



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

MB

FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU

11. Internationale Tagung

SCHWINGUNGEN IN ROTIERENDEN MASCHINEN

23. - 25. Februar 2015
Magdeburg, Deutschland

**KURZFASSUNGEN
BOOK OF ABSTRACTS**



Institut für Mechanik
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

11. Internationale Tagung

**SCHWINGUNGEN IN
ROTIERENDEN MASCHINEN**

23. - 25. Februar 2015
Magdeburg, Deutschland

**KURZFASSUNGEN
BOOK OF ABSTRACTS**

Herausgeber:

H. Ecker, TU Wien

H. Irretier, Universität Kassel

R. Liebich, TU Berlin

R. Markert, TU Darmstadt

R. Nordmann, Alstom Baden

J. Strackeljan, OvGU Magdeburg

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf ohne die Zustimmung des Herausgebers reproduziert, in einem Datenbanksystem gespeichert oder auf irgendeine Arte und Weise (elektronisch, mechanisch, fotografisch) übermittelt werden. Der Herausgeber ist nicht für Aussagen in dieser Veröffentlichung verantwortlich.

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted in any form (electronic, mechanical, photocopy) without the acceptance of the publisher. The publisher is not responsible for any statement made in this publication.

Gedruckt und veröffentlicht im Februar 2015

Printed and published in February 2015

Copyright:

Lehrstuhl Technische Dynamik

Institut für Mechanik

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

SIRM 2015 - 11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen, Magdeburg, Deutschland, 23. - 25. Februar 2015

Vorwort

Nahezu alle Maschinen enthalten rotierende Komponenten. Daher ist es nicht verwunderlich, dass die Analyse der Dynamik dieser Maschinen nach wie vor eine zentrale Stellung in Entwicklung und Betrieb einnimmt. Die Tagungsreihe SIRM "Schwingungen in rotierenden Maschinen" widmet sich diesem Gebiet und bietet ein Forum zur Diskussion neuester Erkenntnisse aus Industrie und Hochschule.

Die SIRM-Tagung findet nunmehr zum 11. mal statt. Gegründet wurde die SIRM-Tagungsreihe im Jahre 1991 von den Professoren Irretier, Nordmann und Springer. Seither fanden die SIRM-Tagungen im zweijährigen Rhythmus an den Universitäten in Kassel, Wien, Kaiserslautern und Darmstadt statt. In den Folgejahren wurde die Gruppe der Wissenschaftlichen Leitung durch Prof. H. Ecker, TU Wien, Prof. R. Markert, TU Darmstadt, Prof. R. Liebich, TU Berlin und um den diesjährigen Veranstalter Prof. J. Strackeljan ergänzt. Die Tagungsreihe SIRM erfreut sich nach wie vor eines ungebrochenen Interesses, da sie neben neuen theoretischen und experimentellen Forschungsergebnissen aus Hochschule und Industrie auch Ergebnisse und Erfahrungen aus der Praxis präsentiert, die Herstellern, Anwendern und Betreibern von rotierenden Maschinen eine Hilfestellung bei der Lösung ihrer Probleme geben können.

Die SIRM-Konferenzserie wurde ursprünglich als Forum für den deutschsprachigen Raum ins Leben gerufen und die Konferenzsprache war daher Deutsch. Seit der SIRM 2009 in Wien ist Englisch zweite Konferenzsprache. Die Wissenschaftliche Leitung der Tagungsreihe forciert damit die internationale Kommunikation und Kooperation,

Für die SIRM 2015 wurden - nach einem Evaluationsprozess durch jeweils zwei unabhängige externe Gutachter - 31 Beiträge zur Präsentation angenommen. Die behandelten Themengebiete reichen von Gleitlagern, Dämpfung und Stabilität, Auswuchten und Monitoring bis hin zu Kontaktproblemen sowie semiaktiven und aktiven Rotorsystemen. Die vorliegende Broschüre enthält die Vortragskurzfassungen sowie ein Autorenregister. Die Beiträge befinden sich in voller Länge auf der Konferenz-CD. Jeder Tagungsbeitrag hat eine Nummer in der Form Paper-ID XX. Diese Nummer wird durchgängig im Tagungsprogramm, in den Kurzfassungen und auf der Konferenz-CD zur Identifikation des Beitrages verwendet. *Es sei noch einmal ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den Full-Paper-Versionen der Beiträge um wissenschaftlich begutachtete und freigegebene (Peer reviewed) Fachaufsätze handelt.*

Der Lehrstuhl Technische Dynamik und die OvGU Magdeburg heißen alle Besucherinnen und Besucher der Tagung aus Deutschland, Europa und der ganzen Welt herzlich willkommen und wünschen Ihnen einen angenehmen Aufenthalt in Magdeburg und eine interessante und fruchtbare Tagung. Die Veranstalter der SIRM 2015 danken dem lokalen Organisationsteam und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls Technische Dynamik sowie des Instituts für Mechanik der OvGU.

Magdeburg, im Februar 2015

H. Ecker, TU Wien

H. Irretier, Universität Kassel

R. Liebich, TU Berlin

R. Markert, TU Darmstadt

R. Nordmann, Alstom Baden

J. Strackeljan, OvGU Magdeburg

**SIRM 2015 - 11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen,
Magdeburg, Deutschland, 23. - 25. Februar 2015**

Preface

Almost all machinery contains rotating components. It is therefore not surprising that the analysis of the dynamics of machines still plays a central role in development and operation. The conference series SIRM "Vibrations in Rotating Machines" is devoted to this area and provides a forum to discuss the latest findings from industry and universities.

The SIRM conference takes place for the 11th time this year. The SIRM conference series was started in 1991 by Professors Irretier, Nordmann and Springer. Since then, the SIRM meetings were held every two years at the Universities of Kassel, Vienna, Kaiserslautern and Darmstadt. In subsequent years, Prof. H. Ecker, Technical University of Vienna, Prof. R. Markert, TU Darmstadt, Prof. R. Liebich, TU Berlin and this year's organizer Prof. J. Strackeljan, OvGU Magdeburg were added to the Scientific Organisation Team. Still the conference series SIRM enjoys continued interests since it presents not only new theoretical and experimental research results from universities and industry, but also results and experiences from practical applications that can aid manufacturers, users and operators of rotating machines in solving their problems.

Originally, the SIRM conference series was established to provide a forum within the German-speaking community in rotor dynamics, and so the conference language was German. Since SIRM 2009 also English is official conference language. By this means the Scientific Organisation of the conference series promote the international communication and cooperation, especially between the countries of Central Europe.

For the SIRM 2015, 31 papers were chosen for presentation, after evaluation by two independent external reviewers. The conference topics cover a range from traditional subjects as journal bearings, damping and stability, balancing and monitoring to sophisticated subjects such as contact problems as well as semi-active and active rotor systems. This booklet contains the abstracts of the presentations and an author index. The presented papers can be found in full length on the conference CD. Each paper is referred by an identification number in the form Paper-ID XX. This number is consistently used for identifying the contribution in the conference program, in the book of abstracts and on the conference CD. *All full papers available on CD are peer-reviewed.*

The Chair of Technical Dynamics and the OvGU Magdeburg welcome all participants of the conference from Germany, Europe, and the whole world, and wish them an enjoyable stay in Magdeburg and an interesting and fruitful conference. The organisers of the SIRM 2015 thank the Local Organisation Committee and all employees of the Chair of Technical Dynamics and the Institute of Mechanics at OvGU.

Magdeburg, im February 2015

H. Ecker, TU Wien

H. Irretier, Universität Kassel

R. Liebich, TU Berlin

R. Markert, TU Darmstadt

R. Nordmann, Alstom Baden

J. Strackeljan, OvGU Magdeburg

**SIRM 2015 - 11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen,
Magdeburg, Deutschland, 23. - 25. Februar 2015**

Impressum

Wissenschaftliche Leitung / Scientific Organisation

H. Ecker, TU Wien

H. Irretier, Universität Kassel

R. Liebich, TU Berlin

R. Markert, TU Darmstadt

R. Nordmann, Alstom Baden

J. Strackeljan, OvGU Magdeburg

Wissenschaftliches Komitee / Scientific Committee

N. Bachschmid, Italy

H. Ecker, Austria

F. Heitmeir, Austria

H. Irretier, Germany

R. Liebich, Germany

R. Markert, Germany

R. Nordmann, Germany

S. Rinderknecht, Germany

A. Rienäcker, Germany

I. F. Santos, Denmark

J. Schmied, Switzerland

J. Strackeljan, Germany

T. Szolc, Poland

J. Wallaschek, Germany

Lokale Organisation / Local Organisation

J. Strackeljan (chair)

C. Daniel

S. Nitzschke

E. Woschke

M. Rudolph

D. Schwarz

Adresse / Address

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Institut für Mechanik

Lehrstuhl Technische Dynamik

Universitätsplatz 2, Gebäude 10

39106 Magdeburg, Germany

Tel: +49 (0)391 67-58608, Fax: -12439

E-Mail: sirm2015@ovgu.de

www.sirm2015.ovgu.de/



FAKULTÄT FÜR
MASCHINENBAU



11. Internationale Tagung
SCHWINGUNGEN IN ROTIERENDEN MASCHINEN
 Magdeburg, Deutschland | 23.-25. Februar 2015

Datum: Montag, 23.02.2015

9:00 **Begrüßung und Einführung**
 - Ort: **G16 H5**

9:30

9:30 **Plenarvortrag**
 - Ort: **G16 H5**

10:30

Scientific Methods in Rotor Dynamics and their application in the Design Process of Large Turbomachines

Nordmann, Rainer; Knopf, Eric

10:30 **Erfrischungen**

-

11:00

11:00 **Torsionsschwingungen**
 - Ort: **G16 H5**

Getriebe/Zahnräder
 - Ort: **G16 215**

12:30

Torsional Vibration Problem in Reciprocating compressor - Case Study - Paper-ID 59

Boru, Fikre; Lenz, Johann

Zahnrad-schwingungen und der Doppler-Effekt - Paper-ID 44

Elbs, Michael; Sterns, Dietmar

Required simulation model detail to achieve reliable simulation results - Paper-ID 60

Rosenlöcher, Thomas; Schlecht, Berthold

Analysis of Systems with Complex Gears - Paper-ID 51

Kosenkov, Alexander; **Gaulard, Frédéric**; Schmied, Joachim

Modal component mode synthesis in torsional vibration analysis: rotor-blade interaction

- Paper-ID 63

Dohnal, Fadi; Nordmann, Rainer; Knopf, Eric

12:30 **Mittagessen**

-

14:30

14:30 **Folienlager I**
 - Ort: **G16 H5**

15:30

A numerical performance analysis of a gas foil bearing including structural modifications by applying metal shims - Paper-ID 49

Hoffmann, Robert; Pronobis, Tomasz; Liebich, Robert

On the Stability of Balanced Rigid Rotors in Air Foil Bearings - Paper-ID 52

Baum, Christoph; Hetzler, Hartmut; Seemann, Wolfgang

15:30 **Erfrischungen**

-

16:00

16:00 **Folienlager II**
 - Ort: **G16 H5**

17:00

Lateral Dynamics of Flexible Rotors Supported by Controllable Gas Bearings – Theory & Experiment - Paper-ID 62

Pierart, Fabian Gonzalo; Santos, Ilmar Ferreira

On the Numerical Simulation of Nonlinear Transient Behavior of Compliant Air Foil Bearings

