

Lernfähig : neue Regelstrategie zur Energieeinsparung bei hydraulischen Antrieben

Citation for published version (APA):

van der Burgt, J. A. H., & Hezemans, P. M. A. L. (1994). Lernfähig : neue Regelstrategie zur Energieeinsparung bei hydraulischen Antrieben. *Maschinenmarkt*, 100(46), 58-62.

Document status and date:

Gepubliceerd: 01/01/1994

Document Version:

Uitgevers PDF, ook bekend als Version of Record

Please check the document version of this publication:

- A submitted manuscript is the version of the article upon submission and before peer-review. There can be important differences between the submitted version and the official published version of record. People interested in the research are advised to contact the author for the final version of the publication, or visit the DOI to the publisher's website.
- The final author version and the galley proof are versions of the publication after peer review.
- The final published version features the final layout of the paper including the volume, issue and page numbers.

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal.

If the publication is distributed under the terms of Article 25fa of the Dutch Copyright Act, indicated by the "Taverne" license above, please follow below link for the End User Agreement:

www.tue.nl/taverne

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at:

openaccess@tue.nl

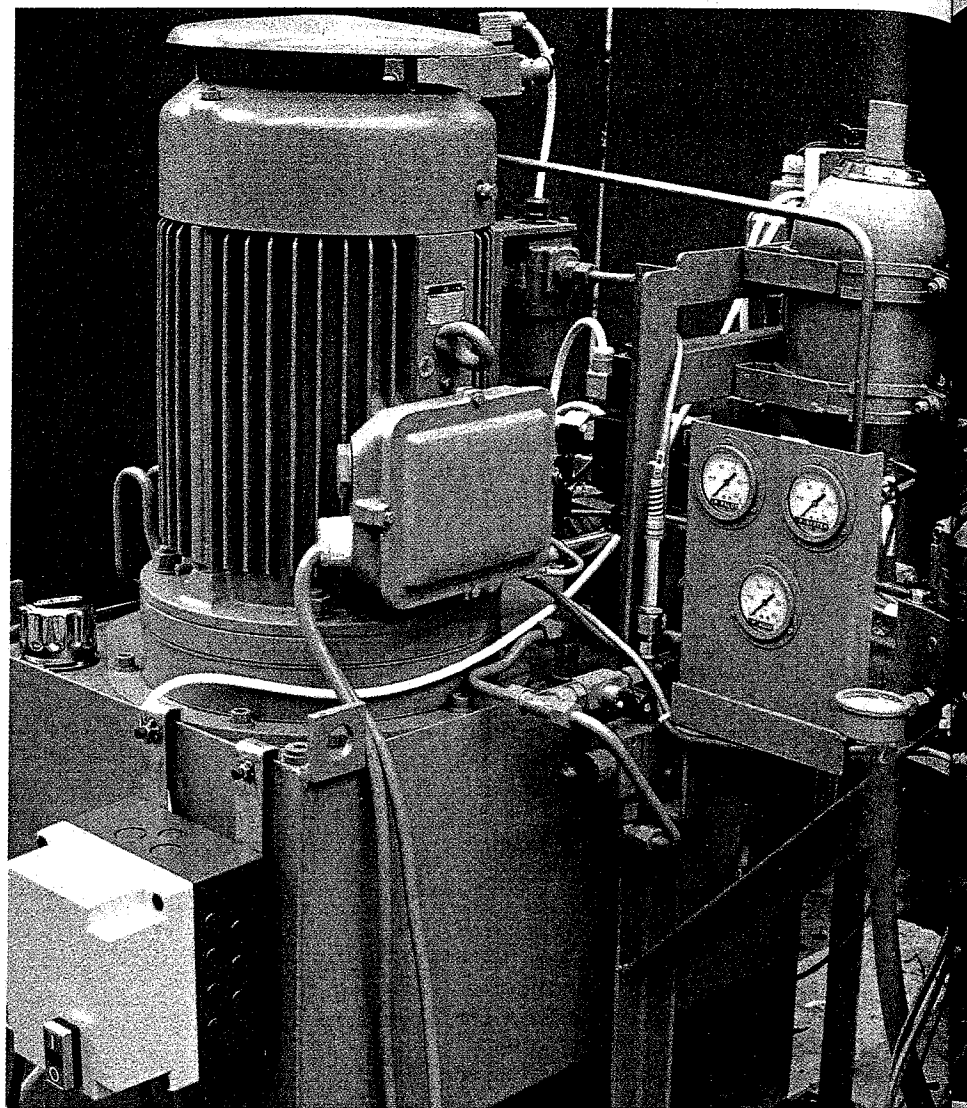
providing details and we will investigate your claim.

