

ADAM PIŁAT

Systemy aktywnej lewitacji magnetycznej

Streszczenie

*Wszystko należy upraszczać jak tylko można,
ale nie bardziej.*

*Nauka bez religii jest ułomna,
religia bez nauki jest ślepa.*

Albert Einstein

Sterowanie w czasie rzeczywistym systemami aktywnej lewitacji magnetycznej (ALM), metody badawcze wspomagane konstruowanymi prototypami oraz interdyscyplinarne modelowanie stanowią rdzeń pracy i przedstawiają obszary zainteresowań autora.

Celem głównym pracy jest przedstawienie wyników badań dotyczących praw sterowania dla systemu aktywnego zawieszenia magnetycznego (AZM), metod i narzędzi do prototypowania, modelowania, symulacji, projektowania regulatorów i analizy działania AZM oraz aktywnego łożyska magnetycznego (AŁM). Opracowanie metodyki projektowania wirtualnych prototypów systemów ALM oraz zaprojektowanie, wykonanie i uruchomienie dedykowanego sterownika realizującego sterowanie AZM i AŁM w reżimie twardego czasu rzeczywistego uważa się za najważniejsze cele pracy.

Jednym z efektów rozwoju teorii sterowania, elektronicznej techniki analogowej i cyfrowej oraz mechaniki precyzyjnej jest możliwość realizacji urządzeń wykorzystujących ALM. Problematyka sterowania w czasie rzeczywistym jest ściśle związana z rozwojem tej technologii oraz różnych aplikacji docelowych. Poszukiwane są nowe rozwiązania w dziedzinie sterowania urządzeń o większej efektywności, sprawności i precyzji działania. Systemy ALM są technologią coraz częściej stosowaną w nowoczesnych rozwiązaniach przemysłowych i należy się spodziewać dalszego rozwoju obszarów badawczych i zastosowań praktycznych.

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 ALM wymagają spojrzenia interdyscyplinarnego oraz stosowania najnowszych osiągnięć nauki i techniki. Zalicza się je do urządzeń mechatronicznych, wykorzystujących pole magnetyczne do bezkontaktowego unoszenia obiektów. Nieliniowości pochodzące od sił elektromagnetycznych oraz niestabilność sprawiają, że tylko dzięki sterowaniu aplikowanemu w nieprzerwany sposób systemy te mogą podtrzymywać swe działanie.

W systemach ALM najistotniejszy jest układ sterowania. Jego cechy oraz działanie w czasie rzeczywistym determinują własności urządzenia. Tematem przewodnim pracy jest poszukiwanie efektywnego rozwiązania konstrukcyjnego układu wykonawczego i układu sterowania przy zapewnieniu wymaganych parametrów dynamicznych i jakości sterowania. Opracowanie modeli numerycznych systemów ALM stanowi ważny element w fazie projektowania nowych urządzeń. Proponowany model dynamiczny zawierający opis pola magnetycznego, dynamiki ruchu obiektu lewitującego oraz prawa sterowania stanowi wirtualny prototyp urządzenia. Automatyzacja modelowania pozwala na skrócenie czasu realizacji koncepcji nowego urządzenia. Mając na uwadze praktyczne zastosowania

urządzeń z technologią lewitacji w przyszłości, opracowano metodykę projektowania wirtualnych prototypów oraz dedykowany sterownik przemysłowy.

Metoda szybkiego prototypowania algorytmów sterowania i różnorakie doświadczenia z kartami sterująco-pomiarowymi pokazały, iż dla aplikacji przemysłowych byłoby wielce pożyteczne opracowanie dedykowanego rozwiązania sprzętowo-programowego, zapewniającego zakładaną jakość sterowania systemami ALM. Automatyzacja projektowania układów regulacji dla takiego sterownika stanowi indywidualne rozwiązanie z zakresu metod szybkiego prototypowania.

Prowadzone prace były motywacją do:

- zaproponowania metody i opracowania interdyscyplinarnych modeli systemów ALM użytecznych dla celów zautomatyzowanego prototypowania, projektowania regulatorów i symulacji,
- zbadania własności systemów ALM a w szczególności ALM do celów modelowania, symulacji i projektowania regulatorów,
- zaproponowania odpowiedniej konfigurowanej architektury sprzętowej przeznaczonej do zadań sterowania,
- zaproponowania efektywnych metod i narzędzi programowych wspierających automatyzację syntezy i realizacji praw sterowania w analogowych układach rekonfigurowanych,
- zbadania minimalnej konfiguracji układu sterowania gwarantującej lewitację, a dającej możliwość rekonfiguracji dynamiki systemu lewitującego,
- oceny zasobów sprzętowych do realizacji praw sterowania.

Wstęp do niniejszej pracy stanowi wprowadzenie do zagadnień systemów ALM ilustrując koncepcję ich działania wraz z ich zaletami, wadami i wybranymi zastosowaniami.