- Paper-ID 39

Larsen, Jon Steffen; **Nielsen, Bo Bjerregaard**; Santos, Ilmar Ferreira

Datum: Dienstag, 24.02.2015

9:00 Abgasturbolader I
- Ort: **G16 H5**

10:30

Modellabgleich eines Turboladerrotors in Schwimmbuchsenlagerung anhand gemessener Schwimmbuchsendrehzahlen - Paper-ID 38
Köhl, Wolfgang; Kreschel, Martin; Filsinger, Dietmar

Oil Flow in Connecting Channels of Floating Ring Bearings - Paper-ID 50
Eling, Rob; Van Ostayen, Ron; Rixen, Daniel

Validierung der Hochlaufsimulation für automotive Abgasturbolader - Paper-ID 58
Daniel, Christian; Woschke, Elmar; Nitzschke, Steffen; Strackeljan, Jens; Driot, Nicolas; Braun, Karl-Ludwig; Koutsovasilis, Panagiotis

10:30 Erfrischungen

11:00

11:00 Spezielle Probleme
- Ort: **G16 H5**

Geregelte Systeme
Ort: **G16 215**

12:30

Modellierung von nichtlinearen amplituden- und frequenzabhängigen Hysterese-Effekten von Gummibauteilen und ihre Verwendung in Mehrkörpersimulationen von Frontladerwaschgeräten - Paper-ID 35
Heine, Christopher; Plagemann, Markus

Vergleich der Eignung von Sensoren zur Störgrößenaufschaltung an einem Rotorsystem mit aktiven piezoelektrischen Lagern - Paper-ID 41
Heindel, Stefan; Becker, Fabian Benedikt; Potrafke, Timo; Rinderknecht, Stephan

Unterscheidung verschiedener Fehlerarten beim modellbasierten Monitoring - Paper-ID 57
Thümmel, Thomas; Rossner, Markus; Ulbrich, Heinz; Rixen, Daniel

Modal damping identification of a gyroscopic rotor in active magnetic bearings - Paper-ID 42
Mikota, Gudrun; Pröll, Andreas Josef; Silber, Siegfried

Ganzheitlicher Virtual Engineering Ansatz zur Schwingungs- und Akustiksimulation eines Verbrennungsmotors - Paper-ID 61
Duvigneau, Fabian; Nitzschke, Steffen; Strackeljan, Jens; Gabbert, Ulrich

An analysis of precise positioning scenarios of the electromechanical rotating system driven by a stepping motor - Paper-ID 40
Konowrocki, Robert; Pochanke, Andrzej; Pręgoska, Agnieszka; **Szolc, Andreas Josef**; Silber, Siegfried

12:30 Mittagessen

14:30

14:30 Abgasturbolader II
- Ort: **G16 H5**

Rotordynamik I
Ort: **G16 215**

15:30

Turbocharger rotors with oil-film bearings: sensitivity and optimization analysis in virtual prototyping - Paper-ID 43
Koutsovasilis, Panagiotis

Dynamik von Laborzentrifugen - Paper-ID 68
Strackeljan, Jens; Behr, Dietrich

DoE basierte Sensitivitätsanalyse konstruktiver Lagerparameter eines gleitgelagerten Abgasturboladers - Paper-ID 55
Göbel, Stefan; Daniel, Christian; Strackeljan, Jens

Chaotic and stable orbits of a rotor in a non-conventional back-up bearing. A numerical and experimental approach - Paper-ID 67
Fonseca, Cesar A.L.L.; Aguiar, Romulo R.; Weber, Hans I.

15:30 Erfrischungen

-

16:00

16:00 Abgasturbolader III
- Ort: **G16 H5**

Rotordynamik II
Ort: **G16 215**

17:00

Influence of axial grooves in floating-ring-bearings on the nonlinear oscillations of turbocharger rotors - Paper-ID 56
Nowald, Gerrit; Boyaci, Aydin; Schmoll, Robert; Koutsovasilis, Panagiotis; Driot, Nicolas; Schweizer, Bernhard

Einfluss der Lagergehäusesteifigkeit auf das Schwingverhalten eines 2-poligen Elektromotors - Paper-ID 66
Kalinowski, Piotr; Krzysteczko, Lukas; Ulbrich, Benjamin Gottfried

Analyse der Einflüsse der hydrodynamischen Axiallagerung auf das rotordynamische Verhalten eines PKW-Abgasturboladers - Paper-ID 47
Li, Shuo; Tuzcu, Sedat; Klaus, Michael; Rienäcker, Adrian; Schwarze, Hubert

Modellgestützte instationäre Unwuchtidentifikation - Paper-ID 37
Siegl, Benjamin; Markert, Richard

Datum: Mittwoch, 25.02.2015

9:00 Gleitlager
- Ort: **G16 H5**

10:30

Fluid-Struktur-Kopplung in elasto-hydrodynamischen Gleitlagern - Paper-ID 48
Krinner, Andreas; Schindler, Thorsten; Rixen, Daniel J.

Experimental Identification of Dynamic Coefficients of Tilting-Pad Bearings with Active Lubrication - Paper-ID 45

G. Salazar, Jorge; C. Varela, Alejandro; F. Santos, Ilmar

High Speed Journal Bearings -- State of the Art of Calculations - Paper-ID 53

Fuchs, Andreas; Kosenkov, Alexander; Schmied, Joachim

10:30

Erfrischungen

-

11:00

11:00

Schaufelschwingungen

-

Ort: **G16 H5**

12:00

Detection of blade mistuning in a low pressure turbine rotor resulting from manufacturing tolerances and differences in blade mounting - Paper-ID 54

Schönleitner, Florian; Traussnig, Lukas; Marn, Andreas; Heitmeir, Franz

Reliability analysis of mistuned blisks - Paper-ID 36

Wagner, Nils; Helfrich, Reinhard

12:00

Abschluss der Tagung

-

Ort: **G16 H5**

12:30

12:30

Mittagessen

-

14:30

Inhaltsverzeichnis

ID 35- Modellierung von nichtlinearen amplituden- und frequenzabhängigen Hysterese-Effekten von Gummibauteilen und ihre Verwendung in Mehrkörpersimulationen von Frontladerwaschgeräten	1
ID 36- Reliability analysis of mistuned blisks	2
ID 37- Modellgestützte instationäre Unwuchtidentifikation	3
ID 38- Modellabgleich eines Turboladerrotors in Schwimmbuchsenlagerung anhand gemessener Schwimmbuchsendrehzahlen	4
ID 39- On the Numerical Simulation of Nonlinear Transient Behavior of Compliant Air Foil Bearings	5
ID 40- An analysis of precise positioning scenarios of the electromechanical rotating system driven by a stepping motor	6
ID 41- Vergleich der Eignung von Sensoren zur Störgrößenaufschaltung an einem Rotorsystem mit aktiven piezoelektrischen Lagern	7
ID 42- Modal damping identification of a gyroscopic rotor in active magnetic bearings	8
ID 43- Turbocharger rotors with oil-film bearings: sensitivity and optimization analysis in virtual prototyping	9
ID 44- Zahnradschwingungen und der Dopplereffekt	10
ID 45- Experimental Identification of Dynamic Coefficients of Tilting-Pad Bearings with Active Lubrication	11
ID 47- Analyse der Einflüsse der hydrodynamischer Axiallagerung auf das rotordynamische Verhalten eines PKW-Abgasturboladers	12
ID 48- Fluid-Struktur-Kopplung in elastohydrodynamischen Gleitlagern	13
ID 49- A numerical performance analysis of a gas foil bearing including structural modifications by applying metal shims	14
ID 50- Oil Flow in Connecting Channels of Floating Ring Bearings	15
ID 51- Analysis of Systems with Complex Gears	16
ID 52- On the Stability of Balanced Rigid Rotors in Air Foil Bearings	17
ID 53- High Speed Hydrodynamic Journal Bearings - State of the Art of Calculations	18

**SIRM 2015 - 11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen,
Magdeburg, Deutschland, 23. - 25. Februar 2015**

ID 54- Detection of blade mistuning in a low pressure turbine rotor resulting from manufacturing tolerances and differences in blade mounting	19
ID 55- DOE basierte Sensitivitätsanalyse konstruktiver Lagerparameter eines gleitgelagerten Abgasturboladers	20
ID 56- Influence of axial grooves in floating ring bearings on the nonlinear oscillations of turbocharger rotors	21
ID 57- Unterscheidung verschiedener Fehlerarten beim modellbasierten Monitoring	22
ID 58- Validierung der Hochlaufsimulation für automotive Abgasturbolader	23
ID 59- Torsional vibration problem in reciprocating compressor - Case study	24
ID 60- Required simulation model detail to achieve reliable simulation results	25
ID 61- Ganzheitlicher Virtual Engineering Ansatz zur Schwingungs- und Akustiksimulation eines Verbrennungsmotors	26
ID 62- Lateral Dynamics of Flexible Rotors Supported by Controllable Gas Bearings - Theory & Experiment	27
ID 63- Modal component mode synthesis in torsional vibration analysis: rotor-blade interaction	28
ID 66- Einfluss der Lagergehäusesteifigkeit auf das Schwingverhalten eines 2-poligen Elektromotors	29
ID 67- Chaotic and stable orbits of a rotor in a non-conventional back-up bearing. A numerical and experimental approach	30
ID 68- Dynamik von Laborzentrifugen	31

Modellierung von nichtlinearen amplituden- und frequenzabhängigen Hysterese-Effekten von Gummibauteilen und ihre Verwendung in Mehrkörpersimulationen von Frontladerwaschgeräten

Heine, Christopher; Plagemann, Markus

Bosch Siemens Hausgeräte GmbH (BSH), Deutschland

Abstract

In der Waschmaschinenentwicklung der Bosch Siemens Hausgeräte GmbH wird das MKS-Programm MSC Adams verwendet. Dabei geht es in erster Linie darum, das dynamische Verhalten des sog. Schwingensystems für die Resonanzdurchfahrt vorherzusagen. Die virtuelle Prototypenoptimierung profitiert von einer stetigen Verbesserung solchartiger Simulationsmodelle. Die zu bestimmenden Parameter sind die der Kraftübertragungskomponenten innerhalb der Waschmaschine. Dazu gehören die Federn, die Dämpfer und die Manschette. Innerhalb experimenteller Untersuchungen konnten maßgebliche Einflüsse der Gummibauteile an den Dämpferfixierungen auf die Gesamtgerätedynamik festgestellt werden. Mit dieser Arbeit wird eine Methode vorgestellt, welche zur Beschreibung des Dämpfers und dessen Anbindungspunkte verwendet wurde. Der Dämpfer wird im Rahmen dieser Studie über einen axialen, einen Torsions-FHG, sowie jeweils zwei rotatorische FHG pro Anbindung beschrieben. Ein Augenmerk dabei ist auf die sog. Gummibuchsen zu legen, welche eine elastische Verbindung der Dämpfer an das Schwingensystem und an das Gehäuse zustande bringen. Diese Gummibauteile sind der Grund für eine auftretende Amplituden- und Frequenzabhängigkeit dieser Kraftübertragungskomponenten. Im Detail werden die gemessenen Moment-Winkel-Hysteresen aufgezeigt, welche eine von Spiel und von nichtlinearen Werkstoffeigenschaften der Gummibauteile gekennzeichnete Charakteristik aufweisen. Es wurden zwei Messreihen durchgeführt, um jeweils die Amplituden- und die Frequenzabhängigkeit getrennt voneinander zu messen. Anschließend wurden rheologische Modelle für die gemessenen Hysteresen formuliert. Mit Hilfe einer eigenen Matlab-Routine konnten anschließend die Parameter der verwendeten rheologischen Modelle, voll automatisiert, an die gemessenen Hysteresen angepasst werden. Um die gemessenen nichtlinearen Hysteresen mit dem verwendeten rheologischen Modell abbilden zu können, wurden dies um eine Skalierungsfunktion erweitert. Diese Erweiterung des rheologischen Modells führte eine Verbesserung der Abbildungsgüte der nichtlinearen Hysteresen herbei. Für die Modellparameter konnten somit Amplituden- bzw. Frequenzabhängigkeiten gefunden und formuliert werden. Die nun vollständig beschriebenen rheologischen Modelle konnten anschließend erfolgreich in die MKS unter Adams implementiert werden. Mit Hilfe dieser Formulierungen konnte im Vergleich mit dem zuvor eingesetzten Modell eine klare Verbesserung der Abbildungsgüte erzielt werden.