Mit der vorgestellten neuen Regelstrategie, den lernenden hydraulischen Systemen, können bei zyklisch belasteten Systemen mit großen Lastwechseln beträchtliche Energieeinsparungen erzielt werden. Eine sehr wichtige Eigenschaft des Systems ist die automatische Neueinstellung bei Änderungen. Die praktische Realisierbarkeit ist mittels eines Prüfstandes ausführlich bewiesen worden.

John A. H. van der Burgt
und Peter M. A. L. Hezemans

MM Maschinenmarkt Hydraulische Antriebe werden oft gewählt für den Antrieb bestimmter Maschinen aufgrund der Vorteile gegenüber andersartigen Antrieben, zum Beispiel wegen der hohen Kraftdichte, der Flexibilität, der guten Steuer- und Regelbarkeit oder des großen Steuer- und Regelbereiches. Für Maschinen, bei denen zyklische Lastprozesse eine große Leistung erfordern und in denen große Lastwechsel, das heißt große Druck- und Volumenstromwechsel, auftreten und bei denen oft nach einer Zeit auf einen ganz anderen zyklischen Lastprozeß übergeschaltet wird, werden deswegen hydraulische Antriebe gewählt. Obwohl diese Maschinen ihren Auftrag sehr gut ausführen, ist der Gesamtwir-

Dr.-Jr. John A. H. van der Burgt ist tätig bei der Klöckner Hänsel Tevopharm B.V., Ing. Peter M. A. L. Hezemans ist wissenschaftlicher Hauptmitarbeiter an der Technischen Universität Eindhoven am Institut für Antriebstechnik und Tribotechnik im Fachbereich Systemtechnik für Antriebssysteme.



kungsgrad oft sehr niedrig, gerade wegen der großen Lastwechsel in einem Zyklus. Zu einem nicht zu vernachlässigenden Teil wird der niedrige Wirkungsgrad auch verursacht durch die Tatsache, daß die Maschine eigentlich für jeden Lastpro-

zeß energetisch neu abgestimmt werden muß (manuell), was aber wegen Zeit-, Geld- oder Kenntnismängeln nicht immer stattfindet. Systeme mit konventioneller Regelung, die bei einem bestimmten Lastzyklus einen ziemlich hohen Wirkungsgrad aufweisen, können bei Laständerung wieder niedrige Wirkungsgrade aufweisen.

Elektroantriebe können besonders für einen größeren Leistungsbedarf für den Antrieb von Maschinen dieser Art keine interessanten

Lernfähig

Neue Regelstrategie zur Energieeinsparung bei hydraulischen Antrieben

Prüfstand zum Ermitteln der Eigenschaften des neu entwickelten lernenden hydraulischen Systemes.

