

Optimal Cylinder Commutation in Digital Hydraulic Pumps and Motors for Pulsation Minimization

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

Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Mateusz Sniegucki

aus Starachowice, Polen

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz

Tag der Einreichung: 12.01.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 19.04.2016

Darmstadt 2016
D17

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Mateusz Sniegucki

**Optimal Cylinder Commutation in Digital Hydraulic
Pumps and Motors for Pulsation Minimization**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording or otherwise, without the prior permission of the publishers.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4532-1

ISSN 0945-1005

Shaker Verlag GmbH • P.O. BOX 101818 • D-52018 Aachen

Phone: 0049/2407/9596-0 • Telefax: 0049/2407/9596-9

Internet: www.shaker.de • e-mail: info@shaker.de



Fig. 1

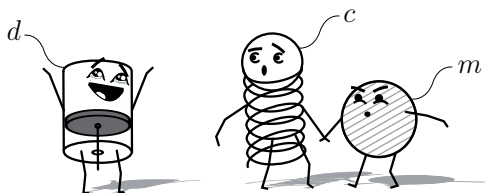


Fig. 2

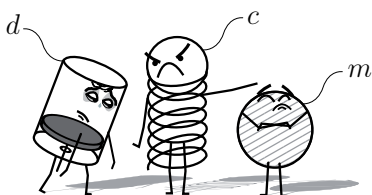


Fig. 3

Acknowledgments

This work was carried out during my time as a PhD student at the advanced development department for pumps and motors, mechatronics and mobile applications of the Bosch Rexroth AG in Horb a.N. from 2011 to 2014. Because research is a cooperative effort, this work would have been impossible without the support of others. I owe a great debt of gratitude to all the people who made this work possible. I would like to thank in particular, but not exclusively:

My supervisor Jörg Weingart for his scientific scrutiny by asking all the important questions and challenging me to answer them. His constructive criticism, technical knowledge and personal advice gave rise to the results achieved in this work.

Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf for supervising this external research outside of his institute, his interest in my work and his professional advice. Prof. Dr.-Ing. Peter F. Pelz for his interest in my research and reviewing this work as the second examiner. The institute of flight systems and automatic control of the TU Darmstadt for every support, the friendly atmosphere and the occasional extracurricular activities in Darmstadt.

Björn Beuter for his motivation, discussions and his valuable time he spend helping me in the laboratory getting things working. For this i am very grateful.

Bernhard Adler for giving me the opportunity and freedom to work on an interesting topic and his support throughout difficult phases of the project. Alejandro López and Markus Gottfried for their support and motivation in the beginning of the project. My students whose work contributed a great deal to this research. Daniel Hast for our fruitful discussions and his companionship during our mutual time as PhD students.

Finally, i want to thank my parents for their endless support and encouragement.

Reutlingen, December 2015

Mateusz Sniegucki

Abstract

Digital hydraulics is an ever growing field in the industry and the research community. Its key aspect and difference to conventional hydraulics is the use of switching elements with discrete states, such as on-off valves instead of continuously variable ones. In this aspect it shares similarities with the digital world of electronics. A circuitry with multiple of these digital hydraulic elements will realize a given functionality of a conventional hydraulic element with arbitrary precision, given arbitrary amounts of digital elements. The digital implementation of a hydraulic functionality comes with the advantages of mechanical robustness, high dynamics, power efficiency and price competitiveness. However this comes at the expense of a high complexity and challenging controllability due to the discrete nature of these systems.

A concrete digital hydraulic system is the digital hydraulic pump & motor. It comprises of several cylinders with moving pistons, each with independently controllable on-off valves. The proper activation of these valves over time determines the volume flow and torque output of the system. The contemporary control approaches for digital hydraulic pumps and motors yield unsatisfactory results. The produced outputs show high pulsation amplitudes with varying frequencies. In applications such as vehicle drives, inducing high pulsation amplitudes into the system is critical since it may inhibit a proper operation or even damage the machine.