Reliability analysis of mistuned blisks

Wagner, Nils; Helfrich, Reinhard

Intes GmbH, Deutschland

Abstract

Blisks also known as bladed disks are designed to be cyclic structures. However, tolerances in the manufacturing and assembling processes and wear originate a loss of symmetry. This phenomenon is called mistuning effect. These imperfections inherently influence the dynamic behaviour of the rotor. It turns out that they can drastically influence the forced response levels. These imperfections could cause large increases in stress and vibration amplitudes. Hence the demand for computationally effective methods to predict and quantify such systems is of great interest to the manufacturers of turbine engines. Due to the spatial confinement of vibration energy, certain blades in a mistuned system can suffer a significant increase in forced-response vibration amplitudes compared to the ideal system. In the absence of mistuning the dynamics of blisks is fully determined from that of a small portion, typically a bladed sector. For this reason mistuning was investigated by lumped models in the past. Nowadays full scale finite element models are available. They take advantage of modelling the shape and flexibility of the blades in a realistic manner. The mistuning effect is often idealized by a modification of mass and stiffness distribution inside the blades. A simplifying assumption is often used when modeling mistuning, namely, that mistuning is proportional. That means that the physical variations in each sector are considered to be proportional to the mass and/or stiffness matrices of the tuned sector. This can be achieved by random mass and stiffness variations or fuzzy variables. In this study the effect of stiffness mistuning on the forced response of a rotating blisk excited by an unbalance is investigated. Uncertainties in rotors arise for example from in-use wear of the blades, temperature fluctuations and from manufacturing tolerances. The blisk geometry is taken from Grabcad and has been modeled and analyzed using the PERMAS finite element program Permas. The disk has 30 blades evenly spaced around the circumference. The Young's modulus of each blade will be chosen as random parameters, respectively. Beside the geometric and centrifugal stiffness matrix, the Coriolis matrix is taken into account. Different engine order excitations are considered in a forced response, whereas unbalance loads are usually neglected.

Modellgestützte instationäre Unwuchtidentifikation

Siegl, Benjamin; Markert, Richard

TU Darmstadt, Deutschland

Abstract

In diesem Beitrag wird ein Unwuchtidentifikationsverfahren im Zeitbereich beschrieben, das aus nur einem instationären Messlauf ohne Testunwuchtsatz die statische und die kinetische Unwucht berechnet. Die Besonderheit gegenüber vorherigen Arbeiten ist, dass sich die Systemmatrizen in den Bewegungsgleichungen während des Hoch- oder Auslaufs mit der Drehzahl ändern dürfen. Es ist somit möglich, signifikante Systemänderungen beim Hoch- oder Auslauf z. B. durch Kreiselwirkung und Gleitlager zu berücksichtigen. Bei Drehzahlabhängigkeit der Systemmatrizen ändern sich die Eigenwerte und die Eigenvektoren sowie die modalen Massen ebenfalls mit der Drehzahl. Bei signifikanter Drehzahlabhängigkeit müssen die Änderungen dieser modalen Größen im Schätzmodell berücksichtigt werden. Die genannten modalen Größen werden im Schätzmodell näherungsweise durch lineare Funktionen der Drehzahl approximiert. Der eigentliche Algorithmus zur Unwuchtidentifikation basiert auf der Minimierung der Fehlerquadratsumme der in den drehzahlveränderlichen Modalraum transformierten Messsignale und der Zeitsignale aus der Simulation. Er wird abgebrochen, wenn eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht ist. An die Anfangsparameter werden keine besonderen Anforderungen gestellt. Sie können Vorabberechnungen der Konstruktion oder Modaltests im Stillstand entnommen werden. Die Erprobung des Verfahrens wird zum einen an synthetisch generierten Pseudo-Messdaten eines Modellrotors und zum anderen an einem speziellen Versuchsstand durchgeführt. An diesem Prüfstand sind die modalen Parameter im Stillstand durch eine experimentelle Modalanalyse als Anfangswerte der Identifikation bekannt. Erste Messergebnisse von Hoch- und Ausläufen werden präsentiert.

Modellabgleich eines Turboladerrotors in Schwimmbuchsenlagerung anhand gemessener Schwimmbuchsendrehzahlen

Köhl, Wolfgang; Kreschel, Martin; Filsinger, Dietmar

1: Technische Universität Darmstadt, Deutschland; 2: IHI Charging Systems International GmbH, Heidelberg

Abstract

Bei PKW-Abgasturboladern mit Schwimmbuchsenlagern können in einem breiten Betriebsdrehzahlbereich gleitlagertypische Oil-Whirl- und Oil-Whip-Effekte auftreten. Zu deren Beschreibung werden in diesem Beitrag die Modellierung und der Modellabgleich eines Abgasturboladers vorgestellt. Zur Modellierung der komplexen Geometrie des Rotors werden Finite Elemente benutzt. Das Finite-Element-Programm liefert die Eigenformen und Eigenfrequenzen des ungefestelten Rotors. Im Sinne eines Ritz-Verfahrens werden für die weitere Berechnung davon nur die ersten vier Eigenformen (zwei Starrkörper- und zwei Biegeeigenformen) verwendet. Mit einer experimentellen Modalanalyse am freien Rotor wird das Rotormodell abgesichert. Das Fluid in den Schwimmbuchsenlagern wird mit Finiten Volumen modelliert und das Rotorgehäuse wird als starr und unverschieblich angesetzt. Für die Modellanpassung veränderbare Parameter sind die Lagergeometrie, die unterschiedlichen Ölviskositäten im inneren und im äußeren Schmierfilm sowie die Eigenfrequenzen des Rotormodells. Am Versuchsmodell werden die Rotorbewegung in zwei orthogonale Richtungen einer Ebene am Verdichterrad und die Schwimmbuchsendrehzahl in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl gemessen. Zur Messung der Schwimmbuchsendrehzahl wird das Turboladergehäuse mittels 3-D-Druck transparent ausgeführt. Dadurch können die Schwimmbuchsen während des Betriebes mit einer Hochgeschwindigkeitskamera optisch erfasst werden. Die Auswertung der Hochgeschwindigkeitsbilder liefert die aktuelle Buchsendrehzahl. Zum Abgleich des numerischen Modells werden die Schwimmbuchsendrehzahl und die Amplituden und Frequenzen der Rotorschwingungen in Abhängigkeit von der Rotordrehzahl herangezogen. Verschiedene Analysen zeigten, dass die Schwimmbuchsendrehzahl eine der empfindlichsten Größen für den Abgleich des numerischen Rechenmodells darstellt. Für den Modellabgleich werden verschiedene Versuche durchgeführt: Bei ansteigender und abfallender Rotordrehzahl wird in einem Versuch das Konstanttonphänomen (Oil-Whirl mit nahezu konstanter Frequenz) erzwungen. In einem zweiten Versuch wird ein Oil-Whirl im inneren Schmierfilm erzeugt. Nach Anpassung der Modellparameter (Lager- und Schwimmbuchsengeometrie, Ölfilmviskositäten, Rotoreigenschaften) konnte eine sehr gute Übereinstimmung der gemessenen und der berechneten Zeitverläufe der Rotorbewegung und der Schwimmbuchsendrehzahl beobachtet werden.

On the Numerical Simulation of Nonlinear Transient Behavior of Compliant Air Foil Bearings

Larsen, Jon Steffen; Nielsen, Bo Bjerregaard; Santos, Ilmar Ferreira

1: Technical University of Denmark, Denmark; 2: Siemens A/S, Aeration Competence Center

Abstract

Compliant air foil bearings have fundamental importance in the development of high speed machines due to low friction and no need of external lubrication system, leading to a more environmental-friendly design. Nevertheless, rotors supported by such a type of bearing are more sensitive to unbalance and nonlinear instabilities due to low level of damping. The transient nonlinear behavior of rotors supported by compliant air foil bearings demands the solution of Reynolds equation for compressible fluid coupled to the compliance of top/bump foil surfaces and the friction between parts of this complex flexible structure. The nonlinear transient simulation of rotors interacting with air foil bearing is still a challenge (according to the literature) and a very time consuming task. In the particular case of assuming that the variation of pressure in time (dp/dt) negligible, time simulations for predicting rotor-bearing transient behavior can be carried out relatively safely and without numerical instability problems. Nevertheless, a precise and correct way of dealing with the nonlinear problem is taking into consideration the variation of pressure in time, i.e. dp/dt . In this framework the manuscript gives an original contribution to the numerical simulation of transient and nonlinear behavior of an industrial compliant air foil bearing, built by three independent segments and used in a Siemens compressor. The variation of pressure in time dp/dt is included as part of the state space variable domain, as proposed in the literature. An efficient finite element model is used for the discretization of the pressure field and foil compliant structure. The friction model used is based on dry friction Coulomb and Maxwell-Slip Model. The theoretical results are validated against the literature and the importance of the term dp/dt is carefully elucidated. A parameter study with focus on the transient nonlinear behavior of the rotor-bearing system is carried out and the efficiency of the method presented is discussed, highlighting advantages and drawbacks.

An analysis of precise positioning scenarios of the electromechanical rotating system driven by a stepping motor

Konowrocki, Robert; Pochanke, Andrzej; Pregowska, Agnieszka; Szolc, Tomasz

1: Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences, Poland; 2: Faculty of Electrical Engineering of the Warsaw University of Technology, Poland

Abstract

In the paper there is investigated experimentally and theoretically electromechanical dynamic interaction between the driving stepping motor and the driven laboratory belt-transporter system imitating an operation of the robotic device in the form of working tool-carrier under translational motion. The translational motion of the tool-carrier is realized along the guideway by the toothed belt spanned on two rollers, where one of them is directly connected with the motor rotor by means of the shaft segment. The considered object is properly equipped with measurement systems enabling us a registration of studied electrical and mechanical quantities, where the electric current control of the driving motor has been applied. The analytical considerations are performed by means of the circuit model of the stepping motor and of the discrete, non-linear model of the mechanical system. In the investigated examples various scenarios of the working tool-carrier motion and positioning by the belt-transporter were measured and simulated. For each scenario a very good mutual qualitative and quantitative agreement between the results of measurements and numerical simulations has been obtained. These scenarios consisted of system movements characterized by piece-wisely constant as well as continuously variable average rotational and translational accelerations and velocities. It turned out that rapid changes of these average accelerations and velocities resulted in excitation of severe low-frequency transient torsional and translational vibrations induced by the electromechanical interaction between the driving motor and the driven system. Moreover, these oscillations superimposed on the nominal motions with high constant average deceleration rates during tool-carrier positioning to the target point were associated with relatively large braking torque and force fluctuations negatively influencing a precise operation of the considered device. However, tool-carrier positioning scenarios characterized by fluent, continuous variations of system average accelerations, decelerations and velocities resulted in essentially smaller transient low-frequency vibrations and in significantly lower amplitudes of braking torques and forces. Thus, such movement scenarios seem to be particularly promising for programmed precise operations of numerous responsible electromechanical devices.

