

Systemy aktywnej lewitacji magnetycznej

Adam Krzysztof Piłat

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział EAIiE, Katedra Automatyki

Streszczenie: Systemy aktywnej lewitacji stanowią nowoczesne rozwiązanie technologiczne umożliwiające bezkontaktowe unoszenie elementów ferromagnetycznych. Prowadzone systematycznie badania doprowadziły do opracowania metod projektowania, prototypowania, syntezy sterowania, modelowania, symulacji, uruchamiania i badania konstruowanych prototypów. Niniejsze opracowanie ilustruje wybrane zagadnienia dotyczące tej technologii.

Słowa kluczowe: aktywna lewitacja magnetyczna, aktywne łożysko magnetyczne, prototypowanie i sterowanie w czasie rzeczywistym

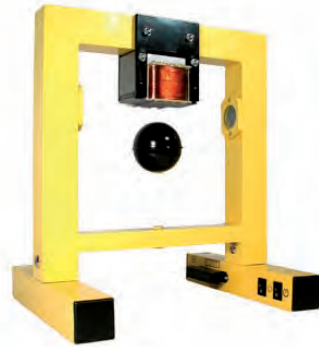
Jednym z efektów rozwoju teorii sterowania, elektronicznej techniki analogowej i cyfrowej oraz mechaniki precyzyjnej jest możliwość realizacji urządzeń wykorzystujących sterowaną lewitację magnetyczną. Problematyka sterowania w czasie rzeczywistym jest ściśle związana z rozwojem tych układów oraz różnych aplikacji docelowych. Poszukiwane są nowe rozwiązania w dziedzinie sterowania i projektowania takich urządzeń, aby zwiększać ich efektywność, sprawność i precyzję działania.

Systemy aktywnej lewitacji magnetycznej są technologią coraz częściej stosowaną w nowoczesnych rozwiązaniach przemysłowych i należy się spodziewać dalszego rozwoju obszarów badawczych i zastosowań praktycznych. Zastosowano ją między innymi w pociągach Mag-Lev oraz aktywnych łożyskach magnetycznych, montowanych między innymi w generatorach, sprężarkach, pompach próżniowych i kinetycznych akumulatorach energii.

Coraz większą wagę przywiązuje się do niezawodności systemów, ich miniaturyzacji, minimalizacji kosztów projektowania i wytwarzania, oraz skrócenia czasu od pomysłu do wdrożenia. Te wszystkie aspekty sprawiają, że systemy aktywnej lewitacji magnetycznej wymagają spojrzenia interdyscyplinarnego oraz stosowania najnowszych osiągnięć nauki i techniki. Dlatego też są one zaliczane do urządzeń mechatronicznych, wykorzystujących pole magnetyczne do bezkontaktowego unoszenia obiektów (rys. 1). Ich działanie nie jest możliwe bez zastosowania układu automatycznej regulacji. To właśnie system sterowania stanowi jądro układu aktywnej lewitacji magnetycznej i jego cechy oraz działanie w czasie rzeczywistym determinują o właściwościach urządzenia.

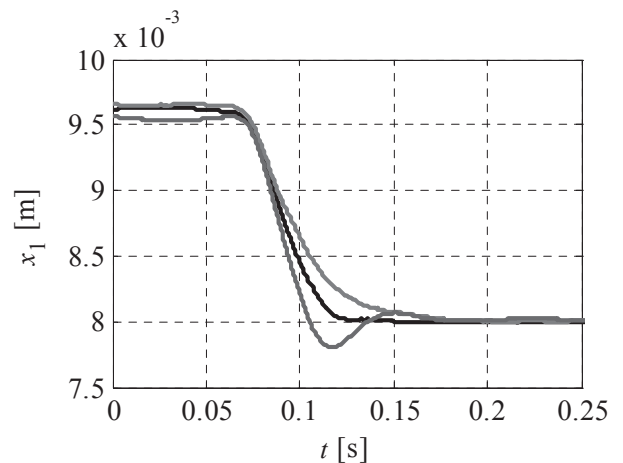
Odpowiednie zaprojektowanie i działanie układu automatycznej regulacji pozwala na kształtowanie właściwości dynamicznych układu zamkniętego (rys. 2). Uwzględnienie tych pożądaných właściwości w procedurze projektowania i konstruowania siłownika elektromagnetycznego pozwala na otrzymanie odpowiednich wartości sprężystości

i tłumienia takiego zawieszenia. W zależności od docelowego zastosowania projektuje się regulator tak, aby spełniał wymagania aplikacyjne.



