

Reihe 11

Schwingungs-
technik

Nr. 352

Benjamin Siegl, M. Sc.
Darmstadt

Zur Instationären Unwuchtidentifikation

Modellgestütztes Auswuchten von
Rotoren mit drehzahlveränderlichen
Parametern

Zur Instationären Unwuchtidentifikation

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt
zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von

M. Sc. Benjamin Siegl

aus Darmstadt

Referent: Prof. Dr.-Ing. Richard Markert

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Tag der Einreichung: 25. Oktober 2016

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Januar 2017

Darmstadt, 2017

D17

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 11

Schwingungstechnik

Benjamin Siegl, M. Sc.
Darmstadt

Nr. 352

Zur Instationären Unwuchtidentifikation

Modellgestütztes Auswuchten
von Rotoren mit drehzahl-
veränderlichen Parametern

VDI verlag

Siegl, Benjamin

Zur Instationären Unwuchtidentifikation

Modellgestütztes Auswuchten von Rotoren mit drehzahlveränderlichen Parametern

Fortschr.-Ber. VDI Reihe 11 Nr. 352. Düsseldorf: VDI Verlag 2017.

114 Seiten, 45 Bilder, 13 Tabellen.

ISBN 978-3-18-335211-1, ISSN 0178-9554,

€ 48,00/VDI-Mitgliederpreis € 43,20.

Für die Dokumentation: Auswuchttechnik – Unwuchtidentifikation – Drehzahlvariable Rotorsysteme – Instationäre Resonanzdurchfahrt – Systemidentifikation – Rotordynamik – Magnetlager – Abgasturbolader

Die vorliegende Arbeit wendet sich an Ingenieure und Wissenschaftler im Bereich der Auswuchttechnik und Rotordynamik. In ihr wird ein Unwuchtidentifikationsverfahren im Zeitbereich entwickelt, das mit nur einem schnellen Hoch- oder Auslauf ohne Testunwuchtsatz auskommt. Dadurch wird die Meßprozedur im Vergleich zu klassischen Verfahren verkürzt. Außerdem sind die während des Durchlaufs von Resonanzen auftretenden Schwingungsamplituden gegenüber quasi-stationären Meßläufen deutlich verringert. Die Besonderheit bei dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren ist, daß sich die Systemmatrizen der Bewegungsgleichungen mit der Drehzahl ändern dürfen. Somit können Systemänderungen während des instationären Meßlaufs berücksichtigt werden, beispielsweise durch Kreiselwirkung oder Gleitlagerung. Das vorgestellte Auswuchtverfahren wird anschließend an einigen Rotorsystemen – darunter einem Rotor in aktiven Magnetlagern und einem in Schwimmbuchsen gelagerten Abgasturbolader – erprobt.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Bibliothek

(German National Library)

The Deutsche Bibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliographie (German National Bibliography); detailed bibliographic data is available via Internet at <http://dnb.ddb.de>.

D 17

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2017

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe (Fotokopie, Mikrokopie), der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, im Internet und das der Übersetzung, vorbehalten.

Als Manuskript gedruckt. Printed in Germany.

ISSN 0178-9554

ISBN 978-3-18-335211-1

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Prof. Dr.-Ing. Richard MARKERT am Fachgebiet Strukturodynamik im Fachbereich Maschinenbau der Technischen Universität Darmstadt, welches nun als Institut für Angewandte Dynamik unter der Leitung Prof. Dr.-Ing. Bernhard SCHWEIZER steht.

Ich danke allen, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Insbesondere danke ich meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Richard MARKERT, der die Anregung zu dieser spannenden Arbeit gab und dessen Tür mir stets offen stand. Besonders geschätzt habe ich die zahlreichen fruchtbaren Gespräche und das mir entgegengebrachte Vertrauen. Durch seinen Einsatz hatte ich die Möglichkeit, mein Thema auf nationalen und internationalen Fachtagungen vorzustellen und zwei Forschungsaufenthalte in Brasilien zu verbringen. Des weiteren bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Uwe KLINGAUF für die Übernahme des Korreferats und den freundlichen Kontakt.