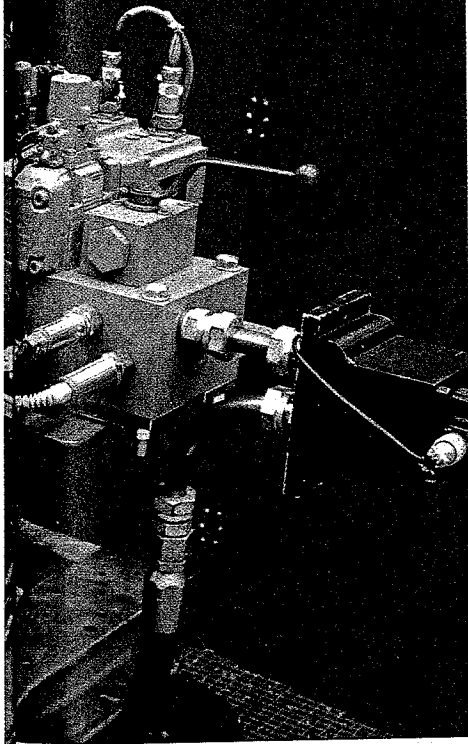


Bild: TU Eindhoven

Perspektiven bieten aufgrund der spezifischen Nachteile, beispielsweise des großen Bauvolumens und der hohen Kosten. Ein wichtiges Problem des herkömmlichen hydrostatischen Antriebes ist aber, daß durch den niedrigen Wirkungsgrad (<30%) die Wahl eines hydraulischen Antriebes für die obengenannten zyklischen Prozesse nicht naheliegt.

Deswegen ist es notwendig, daß hydraulische Antriebe dieser Prozesse eingehender studiert werden, nicht nur zur Lokalisierung der Energieverlustquellen, sondern auch zur Lokalisierung und Minimierung der Energieüberschüsse. Die Zielsetzungen einer Doktorarbeit an der TU Eindhoven waren die Entwicklung eines hydraulischen Systems, das

► bei unterschiedlichen zyklischen Lasten mit großen Wechsels immer einen hohen Wirkungsgrad hat

► und sich außerdem automatisch an Laständerungen anpaßt (ohne menschliches Eingreifen), so daß stets ein optimaler Wirkungsgrad resultiert.

Das Resultat ist eine neue Regelstrategie zur Energieeinsparung bei hydraulischen Systemen mit veränderlicher zyklischer Belastung.

Kontinuierliches Anpassen der Regelstrategie

Ein System, das auf der neuen Regelstrategie basiert, ist ein sogenanntes „lernendes hydraulisches System“. Es zeigt hohe Wirkungsgrade für Lastzyklen mit großen Lastwechseln und paßt seine Einstellung automatisch an neue Lastzyklen an, so daß immer ein höherer Wirkungsgrad resultiert: die lernende Eigenschaft. Bei Änderung des Lastprozesses soll die Regelstrategie (kontinuierlich) angepaßt werden. Die interessanten Lastparameter müssen also immer gemessen und zur Regelung geschickt werden, so daß „lernen“ möglich ist. Nach einigen Zyklen hat das System durch „Selbstbeobachtung“ gelernt, wie der optimale Antrieb für die nächsten Zyklen sein soll.

Das System (Bild 1) besteht aus drei Teilen: dem Aggregat, das die hydraulische Energie liefert, der Last, die die hydraulische Energie verbraucht, und der Regeleinheit.

In diesem Beispiel (Bild 1) ist das Aggregat aus einer Konstantpumpe und einem Hydrospeicher aufgebaut. Die Pumpe kann mit Hilfe eines 2/2-Wege Ventils entlastet werden, und der Hydrospeicher kann mit Hilfe eines 2/2-Wege-Ventils zu- oder abgeschaltet werden. Im zugeschalteten Zustand bestimmt der Großkapazitätsspeicher den Systemdruck. Im anderen Fall wird der Systemdruck von einem proportionalen Druckbegrenzungsventil bestimmt abhängig vom Lastdruck.

Die Last wird charakterisiert durch den Verlauf des Lastdruckes und des Volumenstromes während eines Zyklus. Hier ist ein möglicher Zyklus einer Spritzgießmaschine dargestellt (Bild 1). Die Last wird gemessen und an die Regeleinheit weitergegeben.

In der Regeleinheit werden die Steuersignale (Schaltzeitpunkte) der 2/2-Wege-Ventile optimiert, so daß die Energieverluste im System minimiert werden. Es gelten dabei einige Nebenbedingungen: Der

Lastzyklus muß immer geliefert werden und nicht nur die Last, sondern auch das Verhalten des Systems muß zyklisch sein. Die Steuersignale werden mit Hilfe der neuen Regelstrategie bestimmt.