Rys. 1. MLS1EM – system aktywnej lewitacji magnetycznej z jednym elektromagnesem do badania i demonstracji układów automatycznej regulacji

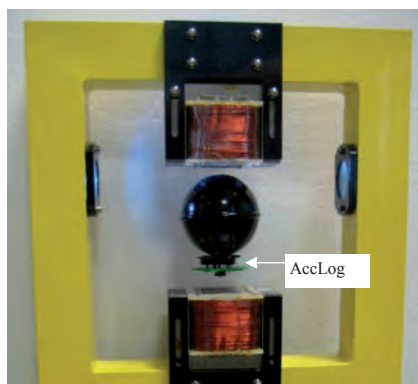
Fig. 1. Active magnetic levitation system (MLS1EM)



Rys. 2. Ilustracja konfigurowanych właściwości dynamicznych w aktywnym zawieszeniu magnetycznym

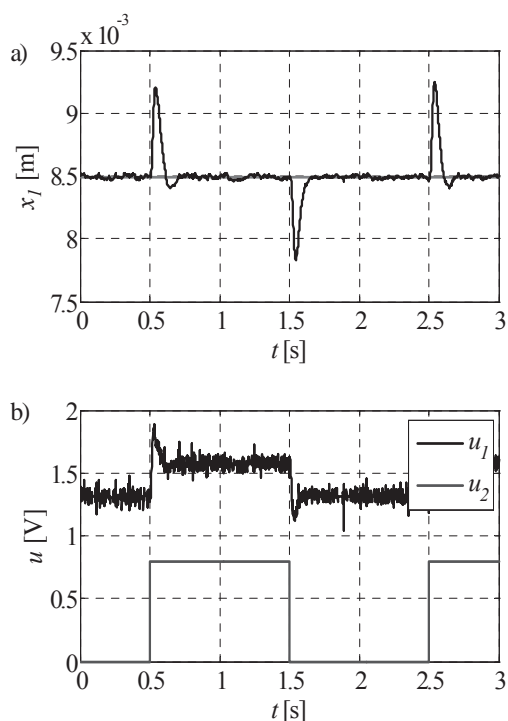
Fig. 2. Configurable dynamical properties in active magnetic levitation systems

Badanie układów regulacji rozszerza się przez zastosowanie dodatkowego siłownika elektromagnetycznego umieszczonego naprzeciwlegle do siłownika górnego – sterującego (rys. 4), otrzymując nową funkcjonalność urządzenia. Dla systemów aktywnej lewitacji stawia się zadania konstrukcji regulatorów odpornych na zewnętrzne zakłócenia (rys. 4b), konstruując np. regulator hybrydowy wykorzystujący strukturę regulatora PD oraz sieci neuronowej zmieniający konfigurację w czasie rzeczywistym i eliminujący uchyb położenia obiektu lewitującego (rys. 4a).



