Fortschritt-Berichte VDI

VDI

Reihe 8

Mess-,
Steuerungs- und
Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Matthias Joost,
Süderwalsede

Nr. 1263

Regelung elastisch gekoppelter Mehrmassensysteme

Berichte des Instituts für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente der Universität Bremen

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Regelung elastisch gekoppelter Mehrmassensysteme

Vom Fachbereich für Physik und Elektrotechnik
der Universität Bremen

zur Erlangung des akademischen Grades eines
DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)
genehmigte Dissertation

von

Dipl.-Ing. Matthias Joost
aus Süderwalsede

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Jan Wenske
Eingereicht am:	07. 11. 2017
Tag des Promotionskolloquiums:	24. 04. 2018

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Fortschritt-Berichte VDI

Reihe 8

Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik

Dipl.-Ing. Matthias Joost, Süderwalsede

Nr. 1263

Regelung elastisch gekoppelter Mehrmassensysteme

Berichte des Instituts für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente der Universität Bremen

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Joost, Matthias
Regelung elastisch gekoppelter Mehrmassensysteme
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 08 Nr. 1263. Düsseldorf: VDI Verlag 2018.
184 Seiten, 96 Bilder, 14 Tabellen.
ISBN 978-3-18-526308-8 ISSN 0178-9546,
€ 67,00/VDI-Mitgliederpreis € 50,30.

Für die Dokumentation: Mehrmassensystem – Modellvereinfachung – Robuste Regelung – Reibung – Belastungsreduktion

Elastisch gekoppelte Mehrmassensysteme bilden einen häufig vorkommenden Anwendungsfall. Ungenau bekannte Parameter und Einflüsse erschweren die Regelung. Daher sind robuste Regler erforderlich. Diese Regler sollten jedoch möglichst einfach gehalten werden, um den Entwurf zu vereinfachen und den Rechenaufwand zu minimieren. Stark wechselnde Torsionsbelastungen können zudem die Lebensdauer dieser Systeme wesentlich beeinträchtigen. In dieser Arbeit werden daher zum einen auf Basis reduzierter Ersatzsysteme entworfene H -optimale Zustandsregler und Verfahren untersucht. Zum anderen wird ein belastungsreduzierender Drehmomentenregler mit adaptiver Begrenzung vorgestellt, der es erlaubt, die auftretenden Torsions- bzw. Stoßbelastungen wesentlich zu verringern.

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet unter www.dnb.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 www.dnb.de.

Dissertation Universität Bremen

© VDI Verlag GmbH · Düsseldorf 2018

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 0178-9546
ISBN 978-3-18-526308-8

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für elektrische Antriebe, Leistungselektronik und Bauelemente (IALB) der Universität Bremen.

An erster Stelle möchte ich hier meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Orlik, für die Möglichkeit zur Anfertigung dieser Dissertation, für das entgegengebrachte Vertrauen, seine beständige Unterstützung sowie die wertvollen Denkanstöße danken. Ohne ihn wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Meinem Korreferenten, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jan Wenske, danke für sein Interesse an dieser Arbeit, für die anregenden Diskussionen und interessanten Hinweise.

Frau Elke Krüger danke ich für ihre Unterstützung und die Durchsicht dieser Arbeit.

Ebenfalls möchte ich allen Kolleginnen und Kollegen, sowie Studierenden am Institut für die gute und konstruktive Zusammenarbeit, ihre Hilfsbereitschaft, sowie die vielen hilfreichen Diskussionen danken.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern, die es mir ermöglicht haben, diesen Weg zu gehen und dieses Ziel zu erreichen.

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:54.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... **III**

Formelzeichen und Abkürzungen ..... **VII**

Einleitung **1**

1 Problemstellung und Stand der Forschung **2**

2 Modellbildung für die robuste Regelung **6**

2.1 Reibung 6

2.2 Lose 10

2.3 Struktur des Mehrmassensystems 11

3 Robuste Regelung **13**

3.1 Grundsätzliche Forderungen an eine Regelung 13

3.2 Beschreibung der Modellunsicherheiten 15

3.3 Robustheitskriterien 16

3.4 Frequenzabhängige Formulierung der Forderungen an die Regelung 19

3.5 Mixed-Sensitivity Ansatz 21

3.6 H_∞-Reglerentwurf 23

3.7 Reglerberechnung 26

3.8 Eliminierung des internen Zustandsbeobachters 30

4 Modellbildung für den H_∞-Reglerentwurf **32**

4.1 Vollständiges, lineares Steckenmodell 32

4.2 Reduziertes Entwurfsmodell 36

4.3 Simulation zum Modellvergleich 43

5 Versuchsergebnisse mit der H_∞-Regelung am Prüfstand **51**

5.1 Beschreibung des Prüfstands 51

5.2 H_∞-Regler mit direkter Zustandsrückführung 53

5.3 H_∞-Regler mit zusätzlichem Beobachter 70

6 Simulationsergebnisse der Regelung an einem Fünfmassensystem **87**

6.1 H_∞-Regler mit direkter Zustandsrückführung 88

6.2 H_∞-Regler mit zusätzlichem Beobachter 95

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:55.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

