

Regelkreisüberwachung mechatronischer Antriebssysteme

Von der Fakultät für Maschinenbau der
Technischen Universität Chemnitz
genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von	Dipl.-Ing. Ruben Schönherr
geboren am	22. Juli 1980 in Annaberg-Buchholz
eingereicht am	22. Februar 2012

Gutachter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Reimund Neugebauer
o. Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Alexander Verl

Chemnitz, den 21. Juni 2012

Impressum

Regelkreisüberwachung mechatronischer Antriebssysteme

Autor:

Ruben Schönherr

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. E. h. Dr.-Ing. E. h. Dr. h. c. Reimund Neugebauer

Wichtiger Hinweis:

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Einer digitalen Veröffentlichung über MONARCH, das Archiv der Hochschulbibliothek der Technischen Universität Chemnitz, wird in diesem Zusammenhang ausdrücklich zugestimmt.

© 2012

Fraunhofer-Institut
für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Straße 88, 09126 Chemnitz
www.iwu.fraunhofer.de

Verlag Wissenschaftliche Scripten
www.verlag-wiss-scripten.de

ISBN: 978-3-942267-56-4

Bibliographische Beschreibung

Schönherr, Ruben

Thema: Regelkreisüberwachung mechatronischer Antriebssysteme

Dissertation an der Fakultät für Maschinenbau der Technischen Universität Chemnitz, Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Chemnitz, 2012

177	Seiten
49	Abbildungen
12	Tabellen
114	Literaturstellen

Referat

Eine hohe Prozesssicherheit und somit die bestimmungsgemäße Funktion aller an der Produktion beteiligten Maschinen- und Anlagenkomponenten ist eine wesentliche Grundvoraussetzung für die Wirtschaftlichkeit eines Unternehmens. Deshalb werden zunehmend kritische Komponenten mit geeigneten Sensoren überwacht, um Bauteilabnutzung und Fehler zeitnah zu detektieren. Die Überwachung der in den Antriebssystemen vorhandenen Regelkreise, insbesondere deren dynamisches Verhalten, spielt in Wissenschaft und Praxis bisher kaum eine Rolle. Jedoch führen nicht optimal arbeitende Antriebsregelkreise zu Einbußen bei der Antriebsdynamik und somit letztendlich zu geringerer Produktivität. Andererseits folgen beispielsweise aus einer durch den Regler hervorgerufenen Schwingungsneigung neben einem höheren Energiebedarf auch höhere Belastungen der mechanischen und elektrischen Komponenten. Das automatische Erkennen nicht adäquaten Reglerverhaltens kann somit wesentlich zur Steigerung der Maschineneffizienz und Prozesssicherheit beitragen.

Der in der vorliegenden Arbeit verfolgte Ansatz ist die Übertragung von Überwachungsmethoden aus der Prozessindustrie in den Maschinenbau. Für die Überwachung von Antriebsregelkreisen werden diese angepasst und neue Lösungsansätze entwickelt. Vorgestellt werden jeweils zwei Methoden zur Schwingungsdetektion sowie zur Bewertung des Drehzahlregelkreises. Die theoretischen Erkenntnisse werden unter Zuhilfenahme von verschiedenen Versuchsständen validiert. Die Implemen-

tierung erfolgt auf Standardsteuerungshardware, was die schnelle Überführung der Forschungsergebnisse in die industrielle Praxis ermöglicht. Dies stellt einen wesentlichen Schritt zur durchgängigen Überwachung der gesamten elektromechanischen Achse dar.

Schlagworte

Antriebstechnik, Überwachung, Regelung, Prony-Analyse, Forsman & Stattin, Hägglund, Dämpfungsverhalten, Schwingungsdetektion, Monitoring

Abstract

A high reliability of processes and thus the correct function of all machine and plant components is required for the profitable operation of a company. Therefore critical components are increasingly monitored using suitable sensors to detect errors and component wear quickly during the processes. However, the monitoring of feedback drive controls, especially of their dynamical behaviour, has been little investigated so far and is still not in the focus of present research. Drive control loops, which do not operate at their optimum can lead to a decrease in dynamics and to lower productivity on the one hand, oscillations caused by too aggressive controller tuning result in a higher energy consumption or higher wear of mechanical and electrical components on the other hand. Detecting inadequate control behavior automatically can therefore significantly increase the machine efficiency and process reliability.

In this dissertation, an approach for supervision of drive controls based on monitoring methods applied in the process industry is described. For this purpose, existing methods are adapted and new ones are developed. Two methods for oscillation detection and two methods for assessing the speed control loop are presented. The theoretical findings are validated with the help of various test rigs. The algorithms are implemented in standard control hardware, so that research results can quickly be put into industrial practice. Hence, this doctoral thesis makes an important contribution towards the continuous monitoring of the entire electro-mechanical axis of production systems.