Rys. 3. System aktywnej lewitacji magnetycznej (MLS2EM) z dwoma elektromagnesami do badania układów automatycznej regulacji (Autonomiczny czujnik przyspieszenia przymocowany do lewitującej sfery)

Fig. 3. Active magnetic levitation system (MLS2EM) with two electromagnets for research in the control field (Acceleration logger attached to the levitated object)

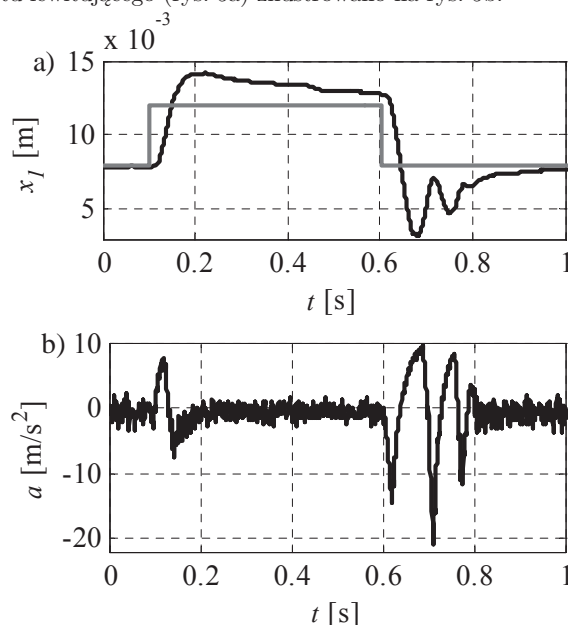


Rys. 4. Stabilizacja sfery przez regulator hybrydowy z opcją adaptacji przy zewnętrznym wymuszeniu: a) przemieszczenie obiektu lewitującego; b) sygnały sterujące siłowników elektromagnetycznych

Fig. 4. Levitated object stabilized by the hybrid controller during external excitation: a) displacement of the levitated object; b) control signals applied to electromagnetic actuators

Prowadzenie badań wymaga również działań identyfikacyjnych i weryfikujących opracowane rozwiązania. Podczas prac badawczych realizowano identyfikację sił elektromagnetycznych, zjawiska termodynamiczne, właściwości pola magnetycznego w obszarze lewitacji i przyspieszenia obiektu lewitującego. Do realizacji tych badań projektuje

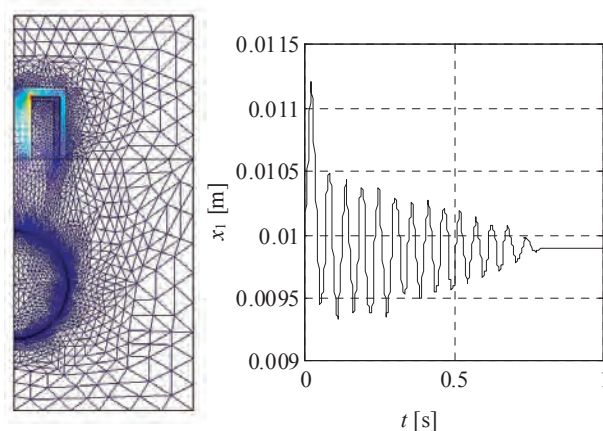
i konstruuje się urządzenia wspomagające, np. autonomiczny czujnik przyspieszenia *AccLog* (rys. 3), umożliwiający weryfikację dynamiki w układzie lewitującym. Zarejestrowane przyspieszenia przy pionowym przemieszczaniu obiektu lewitującego (rys. 5a) zilustrowano na rys. 5b.



Rys. 5. Identyfikacja przyspieszenia z wykorzystaniem autonomicznego rejestratora przyspieszenia

Fig. 5. Identification of levitated object acceleration by autonomous logger

Aby realizować zadania projektowania nowych urządzeń, opracowano metodę interdyscyplinarnego projektowania, modelowania i symulacji, które stanowi obecnie podstawowe narzędzie projektowania i analizy złożonych układów fizycznych. Metodę projektowania poszerzono o zagadnienia sterowania, włączając analizę metodą elementów skończonych równania opisujące dynamikę ruchu obiektu lewitującego pod wpływem sterowanych sił elektromagnetycznych. Uwzględnienie działania regulatora w takiej fazie modelowania pozwoliło otrzymać wersję wirtualnego prototypu (rys. 6).