To this end no approaches for the mitigation of such pulsations exist, which are solely based on control without altering the system with additional hardware. This work shows a new control approach for mitigating pulsations based on model predictive optimization. Not only are the pulsation amplitudes controlled, but the presented methodology also allows for an explicit consideration of frequency content in the produced output.

The discrete characteristics of the digital hydraulic pump/motor are modelled by a hybrid dynamical system model which is translated into a system of differential equations subject to linear inequalities with mixed-integer input variables. This Mixed Logical Dynamical system model is used as a prediction model in an optimization to reduce pulsation amplitudes and set desired frequencies, effectively solving a Mixed-Integer Quadratic Program. The result are switching sequences that yield an output volume flow or torque with desired properties. To achieve robustness in the presence of model uncertainties and disturbances, the approach is complemented by an iterative learning control scheme owing to the periodic behavior of the system. Experiments confirm that the presented approach is able to substantially reduce pulsations.

Deutsche Kurzfassung

Digitalhydraulik ist ein ständig wachsender Bereich in der Industrie und der Forschungsgemeinschaft. Sein Schlüsselaspekt und Unterschied zur konventionellen Hydraulik ist die Verwendung von Schaltelementen mit diskreten Zuständen, wie zum Beispiel Schaltventilen, statt kontinuierlich stellbaren Stetigventilen. In diesem Aspekt teilt die Digitalhydraulik Ähnlichkeiten mit der digitalen Welt der Elektronik. Ein Netzwerk mit mehreren dieser digitalhydraulischen Elemente realisiert eine gegebene Funktionalität eines herkömmlichen Hydraulikelementes mit beliebiger Genauigkeit, bei gegebenen beliebigen Mengen der digitalen Elemente. Die digitale Implementierung einer hydraulischen Funktionalität kommt mit den Vorteilen der mechanischen Robustheit, einer hohen Dynamik, Leistungseffizienz und der preislichen Wettbewerbsfähigkeit. Allerdings geht damit eine hohe Komplexität einher und daraus eine Herausforderung an die Steuerbarkeit aufgrund der diskreten Natur dieser Systeme.

Ein konkretes digitales Hydrauliksystem ist die digitale Hydraulikpumpe und -Motor. Sie umfasst mehrere Zylinder mit beweglichen Kolben, die jeweils unabhängig ansteuerbare Schaltventile besitzen. Die Abfolge der Aktivierung dieser Ventile über der Zeit bestimmt den Volumenstrom und das Drehmoment des Systems. Heutige Steuerungsansätze für digitale Hydraulikpumpen und -Motoren ergeben unbefriedigende Ergebnisse. Die erzeugten Volumenströme und Drehmomente zeigen hohe Pulsationsamplituden mit variierenden Frequenzen. In Anwendungen wie Fahrzeugantrieben ist Pulsation im System kritisch, da sie die einwandfreie Funktion der Einheit hemmt oder sogar zum Ausfall der Maschine führen kann. Der Stand der Technik zeigt bisher keine rein regelungstechnischen Ansätze zur Minderung solcher Pulsationen, also Ansätze die nicht auf einer Veränderung des Systems mit zusätzlicher Hardware basieren. Diese Arbeit zeigt neue Regelungsstrategien zur Minderung von Pulsationen auf Basis von Modellprädiktiven Regelungen. Die Pulsationsamplituden werden nicht nur gemindert, die vorgestellte Methode erlaubt zudem auch eine explizite Berücksichtigung des Frequenzinhalts des Volumenstroms bzw. Drehmoments.