Ein weiterer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Bernhard SCHWEIZER, welcher mir die Freiheit gegeben hat, die Promotion zu einem erfolgreichen Ende zu führen.

Zudem danke ich den Studenten, die Interesse an meinem Forschungsthema gezeigt haben und durch unermüdlichen Einsatz bei ihren Bachelor-, Seminar-, und Masterarbeiten auch mir stets den nötigen Vortrieb gegeben haben. Chronologisch genannt seien hier Martin POSTEL, Matthias LAUZI, Kristin WENDEL, Ruben MICHAELIS, Martin SEILER, Lisa GENTNER und in besonderem Maße Arved ESSER.

Besonders möchte ich meinen Bürokollegen Jens BAUER, Nicklas NORRICK, Bastian PFAU, Gerrit NOWALD und Wolfgang KÖHL für die vielen produktiven Fachgespräche sowie die bei einem solchen Unterfangen notwendige Zerstreuung danken.

An Jochen OTT und Wolfgang HESS geht ein spezieller Dank, da ohne sie die Versuchse im Labor nicht in dieser Form existieren und funktionieren würden.

Bei den Sekretärinnen des Fachgebiets, Maria RAUCK und Helga LORENZ, bedanke ich mich für die stets freundliche und konstruktive Arbeitsatmosphäre.

Ohne die Unterstützung meiner Familie und meiner Freundin Sira wäre es mir schließlich nicht gelungen, immer wieder mit der nötigen Hartnäckigkeit an diese Arbeit heranzugehen. Mein langjähriger Freund Lorenz übernahm die kritische Durchsicht des Manuskriptes. Ihnen gilt mein herzlichster Dank.

Darmstadt, im Januar 2017

BENJAMIN SIEGL

Meinen Eltern gewidmet.

—

„In general, complexity and precision bear an inverse relation to one another in the sense that, as the complexity of a problem increases, the possibility of analyzing it in precise terms diminishes.“

— Lotfi A. Zadeh —

Inhaltsverzeichnis

Liste der Formelsymbole	VII
Kurzfassung	XIII
Abstract	XIV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Forschung	2
1.2.1 Stationäre Auswuchtverfahren	3
1.2.2 Unwuchtidentifikation aus stationären Messungen	5
1.2.3 Instationäre Auswuchtverfahren	6
1.3 Inhalt und Gliederung der Arbeit	8
2 Systemtheoretische Grundlagen	10
2.1 Modellierung von Rotoren mit drehzahlabhängigen Systemmatrizen	11
2.1.1 Zeitkontinuierliches Modell im Verschiebungsraum	11
2.1.2 Zeitkontinuierliches Modell im modalen Zustandsraum	12
2.1.3 Zeitdiskretisierung	15
2.2 Instationärer Hoch- oder Auslauf	16
2.2.1 Gleichmäßig beschleunigter Hoch- oder Auslauf	19
2.2.2 Beliebiger instationärer Drehzahlverlauf	20
3 Verfahren zur Unwuchtidentifikation aus instationären Meßläufen	23
3.1 Unwuchtidentifikation im Zeitbereich	23
3.1.1 Modellierung und Annahmen	23
3.1.2 LTV-Algorithmus im Zeitbereich	25
3.1.3 LTI-Voridentifikation	26
3.2 Gewichtung bestimmter Drehzahlbereiche	27
3.3 Konvergenz und Fehlereinflüsse	28
3.3.1 Statistische Voraussetzungen	29
3.3.2 Einfluß fehlerbehafteter Modaldaten	30