Vergleich der Eignung von Sensoren zur Störgrößenaufschaltung an einem Rotorsystem mit aktiven piezoelektrischen Lagern

Heindel, Stefan; Becker, Fabian; Potrafke, Timo; Rinderknecht, Stephan

TU Darmstadt, Deutschland

Abstract

Störgrößenaufschaltungen sind in der Lage, die Auswirkung periodisch auftretender Anregungen über Sensorsignale zu erfassen und zu kompensieren. Zur Störgrößenaufschaltung wird der FxLMS-Algorithmus verwendet. Dieser wurde bereits erfolgreich an Rotorsystemen eingesetzt. Um einen effektiven Einsatz des FxLMS-Algorithmus über den gesamten Betriebsbereich eines elastischen Rotors zu gewährleisten, ist es notwendig, das System vorab mit einem Regler niedriger Komplexität zu dämpfen. Diese Strategie wird auch hybride Regelung genannt. In dieser Untersuchung wird ein Vergleich von Störgrößenaufschaltungen unter Verwendung verschiedener Sensoren angestellt. Für die Schwingungsisolierung wird die Lagerkraft für die Störgrößenaufschaltung verwendet; für die Schwingungsminderung wird die Rotorauslenkung als Kompensationsgröße benutzt. Bisherige Untersuchungen gehen von einem Zielkonflikt zwischen Schwingungsminderung und Schwingungsisolierung aus. Aus diesem Grund wird im Besonderen die Frage untersucht, ob es Zusammenhänge zwischen der Minderung von Lagerkräften und der Minderung von Rotorauslenkungen gibt, und wie sich die jeweils unkompensierte Größe verhält. Der FxLMS-Algorithmus kann zu Instabilitäten neigen. Werden die Rotorauslenkungen als Kompensationsgröße verwendet, so ist durch die nicht-kollokierte Anordnung von Sensor und Aktor ein exaktes Streckenmodell nötig um Konvergenz sicherzustellen. Insbesondere bei Rotoren mit mehreren biegekritischen Drehzahlen ist es schwierig das System ausreichend genau zu modellieren. Durch die kollokierte Anordnung der Kraftsensoren ist die Dynamik zwischen Aktor und Sensor einfacher nachzubilden. Wir untersuchen die Frage, ob die damit einhergehende Vereinfachung der Sekundärstrecke eine Verbesserung des Konvergenzverhaltens bei der Störgrößenaufschaltung bewirkt. Die Untersuchung wird an einem Rotorprüfstand mit einem aktiven piezoelektrischen Lager durchgeführt. Das zweite Lager ist passiv. Der Rotor besitzt zwei Scheiben. Aufgrund der überkragenden Anordnung einer der Scheiben liegt ein ausgeprägter gyroskopischer Effekt vor. Mit einem Elektromotor können beide biegekritischen Resonanzen durchfahren werden. Sowohl die Auslenkungen der Scheiben als auch die Kräfte am aktiven Lager können gemessen werden. In diesem Beitrag untersuchen wir die Eignung einer Störgrößenaufschaltung unter Verwendung von Kraft- beziehungsweise Wegsensoren zur Schwingungsminderung und -Isolation.

Modal damping identification of a gyroscopic rotor in active magnetic bearings

Mikota, Gudrun; Pröll, Andreas Josef; Silber, Siegfried

Johannes Kepler Universität Linz, Österreich

Abstract

The experimental modal analysis of rotors in active magnetic bearings poses several difficulties. Unbalance excitation is always present and unbalance response adds to the response from the modal testing excitation. This requires a sufficient excitation level. On the other hand, responses should stay within the linear range of the active magnetic bearings and are in any case limited by the clearance of the emergency bearings. However, the dynamic behavior of such a rotor is influenced by a number of parameters that are difficult to determine in theory. Experimental modal analysis provides important contributions to an accurate dynamic rotor model. In this paper, a gyroscopic rotor in active magnetic bearings is investigated. The rotor consists of a shaft that carries a cantilevered disc and can be run at rotational speeds up to 100000 rpm. Besides unbalance response, the rotor exhibits a tendency to vibrate in its first gyroscopic mode. Such vibrations shall be prevented by appropriate measures, which can be evaluated if the respective modal damping is identified. In [1], speed dependent modal models of a similar rotor were obtained with impulsive excitation from one of the active magnetic bearings, and the gyroscopic split of natural frequencies was demonstrated for the four rigid body modes. Due to the application of an exponential window, modal damping values were much exaggerated; apart from that, a short single impulse leads to a poor frequency resolution and would not yield reliable damping values. However, impulsive excitation guarantees both a sufficient excitation level and a limited response. In this paper, the modal damping of the first gyroscopic mode is therefore identified from narrow-band measurements with a suitable arrangement of several impulses. Identification results are used to compare different versions of the active magnetic bearing position controller. In addition, the first backward and forward gyroscopic mode shapes are extracted, and the onset of the gyroscopic split is identified from narrow-band speed dependent measurements.

Reference

[1] G. Mikota, A.J. Pröll, S. Silber, "Experimental modal analysis of a gyroscopic rotor in active magnetic bearings", Fourteenth International Symposium on Magnetic Bearings, JKU Linz, Austria, 2014, accepted for Lecture presentation."

Turbocharger rotors with oil-film bearings: sensitivity and optimization analysis in virtual prototyping

Koutsovasilis, Panagiotis; Driot, Nicolas

BorgWarner Turbo Systems, Germany

Abstract

The correct capture and understanding of the bearing induced rotor vibrations is nowadays a rather compulsory task, which should accompany the modeling and simulation work flow of high-speed rotor systems, such as turbochargers. The oil-film concentrated in the rotors journal bearings is the root cause of the systems occurring non-linear effects known as sub-synchronous vibrations, the behavior of which depends on both the systems geometric and dynamic configuration. In this paper, a methodology is applied for the case of a turbocharger with full-floating ring bearings that allows the quantification of the sub-synchronous vibrations during run-up simulations. It is conducted by considering both the wheel-shaft and shaft-bearing geometry as a set of input parameters, the variation of which contributes in quantifying their influence upon the sub-synchronous evolution with respect to amplitude and duration criteria. The study is extended by accounting for the various unbalance levels with respect to phase and magnitude and their influence upon the inner and outer oil film load capacity. Motivated by linear multivariate regression algorithms and data mining techniques, i.e. correlation coefficients and global sensitivity methods, the influence of each design parameter on the sub-synchronous formation is analyzed. Furthermore, with the help of the non-supervised neural network methods design configurations are indicated that could be set as a compromise in terms of feasibility and low-cost production.

ZahnradSchwingungen und der Dopplereffekt

Elbs, Michael; Sterns, Dietmar

1: ISMB Dautermann GmbH, Deutschland; 2: Renk AG, Deutschland

Abstract

Bei einem zwischen Elektromotor und Verdichter eingesetzten Stirnradgetriebe mit Doppelschrägverzahnung wurden bei Testläufen für die Rad- und Gehäuseschwingungen sehr schmalbandige Resonanzen beobachtet. Eine Ordnungsanalyse zeigte, dass diese vornehmlich bei der Zahneingriffsfrequenz und deren Vielfachen auftreten. An den Resonanzstellen wurden zusätzlich aber auch einseitige Seitenbänder beobachtet. Um dieses Verhalten zu analysieren, wurde ein FE-Modell erstellt. Ein Vergleich von rechnerischer und experimenteller Modalanalyse zeigt eine relative Vorhersagegenauigkeit von besser als 1. Die genaue Lage der Resonanzstellen kann dabei nur erklärt werden, wenn der Dopplereffekt der ortsfesten Schwingungsanregung in Bezug zu den körperfesten Radmoden berücksichtigt wird. Wie in der Messung stellen sich dann auch in der Simulation für jede Radeigenfrequenz je zwei Resonanzstellen ein. Gleichzeitig liefert der Dopplereffekt auch die Erklärung für die im Spektrum beobachteten, asymmetrischen Seitenbänder. Die Messergebnisse, das validierte Simulationsmodell, die Anwendung des Dopplereffekts auf die Radschwingungen sowie die entwickelten Abhilfemaßnahmen werden vorgestellt.

Experimental Identification of Dynamic Coefficients of Tilting-Pad Bearings with Active Lubrication

Salazar, Jorg G.; Varela Alejandro C.; Santos, Ilmar F.

Technical University of Denmark, Denmark

Abstract

This article deals with the experimental identification of the equivalent dynamic coefficients of tilting pad bearings that feature an active lubrication system. The active system is composed of a high pressure oil supply unit, servovalves and injection nozzles located radially across the bearing pads. The servovalve regulate the pressurized oil flow injected into the bearing clearance, as a function of an electric signal generated in a control unit. As a result, the tilting pad bearing static and dynamic properties become controllable. The experimental identification is carried out in two different test rigs featuring a tilting pad bearing with active lubrication, with the purpose of identifying the equivalent bearing impedance functions. The first setup features a rigid rotor supported by a tilting frame, which constrains the rotor displacement to a single vertical direction. The rigid rotor is supported vertically by a tilting pad bearing including two pads. The second setup resembles in a closer way an industrial application of the concept, featuring a flexible rotor, supported by a four pad, load between pad, bearing. In both cases, the identification procedure is performed in frequency domain, by means of experimentally obtained frequency response functions and an equivalent mathematical model of each test setup. Different lubrication regimes are imposed, namely: conventional or passive lubrication (no injection), adjustable lubrication with constant injection flow, active lubrication with control signal resulting from PD controller (variable injection flow). The comparison between the results obtained for these different regimes provides an overview of the feasibility of modifying the bearing impedance functions by means of the active lubrication system.

Analyse der Einflüsse der hydrodynamischer Axiallagerung auf das rotordynamische Verhalten eines PKW-Abgasturboladers

Li, Shuo; Tuzcu, Sedat; Klaus, Michael; Rienäcker, Adrian; Schwarze, Hubert

Continental Automotive GmbH, Product Line Turbocharger, Regensburg, Deutschland

Abstract

Die Hauptbelastungen für das Laufzeug eines Turboladers ergeben sich aus hohen Abgastemperaturen von bis zu 1050°C und Turboladerdrehzahlen von bis zu 250.000 Upm. Hinzu kommen je nach Betriebsbedingungen hohe Axialkräfte infolge der Durchströmung von Verdichter und Turbine. Um den Turbolader bei diesen extremen Betriebsbedingungen stabil betreiben zu können haben sich hydrodynamische Schwimmbuchsenlager und Axiallager etabliert. Zur numerischen Abbildung der nichtlinearen hydrodynamischen Lagerkräfte in Schwimmbuchsenlager kommen häufig neben der Online-Lösung mit der FE-Methode und der Kennfeldlösung auch analytische Näherungslösungen zur Anwendung. Die besondere Rechenzeiteffizienz der analytischen Näherungslösung ist für den industriellen Einsatz von großer Bedeutung. In der vorliegenden Arbeit werden drei unterschiedliche analytische Verfahren (Kurzlager, Butenschön und Booker) gegenübergestellt. Die Notwendigkeit der Abbildung des Axiallagers bei rotordynamischen Hochlaufsimulationen zeigt sich in der Veröffentlichung von Vetter et al. unter Einsatz einer vorgegebenen Lagersteifigkeit. In der vorliegenden Arbeit werden die oben genannten Modellbildungen erweitert, in dem das Axiallager zu jedem Zeitpunkt des Hochlaufs berechnet wird. Um den Rechenaufwand gering zu halten, wird ein analytisches Axiallagermodell entwickelt. Dabei wird die Reynolds Gleichung für Scherung und Verdrängung separat gelöst. Da jedes einzelne Lagerpad des Axiallagers mit den sich einstellenden Spaltweiten berechnet wird, wirkt ein Rückstellmoment auf die Taumelbewegung des Rotors und somit wird das rotordynamische Verhalten besser abgebildet. Zur Validierung des Radiallagermodells werden die simulierten Ergebnisse aus der Hochlaufsimulation des Turboladers mit experimentell ermittelten Daten verglichen und beurteilt. Anschließend wird die Tragfähigkeit des Axiallagers ebenfalls simuliert und mit Messungen validiert. Das entwickelte Modell zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Prüfstands-Messungen. Insbesondere die subsynchronen Schwingungen, angeregt durch Oil-Whirl/Whip, werden gut abgebildet. Ein stabilisierender Einfluss der Axiallagerung auf die Rotordynamik (3. Subsynchrone) ist in den Simulationsergebnissen deutlich zu sehen. Mit den vorgestellten Modellentwicklungen können zukünftig grundlegende Stabilitätsuntersuchungen durchgeführt werden. Die geringen Rechenzeiten bei Verwendung von modernen Rechnerarchitekturen lassen vielfältige Parameter- und DOE-Untersuchungen zu.