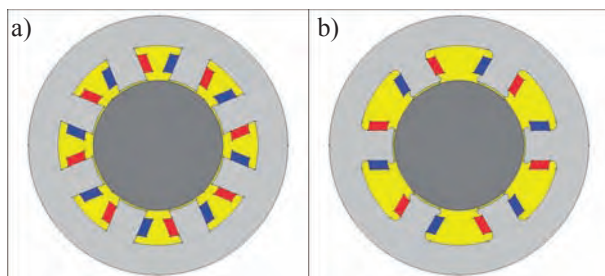


Rys. 6. Model dynamiczny aktywnego zawieszenia magnetycznego wraz z wbudowanym układem sterowania

Fig. 6. Dynamical model of active magnetic suspension with embedded control system

W tak zintegrowanym środowisku możliwe jest prowadzenie badań i synteza sterowania już na etapie fazy projektowej i modelowej. Opracowana metoda tworzenia wirtualnych prototypów wraz z oprogramowaniem jest dzisiaj stosowana jako narzędzie przez inżynierów automatyków.

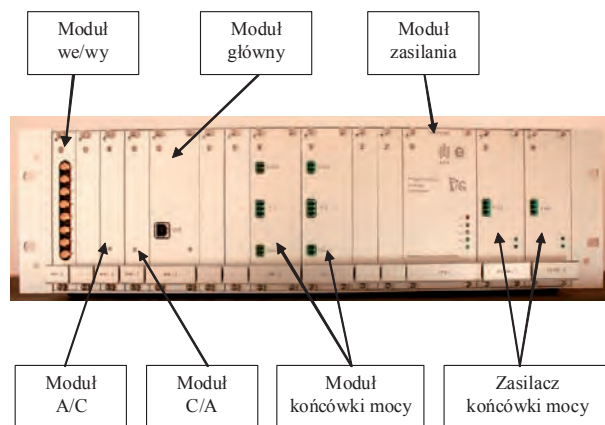
Na potrzeby projektowania maszyn wirnikowych opracowano metodę automatycznej generacji aktywnych łożysk magnetycznych z zastosowaniem geometrii analitycznej pozwalającą na tworzenie bazy dla wirtualnych prototypów. Narzędzie to może być również z powodzeniem zastosowane do projektowania silników elektrycznych (rys. 7).



Rys. 7. Automatycznie wygenerowane konfiguracje aktywnych łożysk magnetycznych.

Fig. 7. Automatically generated constructions of active magnetic bearing

Aby spełnić rygorystyczne wymagania stawiane sterowaniu układami lewitacji, opracowano konfigurowany sterownik, którego zasoby sprzętowe i programowe są w pełni ustawiane przez użytkownika. Ta uniwersalna aparatura może być wykorzystana do sterowania innymi urządzeniami ze względu na swoje szczególne modułowe właściwości konfiguracyjne. Sterownik (rys. 8) umożliwia zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego z częstotliwością do kilkuset kHz w zależności od zaprojektowanej konfiguracji.

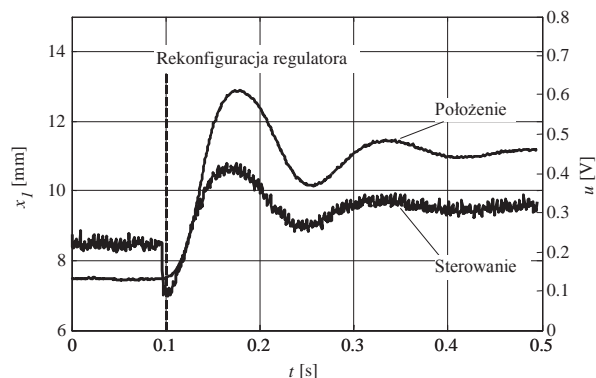


Rys. 8. Konfigurowany sterownik przemysłowy (PAC) do sterowania w reżimie twardego czasu rzeczywistego

Fig. 8. Configurable industrial controller (PAC) devoted to hard real-time tasks

Ponadto, sterownik ten ma szczególne właściwości umożliwiające zmianę parametrów układu regulacji podczas realizacji sterowania w czasie rzeczywistym. Na rys. 9

przedstawiono rekonfigurację regulatora w czasie rzeczywistym pozwalającą na zmianę właściwości dynamicznych układu lewitującego oraz przemieszczenie sfery bez utraty stabilności.

