

Diss. ETH No. 14474

Identification and Automated Controller Design for Active Magnetic Bearing Systems

Dissertation submitted to the
Swiss Federal Institute of Technology
Zurich

for the degree of
Doctor of Technical Sciences

presented by
Florian Lösch
Dipl.-Math. (techn.) University of Kaiserslautern
born February 11, 1971
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Gerhard Schweitzer, examiner
Prof. Dr. Rainer Nordmann, co-examiner

Zurich, 2002

Abstract

Contact-free levitation of rotors by means of active magnetic bearings has been a research topic for more than two decades. During this time, active magnetic bearings have evolved into an industry product that due to its numerous advantages over conventional bearing technology is used in many practical applications.

For the operation of active magnetic bearing (AMB) systems, adequate controllers are indispensable. The design of such controllers is a challenging task since they must compensate for the instability inherent to the magnetic bearings and at the same time avoid destabilization of any flexible eigenmodes the rotor may exhibit. This is a particularly delicate problem since damping is extremely weak due to the contactless levitation and since the poles are displaced by gyroscopic effects when the rotor is rotating.

Traditionally, AMB controllers are designed by well-trained engineers. The existing design techniques are either not standardized and hence depend on the designer's intuition and experience or they rely on highly accurate system models that must be manually fine tuned.

In any case, AMB controller design is a time-consuming task that requires considerable amounts of expertise from different fields.

The purpose of the present work is to contribute to controller design for AMB rotor systems by improving this situation. To this end research in two directions is presented.

The first area of investigation is that of *identification of AMB rotor systems*. In this context identification algorithms for obtaining accurate system models directly from the AMB system under consideration are presented. Identification is achieved by means of a step-wise procedure. First, a rigid body model of the rotor is extracted based on measured system re-

sponses to current steps applied to the bearings. Then a simple preliminary stabilizing controller that avoids destabilization of any high frequency flexible modes is designed. With the rotor levitated, the complete open loop model including the flexible rotor modes is identified based on measurements of the system's open-loop transfer function.

In addition to this, an algorithm for identifying the gyroscopic matrix G from the rotating system is introduced.

The second research topic is *automated controller design for AMB systems*. The first problem addressed in this context is the stabilization of flexible rotors of which only the rigid body dynamics are known. The problem is solved by means of a μ -synthesis based procedure automatically adapting the system's bias current such that maximum robustness to additive high frequency uncertainty is achieved.

Then automated controller design for flexible rotors is addressed. Based on an analysis of the state of the art methods in AMB controller design, the method best suited for automation is identified. Also based on μ -synthesis, this method is then adapted to meet the special requirements of gyroscopic rotor systems. The analysis of the resulting controllers is refined, and finally an automated version of the procedure is formulated.

The identification and controller design algorithms are integrated into an *automated procedure* that requires only little user interaction and expert knowledge on the part of the designer. This procedure consists of three parts, the first two of which comprise the identification of the rotor system at standstill. The third part consists in a sequence of steps in which controller design for the flexible rotor, controller performance tests on the system, and identification of the gyroscopic matrix are iterated at increasing speeds until the system's top operating speed has been reached or no improvements to the last controller can be made anymore.

The procedure has been tested on different configurations of a test rig with a highly flexible rotor and showed good performance even in presence of strong gyroscopic effects.

Kurzfassung

Die berührungsfreie Lagerung von Rotoren mit Hilfe von aktiven Magnetlagern ist seit über zwanzig Jahren Gegenstand der Forschung. In dieser Zeitspanne haben sich Magnetlager zu einem Industrieprodukt entwickelt, das aufgrund seiner vielfältigen Vorteile gegenüber herkömmlichen Lagertechniken in einer Vielzahl von praktischen Anwendungen zum Einsatz kommt.

Für den Betrieb von aktiven Magnetlagern sind geeignete Regler unverzichtbar. Die Auslegung solcher Regler ist eine herausfordernde Aufgabe, da diese die den Magnetlagern eigene Instabilität kompensieren müssen ohne dabei etwaige elastische Eigenmoden des Rotors zu destabilisieren. Dies ist besonders schwierig, da die Systemdämpfung aufgrund der kontaktlosen Lagerung nur sehr schwach ist und sich die Pole zudem infolge gyroskopischer Effekte verschieben sobald der Rotor rotiert.