7 Reibungskompensation für die robuste Regelung niedriger Ordnung von Mehrmassensystemen 102

7.1 Modellierung der Reibung 102

7.2 Prinzip der verwendeten Reibungskompensation 103

7.3 H_∞-Regler mit Reibungskompensation 104

7.4 H_∞-Regler mit weiter vereinfachter Reibungskompensation 106

7.5 H_∞-Regelung mit Beschleunigungsmessung für die Reibungskompensation 108

8 H_∞-optimale robuste PI-Kaskadenregelung 113

8.1 Genetische Algorithmen 115

8.2 Differentielle Evolution 120

8.3 Partikelschwarmoptimierung 123

9 Übersicht über die bisher erzielten Ergebnisse 126

10 Modellbildung für die belastungs- reduzierende Regelung 128

11 Reglerentwurf 131

11.1 Ruckregelung 131

11.2 Berücksichtigung der Stellgrößenbeschränkung 133

11.3 Simulationsergebnisse 137

11.4 Experimentelle Ergebnisse am Prüfstand 143

12 Regelung mit Beobachter 148

12.1 Simulationsergebnisse der Regelung mit Beobachter 150

12.2 Versuchsergebnisse am Prüfstand 154

13 Anwendung der Regelung bei Windenergieanlagen 159

13.1 Beschreibung des Prüfstands 159

13.2 Beobachter für das Torsionsmoment auf Basis eines Einmassensystems 160

13.3 Experimentelle Ergebnisse 163

14 Zusammenfassung und Ausblick 167

15 Literaturverzeichnis 170

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:55.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

Formelzeichen und Abkürzungen

$\underline{A}$	Systemmatrix
$\underline{B}$	Eingangsvektor bzw. -matrix
$\underline{C}$	Ausgangsvektor bzw. –matrix
$\underline{C}_m$	Ausgangsvektor bzw. –matrix der gemessenen Größen
C_i	Federkonstante der Feder i
C_{Ni}	normierte Federkonstante der Feder i
$\underline{D}$	Durchgriffsvektor bzw. –matrix
D_i	Dämpfungskonstante der Feder i
$\underline{E}$	Störeingangsvertor bzw. -matrix
F	Gewichtungsfaktor für das Verfahren der differentiellen Evolution bzw. Vorfilter einer Zustandsrückführung
$F(s)$	Führungsübertragungsfunktion
$G(s)$	Übertragungsfunktion des Entwurfsmodells
$G^0(s)$	Übertragungsfunktion des realen Systems
$\underline{\mathcal{H}}$	Hamiltonmatrix
$\underline{I}$	Einheitsmatrix
K	Rückführvektor bzw. -matrix
K_P	Verstärkungsfaktor des Proportionalanteils eines PI-Reglers
K_I	Verstärkungsfaktor des Integralanteils eines PI-Reglers
$\underline{L}$	Korrekturvektor bzw. –matrix eines Beobachters
N	Normalkraft
$\underline{P}(s)$	verallgemeinertes Mehrgrößensystem zum Reglerentwurf
$R(s)$	Übertragungsfunktion des Reglers
R_G	Gleitreibungskraft
$R_{H\,\max}$	maximale Haftreibungskraft
R_L	linear geschwindigkeitsabhängige Reibungskraft
$S(s)$	Störübertragungsfunktion
T_i	Zeitkonstante Nr. i
$W_i(s)$	frequenzabhängige Gewichtungsfunktion Nr. i
$\underline{X}_\infty$	Lösung der Matrix-Riccati-Gleichung (3.49)
$\underline{Y}_\infty$	Lösung der Matrix-Riccati-Gleichung (3.50)
a	kontanter Faktor für die Reibungskompensation
b	multiplikativer Faktor für die Reibungskompensation
c_1, c_2	Parameter für das Verfahren der Partikelschwarmoptimierung
e	Regelabweichung
k_i	Komponenten des Rückführvektor bzw. -matrix
m	Drehmoment
$m(s)$	Messstörung