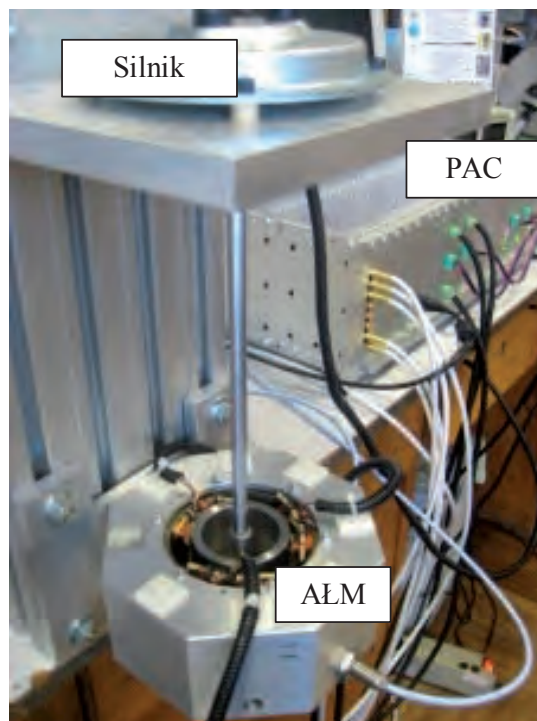


Rys. 9. Rekonfiguracja w czasie rzeczywistym regulatora stabilizującego

Fig. 9. Stabilizing controller reconfigured in hard-real time regime

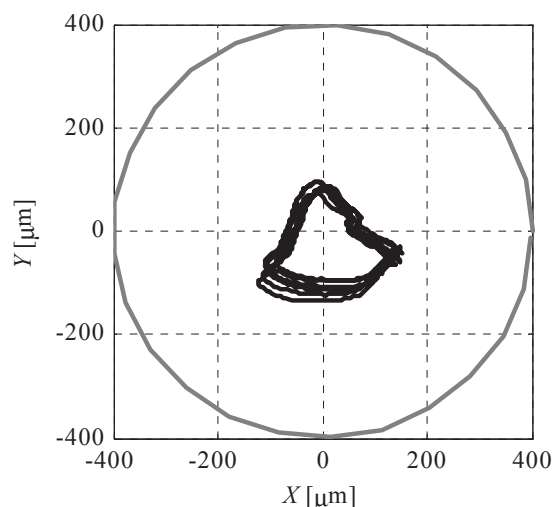
Prototypowe stanowisko badawcze do badania zaprojektowanego łożyska magnetycznego skonfigurowano jako pionową maszynę wirnikową (rys. 10) i zrealizowano stabilizację wirnika w przestrzeni łożyskowej przy prędkości obrotowej 3894 obr/min (rys. 11). Opracowany algorytm regulacji uruchomiono na opracowanym sterowniku przy częstotliwości 50 kHz zegara taktującego pętlę regulacji.

Zdobyte doświadczenie podczas realizacji prac badawczych i projektowych stanowi bazę wiedzy dla realizacji projektów systemów aktywnej lewitacji magnetycznej.



Rys. 10. Konfigurowane stanowisko badawcze aktywnego łożyska magnetycznego

Fig. 10. Configurable active magnetic bearing test-rig



Rys. 11. Trajektoria wirnika w przestrzeni łożyskowej przy prędkości obrotowej 3894 obr/min.

