

Hans Dresig
Schwingungen mechanischer Antriebssysteme

Hans Dresig

Schwingungen mechanischer Antriebssysteme

Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese

Mit 150 Abbildungen



Springer

UNIV.-PROF. DR.-ING. HABIL. HANS DRESIG
Institut für Mechanik
Professur Maschinendynamik/Schwingungslehre
Technische Universität Chemnitz
Straße der Nationen 62
09107 Chemnitz
e-mail: hans.dresig@mb1.tu-chemnitz.de

ISBN 978-3-662-09834-9 ISBN 978-3-662-09833-2 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-09833-2

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Dresig, Hans: Schwingungen mechanischer Antriebssysteme: Modellbildung, Berechnung, Analyse, Synthese / Hans Dresig. - Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hongkong; London; Mailand; Paris; Singapur; Tokio: Springer, 2001

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

<http://www.springer.de>

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001
Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York 2001
Softcover reprint of the hardcover 1st edition 2001

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Satz: Reproduktionsfertige Vorlage von Satzherstellung Dr. Naake, Chemnitz
Einband: de'blik, Berlin

Vorwort

Antriebssysteme haben die Aufgabe, Körper in Bewegung zu setzen und dabei zuverlässig und sicher zu funktionieren. Erfahrungsgemäß gibt es aber verschiedenartige dynamische Störerscheinungen in den Baugruppen zwischen Motor und Abtrieb, insbesondere bei Anlauf- und Bremsvorgängen oder bei bestimmten kritischen Drehzahlen. Beim Entwurf und der Konstruktion der mechanischen Antriebssysteme von Maschinen und Transporteinrichtungen, insbesondere des Verarbeitungsmaschinen- und Werkzeugmaschinenbaues, werden hohe Ansprüche an den Konstrukteur gestellt, der Aufgaben der Maschinendynamik lösen muß. Das beginnt mit der zweckmäßigen Konzeption eines Antriebssystems und geht bis zur Auslegung und Dimensionierung einzelner Bauelemente. Solche Aufgaben sind nur lösbar, wenn Klarheit über die Gesetzmäßigkeiten herrscht, die das dynamische Verhalten der Antriebssysteme bestimmen.

Die Entwicklung der rechnergestützten Simulation, die eine Analyse festkörpermechanischer Erscheinungen in Wechselwirkung mit anderen Einflüssen erlaubt und deren Integration in die CAD-Umgebung, ist gegenwärtig der Inhalt vieler Forschungsprojekte. Im vergangenen Jahrzehnt gab es enorme Fortschritte bei der Entwicklung der numerischen und der experimentellen Methoden. Das dynamische Verhalten der Maschinenelemente und einiger Baugruppen dynamisch hoch beanspruchter Antriebssysteme ist von vielen Forschern intensiv analysiert worden, worüber in zahlreichen Artikeln berichtet wird. Es ist ein Anliegen des Autors, einen Einblick in den aktuellen Stand zu geben. Es werden die neuesten Publikationen berücksichtigt, aber da es unmöglich ist, bei einer zusammenfassenden Darstellung auf allen Teilgebieten in die Tiefe zu gehen, wird nur exemplarisch gezeigt, wie weit die Modellbildung und Modellberechnung bei manchen Baugruppen bereits getrieben wurde.

Das Buch wendet sich an Fachleute, die beim Entwurf der verschiedenartigsten Erzeugnisse dynamische Effekte berücksichtigen müssen. Es behandelt festkörpermechanische Antriebssysteme, also keine elektrischen, magnetischen, hydraulischen oder pneumatischen Antriebe. Die Wechselwirkung mit den elektrischen Antrieben wird stellenweise berücksichtigt, aber der wesentliche Inhalt bezieht sich auf das mechanische Verhalten von Antrieben des klassischen Maschinenbaues. Es wird die Verbindung zwischen den fundamentalen Methoden der Mechanik und den modernen Berechnungsmethoden gezeigt, um zur Integration solcher an den Technischen Universitäten und Fachhochschulen vertretenen Grundlagengebiete wie Angewandte Mechanik, Konstruktionstechnik, Maschinenelemente, Getriebe- und Antriebstechnik, Maschinendynamik, Schwingungstechnik, Simulationstechnik und Mechatronik einerseits und den Anwendungsgebieten, wie z. B. allgemeiner Maschinenbau, Fördertechnik, Verarbeitungsmaschinen und Werkzeugmaschinen andererseits beizutragen.