W rozdziale pierwszym omówiono zagadnienia sterowania w czasie rzeczywistym na wybranych i dostępnych autorowi platformach sprzętowo-programowych. Korzystano z metody szybkiego prototypowania algorytmów sterowania cyfrowego. Przedstawiono indywidualne rozwiązanie karty sterująco-pomiarowej dedykowanej systemom ALM. Porównano poszczególne architektury programowo-sprzętowe ze względu na ich własności istotne dla sterowania cyfrowego tymi układami.

Rozdział drugi prezentuje AZM jako elementarny układ ALM. Prowadzono badania stosując klasyczne i inteligentne metody teorii sterowania. Wprowadzono sterowanie w postaci nieliniowego sprzężenia zwrotnego idealizując w ten sposób własności zawieszenia. Stosując metodę automatycznej generacji i optymalizacji struktury regulatora rozmytego wyposażono go w wiedzę o nieliniowościach strukturalnych AZM. Wykorzystanie sztucznej sieci neuronowej z mechanizmem samouczącym pozwoliło na opracowanie hybrydowego regulatora odpornego na zmianę obciążenia. Stosując metodę częstotliwościową dokonano syntezy regulatora odpornego na zmianę masy obiektu lewitującego. Przeprowadzono analizę poszczególnych rozwiązań i ocenę ich praktycznej stosowalności.

W rozdziale trzecim przedstawiono aspekty związane z projektowaniem nowoczesnych urządzeń mechatronicznych. Na potrzeby automatyzacji i optymalizacji konstrukcji opracowano metodę projektowania geometrii łożyska magnetycznego z zastosowaniem krzywych Béziera. Zwrócono szczególną uwagę na zależności geometryczne i wynikające z nich nieliniowości, prowadząc rozważania dla wirnika eliptycznego. Przeprowadzono badania siły elektromagnetycznej i indukcji magnetycznej

w przestrzeni łożyskowej oraz badania termograficzne dla zaprojektowanego i wykonanego łożyska magnetycznego.

Omówiono metodę interdyscyplinarnego projektowania, modelowania i symulacji, która stanowi narzędzie projektowania i analizy złożonych układów fizycznych. Metodę projektowania poszerzono o zagadnienia sterowania włączając w 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, co umożliwiło prowadzenie badań i syntezę sterowania już na etapie fazy projektowej i modelowej. Zagadnienia projektowe zilustrowano opracowanymi konstrukcjami AŁM o trzech i czterech siłownikach elektromagnetycznych w konfiguracji heteropolarnej, realizując zadanie stabilizacji wirnika w przestrzeni łożyskowej z uwzględnieniem dynamiki jego ruchu.

Rozdział czwarty przedstawia kompletne rozwiązanie sprzętowo-programowe, stanowiące nowatorskie opracowanie autora w obszarze konfigurowanych sterowników, w szczególności przeznaczone do sterowania układami ALM. Architektura sprzętowa aparatury została tak zaprojektowana, aby spełniać rygorystyczne wymagania sterowania w czasie rzeczywistym. Wykorzystanie nowej technologii dynamicznie programowanych procesorów analogowych pozwala na realizację zadań sterowania w reżimie twardego czasu rzeczywistego, a opracowana pół-automatyczna metoda syntezy prawa sterowania umożliwia konfigurację i weryfikację projektowanego układu automatycznej regulacji.

W rozdziale piątym przedstawiono zastosowanie opracowanego sterownika do zadań sterowania AZM i AŁM. Omówiono problemy realizacji prawa sterowania, wady i zalety wynikające z przyjętych rozwiązań technologicznych. Na wybranych przykładach pokazano jakie cechy posiada opracowane rozwiązanie sprzętowo-programowe. W efekcie otrzymano kompletne układy wykonawcze automatyki w postaci AZM oraz AŁM sterowane w reżimie twardego czasu rzeczywistego z możliwością konfiguracji struktury prawa sterowania oraz jego modyfikacji w czasie rzeczywistym podczas jego ciągłej pracy.

ADAM PIŁAT

Active magnetic levitation systems

Summary

Control in real-time of Active Magnetic Levitation (AML), scientific research methods supported by constructed prototypes and interdisciplinary modelling constitute the core of this work and present the area of the author's interests.

The main goal of this work is to present the results of research on control laws for Active Magnetic Suspension (AMS), methods and tools for prototyping, modelling, simulation, controller design purposes and analysis of AMS and Active Magnetic Bearing (AMB). Elaboration of interdisciplinary AML models in the form of virtual prototypes, as well as the design, manufacture and start-up of a dedicated controller implementing the control of AMS and AMB in a hard real-time mode, are treated as the work's most important goal.

One of the effects of evolution in the fields of control theory, analogue and digital electronics, and precision mechanics is the possibility of manufacturing devices based on AML technology. The problem of real-time control is directly connected with the evolution of these technologies and their practical applications. New devices characterised by increased effectiveness, efficiency and precision of operation are required. AML technology is increasingly used in modern industrial applications and further evolution of research areas and practical applications is expected.