Regler für aktive Magnetlagersysteme werden üblicherweise von erfahrenen Ingenieuren ausgelegt. Die heute existierenden Entwurfsverfahren sind entweder nicht standardisiert und bauen damit auf die Intuition und Erfahrung des Benutzers oder benötigen sehr genaue Systemmodelle, die Fein Anpassung von Hand erfordern.

Unabhängig von der gewählten Entwurfsmethode benötigt der Reglerentwurf für aktive Magnetlagersysteme viel Zeit und beachtliches Expertenwissen aus verschiedenen Fachgebieten.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es durch Verbesserung dieser Situation einen Beitrag zur Regelung aktiver Magnetlagersysteme zu leisten. Dazu werden Forschungsergebnisse aus zwei Bereichen präsentiert.

Das erste Forschungsgebiet ist die *Identifikation von Magnetlagersystemen*. Hier werden Identifikationsalgorithmen präsentiert, mit deren Hilfe ausschließlich aus Messungen, die am realen Magnetlagersystem durchgeführt

werden, genaue Systemmodelle gewonnen werden können. Die Identifikation erfolgt dabei in mehreren Schritten. Zunächst wird die Systemantwort auf Stromschritte, die auf die Magnetlager aufgegeben werden, gemessen und daraus ein Starrkörpermodell des Rotors extrahiert. Dann wird ein erster einfacher Regler entworfen, der das System zu stabilisieren vermag, ohne etwaige hochfrequente elastische Eigenmoden zu destabilisieren. Sobald der Rotor schwebt, wird basierend auf Frequenzgangmessungen der Strecke das gesamte Modell mit allen elastischen Moden identifiziert. Darüberhinaus wird ein Algorithmus zur Identifikation der gyroskopischen Matrix G aus dem rotierenden System vorgestellt.

Der zweite Forschungsgegenstand ist der *automatisierte Reglerentwurf für Magnetlagersysteme*. Hier wird zunächst die Frage der Stabilisierung elastischer Rotoren untersucht, von denen lediglich ein Starrkörpermodell bekannt ist. Dieses Problem wird mit Hilfe eines μ -Synthese basierten Prozedur gelöst, die automatisch den Vormagnetisierungsstrom so einstellt, dass maximale Robustheit gegenüber hochfrequenter additiver Unsicherheit erreicht wird.

Dann wird der automatisierte Reglerentwurf für elastische Rotoren behandelt. Ausgehend von einer Analyse des Stands der Technik wird die am besten zur Automatisierung geeignete Reglerentwurfsmethode ermittelt. Dieses ebenfalls auf μ -Synthese basierende Verfahren wird dann angepasst, um den besonderen Anforderungen von Systemen mit gyroskopischen Rotoren gerecht zu werden. Verfeinerte Analyseverfahren für die entworfenen Regler werden vorgestellt, und schliesslich wird ein automatisierter Reglerentwurfalgorithmus formuliert.

Die Identifikations- und Reglerentwurfalgorithmen werden in eine *automatisierte Prozedur* eingebettet, die dem Anwender nur wenig aktives Eingreifen und geringes Expertenwissen abverlangt. Diese Prozedur ist in drei Teile gegliedert, von denen die ersten beiden die Identifikation des Magnetlagersystems im Stillstand umfassen. Der dritte Teil besteht aus einer Folge von Schritten in denen Reglerentwurf für den elastischen Rotor, Regelgütetests am System und Identifikation der gyroskopischen Matrix bei steigenden Drehzahlen wiederholt werden bis die Maximaldrehzahl erreicht ist oder der letzte Regler nicht mehr weiter verbessert werden kann.

Die Prozedur ist an verschiedenen Konfigurationen eines Prüfstandes mit sehr elastischem Rotor getestet worden. Auch für stark gyroskopische Rotoren wurden gute Ergebnisse erzielt.