Das Buch soll dem Leser helfen, spezifische dynamische Erscheinungen in Antriebssystemen kennenzulernen, zu analysieren, zu bewerten, zu berechnen und konstruktiv zu beeinflussen. Es werden deshalb typische dynamische Effekte erklärt und behandelt, die bei der Entwicklung eines Erzeugnisses zu beachten sind, wenn z. B. durch die Drehzahlerhöhung ein höheres „dynamisches Problemniveau“ erreicht wird. Manche der Erkenntnisse werden in Form allgemeiner Regeln zusammengefaßt.

Allen Mitarbeitern meines Lehrstuhls, insbesondere den Herren Dipl.-Ing. Gao Xingliang 高星亮, Dr.-Ing. Ludwig Rockhausen, Dr.-Ing. Paul Rodionow, Dr.-Ing. Holger Weiß und Dipl.-Ing. Jörg Weiß sowie dem Studenten Arnd Golle, die mit ihren Diskussionen und bei der Berechnung von Beispielen behilflich waren, möchte ich für die Mitarbeit danken, insbesondere auch Frau Gisela Richter, die alle meine Wünsche bei der Zeichnung von Bildern und Tabellen erfüllte und Frau Eugenia Tereschenko, die mich bei der Literaturbeschaffung sehr unterstützte.

Dank für Anregungen und Diskussionen richte ich auch an die mir kollegial verbundenen Herren Dr.-Ing. A. Laschet (ARLA Maschinentechnik/Kürten), Dipl.-Ing. U. Schreiber (ITI Dresden), Dipl.-Ing. E. Schröder (Mannesmann Dematic/Wetter), Dr.-Ing. C. Spensberger (Kupplungswerk Dresden) und Dr.-Ing. H. Wiese (MAN Roland Druckmaschinen/Offenbach), die mir Parameterwerte, praktische Beispiele und Bildmaterial zur Verfügung stellten. Ich danke auch den Herren Prof. Dr. sc. nat. I. I. Blekhan (Russische Akademie der Wissenschaften/Sankt Petersburg), Dr.-Ing. A. Fidline (Fa. LuK Antriebssysteme/Bühl), Dr. sc. techn. P. Hupfer (Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik Chemnitz), Prof. Dr. rer. nat. E. Krämer (Technische Universität Darmstadt), Prof. Dr. sc. techn. H. Loose (Fachhochschule Brandenburg), Prof. Dr.-Ing. H. H. Müller-Slany (Universität Duisburg) und Dipl.-Ing. Friedmar Dresig (Robert Bosch GmbH Stuttgart), die Teile des Manuskriptentwurfs gelesen und mich mit ihren kritischen Fragen und Anmerkungen zu klareren Formulierungen und Ergänzungen veranlaßt haben.

Besonders danke ich Herrn Dr.-Ing. Steffen Naake, der mit viel Geduld, Sachkenntnis und Verständnis aus meiner sich im Laufe von zwei Jahren entwickelnden Manuskriptvorlage das Buchmanuskript in die vorliegende Form gebracht hat.

Herrn Dr. Merkle vom Springer-Verlag danke ich für die verständnisvolle Zusammenarbeit.

Dankbar bin ich auch Barbara, meiner lieben Frau, ohne deren ermunternden Beistand dieses Buch nicht entstanden wäre.

Auerswalde, Dezember 2000

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Hans Dresig

TU Chemnitz Institut für Mechanik
Professur Maschinendynamik/Schwingungslehre
e-mail: hans.dresig@mb1.tu-chemnitz.de
<http://www.mb1.tu-chemnitz.de>