Fluid-Struktur-Kopplung in elastohydrodynamischen Gleitlagern

Krinner, Andreas; Rixen, Daniel J.

Technische Universität München, Deutschland

Abstract

Drehgelenke sind Bestandteil vieler technischer Systeme wie zum Beispiel Verbrennungsmotoren oder Rotoren. Ihre nicht ideale Beschaffenheit beeinflusst deren dynamisches Verhalten und kann zu Reibverlusten und Vibrationen führen. Eine Gruppe spielbehafteter Drehgelenke sind hydrodynamische Gleitlager. Für die Berechnung der Fluidkräfte werden oft reduzierte Gleitlagermodelle verwendet, die für Aussagen zum globalen Systemverhalten ausreichen. Sind jedoch detailliertere Aussagen zum Druck im Gleitlager, zu Reibeffekten oder zur elastischen Deformation der umgebenden Lagerschale von Interesse, sind genauere Modelle notwendig; die höhere Genauigkeit erfordert dann jedoch auch einen höheren Simulationsaufwand. Dieser Beitrag widmet sich deshalb der effizienten numerischen Behandlung von Systemen mit elastohydrodynamischen Gleitlagermodellen. Die beschriebenen Modelle und Methoden sind für jedes beliebige System mit elastischer Lagerschale anwendbar. Als Anwendungsbeispiel dient ein Modell eines Schubkurbelmechanismus mit einem elastischen Pleuel, wie er in einem Verbrennungsmotor zum Einsatz kommt. Im ersten Teil wird das elastohydrodynamische Gleitlagermodell vorgestellt. Die Druckberechnung erfolgt mittels der Reynoldsgleichung, in der als Eingangsgrößen alle Lage- und Geschwindigkeitsgrößen Berücksichtigung finden, inklusive derer aufgrund der elastischen Deformation. Die numerische Lösung wird aus einer FE Diskretisierung berechnet. Für die Kopplung zwischen Struktur und Fluid bei nicht zusammenpassenden Netzen werden ein konsistenter und ein konservativer Kopplungsansatz untersucht und anhand charakteristischer Verläufe wie dem maximalen Druck und der minimalen Spalthöhe miteinander verglichen. Als Kopplungsmethoden werden zum einen die Methode "Nearest Neighbour" als auch eine schwache Erfüllung der Kopplungsbedingungen für Druck und Verschiebung umgesetzt. Im zweiten Teil wird auf die Zeitintegration von Systemen mit elastohydrodynamischen Gleitlagern eingegangen. Es wird ein Quasi-Newton Verfahren für die Kopplung zwischen Fluid und Struktur im Gleitlager angewandt, wie es bei DeGroot [1] für die allgemeine Fluid-Struktur-Interaktion vorgestellt wird. Dieses Verfahren wird mit einem herkömmlichen Newton-Raphson Verfahren bezüglich Zeitschrittweite und Simulationsdauer verglichen.

[1] DeGroot, Bathe, Vierendeels: "Performance of a new partitioned procedure versus a monolithic procedure in fluid-structure interaction", *Computer & Structure*, Juni 2009

A numerical performance analysis of a gas foil bearing including structural modifications by applying metal shims

Hoffmann, Robert; Pronobis, Tomasz; Liebich, Robert

1: TU Berlin, Deutschland; 2: TU Berlin, Deutschland; 3: TU Berlin, Deutschland

Abstract

Gas foil bearings (GFBs) are a smart, self-acting and green technology, which provide an appropriate bearing setup for small and mid-size turbo machinery applications. Low power loss, high speed operation and the omission of an oil system are some advantages of GFBs. However, experimental and numerical investigations have shown sub synchronous vibrations, which may significantly affect the rotor dynamic behavior. The causes of this vibrations are based on the nonlinear fluid film forces and the elastic structure. Particularly, the structure has a main influence on the damping and stiffness characteristic of a GFB and is tunable. Due to friction inside the elastic structure damping is supplied and can decrease amplitudes up to a certain level. Nevertheless, several structural modifications have been introduced to improve the dynamic performance. One of the cheapest modifications is the usage of metal shims, which are inserted between the bump-foil and the bearing sleeve. It generates a defined preload inside the elastic structure, improves the damping characteristic and increases the onset speed of sub synchronous vibrations (OSSV). The aim of this paper is to examine the effect of different shimmed bearing configurations on the dynamic performance. A shimmed GFB is considered for a set of bearing loadings. Using a perturbation method delivers the linearized bearing parameters "stiffness" and "damping". Both are used for a linearized eigenvalue problem, which delivers the OSSV generated by the self-excitation of the fluid film. The Reynolds equation is discretized by a hybrid finite difference scheme, while the pressure field is coupled with a 2D plate model. The bump structure is simplified by a link-spring model.

Oil Flow in Connecting Channels of Floating Ring Bearings

Eling, Rob; Van Ostayen, Ron; Rixen, Daniel

1: Research and Development, Mitsubishi Turbocharger, 1332EC, Almere, The Netherlands; 2: Precision and Microsystems Engineering, Delft University of Technology, 2628CD, Delft, The Netherlands; 3: Institute of Applied Mechanics, Technische Universität München, 85748, Garching, Germany

Abstract

In the field of turbocharger rotordynamics, the current focus is on creating designs which reduce friction losses and audible noise output. Researchers develop numerical models which describe the interaction between the flexible rotor and the floating ring bearings. In these models, the dynamics of the rotor are usually relatively straightforward beam-disk models. The modeling of the floating ring bearings, however, is more complicated because there are many physical aspects to consider, such as cavitation and (conjugate) heat transfer. In addition, the rotordynamic behavior of the rotor-bearing system is strongly non-linear and therefore requires time-transient simulations to predict the rotordynamic response. For the time-transient analysis, it is important to minimize the computational effort needed to run the bearing models. Therefore, the fluid domain is commonly modeled using the Reynolds equation for thin film flow instead of using the more complex Navier-Stokes equations, as done in conventional CFD analysis. Using the standard Reynolds equation for thin film flow, one cannot straightforwardly model the flow of oil in the channels which connect the inner and outer oil films of a floating ring bearing. In the past, some researchers have completely neglected the influence of these oil connecting channels, whereas other researchers have chosen to equalize the inner and outer pressures over the surface of the connecting channels. In this study, the influence of the flow in the connecting channels on the rotordynamic behavior is investigated in more detail. A 3d CFD model shows that the opposite shear flow on the top and bottom of each channel creates a cavity flow with vortices. Combined with the unequal clearances and velocities of the inner and outer film, these vortices create an asymmetric pressure distribution over the walls of the channel. This results in a driving torque and therefore an increase of rotation speed of the ring. In addition, the shear flow which exits the channels creates local peak pressures in the film areas. This flow therefore causes a pre-load to the floating ring bearing. Based on the results of the 3d CFD simulation, an equivalent Reynolds-based model is developed. This extended Reynolds model uses flow factors and an artificial height function to capture the influence of the oil connecting channels without significantly increasing the computational cost of the original Reynolds-based model.

Analysis of Systems with Complex Gears

Kosenkov, Alexander; Gaulard, Frédéric; Schmied, Joachim

Delta JS AG, Schweiz

Abstract

The article presents several examples of complex gear systems, with which authors were faced in their consulting practice in the field of rotor dynamics. Those examples include: parallel gears, planetary gears with fixed and rotating planet carriers, and multi-staged epicyclic gears. Unfortunately, contradicting or inaccurate data is often given in project documentation. Therefore in addition to engineering common sense we strive to implement cross-checks of model data using our rotor dynamics software MADYN 2000. Authors share their practical experience, common mistakes, and possible sources of misunderstanding of specifications. This article focuses on checking correctness of rotating speeds of shafts in complex models with gears. Many engineering tables and formulas exist for this purpose, covering specific and particular configurations of epicyclic gears. Unfortunately, this handbook-like approach has very limited use for the development of engineering software, where all possible configurations should be supported. Incorrectly modeled gears should result in a clear and helpful diagnostic recommendation, showing possible resolutions of the conflict. Very straight-forward procedure of building a system of corresponding linear equations is shown in detail. Resulting equations can easily be solved manually or using computer algebra system; the solution defines geometrical position and rotating speeds of all components of the system. The specificity of the approach is a capability of dealing with incomplete or conflicting user input.

On the Stability of Balanced Rigid Rotors in Air Foil Bearings

Baum, Christoph; Hetzler, Hartmut; Seemann, Wolfgang

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland

Abstract

Ölfreie Lagerungskonzepte sind ein vielversprechender Ansatz zur Optimierung von Turbomaschinen und hochtourigen Rotoren. Luftgeschmierte Lager bieten gegenüber den klassischen ölgeschmierten Gleit- und Wälzlager die Möglichkeit, auftretende Reibungsverluste erheblich zu reduzieren und bringen gleichzeitig den Vorteil einer vereinfachten Schmierstoffversorgung mit sich. Entscheidendes Kriterium bei der Auswahl der Lagerung ist aber das sich einstellende Betriebsverhalten des Rotors, welches maßgeblich von der Lagerung mit beeinflusst wird. Insbesondere die dynamischen Lagerkräfte können ein Anregungsmechanismus für Rotorschwingungen sein. Je nach gefahrenem Betriebspunkt können deshalb Schwingungen auftreten, wodurch ein sicherer Betrieb der Maschine unter Umständen nicht mehr möglich ist und es zum Versagen kommt. Bei der Auslegung des Rotors sind deshalb möglichst umfangreiche Kenntnisse über die Lagereigenschaften, z. B. in Form von Berechnungsmodellen wünschenswert, um frühzeitig eine auf den Rotor abgestimmte Lagerauswahl treffen oder eine konstruktive Umgestaltung der Lager vornehmen zu können. Konkret sollen Folienlager modelliert und deren Einfluss auf das dynamische Verhalten des Rotors diskutiert werden. Folienlager fallen in die Kategorie der dynamischen Luftlager. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sich der tragende Fluidfilm ausschließlich durch die Relativbewegung des Rotors und der Lagerschale, ohne externe Druckquelle aufbaut. Die Lagerschale ist dabei so gestaltet, dass sie sich im Betrieb unter den wirkenden Druckkräften verformen kann. Die Nachgiebigkeit ist bei Folienlager häufig durch eine leicht verformbare Struktur und eine abschließende Folie als inneren Rand des Lagers realisiert. Das innerhalb des Beitrags verwendete Lagermodell wird möglichst einfach gehalten, so dass es einerseits möglichst rechenzeiteffizient Lagerkräfte liefert, aber dennoch die wesentlichen physikalischen Eigenschaften abbildet. Für die Analyse des Rotor-Lager-Systems wird das Rotor- und Lagermodell gekoppelt und hinsichtlich seines dynamischen Verhaltens, insbesondere im Hinblick auf seine Schwingungseigenschaften und sein Stabilitätsverhalten untersucht.