Die Struktur der Regeleinheit ist in Bild 2 dargestellt. Die Regeleinheit besteht aus den Blöcken Belastungsfestlegung, Identifikation, Optimierung und Korrektur. Der Block System (Bild 2) ist aufgebaut aus dem Aggregat und dem Lastzyklus entsprechend Bild 1. Die Steuersignale $u_c(t)$ und der gewünschte Lastverlauf $w(t)$ bilden den Input und der gemessene Lastverlauf und verschiedene Meßergebnisse vom Aggregat bilden den Output $y(t)$ des Systems.

Im Block Belastungsfestlegung wird aus dem gemessenen Lastverlauf der gewünschte Lastzyklus charakterisiert. Die hoch- und mittelfrequenten Aspekte werden ausgefiltert, so daß nur die für den Energieverbrauch interessanten statischen und niederfrequenten Aspekte der Last resultieren. Die charakterisierte Last wird in den Blöcken Identifikation und Optimierung angewandt.

Niederfrequente Aspekte werden modelliert

Der Block Identifikation: In der Regelstrategie wird ein Modell des Systems verwendet, in dem nur die niederfrequenten Aspekte des Speicherhaltens und die statischen Aspekte vom Rest des Systems modelliert sind. Eine umfassende Forschung nach dem Druckspeicher als Energiespeicher ist ausgeführt worden [1]. Mit Hilfe der Bondgraph-Technik wurde ein fundamentaler Einblick in die thermodynamischen Eigenschaften des Speichers geschaffen, was nicht nur in Entwurfsregeln für die Wahl und Dimensionierung des Druckspeichers resultierte, sondern auch in das erforderte Modell für die optimale momentane Abstimmung des Speichers auf den sich ändernden Lastprozeß einging. Es hat sich herausgestellt, daß ein einmal bestimmtes Modell nicht ausreicht. Das Systemmodell, das ja immer eine Annäherung des realen Systems ist, dessen Parameter in Betrieb außerdem nicht konstant bleiben, wird fortwährend mit Hilfe eines Identifikationsverfahrens angepaßt.

Die Differenz zwischen Meßergebnissen $y_m(t)$ und Simulationsergebnissen $y_s(t)$ wird rückgekoppelt, und