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Modellbildung mechanischer Antriebssysteme	5
2.1	Einführung in die Modellbildung	5
2.1.1	Ziele der Modellbildung	5
2.1.2	Typen der Berechnungsmodelle	11
2.1.2.1	Allgemeines	11
2.1.2.2	Einteilung der Berechnungsmodelle	15
2.1.2.3	Beispiel: Antrieb eines Mechanismus	22
2.2	Bewertung von Modellgleichungen	24
2.2.1	Regeln zur Verifikation von Modellgleichungen	24
2.2.2	Normierung der Parameter und der Variablen	27
2.2.3	Berechnungsmodelle von Schubkurbelgetrieben	29
2.2.3.1	Modellgleichungen	29
2.2.3.2	Elastisches Abtriebsglied mit Spiel	31
2.2.3.3	Spiel im Kurbelgelenk	39
2.2.3.4	Zur Kolbensekundärbewegung	41
2.2.4	Beispiele für mehrere Modellstufen	43
2.2.4.1	Modellgleichungen von Rotoren mit Unwucht	43
2.2.4.2	Schadensfall an einer Pumpenwelle	46
2.2.4.3	Versuchsstand mit Unwuchterreger	50
2.3	Induktive Modellbildung	53
2.3.1	Allgemeines	53
2.3.2	Parametererregte Schwingungen einer Buchschneidemaschine	56
2.3.3	Selbsterregte Schwingungen eines Wicklers	59
2.3.4	Instationäre Bewegungen bei Kranen	65
2.3.4.1	Anheben der Last vom Boden	65
2.3.4.2	Heben und Senken (Modell mit $n = 2$)	69
2.3.4.3	Heben und Senken (Modell mit $n = 4$)	77
2.3.4.4	Antriebsmoment bei Wippkranen	81
2.3.5	Diskrete Schwinger statt Kontinua (Balken- und Stabmodelle)	84
2.4	Deduktive Modellbildung	92
2.4.1	Allgemeines	92
2.4.2	Grundfrequenz von Schleifspindeln	94
2.4.3	Von 23 zu 5 Parametern (Fahrbewegung eines Brückenkrans)	99
2.4.4	Von räumlichen zu eindimensionalen Balken- und Stabmodellen	103
2.4.4.1	Allgemeine Zusammenhänge	103
2.4.4.2	Biegeschwingungen	111

2.4.4.3	Längs- und Torsionsschwingungen	112
2.4.4.4	Modellierung einer Getriebewelle	114
2.4.5	Modellreduktion mit der Mittelungsmethode	117
2.4.5.1	Einführung	117
2.4.5.2	Einfluß der Schwingungen auf die Reibungszahl	118
2.5	Ermittlung von Parametern des Gesamtsystems	124
2.5.1	Sensitivitätsanalyse	124
2.5.1.1	Allgemeine Zusammenhänge	124
2.5.1.2	Beispiel: Torsionsschwingerkette	127
2.5.2	Parameterermittlung aus gemessenen Eigenfrequenzen und Eigenformen	131
2.5.3	Identifikation eines Systems mit zwei Freiheitsgraden	135
2.6	Freiheitsgradreduktion und Modellanpassung	137
2.6.1	Grundlagen der Freiheitsgradreduktion	137
2.6.2	Statische und dynamische Kondensation GUYAN, RÖHRLE	140
2.6.3	Reduktion nach RIVIN und DI	141
2.6.4	Modale Reduktion und Eigenformapproximation	144
2.6.5	Vergleich der Reduktionsmethoden an einem Beispiel	145
2.6.6	Modale Synthese	149
2.6.7	Kopplung von zwei Schwingerketten	152
3	Parameterwerte von Maschinenelementen und Baugruppen	159
3.1	Erreger- und Übertragungselemente von Torsionsschwingern	159
3.2	Parameterwerte einzelner Elemente	164
3.2.1	Zylinder- und Kegelelemente	164
3.2.2	Zusatzlängen und Nachgiebigkeitsfaktoren	167
3.2.3	Drehsteifigkeiten von Kurbelwellen	170
3.2.4	Dämpfungswerte von Torsionsschwingern	172
3.3	Wälzlager und Fugen	175
3.3.1	Allgemeine Zusammenhänge	175
3.3.2	Kugel- und Rollenlager	176
3.3.3	Fugen, Kontaktstellen, Gleit- und Wälzführungen	180
3.4	Getriebe, Kupplungen, Motoren	181
3.4.1	Zahnradgetriebe	181
3.4.2	Berechnungsmodelle für nachgiebige Kupplungen	185
3.4.2.1	Allgemeine Zusammenhänge	185
3.4.2.2	Berechnungsmodell für Elastomerkupplungen	187
3.4.2.3	Nichtlineare Effekte bei biharmonischer Erregung	190
3.4.3	Asynchronmotor	194
3.5	Dämpfungskennwerte	197
4	Beispiele zur dynamischen Analyse von Antriebssystemen	205
4.1	Anlaufvorgang eines Antriebs mit Asynchronmotor	205
4.2	Fahrzeug-Antriebsstrang	207
4.3	Kupplungen im Antriebsstrang	214
4.3.1	Allgemeine Problemstellung	214
4.3.2	Lüfterantrieb	215
4.3.3	Druckmaschine	219