Die diskreten Eigenschaften der digitalen hydraulischen Pumpe/Motor werden durch ein hybrides dynamisches System modelliert. Dieses wird übersetzt in ein System von Differentialgleichungen, die linearen Ungleichungen mit gemischt-ganzzahligen Eingangsgrößen unterliegen. Dieses gemischt logische dynamische System (engl. Mixed Logical Dynamical System) wird als Vorhersagemodell in einer Optimierung verwendet, um Pulsationsamplituden zu reduzieren und den gewünschten Frequenzinhalt einzustellen, wobei effektiv ein gemischt-ganzzahliges quadratisches Programm gelöst wird. Das Ergebnis sind Schaltsequenzen für die einzelnen Ventile, die einen Ausgangsvolumenstrom oder ein Drehmoment

mit den gewünschten Eigenschaften liefern. Um die Robustheit in Gegenwart von Modellsicherheiten und Störungen zu erreichen, wird der Ansatz durch eine iterativ lernende Regelung ergänzt, bedingt durch die periodische Eigenschaft des Systems. Experimente bestätigen, dass der vorgestellte Ansatz in der Lage ist Pulsationen wesentlich zu reduzieren.

Contents

Abstract	vi
Deutsche Kurzfassung	vii
Notations and Conventions	xiii
1 Introduction	1
1.1 Digital hydraulic pumps and motors	3
1.2 Motivation	6
1.3 Scope of the thesis	6
1.4 Structure of the thesis	7
2 State of the art	9
2.1 Cylinder commutation in digital hydraulic pumps and motors	10
2.1.1 Delta-Sigma modulation	10
2.1.2 Pulse width modulation	12
2.2 Potential for improvement	13
2.3 Control theory	14
2.3.1 System classification	14
2.3.2 Control synthesis methods	17
3 System Model of a digital hydraulic pump/motor	19
3.1 System Modelling	21
3.1.1 Pressure dynamics	21
3.1.2 Valve dynamics	23
3.1.3 Eccentric shaft kinematics	26
3.1.4 Coupling between subsystems	27
3.1.5 Model validation	28

4	Complexity reduction by hybrid modelling	33
4.1	Hybrid dynamical system model	33
4.1.1	Valve model alterations	37
4.2	Hybrid model validation	38
4.3	System analysis	39
4.3.1	Disturbances and robustness	41
4.4	Control design model	43
4.4.1	Discretization	43
4.4.2	Mixed Logical Dynamical System Representation	45
4.4.3	Discretization errors	50
5	Optimal control of a digital hydraulic drive	53
5.1	Receding horizon optimization	53
5.2	Control design	54
5.2.1	Spectrum control	55
5.2.2	Heuristics	57
5.2.3	Recursive Feasibility and minimal horizon length	58
5.2.4	Stability	60
5.3	Mixed-Integer Programming Formulation	61
5.4	Solution methods and problem complexity	65
6	Numerical Investigation	67
6.1	Adjusting weights	68
6.2	Influence of horizon length and sample width	69
6.3	Initial conditions	71
6.4	Operational parameters	76
6.5	Activation of opposing cylinders	76
6.6	Frequency control	78
6.7	Model mismatch and disturbance behavior	84
6.7.1	Mismatch model	84
6.7.2	Disturbance model	84
6.7.3	Closed loop vs open loop response	85
6.8	Performance comparison with the state of the art	86
7	Real time implementation	89
7.1	Discretization of the system parameter space	93
7.2	Control law implementation	95

7.2.1	Input Quantization	95
7.2.2	Compensation of dead time	95
8	Robust switching control	97
8.1	Robust Optimization	97
8.2	Iterative feedback	100
8.2.1	Principle of iterative learning control	101
8.2.2	Valve switching ILC	103
8.2.3	Simulation results	105
9	Experimental study	109
9.1	Experiment setup	109
9.2	Experiments	110
9.2.1	Motor mode setpoint tracking	110
9.2.2	Pump mode setpoint tracking	112
9.2.3	Frequency control	114
9.2.4	Iterative learning feedback	116
10	Conclusions and outlook	121
A	Algorithms	125
B	Test-bed components	127
C	Model equations	129
	List of Figures	133
	List of Tables	137
	List of Algorithms	139
	Bibliography	145