More and more attention is being paid to the reliability of the devices, their miniaturisation, minimising the cost of their design and production, and shortening the time from concept to implementation. All these aspects mean that AML systems require an interdisciplinary perspective and the use of the latest achievements of science and technology. They are classified as mechatronic devices that use a magnetic field for the levitation of objects. The high nonlinearity derived from the electromagnetic forces, as well as structural instability, require the application of uninterrupted control.

In any AML device, the most important component is a control system. Its characteristics and operation in real time determine the device's properties. The main theme of this work is the search for an effective design solution for actuator and control systems ensuring the required dynamic performance and quality control. The design of AML simulation models is a key element in the prototyping stage. The proposed model, consisting of the magnetic field phenomena, the dynamics of the levitated object's motion, and control laws, constitutes a virtual prototype of the device. Automatisations of the modelling stage enables minimisation of the concept-to-product timeline. In view of the

practical use of such devices in the future, design methodology for virtual prototypes was developed as well as a dedicated industrial controller.

The rapid prototyping method of control algorithms and diverse experiences with PC-based control and data-acquisition boards showed that for industrial applications it would be highly useful to develop a dedicated hardware-software solution that ensures the assumed control quality for AML systems. Automatisation of the controller design stage for such a controller constitutes an individual solution for rapid prototyping methods.

This work provided the incentive to:

- propose methods and develop an interdisciplinary model of complex AML systems applicable to the goals of automated prototyping, controller design and simulation,
- investigate the properties of AML and particularly AMB systems required for modelling, simulation and controller design,
- propose appropriate hardware-software configurable architecture dedicated to control tasks,
- propose effective methods and software tools to support automation of synthesis and implementation of control law in programmable analogue control systems,
- Investigate minimal configurations of a control system which would guarantee levitation and make it possible to reconfigure the dynamics of the levitation system,
- Evaluate hardware resources for the implementation of control laws.

The introduction presents some preliminary information about AML systems, illustrating the concept of their operation along with their advantages, disadvantages and applications.

In the first chapter, issues concerning real-time control hardware and software platforms available to the author are discussed. A method of rapid prototyping of digital control algorithms is used. A custom control and data acquisition board dedicated to AML systems is presented. Various details of software and hardware architecture are compared with properties essential for the digital control of devices.

The second chapter presents AMS as an elementary AML system. The research was conducted using classic methods and intelligent control theory. Control was introduced in the form of a nonlinear feedback system, thus idealising properties of suspension. Applying the method of automatic generation and optimisation of the fuzzy controller structure, it was embedded with knowledge of AMS structural nonlinearities. The use of an artificial neural network with a self-learning mechanism enabled the development of a resistant hybrid controller. Using the method of frequency domain synthesis, a control resistant to the uncertain mass of the levitated object was synthesised. An analysis of the considered solutions and evaluation of their practical applicability is presented.

The third chapter discusses issues related to the design of modern mechatronic devices, with particular attention paid to aspects of control. A method for automation and construction optimisation of AMB geometry using Bezier curves is presented. Special attention is paid to rotor-bearing geometry analysis and the resulting nonlinearity, along with an analysis of the levitation gap for the elliptical rotor. This chapter presents some aspects related to the identification of the prototyped AMB. These include studies of electromagnetic force and the magnetic flux density in the AMB plane and a thermographic investigation of the AMB. An interdisciplinary approach and software environment for design, modelling and simulation is presented. This has become an essential tool for the design and analysis of complex physical systems. The design method was expanded based on the Finite Element Method, with equations describing the dynamics of levitating an

object under the influence of controlled (using control formulas) electromagnetic forces. The inclusion of the regulator in the modelling phase enabled the achievement of a virtual version of the prototype, which in turn enabled research and synthesis of control at the design and modelling stage. Subsequently, levitation issues are illustrated by an AMB containing three and four electromagnets in a heteropolar configuration, with implementation of the control and motion dynamics for rotor stabilisation in the bearing plane.

The fourth chapter presents a complete hardware and software solution representing an innovative development in the field of configurable devices, especially those designed for control of AML systems. Hardware architecture has been designed to meet the rigorous requirements of real-time control. The use of the new technology of dynamically programmed analogue processors enables the execution of control tasks in a hard real-time regime. A developed semi-automatic method for the synthesis of control law enables the configuration and verification of the proposed automatic control system.

The fifth chapter presents an application of the developed programmable controller for the AMS and AMB. The problems of control synthesis and the advantages and disadvantages resulting from the adopted technology are discussed. Selected examples show the features and limitations of the developed hardware and software solution with respect to the solutions given in chapter one. As a result, the complete solution of the AMS and AMB automatic control devices was obtained. They are steered in a hard real-time regime with the option of configuring their control-law structure and of making structural and parametric modifications in real time during continuous operation.