High Speed Hydrodynamic Journal Bearings - State of the Art of Calculations

Fuchs, Andreas; Kosenkov, Alexander; Schmied, Joachim

Delta JS AG, Schweiz

Abstract

The operating behavior and therefore the unsteady bearing load of high speed hydrodynamic bearings can be affected by dynamic effects in the oil supply, the energetic coupling of the oil films and tolerances in the lubricating gap. The 2d oil film pressure, the 3d temperature distribution in the oil film and the bearing shell as well as the static and dynamic bearing coefficients can be more precisely calculated with the enhanced program ALP3T2P+ (considering two phase model and inertia forces in the oil film) compared to classical cavitation models such as Gümbel and Reynolds boundary conditions. This applies for complex sliding bearings without and with any pockets and geometry, tilting pad bearings and floating ring bearings as well as for squeeze film dampers. The modelling of bearing geometries, which can be described by curvature radii and centers, is supported by user friendly GUIs. The calculation is based on an iterative solution of the extended Reynolds-, the energy- and the deformation-equations including the temperature and pressure dependent properties of the oil film. By integrating the program ALP3T2P+ and the program for calculating the unsteady bearing load of general bearings, floating ring bearings or squeeze film dampers in the program-system MADYN 2000, the vibration behavior of rotor-bearing-basement systems can be accurately calculated. Analyzing such systems reveals, that the damping in the cavitation areas and the local inertia forces in the lubricating oil films can significantly change the non-linear vibration behavior of such complex systems. For squeeze film dampers and static non-centered, non-rotating floating ring bearings, the important centering effect due to the dynamic load (actually creating load carrying capacity) can be clearly shown by non-linear analyses with the enhanced program system.

Detection of blade mistuning in a low pressure turbine rotor resulting from manufacturing tolerances and differences in blade mounting

Schönleitner, Florian; Trussnig, Lukas; Marn, Andreas; Heitmeir, Franz

Graz University of Technology, Österreich

Abstract

For a serious prediction of vibration characteristics of any structure a detailed knowledge of the modal characteristic is essential. This is especially important for bladed turbine rotors. Mistuning of the blading of a turbine rotor can appear due to manufacturing tolerances or because of the blading process itself due to unequal mounting of the blades into the disk. This paper investigates the mistuning of the individual blades of a low pressure turbine with respect to the effects mentioned above. Two different rotors with different aerodynamic design of the blades were investigated. The blades were mounted to the disk with a so called hammer head root which is especially prone to mounting irregularities. For detailed investigations, the rotor was excited with a shaker system to detect the forced response behaviour of the individual blades. The measurements were done with a laser vibrometer system. As the excitation of rotor structure was held constant during measurement it was possible to detect the line of nodes and mode shapes as well. It could be shown, that the assembly process has an influence on the mistuning. The data were analysed and compared with numerical results. For this, different contact models and boundary conditions were used. The above described characterization of modal behaviour of the rotor is the basis for the upcoming aeroelastic investigations and especially for the blade vibration measurements of the rotor, turning with design and off-design speeds. The paper gives an outlook to these blade vibration measurements which will be executed by a telemetry system and strain gages on the large turbine test facility of Graz University of Technology.

DOE basierte Sensitivitätsanalyse konstruktiver Lagerparameter eines gleitgelagerten Abgasturboladers

Göbel, Stefan; Daniel, Christian; Woschke, Elmar; Strackeljan, Jens

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Deutschland

Abstract

Gleitgelagerte Rotorsysteme, beispielsweise Abgasturbolader für PKW Motoren, zeigen ein nichtlineares Bewegungsverhalten. Von herausragender Bedeutung während des Betriebs und wohl dokumentiert sind subsynchrone Whirlschwingungen. Die Beeinflussung dieser, unter anderem durch konstruktive Parameter, thermische Randbedingungen oder Fertigungstoleranzen ist teilweise nicht verstanden, in jedem Fall aber analytisch nicht beschreibbar. Insbesondere fehlt die systematische Zuordnung, welche Änderung einer Ausgangskonfiguration zu welcher Änderung des Bewegungsverhaltens führt. Die numerische Simulation unter Berücksichtigung der Kopplung von elastischem Rotor und hydrodynamischer Gleitlagerung ist das Werkzeug zur eingehenden Untersuchung dieser gekoppelten Abhängigkeiten. Die Strategie und Umsetzung solcher Simulationen ist von der Forschungsgruppe am Lehrstuhl für Rotordynamik in bereits in Veröffentlichungen vorgestellt. Um aus den unzähligen Ergebnisdaten einer validierten Simulation und zusätzlicher Variationsrechnungen valide Aussagen zu gewinnen, ist eine Strategie nötig, die über die bloße vergleichende Betrachtung zweier Varianten hinausgeht. Hierfür bieten sich Methoden aus der statistischen Versuchsplanung (design of experiments - DOE) an. Mithilfe dieser können günstige Parameterkombinationen für die Durchführung eines Computerexperiments ermittelt werden, welche trotz weniger Simulationen Auskunft über Wirkzusammenhänge und Wechselwirkungen geben. Die Auswertung erfolgt anschließend durch multidimensionale Regressionsanalysen, die neben einer übersichtlichen Auswertung der Stärke auch eine Einschätzung der Zuverlässigkeit gefundener Effekte ermöglichen. In diesem Beitrag soll das Vorgehen exemplarisch an einem kleinen Turbolader mit full-floating Schwimmbuchsenlagerung für PKW Motoren dargelegt werden. Ziel ist, die Wirkung inklusive Kreuzkorrelationen erster Stufe von fünf konstruktiven Faktoren auf die Amplitude subharmonischer Wellenbewegungen zu identifizieren. Aus dem gewonnenen Regressions-Metamodell wird eine optimale Parameterkombination abgeleitet. Die gewonnenen Aussagen sowie die Grenzen der Methode werden kritisch kommentiert, bevor durch die abschließende Simulation eines Turboladers mit auf geringe Schwingungsamplituden optimierter Konstruktion die Vorhersagekraft der dargelegten Sensitivitätsanalyse überprüft wird.

Influence of axial grooves in floating ring bearings on the nonlinear oscillations of turbocharger rotors

Nowald, Gerrit; Boyaci, Aydin; Schmoll, Robert; Koutsovasilis, Panagiotis; Driot, Nicolas; Schweizer, Bernhard

Technische Universität Darmstadt, Deutschland

Abstract

High-speed turbocharger rotors are often supported in floating ring bearings due to their good damping behavior and their low costs. On the contrary, these rotor-bearing systems undergo subsynchronous oscillations, which can cause acoustic problems and can even lead to the destruction of the turbocharger. In the present investigations of turbocharger rotor systems, only cylindrical bearings with plain surfaces are mostly considered. The bearing geometry of the rings usually contains grooves and bores to maintain the oil supply. Bearings with such geometries have been comprehensively discussed in literature. However, most of the studies treat only fixed bearing shells with journals under stationary conditions. Additionally, simple rotor models are usually used to study the dynamical behavior. Here, the influences of grooves on the subsynchronous oscillations of turbocharger rotors are investigated. The pressure and shear stress distributions in the oil films change due to the additional boundary conditions introduced by the grooves. Furthermore, the rotation of the rings and thus the position of the grooves has to be taken into account. Run-up simulations are performed with a multi-body model of a turbocharger rotor. The bearing forces are calculated by solving the Reynolds equation. Results for run-up simulations of a turbocharger rotor in floating ring bearings, either with plain cylindrical surfaces or with grooves, are compared. It is shown that the friction torques, which act on the ring, have a large influence on the ring speed and therefore on the nonlinear oscillations of the rotor. Thus, the influence of the pressure distribution and the friction torque are discussed separately.

Unterscheidung verschiedener Fehlerarten beim modellbasierten Monitoring

Thümmel, Thomas; Roßner, Markus; Ulbrich, Heinz; Rixen, Daniel J.

Technische Universität München, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Deutschland

Abstract

Zur Erhöhung der Sicherheit und Zuverlässigkeit besitzen viele Rotorsysteme ein Überwachungssystem. Ein wichtiger Entwicklungstrend ist dabei der Übergang zu modellbasierten Systemen. Diese Systeme ergänzen die Signalüberwachung um eine Simulation des Schadens, was genauere Aussagen über das Ausmaß des Schadens erlaubt. Wie in der letzten SIRM vorgestellt, arbeiten die Autoren an einem autonomen Monitoring-System. Bei Abweichung vom Normzustand soll dieses System selbstständig die Signale analysieren, aus einer Schadensbibliothek die richtige Art des Fehlers herausuchen und anschließend den Schaden mittels Simulation quantifizieren. Im Speziellen wird in dieser Veröffentlichung ein Überblick zu den Schadensmodellen in der Bibliothek des akademischen Monitoringsystems im Labor des Lehrstuhles für Angewandte Mechanik gegeben. Die Basis bildet dabei eine klare Schadensdefinition mit Modell und Parametrisierung und die Wahl der notwendigen Sensorik, Signaltransformationen und Indikatoren. Dies ermöglicht letztlich die modellbasierte Trennung der Schäden. Die Schadensbibliothek enthält bisher Störungen durch Unwucht, Schlag, Rundheitsfehler, Versatz (Parallelversatz, Winkelversatz, Versatz in Kupplungen), Anstreifen im Fanglager und externe Anregung durch harmonische Kräfte. Im Beitrag werden die Schadensfälle zunächst anhand des LAVAL-Rotors veranschaulicht und anschließend mit den konkreten abgeglichenen Modellen des Laborprüfstandes vorgestellt. Im Normalbetrieb überwacht das Monitoringsystem den Trendverlauf einzelner weniger Indikatorwerte des Rotors, bis eine kritische Schwelle überschritten wird. Aus den Messdaten können signalbasiert Gruppen von Schadensarten separiert werden. Erst mit Hilfe einer darauf folgenden modellbasierten Phase lassen sich innerhalb einer Gruppe die Schäden klar trennen. Daraus resultiert nicht nur eine eindeutigere Unterscheidung der Schäden, sondern auch eine Quantifizierung des Schadensausmaßes. Der Beitrag gibt viele praktische Erfahrungen wieder, besonders hinsichtlich Sensorauswahl, Signalaufbereitung, Parameteridentifikation mittels Optimierungsverfahren sowie Dokumentation und Interpretation der Schadensfälle. Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Bestimmung des tatsächlichen Rotororbits bei Wellen mit Rundheitsfehlern.