4.4	Ungleichmäßig übersetzende Mechanismen	222
4.4.1	Schwingungsursachen	222
4.4.2	Schwingungen am Abtriebsglied	227
4.4.3	Schwingungen infolge elastischer Antriebsglieder	232
4.5	Selbsthemmende Getriebe	236
4.5.1	Schwingungsursachen	236
4.5.2	Keilschubgetriebe	237
4.5.3	Schneckengetriebe	240
4.6	Schwingungen von Zugmittelgetrieben	248
4.6.1	Schwingungsursachen	248
4.6.2	Eigenfrequenzen des Zweischeiben-Riemengetriebes	250
4.6.3	Erzwungene und parametererregte Schwingungen	254
4.6.4	Kettengetriebe	256
4.6.5	Zahnriemengetriebe	263
4.7	Schwenkbewegung eines Auslegerarms	265
4.8	Fahrbewegung eines Regalbediengerätes	272
4.8.1	Modellbildung	272
4.8.2	Herleitung der Bewegungsgleichungen	274
4.8.3	Lösung der Bewegungsgleichungen	277
4.8.4	Zahlenbeispiel	279
4.9	Irreguläre Belastungen	282
4.9.1	Querstoß an Führungsbahn	282
4.9.2	Nachlauf nach den Abschalten (Überlastsicherung)	285
5	Zur Synthese von Antriebssystemen	289
5.1	Regeln zur dynamischen Synthese	289
5.1.1	Zur Struktursynthese	289
5.1.2	Modellstufe „Starrkörpersystem“	294
5.1.2.1	Bewegung eines einzelnen Starrkörpers	294
5.1.2.2	Bewegung von Starrkörpersystemen	296
5.1.3	Modellstufe „Lineares Schwingungssystem“	299
5.1.4	Modellstufe „Nichtlineares Schwingungssystem“	301
5.2	Modale Anregbarkeit	302
5.2.1	Allgemeine Zusammenhänge	302
5.2.2	Beispiel: Torsionsschwingerkette	304
5.3	Optimale Auslegung von Baugruppen	307
5.3.1	Konturen von Unwuchtmassen	307
5.3.2	Kompensatoren für ungleichmäßig übersetzende Getriebe	309
5.3.3	Übersetzungsverhältnisse bei minimalem Trägheitsmoment	311
5.3.4	Stabprofile für extreme Eigenfrequenzen	313
5.4	Optimale Bewegungsabläufe	316
5.4.1	Instationäre Starrkörperbewegung	316
5.4.2	Eigenbewegung von Mechanismen	320
5.4.3	Anlaufen und Bremsen eines linearen Schwingers	323
5.4.3.1	Vergleich von Anlaufunktionen	323
5.4.3.2	Optimaler Antriebskraftverlauf	328

5.4.4	Kompensation von Restschwingungen	331
5.4.5	Resonanzdurchlauf	338
5.5	Zum Entwurf schwingungsarmer Mechanismen	344
5.5.1	Gestellschwingungen und Massenausgleich	344
5.5.2	Torsionsschwingungen und Leistungsausgleich	347
5.5.3	HS-Profile bei Kurvengetrieben	350
5.5.3.1	Theoretische Grundlagen	350
5.5.3.2	Rastgetriebe	354
5.5.3.3	Schrittgetriebe	356
5.5.4	Beeinflussung des Erregerspektrums mehrgliedriger Koppelgetriebe	363
5.6	Optimale Stützenabstände angetriebener Balken	365
5.6.1	Aufgabenstellung	365
5.6.2	Gekoppelte Biege- und Torsionsschwinger	366
5.6.3	Balken auf mehreren Stützen	369
5.7	Antriebe von Vibrationsmaschinen	376
5.7.1	Aufgabenstellung	376
5.7.2	Schubkurbelgetriebe als Schwingungserreger	377
5.7.3	Unwuchterreger und Selbstsynchronisation	382
5.7.3.1	Zur historischen Entwicklung dieser Antriebsart	382
5.7.3.2	Bedingungen für stabile Betriebszustände von Unwuchtroten	384
5.7.3.3	Beispiele für Vibrationsantriebe mit Selbstsynchronisation	388
	Häufig benutzte Formelzeichen	395
	Literaturverzeichnis	399
	Sachverzeichnis	415