4	Praktische Erprobung des Auswuchtverfahrens	32
4.1	LAVAL-Rotor mit Gyroskopie	33
4.1.1	Systembeschreibung und Modellierung	33
4.1.2	Messkette	38
4.1.3	Aufbereitung der Meßdaten	40
4.1.4	Identifikationsergebnisse	41
4.1.4.1	Numerischer Rotor Konfiguration <i>kurz</i>	41
4.1.4.2	Experimenteller Einscheibenrotor Konfiguration <i>kurz</i>	44
4.1.4.3	Experimenteller Einscheibenrotor Konfiguration <i>lang</i>	47
4.2	Starrer Rotor in horizontal nachgiebigen Lagern	51
4.2.1	Systembeschreibung und Modellierung	51
4.2.2	Messkette	52
4.2.3	Aufbereitung der Meßdaten	53
4.2.4	Identifikationsergebnis	54
4.3	Zweischeibenrotor (LTI)	58
4.3.1	Systembeschreibung und Modellierung	58
4.3.2	Messkette	59
4.3.3	Aufbereitung der Meßdaten	60
4.3.4	Identifikationsergebnis	60
4.4	Rotor in zeitveränderlichen aktiven Magnetlagern (LTV)	65
4.4.1	Systembeschreibung und Modellierung	65
4.4.2	Messkette	69
4.4.3	Aufbereitung der Meßdaten	71
4.4.4	Identifikationsergebnis	71
4.5	Abgasturbolader	76
4.5.1	Systembeschreibung und Modellierung	76
4.5.2	Messkette	77
4.5.3	Aufbereitung der Meßdaten	79
4.5.4	Identifikationsergebnis	82
5	Zusammenfassung und Ausblick	86
5.1	Zusammenfassung	86
5.2	Ausblick	88
	Anhang	90
A	Analyse von zeitvarianten Systemen im Frequenzbereich	90
	Literaturverzeichnis	94

Liste der Formelsymbole

Lateinische Buchstaben (Indizes in separater Auflistung)

Symbol ¹	Einheit ²	Bedeutung
a	–	generalisierte modale Masse
A	min^2	Fläche
$A_{\mathbb{R}}$	*	(eine) Systemmatrix im Zustandsraum
c	–	Laufzahl für Zeitstützstellen
C	–	Gesamtanzahl der Zeitstützstellen
b	$\text{Ns/m}, \text{Ns m}$	Dämpfungskoeffizient
B	*	Dämpfungsmatrix
$B_{\mathbb{R}}$	*	Eingangsmatrix im Zustandsraum
D	–	modales Dämpfungsmaß
f	Hz	Frequenz
F	N	Kraft
f	N	Erregervektor
G	*	gyroskopische Matrix
H	–	Übertragungsfunktion
i	–	imaginäre Einheit
I	A	elektrischer Strom
k	$\text{N/m}, \text{N}, \text{N m}$	Steifigkeitskoeffizient
$k_{\mathbb{R}}$	*	Koeffizient, z. B. von Reglern, AMBs, etc.
K	*	Steifigkeitsmatrix
l	m	Länge
m	kg	Masse
M	*	Massenmatrix
n	min^{-1}	Drehzahl
n_{AMB}	–	Wicklungsanzahl pro Pol im AMB
N	*	zirkulatorische Matrix
p	–	Laufzahl für Moden
P	–	Gesamtanzahl der Moden
q	–	Laufzahl für konjugiert-komplexe Moden

¹ \mathbb{R} : Variablen- oder Indexplatzhalter

² *: Einheit unterschiedlich

q	m	physikalischer Koordinatenvektor
Q	–	Gesamtanzahl konjugiert-komplexer Moden q
$Q(t)$	m	Instationäre komplexe Amplitudenfunktion
r	–	Beliebige Laufzahl
$r(t)$	m	Komplexe Rotorauslenkungen
\mathbf{R}	mm	Residuum
R	–	Gesamtanzahl für Laufzahl r
s	m, mm	Beliebiger Abstand
S	*	Leistungsdichte
\mathbf{u}	*	Erregervektor im Zustandsraum
t	s	Zeit
T	s	Meßdauer
u	V	elektrische Spannung
U	kg m	Unwucht
\mathbf{U}	kg m	Matrix der Unwuchten
v	m	horizontale Rotorverschiebung
w	m	vertikale Rotorverschiebung
x	*	allgemein: Signal
x	–	Rotorlängsachse (festes KS)
\mathbf{x}	m, m/s	Zustandsvektor im physikalischen Raum
X	*	allgemein: zum Signal x gehörendes Spektrum
\mathbf{X}	*	Modalmatrix
y	–	horizontale Rotorachse (festes KS)
z	–	vertikale Rotorachse (festes KS)

