

## Streszczenie

W rozprawie doktorskiej przedstawiono koncepcję nowatorskiego siłownika z sześcioma nabiegownikami (6pAAMB) w aplikacji osiowego aktywnego układu zawieszenia magnetycznego. Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny, prezentując szereg badań nad wirtualnym i szybkim prototypowaniem osiowych siłowników elektromagnetycznych. Struktura rozprawy ma charakter modułowy. Swoim zakresem obejmuje wiele dziedzin nauki wokół zainteresowań autora, czego efektem jest spójny tok rozumowania prowadzący od potrzeby i pomysłu aplikacji, poprzez testowanie i weryfikację różnych koncepcji, aż po procedurę projektową, w tym modelowanie numeryczne, obliczenia analityczne, konstrukcję, kontrolę jakości, identyfikację i sterowanie. Rozprawa podzielona jest na część wstępną (Rozdziały 2-5) oraz część główną (Rozdziały 6-13).

Rozdział 2 zawiera badania nad systemem lewitacji magnetycznej z dwoma przeciwsobnymi siłownikami elektromagnetycznymi. Przeprowadzone badania potwierdziły, że właściwości dynamiczne ruchu poprzecznego można konfigurować poprzez sterowanie siłą osiową. Rozdział 3 skupia się na modelu termicznym lewitacji magnetycznej. Równania dynamiki systemu lewitacji magnetycznej rozszerzono o przepływ ciepła za pomocą nieliniowego modelu zależnego od temperatury. W rozdziale 4 omówiono koncepcję elektromagnesu z porowatym rdzeniem wraz z procedurą prototypowania wspomaganą metodą elementów skończonych. Koncepcję, konstrukcję, model i prototyp hybrydowego osiowego łożyska magnetycznego przedstawiono w rozdziale 5.

Rozdział 6 w skrócie zapoznaje czytelnika z koncepcją siłownika osiowego z kilkoma nabiegownikami, który jest zdolny do osiowej lewitacji z funkcją orientacji przestrzennej wirnika w aktywnej przestrzeni łożyska. Rozdział 7 przedstawia numeryczny model osiowego łożyska magnetycznego z sześcioma cylindrycznymi nabiegownikami. Zaproponowana konstrukcja pozwala na kontrolę kąta nachylenia wirnika za pomocą kilku składowych siły osiowej. Niezamierzony defekt siłownika stał się motywacją do napisania rozdziału 8. Eksperymenty uruchomieniowe wykazały, że zastosowana konfiguracja 6pAAMB wymaga kontroli jakości. W konsekwencji autor proponuje metodę diagnostyki osiowego siłownika elektromagnetycznego, opartą na fuzji pomiarów odległości, prądu i sygnału sterującego, według określonego scenariusza. Algorytm, który służy do diagnostyki uszkodzeń siłowników, z satysfakcjonującą dokładnością podaje różnice pomiędzy wysokościami poszczególnych nabiegowników. Wprowadzając interdyscyplinarne podejście do projektowania aktywnych łożysk magnetycznych, w rozdziale 9 przetestowano i zaadaptowano siłownik 6pAAMB w pionowej konfiguracji wirnik-wał. Rozdział 10 przedstawia model analityczny 6pAAMB, który został opracowany w celu uzyskania trójwymiarowego rozkładu składowej osiowej indukcji magnetycznej. Model wykorzystuje opis wektorowy potencjału magnetycznego i mapowanie Schwarza-Christoffela. Badania obejmują rozważania na temat wpływu efektu końcowego oraz sprzężonej funkcji permeancji. Główną zaletą proponowanego modelu jest znacznie krótszy czas obliczeń w porównaniu z modelem numerycznym przy ich zbieżności. Rozdział 11 przedstawia konfigurację pasywnego łożyska promieniowego, które wspomaga stabilizację poprzeczną lewitującego wirnika. Omówiono kilka eksperymentów pokazujących właściwości proponowanego rozwiązania. Autorskie sprzęgło magnetyczne służy do bezkontaktowego przyspieszenia wirnika do prędkości 4000 obr./min. W rozdziale 12 omówiono kompleksowe podejście do identyfikacji parametrów siłownika 6pAAMB z elektromagnesami sterowanymi prądowo. Zmierzono parametry cewek z dokładnym wskazaniem różnic. Zbadano niezawodność termiczną łożyska. Badania obejmują analizę siły elektromagnetycznej kilkoma metodami z zadawalającą zbieżnością między nimi. Ogólnie rzecz biorąc, zaproponowany siłownik mechatroniczny jest w stanie zwiększyć zakres stabilności lewitujących wirników i charakteryzuje się korzystnymi właściwościami dynamicznymi, co wykazano w testach z zewnętrznym wymuszeniem harmonicznym. Pełen opis siłownika wraz z niepewnościami parametrów uzyskano dzięki identyfikacji in situ. Na koniec rozdział 13 skupia się na przedstawieniu możliwości stabilizacji wirnika w wybranym punkcie przestrzeni aktywnej łożyska z wykorzystaniem opracowanego siłownika 6pAAMB.