Fig. 11. Rotor trajectory in the AMB plane at 3894 rpm

Bibliografia

1. Bania P.: *Model i sterowanie magnetyczną lewitacją*, praca dyplomowa, Katedra Automatyki AGH, Kraków 1999.
2. Baranowski J., Piątek P., Piłat A.: *Nonlinear observer design for the magnetic levitation system*, „Recent advances in control and automation”, Warsaw, Academic Publishing House EXIT, 2008, 63–72.
3. [www.inteco.com.pl] – MLS1EM, MLS2EM, User's Guide, INTECO, Krakow.
4. Piątek P., Piłat A., Marchewka D.: *Magnetyczne zawieszenie sterowane 8-bitowym mikrokontrolerem*, CMS, 14–16 November 2005, Kraków, 133–136.
5. Piątek P.: *Wykorzystanie specjalizowanych architektur sprzętowych do realizacji krytycznych czasowo zadań sterowania*, praca doktorska, AGH, promotor: W. Grega, 2007.
6. Piłat A.: *Sterowanie układami magnetycznej lewitacji*, praca doktorska, AGH, promotor: W. Grega, 2002.
7. Piłat A.: *FEMLab software applied to active magnetic bearing analysis*, „International Journal of Applied Mathematics and Computer Science”, 2004 vol. 14 no. 4, 497–501.
8. Piłat A.: *Programmable analog hardware for control systems exemplified by magnetic suspension*, CMS, November 14–16, Kraków, Poland, 2005, 143–148.
9. Piłat A.: *Active magnetic suspension and Bering*, [w:] Petrone G., Camarata G. (red.): *Modelling and simulation*, InTech Education and Publishing, Vienna 2008, 453–470.
10. Piłat A.: *Prototypowanie systemów aktywnej lewitacji magnetycznej*, Kierunki działalności i współpraca naukowa Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Infor-

matyki i Elektroniki: materiały konferencji zorganizowanej z okazji jubileuszu 90-lecia AGH Kraków, 28–29 maja 2009, 43–44.

11. Piłat A.: *Analytical modeling of active magnetic bearing geometry*, „Applied Mathematical Modelling”, vol. 34, issue 12, 2010, 3805–3816.
12. Piłat A., Grega W.: *Reconfigurable test-rig for AMB control*, 7th Conference on Active noise and vibration control methods, June 8–12, Wigry, 2005, 1–8.
13. Piłat A., Klocek J.: *Modułowa aparatura do zadań diagnostyki i sterowania*, „Pomiary Automatyka Robotyka” nr 2/2011, 707–716.
14. Piłat A., Turnau A.: *Self-organizing fuzzy controller for magnetic levitation system*, CMS, 14–16 November, Kraków, Poland, 2005, 101–106.
15. Piłat A., Turnau A.: *Neural adapted controller learned on-line in real-time*, MMAR, August 19–21, Międzyzdroje, Poland, [www.ifac-papersonline.net], 2009, 1–6.
16. Rosół M., Piłat A., Turnau A.: *Real-time controller design based on NI CompactRio*, IMCSIT, October 18–20, Wisła, Poland, 2010, 825–830. ■

Active Magnetic Levitation Systems

Abstract: Active magnetic levitation systems are modern devices that allows to perform operation of many machines without physical contact. The systematically realized research lead to custom methods in the prototyping, manufacturing, identification and control fields. This paper presents selected results of the realized research.

Keywords: active magnetic levitation, active magnetic bearing, prototyping and real-time control

dr inż. Adam Piłat



W 1996 r. ukończył studia w Akademii Górniczo-Hutniczej na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Elektroniki AGH, uzyskując tytuł magistra inżyniera w dziedzinie Automatyka i Robotyka. W 2002 r. uzyskał tytuł doktora nauk technicznych w dziedzinie Automatyka i Robotyka na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki Informatyki i Elektroniki AGH.

Jest autorem i współautorem 67 publikacji, trzech zgłoszeń patentowych w UP RP, członkiem IEEE. Prowadzone przezeń badania są ukierunkowane na rozwój aspektów projektowania, modelowania i sterowania w czasie rzeczywistym układami aktywnej lewitacji magnetycznej.

e-mail: ap@agh.edu.pl