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
α	1/s ²	Anfahrbeschleunigung
β	–	Aufkeilwinkel der Scheibe
γ	–	Phasenwinkel der Aufkeilung
δ	–	Phasenwinkel der Exzentrizität
ε	m	Exzentrizität
λ	1/s	Eigenwert
μ	H/m	magnetische Permeabilität
φ	–	Drehwinkel des Rotors
φ_{r}	–	allgemein: Drehwinkel
ψ	–	Phasenwinkel der Übertragungsfunktion

θ		Spaltenmatrix der Optimierungsgrößen
Θ	kg m^2	Massenträgheitsmoment
ξ	*	modaler Zustandsvektor
\mathbf{v}	–	Referenzsignal (Erregervektor)
ω	$1/\text{s}$	Eigenkreisfrequenz
Ω	$1/\text{s}$	Drehzahl
$\bar{\Omega}$	$1/\text{s}$	Kreisfrequenz der FOURIER-Transformation

Indizes

Symbol	Bedeutung
a	axial
AMB	aktives Magnetlager (<i>Active Magnetic Bearing</i>)
b	bezugs-
B	Lager (<i>Bearing</i>)
d	den Auslauf betreffend (<i>down</i>)
D	differentiell-
e	eck-
end	end-
I	integral-
ini	anfangs- (<i>initial</i>)
ident	identifiziert
L	Luft
mag	magnetisch
max	maximal
p	polar
p	p -te (Mode)
P	proportional-
q	q -te (konjugiert-komplexe Mode)
r	r -te
r	im Residuenvektor gewählte Koordinaten
R	Regel-
s	Abtast- (<i>sampling</i>)
S	Schwerpunkt
soll	einen Sollwert betreffend
u	den Hochlauf betreffend (<i>up</i>)
v	den modalen Erregervektor betreffend
V	Vormagnetisierung

W	Wellendurchstoßpunkt
φ	Rotation betreffend
x	das Signal x betreffend
ξ	den modalen Zustandsvektor betreffend
y	die y -Achse betreffend
z	die z -Achse betreffend
0	Anfangs-/Ruhe-

Sonstige mathematische Symbole

Symbol	Bedeutung
diag	Diagonalmatrix
$\frac{\partial}{\partial \xi}$	Partielle Ableitung
$\frac{d}{dt}$	Totale Ableitung
$\Delta \xi$	Differenz
$\dot{\xi}$	Zeitableitung ($\frac{d\xi}{dt}$)
$\hat{\xi}$	Eigenvektor (wenn Platzhalter fett)
$\tilde{\xi}$	Amplitude (wenn Platzhalter nicht fett)
$\xi(t)$	Messung
$\xi(\bar{\Omega})$	Auf Meßdauer bezogene FOURIER-Transformierte
$\bar{\xi}$	Mittelung bzw. die FOURIER-Transformierte betreffend
ξ^R	Rechtseigen-
ξ^L	Linkseigen-
ξ^T	Transponiert
ξ^*	Konjugiert-komplex
$\mathcal{F}\{\xi\}$	* Operator „FOURIER-Transformierte von“
$\Im\{\xi\}$	Operator „Imaginärteil von“
$\Re\{\xi\}$	Operator „Realteil von“
RMS $\{\xi\}$	Operator „quadratisches Mittel“