W wyniku badań naukowych potwierdzono główną tezę, demonstrując zasadniczą cechę siłownika, jaką jest możliwość przestrzennego pozycjonowania lewitującego obiektu. Zagadnienia przedstawione w powyższej rozprawie podsumowują interdyscyplinarny przebieg projektowania, wytwarzania, identyfikacji i sterowania obiektem lewitacji za pomocą osiowego aktywnego łożyska magnetycznego z sześcioma nabiegownikami. Czytelnik może uznać powyższe za schemat projektowania siłownika osiowego z kilkoma nabiegownikami. Autor traktuje tę pracę jako wstęp i zaproszenie do dalszych badań naukowych.

16.02.2023

Silone

## Abstract

The doctoral dissertation presents the concept of a novel actuator with six pole pieces (6pAAMB) that operates as an axial active magnetic suspension system. The dissertation is interdisciplinary, presenting a number of research on virtual and rapid prototyping of the axial electromagnetic actuators. The structure of the dissertation is modular. Its scope covers numerous fields of science around the author's interests, the effect of which is the coherent line of reasoning leading from the application need and idea, through testing and verification of various concepts, to the design procedure, including numerical modeling, analytical calculations, manufacturing, quality check, identification and control application. The dissertation is divided into the introductory part (Chapters 2-5) containing preliminary research and the main part (Chapters 6-13) discussing the 6pAAMB configuration.

Chapter 2 includes research on a magnetic levitation system with two antiparallel electromagnetic actuators. The research carried out confirmed that the dynamical properties of the lateral motion can be configured by stretching control. Chapter 3 focuses on the magnetic levitation thermal model. It extends the dynamic equations of magnetic levitation systems by using the nonlinear temperature-dependent heating transfer model. In Chapter 4 the concept of an electromagnet with a porous core is studied together with the prototyping procedure, using a finite element method. The concept, design, model and prototype of the hybrid axial magnetic bearing is presented in Chapter 5.

Chapter 6 in a nutshell introduces the reader to the concept of an axial actuator with a few pole pieces that is capable of axial active levitation with the function of spatial orientation of the rotor in the active bearing space. Chapter 7 presents a numerical model of the axial magnetic bearing with six cylindrical poles. The proposed design allows us to suppress the tilting of the disc with the use of a few axial force components. An unintended actuator defect was the motivation for Chapter 8. A run-up experiment showed that the applied 6pAAMB configuration requires a quality test. As a consequence, the author proposes an original diagnostic method of the disc-type electromagnetic actuator based on the fusion of distance, current and control signal measurements, according to a specific scenario. The algorithm, which is used for actuator fault diagnosis, indicates differences between the heights of individual pole pieces with adequate accuracy. Introducing an interdisciplinary approach to the design of active magnetic bearings, the slim-type 6pAAMB actuator was tested and adapted to the vertical rotor-shaft configuration in Chapter 9. Chapter 10 presents the 6pAAMB analytical model, which was developed to provide the 3D axial magnetic induction distribution. The model utilizes the magnetic vector potential formulation and Schwarz-Christoffel mapping. The research covers deliberations on the end effect influence and the conjugate complex permeance function. The main advantage of the proposed model is the significantly shorter computation time compared to the numerical one with comparable convergence. Chapter 11 presents the configuration of a passive radial bearing that supports the lateral stabilization of the levitating rotor in 6pAAMB. Several experiments showing the properties of the proposed solution are presented. A proprietary magnetic coupling is used to accelerate the rotor to a speed of 4000 rpm without contact. Chapter 12 elaborates a comprehensive approach to identify the parameters of the 6pAAMB actuator with current-driven electromagnets. The coil parameters were measured with a precise indication of the differences. The thermal reliability of the bearing was tested. The study extends the crucial aspect of measuring and calculating the electromagnetic force through several methods with decent convergence between them. In general, the proposed mechatronic actuator is capable of increasing the stability range of levitating rotors and is characterized by favorable dynamic properties, which was demonstrated in the shaker test with external harmonic excitation. A complete description of the actuator with uncertainties in the parameters was obtained by accessible in situ identification. Finally, Chapter 13 focuses on presenting the possibility of stabilizing the disc at a selected point in the active space of the bearing with the use of the developed 6pAAMB actuator.

As a result of scientific research, the main statement was confirmed, showing the exclusive feature of the actuator, which is the possibility of spatial positioning of the levitating object. The issues presented in the above dissertation summarize the interdisciplinary course of designing, manufacturing, identifying and controlling the levitation object by means of an axial active magnetic bearing with six pole pieces. The reader may consider this as the blueprint for the design of an axial actuator with a few pole pieces. The author considers the above as the introduction and the invitation to continue his scientific research.

16.02.2023

Silvina