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:55.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

m_a	Antriebsdrehmoment
m_0	Nenndrehmoment
m_L	Lastdrehmoment
m_R	Reibungsdrehmoment
m_T	Torsionsdrehmoment
$\dot{m}_T$	Zeitliche Ableitung des Torsionsdrehmomentes
$\ddot{m}_T$	Zweite Zeitliche Ableitung des Torsionsdrehmomentes
m_w	Widerstandsdrehmoment
n_0	Nenndrehzahl
$\vec{p}_i$	Aktuell beste Position eines Partikels für das Verfahren der Partikelschwarmoptimierung
$\vec{p}_g$	Aktuell beste Position in der Nachbarschaft eines Partikels für das Verfahren der Partikelschwarmoptimierung
r_1, r_2	Zufallszahlen für das Verfahren der Partikelschwarmoptimierung
r_L	Proportionalitätsfaktor der linearen Reibung
u	Stellgröße
$\ddot{u}$	Übersetzungsverhältnis
u_c	Zusätzliche Stellgröße zur Reibungskompensation
$\vec{u}$	Vektor der Eingangsgrößen
$\vec{u}_i$	Rekombinierter Parametervektor („Individuum“) für das Verfahren der differentiellen Evolution
v	Geschwindigkeit
$\vec{v}_i$	modifizierter Parametervektor („mutiertes Individuum“) für das Verfahren der differentiellen Evolution bzw. Geschwindigkeit eines Partikels für das Verfahren der Partikelschwarmoptimierung
w	Führungsgröße bzw. Parameter für das Verfahren der Partikelschwarmoptimierung
$\vec{x}$	Zustandsvektor
$\vec{x}_i$	Parametervektor („Individuum“) für das Verfahren der differentiellen Evolution bzw. Position eines Partikels für das Verfahren der Partikelschwarmoptimierung
$\vec{x}^*$	Aktuell bester Parametervektor („bestes Individuum“) für das Verfahren der differentiellen Evolution
y	Ausgangsgröße
$\vec{y}$	Vektor der Ausgangsgrößen
$\vec{y}_m$	Vektor der gemessenen Größen
z	Störgröße

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:55.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

$\gamma_a(s)$	Schranke für die additive Modellunsicherheit
$\gamma_m(s)$	Schranke für die multiplikative Modellunsicherheit
$\Delta_a(s)$	additiven Modellunsicherheit
$\Delta_m(s)$	multiplikative Modellunsicherheit
$\Delta\varepsilon$	Positions- bzw. Winkeldifferenz
$\Delta\varepsilon_{max}$	maximale Positions- bzw. Winkeldifferenz
ε	Position bzw. Verdrehwinkel
ε_N	normierte Position bzw. Verdrehwinkel
ε_0	Nenn- bzw. Betzugsposition/ -verdrehwinkel
ε_{modell}	Position bzw. Verdrehwinkel des Modells ohne nichtlineare Reibung
ε_{sys}	Position bzw. Verdrehwinkel des realen Systems
Θ_i	Massenträgheit der Masse i
λ	Eigenwerte einer Matrix
μ_G	Gleitreibungskoeffizient
μ_H	Haftreibungskoeffizient
μ_L	linearer Reibungskoeffizient
$\bar{\sigma}(\underline{A})$	größter Singulärwert der Matrix $\underline{A}$
φ	Losewinkel
ω	Winkelgeschwindigkeit
ω_N	normierte Winkelgeschwindigkeit
ω_{res}	Resonanzfrequenz bzw. –winkelgeschwindigkeit
$\dot{\omega}$	Winkelbeschleunigung
$\hat{X}$	beobachteter bzw. geschätzter Wert einer allg. Größe X
X_{ers}	Größe X in einem Ersatzmodell

DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
MA/FR	Ersatzmodelltyp (durch Verschieben der mittleren Massen auf die Antriebsseite und Anpassung der Ersatzfederkonstante an die niedrigste Resonanzfrequenz des Originalsystems gebildet)
ML/FR	Ersatzmodelltyp (durch Verschieben der mittleren Massen auf die Lastseite und Anpassung der Ersatzfederkonstante an die niedrigste Resonanzfrequenz des Originalsystems gebildet)
MV/FR	Ersatzmodelltyp (durch Verteilender mittleren Massen und Anpassung der Ersatzfederkonstante an die niedrigste Resonanzfrequenz des Originalsystems gebildet)

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:55.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.

MA/FZ	Ersatzmodelltyp (durch Verschieben der mittleren Massen auf die Antriebsseite und Bestimmung der Ersatzfederkonstante durch Zusammenfassen der Federkonstanten des Originalsystems)
ML/FZ	Ersatzmodelltyp (durch Verschieben der mittleren Massen auf die Lastseite und Bestimmung der Ersatzfederkonstante durch Zusammenfassen der Federkonstanten des Originalsystems)
MV/FZ	Ersatzmodelltyp (durch Verteilender mittleren Massen und Bestimmung der Ersatzfederkonstante durch Zusammenfassen der Federkonstanten des Originalsystems)
PT_1	Verzögerungsglied erster Ordnung
PT_2	Verzögerungsglied zweiter Ordnung

https://doi.org/10.51202/9783186263087-I
Generiert durch IP '3.128.199.162', am 10.05.2024, 16:35:55.
Das Erstellen und Weitergeben von Kopien dieses PDFs ist nicht zulässig.