Validierung der Hochlaufsimulation für automotive Abgasturbolader

Daniel, Christian; Woschke, Elmar; Nitzschke, Steffen; Strackeljan, Jens; Driot, Nicolas; Braun, Karl-Ludwig; Koutsovasilis, Panagiotis

1: Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland; 2: BorgWarner Turbo Systems

Abstract

Abgasturbolader sind ein probates Mittel die Effizienz von Verbrennungsmotoren zu steigern und sind aus heutigen Fahrzeugkonzepten nicht mehr wegzudenken. Zur Verkürzung des Entwicklungsprozesses kommen für die notwendige Optimierung der Systemparameter statt kostenintensiver Prüfstandsversuche vermehrt Simulationen des Hochlaufverhaltens von Turbolader-Rotoren zum Einsatz. Von besonderer Bedeutung ist die Lagerung des Rotors, welche vorwiegend gleitgelagert ausgeführt wird. Bedingt durch den daraus entstehenden Zielkonflikt zwischen maximal nutzbarem Drehzahlbereich und der gleitlagerbedingten Stabilitätsgrenzdrehzahl wird auf eine Schwimmbuchsenlagerung mit semi- oder full-floating ring zurückgegriffen. Das daraus resultierende extrem nichtlineare Rotorsystem erfordert ein aufwändiges Simulationsmodell zur Vorhersage des transienten Schwingungsverhaltens. Das verwendete Modell wurde innerhalb einer MKS Umgebung unter Einbeziehung der Elastizität der rotierenden Welle implementiert. Die Abbildung der Lager erfolgt durch ein nichtlineares Kraftelement, welches auf Basis der Reynoldsschen Differentialgleichung, unter Berücksichtigung von Schiefstellung der Lagerpartner sowie der Ölversorgung von äußerem und innerem Schmierfilm, die Rückstellkräfte numerisch berechnet. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden anhand von Prüfstandsversuchen eines ATL von BW-TS umfangreiche Vergleiche bei Variation von Lagerspiel, Unwucht und Druck der Ölzufuhr angestellt. Die anhand von Wasserfalldiagrammen der Wellenschwingung erfolgte Auswertung zeigt eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation bei allen Varianten. Mit dem validierten Simulationsmodell können nun tiefere Einblicke in das System gewonnen werden. Dies umfasst die Auswertung tribologisch wichtiger Größen, wie minimaler Schmierpalt oder Reibleistung sowie eine Erweiterung des Verständnisses der vorherrschenden Anregungsmechanismen.

Torsional vibration problem in reciprocating compressor - Case study

Boru, Fikre; Lenz, Johann

KÖTTER Consulting Engineers GmbH & Co. KG, Deutschland

Abstract

Reciprocating compressors are unavoidable classical solutions in the field of natural and process gas compression with the ability to function over a wide range of operating conditions. The dynamic design of the reciprocating compressor is complicated due to the large number of conditions that have to be fulfilled. Since high torsional dynamic stress is often not recognised until damages appear, it is advisable to conduct a detailed torsional vibration analysis when planning a new drive train or modifying an existing one. In the effort to adapt to the varying demand of the market, natural and process gas facilities revamp fixed speed reciprocating machines with variable speed drive (VSD) and (active) suction valve unloading devices. Such a revamp leads to a change (often to the worst) of the dynamic behaviour of the drive train even though the components in the train are unchanged. The motivation of this article emanates from a practical example, where the torsional vibration of a reciprocating compressor after installation of a stepless active suction valve unloader led to repeated failures of the drive train. The purpose of this paper is to raise awareness of torsional vibration problems and to outline an analytical procedure to follow in the design stage (new or revamp) of reciprocating compressors. A detailed finite-element-model of the complete drive train including the non-linear rubber coupling and the periodic excitation torque (inertial and gas forces) is developed. It is shown in the paper that the resulting equation of motion of the drive train is a second order differential equation with operation dependent damping matrix. The solution to the differential equation is then solved in the time domain. As a practical example, the analytical and the measurement results are compared to each other and the differences are clarified. Practical recommendations on the basis of experience are provided to help to achieve a maximum reliability from the torsional vibration point of view.

Required simulation model detail to achieve reliable simulation results

Rosenlöcher, Thomas; Schlecht, Berthold

Technische Universität Dresden, Deutschland

Abstract

The determination of the natural torsional frequencies of drivetrains is mandatory to predict the possible occurrence of resonances due to an excitation of mode shapes. The excitation can be caused by the imbalance or misalignment of shafts, by gear meshing frequencies, by loading characteristics or further excitation mechanisms. The measurement of the natural torsional frequencies on the first prototype can, in some cases, be too late with the result that opportunities are lost to realise major constructional changes. To avoid undesirable resonances during operation it is essential to use simulation models at an early stage of the product development process. The assembly of a simulation model pre-supposes the definition of system boundaries, the level of detail and the degrees of freedom. These decisions result in the number of required parameters, the time and effort needed to model the system and the calculation time. However, in particular, stated expectations with regard to the targeted results and the accuracy of the model are of great importance in terms of the decisions to be made during the modelling process. The paper and presentation set out to demonstrate the influence of the level of model detail on the results to be achieved, as well as possibilities for using modelling approaches appropriate to the questions posed in different industrial applications (e.g. ships, cranes, bucket wheel excavators, rolling mills, wind turbines).

Ganzheitlicher Virtual Engineering Ansatz zur Schwingungs- und Akustiksimulation eines Verbrennungsmotors

Duvigneau, Fabian; Nitzschke, Steffen; Strackeljan, Jens; Gabbert, Ulrich

Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland

Abstract

In den letzten Jahren ist Komfort zu einem wichtigen Faktor bei der Beurteilung moderner Automobile geworden. Dabei spielt die Schallemission des Fahrzeugs in Bezug auf die Wahrnehmung der Qualität eine entscheidende Rolle. Daher ist ein wichtiges Ziel in der aktuellen Forschung die Schallabstrahlung dominanter Komponenten, beispielsweise von einem Verbrennungsmotor, zu minimieren. In diesem Beitrag wird ein ganzheitlicher Ansatz präsentiert, der ausgehend von einem gegebenen Gasdruckverlauf im Zylinder die geschlossene Simulation der Schalldruckverteilung um den Motor ermöglicht. Der vorgestellte ganzheitliche Ansatz beinhaltet dabei zunächst eine elastische Mehrkörpersimulation, welche die Eingangsdaten für eine anschließende Finite-Elemente-Berechnung liefert. Mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) werden die Strukturschwingungen des Motorblocks und der Ölwanne berechnet, die als Grundlage für die anschließende Berechnung des Schalldruckes in der Umgebungsluft dienen. Die wesentlichen Anregungskräfte im Zylinderkurbelgehäuse werden durch eine elastische Mehrkörpersimulation gewonnen und stammen aus dem Zylinderinnendruck, den Kurbelwellenhauptlagern sowie der Kolbensekundärbewegung. Letztere Quer- und Kippbewegung im Rahmen des Betriebsspiels erfordert die Berechnung der hydrodynamischen Schmierfilmreaktion sowie des Festkörperkontakts zwischen Kolben und Zylinder. Die beiden Kontaktpartner Kolben und Zylinder werden als elastische Körper aufgebaut, welche lokale Deformationen aus dem EHD Kontakt abbilden können. Die Hauptlagerkräfte werden nach der Gleitlagertheorie durch Lösung der Reynoldsen Differentialgleichung berechnet. Zusammen mit den Gaskräften werden die so generierten Kraftanregungen auf die FE-Struktur von Zylinderkurbelgehäuse und Ölwanne gegeben. Mithilfe der FEM werden anschließend die Strukturschwingungen dieser Bauteile berechnet, die aus der Anregung resultieren, die mithilfe der elastischen Mehrkörpersimulation bestimmt wurde. Nachgeschaltet erfolgt auf Basis dieser Strukturschwingungen die Berechnung der Schallabstrahlung ins Freifeld.

Lateral Dynamics of Flexible Rotors Supported by Controllable Gas Bearings - Theory & Experiment

Pierart, Fabian G.; Santos, Ilmar F.

Technical University of Denmark, Dänemark

Abstract

Active gas bearings might represent a mechatronic answer to the growing industrial need to high performance turbomachinery. In this framework, the paper gives a theoretical and experimental contribution to the improvement of lateral dynamics and stability of rotating machines. The work aims at demonstrating theoretically as well as experimentally the feasibility of applying active lubrication to gas journal bearings. The operation principle is to generate active forces by regulating radial injection of compressible lubricant (gas) by means of piezoelectric actuators mounted on the back of the bearing sleeves. Two operational principles are carefully investigated: i) the hybrid (hydrodynamic + hydrostatic) with controllable static pressure and ii) the active with time-varying control pressure. The active control principle is built using eddy-current sensor signals able to detect the rotor lateral motion. A feedback law is used to couple the lateral dynamic of a flexible rotor-bearing system with the pneumatic and dynamic characteristics of a piezoelectric actuated valve system. Different control strategies are theoretical as well as experimentally investigated. Theoretical and experimental results show the considerable performance advantages of such new kind of bearing. Discrepancies between theoretical and experimental results are elucidated in the paper, considering some simplifying assumptions used to derive the modified Reynolds equations.

Modal component mode synthesis in torsional vibration analysis: rotor-blade interaction

Dohnal, Fadi; Nordmann, Rainer; Knopf, Eric

Alstom (Switzerland) Ltd., Schweiz

Abstract

For safe rotor operation it is important to predict natural frequencies of the full rotor arrangement and not only its components. These natural frequencies are typically speed-dependent if rotor and blade vibrations are coupled. In this contribution we focus on the torsional rotor-blade interaction, the coupling between torsional vibrations of the shaft and bending vibrations of blade rows attached to the shaft. During the design of a turbine shaft train, rotor blades are modelled using 3D finite elements due to its complex geometry and resulting vibration modes. This kind of model incorporates typically centrifugal loading due to the rotor rotation as well as contact modelling at the rotor-blade interface. Building a 3D finite element model describing the rotor-blade interaction can become cumbersome and its calculation is time consuming. Instead of modelling the whole shaft train in 3D finite elements, the proposed modelling is based on the simple 1D rotor beam model. Employing the method of substructuring enables to translate any complex blade which is modelled using 3D finite elements with thousands of physical degrees of freedom into a bunch of models with a single modal degree of freedom described by its natural frequencies and the so-called modal effective moments of inertia. It is outlined how the natural frequencies of a rotor with flexible blades are predicted by coupling the modal properties of two or more subsystems: the rotor with rigid blades and the isolated flexible blade rows. The resulting model resembles the rotor-blade interaction in all its details from the rotor point of view. It has to be highlighted that his process allows incorporating several modes of any blade row to be incorporated in the final rotordynamic model.

Einfluss der Lagergehäusesteifigkeit auf das Schwingverhalten eines 2-poligen Elektromotors

Kalinowski, Piotr; Krzysteczko, Lukas; Ulbrich, Benjamin G.

1: Siemens AG, Berlin, Deutschland; 2: Renk AG, Hannover, Deutschland

Abstract

Die genaue Vorhersage des Schwingungsverhaltens rotierender, elektrischer Maschinen erfordert den Einsatz von zuverlässigen Simulationsmodellen. Während die Rotoren mit Hilfe von Balkenelementen und Punktmassen sehr gut abgebildet werden können, liegt bei gleitgelagerten Rotoren eine wesentliche Herausforderung in der geeigneten Modellierung des Ölfilms sowie der nicht rotierenden Baugruppen, wie Lagergehäusen, Grundrahmen, Unterbauten usw. Gewöhnlich werden diese mit Hilfe von in Reihe geschalteten Massen- und Federelementen modelliert. Diese Vorgehensweise hat sich für die rotordynamische Analyse bewährt und erlaubt eine höchst effiziente Modellbildung für die Simulation bei sehr guter Ergebnisqualität. Allerdings lässt sich eine hohe Genauigkeit nur dann erzielen, wenn Federsteifigkeiten und Massen realitätsnah abgestimmt sind. Im Rahmen dieses Beitrags wird exemplarisch gezeigt, welchen Einfluss die Modellierung der Lagergehäusesteifigkeit auf die Simulation des Schwingungsverhaltens eines großen 2-poligen Elektromotors hat. Zu diesem Zweck werden die Steifigkeiten des Lagergehäuses unter Berücksichtigung der Lagerungsbedingung der Lagerschale im Gehäuse ermittelt. Dabei werden Einflussfaktoren wie z.B. Lagerfertigungstoleranzen und Lagerlastabweichungen berücksichtigt, woraus sich ein für den untersuchten Elektromotor gültiger Steifigkeitsbereich ergibt. Schließlich wird diskutiert, inwieweit die Steifigkeitsvariation das Eigenverhalten des Rotors sowie die zu erwartenden unwuchtbedingten Schwingwerte beeinflusst und welche Vorteile diese Erkenntnis im Hinblick auf die Auslegung von rotierenden Elektromaschinen bietet.