Abkürzungen

Symbol	Bedeutung
AA	anti-Aliasing
AMB	aktives Magnetlager (<i>Active Magnetic Bearing</i>)
ATL	Abgasturbolader
BGL	Bewegungsgleichung

DGL	Differentialgleichung
EK	Einflusskoeffizienten
EMA	experimentelle Modalanalyse
engl.	englisch
ICSI	IHI Charging Systems International GmbH
KS	Koordinatensystem
LTI	linear-zeitinvariant (<i>Linear-Time-Variant</i>)
LTV	linear-zeitvariant (<i>Linear-Time-Invariant</i>)
PID	proportional-integral-differentieller Regler
RMS	quadratisches Mittel (<i>Root Mean Square</i>)

Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein Unwuchtidentifikationsverfahren im Zeitbereich beschrieben, das mit nur einem schnellen Hoch- oder Auslauf ohne Testunwuchtsatz auskommt. Dadurch wird die Meßprozedur im Vergleich zu klassischen Verfahren verkürzt. Außerdem sind die während des Durchlaufs von Resonanzen auftretenden Schwingungsamplituden gegenüber quasi-stationären Meßläufen deutlich verringert. Die Besonderheit verglichen mit vorherigen Arbeiten ist bei dem in dieser Arbeit entwickelten Verfahren, daß sich die Systemmatrizen der Bewegungsgleichungen mit der Drehzahl ändern dürfen. Somit können Systemänderungen während des instationären Meßlaufs berücksichtigt werden, beispielsweise durch Kreiselwirkung oder Gleitlagerung.

Der Unwuchtidentifikationsalgorithmus erfolgt durch eine modellgestützte Parameteridentifikation im Zeitbereich. Dazu werden während eines Hoch- oder eines Auslaufs Schwingungssignale gemessen. Anschließend wird die Quadratsumme des Fehlers zwischen diesen Signalen und denen aus einer numerischen Simulation eines modal reduzierten Rotors bei demselben Drehzahlverlauf minimiert. Der Suchlauf wird abgebrochen, wenn eine zufriedenstellende Genauigkeit erreicht ist und damit die Unwuchten bekannt sind. Um die Wahrscheinlichkeit des Hängenbleibens in lokalen Minima zu senken, wird ein kaskadierendes Verfahren zur Startwertsuche vorgestellt, das mit sehr wenigen anzupassenden Parametern auskommt.

Das vorgestellte Auswuchtverfahren wird anschließend an einigen Rotorsystemen erprobt. Dabei werden die Sonderfälle von drehzahlunabhängigen Rotorsystemen ebenso untersucht wie der Sonderfall eines Rotors, dessen Eigenfrequenzen sich linear mit der Drehzahl ändern. Außerdem wird das Verfahren an einem Rotor mit ausgeprägter Kreiselwirkung und an einem in Schwimmbuchsen gelagerten Abgasturbolader getestet.

Abstract

In this thesis, a method for unbalance identification in time-domain is presented. It is capable to identify the unbalance from one fast run-up or run-down process without using test weights. This shortens the balancing procedure compared to conventional methods. It also reduces the amplitudes while passing through the resonance compared to slow run-ups or run downs. The novelty compared to previous works is that the system matrices may be speed-dependent. This gives rise to the identification of rotor systems which change during the measurement procedure, for example due to gyroscopic effects or journal bearings.

Based on a speed-dependent modal model, a numerical simulation in modal space gives a solution in time-domain. The identification algorithm works by model-based parameter identification in time-domain. It minimizes the squared error sum of the numerical time signals transformed into physical coordinates and the measured time signals. To avoid solutions stuck in a local optimum a cascading procedure to find initial values is presented. This procedure only needs very few fitting parameters.

Subsequently, the presented balancing method is validated using several rotor systems. In particular this includes speed-independent rotors and a rotor with natural frequencies linear dependent of the rotor speed. Plus, the method is tested at a rotor with distinctive gyroscopics and an automotive turbocharger in full-floating ring bearings.