(i+1) = A_D x(i) + B_D u(i) \quad (6)$$

$$y(i) = C_D^T x(i)$$

gdzie:  $A_D = e^{A T_0}$ ,  $B_D = \int_0^{T_0} e^{A t} dt B$ ,  $C_D = C$

$$e^{A T_0} = \begin{bmatrix} A_{D1} & A_{D2} & A_{D3} \\ A_{D4} & A_{D5} & A_{D6} \\ 0 & 0 & A_{D7} \end{bmatrix}, B_D = \begin{bmatrix} B_{D1} \\ B_{D2} \\ B_{D3} \end{bmatrix}$$

a następnie transmitancję układu otwartego w postaci:

$$G_O(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0} \quad (7)$$

gdzie:

$$b_2 = B_{D1}$$

$$b_1 = A_{D2} B_{D2} + A_{D3} B_{D3} - A_{D7} B_{D1} - A_{D5} B_{D1}$$

$$b_0 = A_{D5} A_{D7} B_{D1} + A_{D2} A_{D6} B_{D3} - A_{D2} A_{D7} B_{D2} - A_{D3} A_{D5} B_{D3}$$

$$a_2 = -A_{D1} - A_{D5} - A_{D7}$$

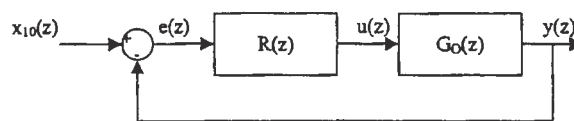
$$a_1 = A_{D1} A_{D7} + A_{D1} A_{D5} + A_{D5} A_{D7} - A_{D2} A_{D4}$$

$$a_0 = A_{D2} A_{D4} A_{D7} - A_{D1} A_{D5} A_{D7}$$

##### 4.2 Regulator PID

Celem działania regulatora jest stabilizacja obiektu lewitującego w zadanym położeniu. Regulator PID [5, 6] realizuje to zadanie, a w szczególności kompensuje

zakłócenie spowodowane zmianą masy obiektu lewitującego.



Rys. 8. Układ regulacji.

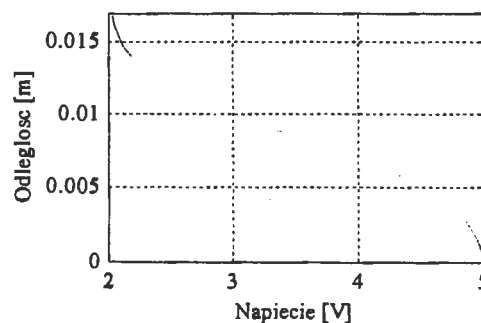
Parametry regulatora cyfrowego (8) zostały tak dobrane aby zapewnić stabilną pracę systemu w zakresie wymaganej zmienności masy.

$$R(z) = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (8)$$

gdzie:  $q_0 = 4100.2$ ,  $q_1 = -8100$ ,  $q_2 = 400$ .

#### 5. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Eksperymenty przeprowadzono z wykorzystaniem trzech mas wynoszących odpowiednio:  $m_1 = 0.05710$  kg,  $m_{II} = 0.08540$  kg,  $m_{III} = 0.10627$  kg. Ciężary wzorcowe określono za pomocą wagi laboratoryjnej o dokładności 0.01g. W celu uniknięcia błędów pomiarowych związanych z czujnikiem położenia, zapewniono lewitację obiektu o masie  $m_1$ , odpowiednio zwiększając jej ciężar. Zapewniono również pracę układu w zakresie liniowym charakterystyki czujnika położenia obiektu (rys. 9)

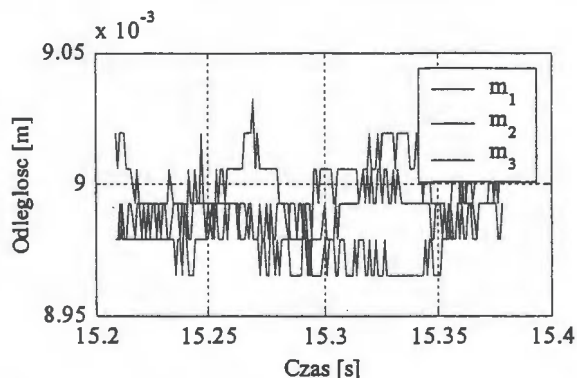


Rys. 9. Charakterystyka czujnika położenia.