Chaotic and stable orbits of a rotor in a non-conventional back-up bearing. A numerical and experimental approach

Fonseca, Cesar A.L.L.; Aguiar, Romulo R.; Weber, Hans I.

Department of Mechanical Engineering, Technical University of Denmark, Denmark

Abstract

The present work is a numerical study with experimental validation of the non-linear behaviour of a rotor interacting with a non-conventional stator bearing. When the rotors movement in the (x, y) plane reaches an undesirable amplitude, such movement is restrained by the non-conventional stator, composed by pins. These pins receive all the impacts, working as a containment bearing. While conducting numerical simulations, the results show the different characteristics of the rotor orbit, depending on the applied torque. The steady state trajectories formed singular geometries, different from each other. A considerable set of data was collected, showing this interesting rotor/stator interaction due to impacts with the pins. The results include various non-linear features, such as bifurcations and chaos. Furthermore an experimental test rig is mounted and the position of the rotor inside the modified safety bearing is measured and the result is compared to the simulation presented.

Dynamik von Laborzentrifugen

Strackeljan, Jens; Behr, Dietrich[†]

Deutschland

Abstract

Moderne Laborzentrifugen sind Universalmaschinen, weil sie mit einer Vielzahl unterschiedlicher Rotoren lauffähig sein müssen. Aus Sicht der Dynamik ist dies ein Problem, weil Lagerung, Antrieb und die Verbindung zwischen Motor und Rotor für alle Rotoren unverändert bleiben, obwohl die Rotoren sich bezüglich Masse und Trägheitsmoment erheblich unterscheiden. Neben klassischen Problemen der Resonanz ergeben sich bei schnell drehenden Rotorsystemen häufig Fragestellungen durch innere Reibung. Hierbei treten instabile Systemzustände mit exponentiell wachsenden Amplituden auf, wenn einerseits die Rotordrehzahl höher als eine der Gleichlaufeigenfrequenzen ist - also allemal im typischen Betriebsdrehzahlbereich - und wenn andererseits die äußere Dämpfung, nicht genügend groß ist. Derartige Phänomene treten bei der Konstruktion von Laborzentrifugen relativ häufig auf und enden meist mit erheblichen Zerstörungen der Zentrifuge und deren Umfeld. Dabei stammt die sogenannte "mitbewegte Reibung" häufig aus Mikro-Gleitvorgängen zwischen Rotoraufnahme am oberen Nadelende und dem Rotor. Weiterhin gibt es unter dem Stichwort Unwuchttoleranz umfangreiche Bemühungen und Forderungen den Anwender, zur Steigerung des Bedienkomforts, von Tarierarbeiten möglichst zu befreien. Es ist heute sehr wohl möglich, Unwuchten im Bereich von 10 ‰ der Rotormasse zu beherrschen, wenn zugehörige Antriebs- und Lagerungskonzepte des Rotors realisiert werden.

Der Beitrag¹ greift aktuellen Entwicklungen und Anforderungen an moderne Laborzentrifugen und deren Auswirkungen auf die Rotordynamik auf.

¹In Gedenken an Prof. Dr. rer. nat Dietrich Behr, der an der TU Clausthal mit seiner Arbeitsgruppe über viele Jahre die Rotordynamik von Laborzentrifugen als Forschungsthema intensiv bearbeitet hat.

Autorenregister - Index of authors

Name	Organisation	Paper-ID
Aguiar, Romulo R.	PUC-Rio, Department of Mechanical Engineering	67
Baum, Christoph	Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland	52
Becker, Fabian Benedikt	TU Darmstadt, Deutschland	41
Behr, Dietrich	TU Clausthal, Deutschland	68
Boru, Fikre	KÖTTER Consulting Engineers GmbH&Co. KG, Deutschland	59
Boyaci, Aydin	Fachgebiet Strukturtechnik, Technische Universität Darmstadt	56
Braun, Karl-Ludwig	BorgWarner Turbo Systems	58
Daniel, Christian	Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland	58, 55
Dohnal, Fadi	Alstom (Switzerland) Ltd., Schweiz	63
Driot, Nicolas	BorgWarner Turbo Systems	58, 56
Duvigneau, Fabian	Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland	61
Elbs, Michael	ISMB Dautermann GmbH, Deutschland	44
Eling, Rob	Mitsubishi Turbocharger and Engine Europe, Almere, The Netherlands; Technische Universität Delft, The Netherlands	50
Filsinger, Dietmar	IHI Charging Systems International GmbH, Heidelberg	38
Fonseca, Cesar A. L. L.	Technical University of Denmark, Department of Mechanical Engineering	67
Fuchs, Andreas	Delta JS AG, Schweiz	53
Gabbert, Ulrich	Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland	61
Gaulard, Frédéric	Delta JS AG, Switzerland	51
Göbel, Stefan	Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland	55
Heindel, Stefan	TU Darmstadt, Deutschland	41
Heine, Christopher	Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH (BSH), Deutschland	35
Heitmeir, Franz	Graz University of Technology, Österreich	54
Helfrich, Reinhard	Intes GmbH, Deutschland	36
Hetzler, Hartmut	Universität Kassel, Deutschland	52
Hoffmann, Robert	TU Berlin, Deutschland	49
Kalinowski, Piotr	Siemens AG, Berlin, Deutschland	66
Klaus, Michael	Continental AG, Simulation Turbolader, Deutschland	47
Knopf, Eric	Alstom Switzerland Ltd., Baden, Switzerland	69, 63
Köhl, Wolfgang	Technische Universität Darmstadt, Fachgebiet Strukturtechnik, Deutschland	38

**SIRM 2015 - 11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen,
Magdeburg, Deutschland, 23. - 25. Februar 2015**

Name	Organisation	Paper-ID
Konowrocki, Robert	Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences, Poland	40
Kosenkov, Alexander	Delta JS AG, Switzerland	51, 53
Koutsovasilis, Panagiotis	BorgWarner Turbo Systems	58, 43, 56
Kreschel, Martin	IHI Charging Systems International GmbH, Heidelberg	38
Krinner, Andreas	Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, Deutschland	48
Krzysteczko, Lukas	Renk AG, Hannover, Deutschland	66
Larsen, Jon Steffen	Technical University of Denmark, Denmark; Siemens A/S - Aeration Competence Center, 3000 , Helsingør, Denmark	39
Lenz, Johann	KÖTTER Consulting Engineers GmbH&Co. KG, Deutschland	59
Li, Shuo	Continental AG, Simulation Rotordynamik, Deutschland	47
Liebich, Robert	TU Berlin, Deutschland	49
Markert, Richard	TU Darmstadt, Deutschland	37
Marn, Andreas	Graz University of Technology, Österreich	54
Mikota, Gudrun	Johannes Kepler Universität Linz, Österreich	42
Nielsen, Bo Bjerregaard	Technical University of Denmark, Denmark	39
Nitzschke, Steffen	Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland	58, 61
Nordmann, Rainer	Alstom Switzerland Ltd., Baden, Switzerland	69, 63
Nowald, Gerrit	Fachgebiet Strukturtechnik, Technische Universität Darmstadt	56
Pierart, Fabian Gonzalo	Technical University of Denmark, Dänemark	62
Plagemann, Markus	Bosch und Siemens Hausgeräte GmbH (BSH), Deutschland	35
Pochanke, Andrzej	Warsaw University of Technology, Faculty of Electrical Engineering	40
Potrafke, Timo	TU Darmstadt, Deutschland	41
Pregowska, Agnieszka	Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences, Poland	40
Pröll, Andreas Josef	Johannes Kepler Universität Linz, Österreich	42
Pronobis, Tomasz	TU Berlin, Deutschland	49
Rienäcker, Adrian	Universität Kassel, IAF, Deutschland	47
Rinderknecht, Stephan	TU Darmstadt, Deutschland	41
Rixen, Daniel J.	Technische Universität München, Germany	48, 50, 57
Rosenlöcher, Thomas	Technische Universität Dresden	60
Rossner, Markus	Technische Universität München, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Deutschland	57
Salazar, Jorge G.	Technical University of Denmark, Denmark	45
Santos, Ilmar Ferreira	Technical University of Denmark, Denmark	39, 45, 62

**SIRM 2015 - 11. Internationale Tagung Schwingungen in rotierenden Maschinen,
Magdeburg, Deutschland, 23. - 25. Februar 2015**

Name	Organisation	Paper-ID
Schindler, Thorsten	Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Technische Universität München, Deutschland	48
Schlecht, Berthold	Technische Universität Dresden	60
Schmied, Joachim	Delta JS AG, Switzerland	51, 53
Schmoll, Robert	BorgWarner Turbo Systems Engineering GmbH	56
Schönleitner, Florian	Graz University of Technology, Österreich	54
Schwarze, Hubert	TU Clausthal, ITR, Deutschland	47
Schweizer, Bernhard	Fachgebiet Strukturtechnik, Technische Universität Darmstadt	56
Seemann, Wolfgang	Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Deutschland	52
Siegl, Benjamin	TU Darmstadt, Deutschland	37
Silber, Siegfried	Johannes Kepler Universität Linz, Österreich	42
Sterns, Dietmar	Renk AG, Deutschland	44
Strackeljan, Jens	Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland	58, 61, 68, 55
Szolc, Tomasz	Institute of Fundamental Technological Research of the Polish Academy of Sciences, Poland	40
Thümmel, Thomas	Technische Universität München, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Deutschland	57
Traussnig, Lukas	Graz University of Technology, Österreich	54
Tuzcu, Sedat	Continental AG, Simulation Rotordynamik, Deutschland	47
Ulbrich, Benjamin Gottfried	Siemens AG, Berlin, Deutschland	66
Ulbrich, Heinz	Technische Universität München, Lehrstuhl für Angewandte Mechanik, Deutschland	57
Van Ostayen, Ron	Technische Universität Delft, The Netherlands	50
Varela, Alejandro C.	Technical University of Denmark, Denmark	45
Wagner, Nils	Intes GmbH, Deutschland	36
Weber, Hans I.	PUC-Rio, Department of Mechanical Engineering	67
Woschke, Elmar	Otto-von-Guericke-Universität, Deutschland	58, 55

Force Majeure / Act of god

Dem Veranstalter gegenüber können keine Schadensersatzansprüche geltend gemacht werden, wenn die Durchführung der Tagung oder Teile davon durch unvorhergesehene politische oder wirtschaftliche Ereignisse oder durch höhere Gewalt erschwert oder unmöglich gemacht werden, oder wenn Programmänderungen aufgrund von Absagen durch Referenten erfolgen müssen.

It is mutually agreed that in the event of total or partial cancellation of the Congress due to fire, strike, natural disaster (either treated or actual), government regulations or incidents not caused by the organiser, which would prevent its scheduled opening or continuance, this agreement may be partially postponed or terminated as a whole. In this case, participants are not entitled to reclaim refunds on no account. Participants are obliged to have a civil liability insurance.