Keywords

drive control, monitoring Prony-analysis, Forsman & Stattin, Hägglund, damping, oscillation detection, Performance Monitoring, closed loop control

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse (IWP) der Technischen Universität Chemnitz.

Ich möchte mich an dieser Stelle herzlich bei dem Leiter des Instituts Herrn Professor Reimund Neugebauer für seine Unterstützung, die wissenschaftliche Betreuung und die Möglichkeit zur Promotion bedanken. Für die fachlichen Anmerkungen und die Übernahme des Gutachtens gilt mein besonderer Dank Herrn Professor Alexander Verl, Leiter des Instituts für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) in Stuttgart.

Herrn Doktor Holger Schlegel danke ich darüber hinaus ganz besonders für die konstruktiven Diskussionen und seine umfangreiche fachliche Unterstützung während der Arbeit. Ebenso möchte ich mich bei meinen Kollegen der Abteilung Steuerungs- und Regelungstechnik für die gute Zusammenarbeit und die vielfältige Hilfe bedanken.

Meiner Familie und allen Freunden vielen Dank für das entgegengebrachte Verständnis und das Mittragen dieser Aufgabe. Besonderer Dank gilt meiner Ehefrau Julia - für ihre unendliche Geduld, die vielen motivierenden Worte und die Hilfe beim Ordnen der Gedanken. Ohne sie wäre diese Arbeit nie fertig geworden.

Chemnitz im Juni 2012

Ruben Schönherr

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	10
Tabellenverzeichnis.....	13
Formelzeichen und Abkürzungen.....	14
1 Einleitung und Motivation.....	23
2 Antriebstechnik.....	27
2.1 Einordnung von Antriebssystemen und Achsen.....	29
2.1.1 Einordnung nach der Energieform.....	29
2.1.2 Einordnung nach der Bewegungskomplexität.....	30
2.1.3 Regelungstechnische Einordnung.....	34
2.1.4 Bussystem.....	35
2.1.5 Industrielle Anwendungen, maschinenseitige Einordnung.....	38
3 Überwachung im Maschinenbau.....	41
3.1 Einführung.....	41
3.2 Begriffe und Klassifizierung.....	43
3.2.1 Terminologie.....	43
3.2.2 Klassifizierung von Überwachungssystemen.....	44
3.2.3 Klassifizierung von Auswertungsmethoden nach Domänen ..	45
3.3 Stand der Wissenschaft und Technik.....	46
3.3.1 Prozessüberwachung.....	48
3.3.2 Überwachung mechanischer Komponenten.....	52
3.3.3 Überwachung des Antriebssystems.....	57
3.3.4 Steuerungsüberwachung.....	61
3.4 Zusammenfassung und Fazit.....	63
4 Ansatz und Zielstellung.....	65

5	Control Loop Performance Monitoring.....	69
5.1	Begriffserklärung.....	69
5.2	Einordnung der Verfahren des CLPM.....	72
5.2.1	Einordnung nach Art der Auswertung.....	73
5.2.2	Einordnung anhand des Prozesseingriffs.....	74
5.2.3	Unterscheidung nach der Zielstellung.....	75
5.3	Methoden und Eignung für Antriebsregelkreise.....	76
5.3.1	Reglerbewertung.....	76
5.3.2	Identifikation häufig auftretender regelungstechnischer Probleme.....	79
5.3.3	Reglerbewertung zur Optimierung.....	80
5.4	Zusammenfassung der Analyse der Methoden des Control Loop Performance Monitoring.....	80
6	Schwingungsdetektion.....	87
6.1	Zeitbezogene Auswertung.....	87
6.1.1	Forsman & Stattin (zeitbezogen).....	88
6.1.2	Hägglund (zeitbezogen).....	92
6.2	Positionsbezogene Auswertung.....	97
6.2.1	Forsman & Stattin (positionsbezogen).....	98
6.2.2	Hägglund (positionsbezogen).....	99
6.3	Anwendung und Ergebnisse.....	101
6.3.1	Zeitbezogene Auswertung.....	101
6.3.2	Positionsbezogene Auswertung.....	109
6.4	Vergleich der Verfahren in Bezug auf ihre Eignung in der Antriebstechnik.....	119
7	Reglerüberwachung.....	121
7.1	Gebräuchliche Gütekriterien.....	122
7.2	Dämpfungsermittlung.....	123
7.2.1	Modifizierung des Verfahrens nach Forsman & Stattin.....	125

7.2.2	Prony-Analyse.....	138
7.2.3	Vergleich.....	153
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
	Literaturverzeichnis.....	159
	Anhang.....	167
A	Antriebstechnische Begriffe.....	168
B	Erläuterung zu Steuerungsklassen.....	170
C	Terminologie und Klassifikation von Überwachungsmethoden.....	171
C.1	Terminologie.....	171
C.2	Klassifikation.....	173