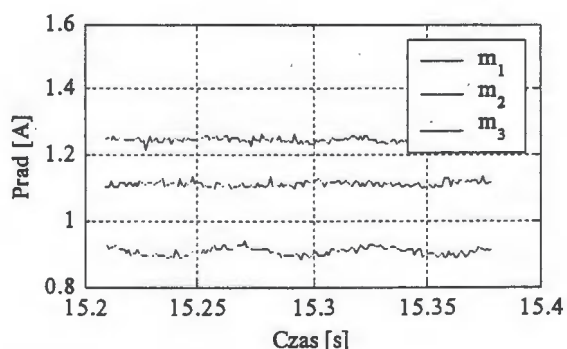
Sygnal położenia w zakresie liniowym, tj. dla napięć  $V_p \in [2.69662, 4.40156]$  V, odpowiadającym zakresowi odległości  $x_i \in [0.0056, 0.0112]$  m jest mierzony z dokładnością 8.019  $\mu$ m. Ze względu na zależność masy również od wartości prądu konieczne jest uwzględnienie rzeczywistego pomiaru prądu i jego charakterystyki. Pomiarowy sygnał napięciowy z zakresu  $[0.262899, 2.269865]$  V reprezentuje prąd płynący przez cewkę w zakresie  $[0.25, 2.43]$  A stanowiąc funkcją liniową. Pomiar prądu jest realizowany z dokładnością 2.651896 mA.

Wykonano eksperymenty polegające na stabilizacji mas w zadanym położeniu (eksperyment 1). Na podstawie danych pomiarowych, dla każdego z punktów stabilizacji wyznaczono wartości położenia sfery, prędkości sfery, prądu w cewce i sterowania. Rys. 10 przedstawia działanie

regulatora – stabilizację położenia każdego z zawieszonych obiektów. Wyznaczone sterowanie spowodowało wzrost prądu w cewce wraz ze wzrostem masy obiektu (rys. 11).



Rys. 10. Położenie obiektów lewitujących.



Rys. 11. Wartości prądów zarejestrowane podczas zawieszenia obiektów o różnych masach.

Dodatkowo przeprowadzono dla każdego z obiektów stabilizację w czterech położeniach zlokalizowanych w otoczeniu punktu 0.009 m (eksperyment 2). Dokonując analizy danych pomiarowych i wykorzystując metodę estymacji wartości stałej w modelu metodą najmniejszych kwadratów [7] otrzymano wartości mas dla poszczególnych obiektów lewitujących. Zestawienie wartości wzorcowych i zidentyfikowanych przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wyniki eksperymentu

Masa	Wartość wzorcowa [kg]	Wartość – eksperyment 1 [kg]	Wartość – eksperyment 2 [kg]
$m_I$	0.05710	0.0570	0.0578
$m_{II}$	0.08540	0.0858	0.0842
$m_{III}$	0.10627	0.1081	0.1031

Zaobserwowane różnice wynikają ze zbyt krótkich czasów niezbędnych do stabilizacji obiektu po zmianie położenia oraz z zastosowania układu liniowego na potrzeby sterowania.

## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań należy stwierdzić, że jakość wyznaczenia masy lewitującego obiektu zależy w szczególności od modelu siły elektromagnetycznej i dokładności pomiarowej. Na dokładność pomiarową mają wpływ między innymi: formowanie sygnału sterującego, rodzaj przetwornika A/C oraz zakłócenia sygnałów. Kolejny etap prac będzie poświęcony zwiększeniu dokładności pomiarowej, zastosowaniu sprzętowego sterownika (np. [8]), modyfikacjom modelu w celu uzyskania jak najlepszej zgodności z obiektem rzeczywistym, uwzględnieniu dokładności obliczeń związanej z reprezentacją wartości rzeczywistych w systemie mikroprocesorowym lub innym rozwiązaniu sprzętowym oraz rozszerzeniu zakresu pomiarowego poprzez zastosowanie nieliniowych technik regulacji [3].

## MASS IDENTIFICATION IN THE MAGNETIC SUSPENSION

**Abstract:** In this paper simulation and experimental results of mass estimation in the magnetic suspension system are presented. For the linear discrete model of the system the digital controller was developed. The real-time control task was realized using laboratory test rig. The estimated mass was obtained via calculation based on model parameters and measurements. The quality of estimation was discussed for the future practical use.

## Literatura

- [1] Suzuki S., Kawashima M., Hosoda. Y, Tanida T.: HSST-03 System. IEEE Transactions On Magnetics, vol. MAG-20, no. 5, September 1984, str. 1675 + 1677.
- [2] Gillon P. (2001) Magnetic Suspension: a Powerful Tool for Contactless Processing of Materials. 6th International Symposium on Magnetic Suspension Technology, 7-11 October, Turin, Italy.
- [3] Piłat A. (2002) Sterowanie układami magnetycznej lewitacji. Praca Doktorska, AGH Katedra Automatyki.
- [4] Magnetic Levitation System (2005), INTECO Ltd. Kraków.
- [5] Larminat P., Thomas. Y (1983) Automatyka – układy liniowe, WNT Warszawa
- [6] Grega W. (2004) Metody i algorytmy sterowania cyfrowego w układach scentralizowanych i rozproszonych. Wydawnictwo AGH, Kraków
- [7] Soderstrom T., Stoica P. (1997) Identyfikacja systemów. PWN Warszawa
- [8] Piątek P. (2005), Sterowanie magnetycznym zawieszeniem z wykorzystaniem szybkich sterowników opartych na technologii FPGA. Krajowa Konferencja Automatyki 2005, Warszawa

*Praca była finansowana ze środków na działalność statutową AGH*





**Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk**

**ISBN 83-89475-02-2**