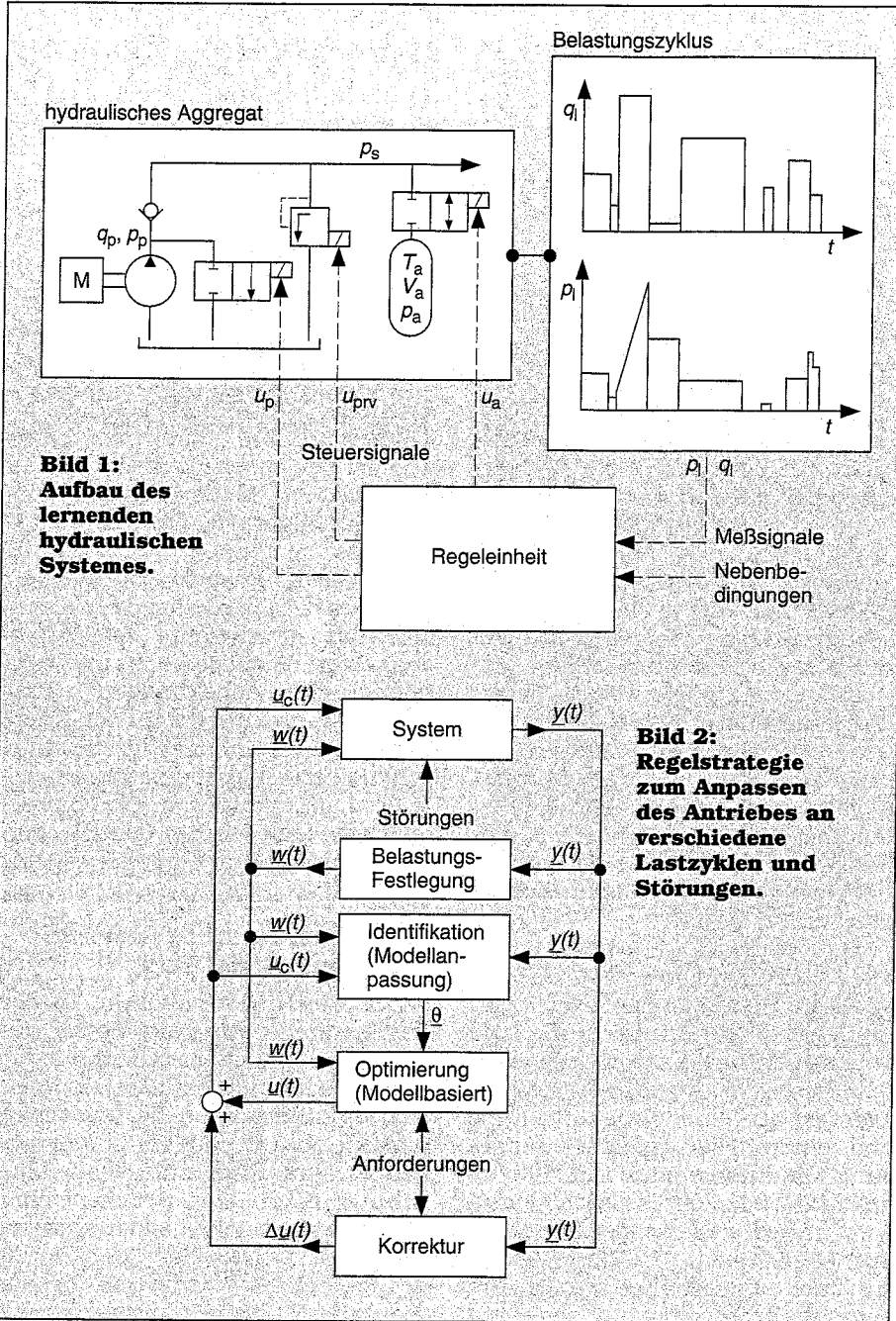


Bild 1:
Aufbau des lernenden hydraulischen Systemes.

Bild 2:
Regelstrategie zum Anpassen des Antriebes an verschiedene Lastzyklen und Störungen.

Formelzeichen

t	Zeit
i	Anzahl der Zyklen
\underline{w}	Lastzyklus
\underline{y}	Gemessener Output des Systems
\underline{y}_m	Meßergebnisse
\underline{y}_b	Simulationsergebnisse
\underline{u}	Steuersignale
\underline{u}_c	Korrigierte Steuersignale
u_p	Steuersignal Pumpe
u_a	Steuersignal Speicher
u_{PRV}	Steuersignal Druckbegrenzungsventil
u_{fuzzy}	Input-Fuzzy-Controller
x_0	Anfangszustand
c_1	Konstante
c_2	Konstante
s	Nichterfüllung der Nebenbedingungen
s'	Änderung der Nichterfüllung pro Zyklus
E_{Verlust}	Energieverlust
p_p	Pumpendruck
p_1	Lastdruck
p_s	Systemdruck
q_1	Lastvolumenstrom
q_p	Pumpenvolumenstrom

Anfangszustand des Hydrospeichers x_0 entsprechend dem angepassten Modell. Damit gilt die Gleichung:

$$E_{\text{Verlust}} = E_{\text{Verlust}}(\underline{y}(t), \underline{x}_0) \quad (3)$$

Beim Optimieren müssen die Nebenbedingungen berücksichtigt werden: zyklischer Verlauf des Systems, Lieferung des Lastdruckes und des Lastvolumenstromes. Für dieses Optimierungsproblem ist an der TU Eindhoven ein besonderer mathematischer Optimierungsalgorithmus entwickelt worden, basiert auf der „Projektierten Gradient-Methode“ [2]. Dieser Algorithmus erfordert das identifizierte mathematische Modell des Energiehaushalts in der zyklisch belasteten Maschine. Mit diesem Algorithmus wird auf intelligente Weise eine Steuerung des schaltbaren Druckspeichers und der schaltbaren Pumpen geschaffen. Somit wird immer eine optimale Einstellung des hydrostatischen Antriebs realisiert.

Steuersignal-Korrektur nach jedem Zyklus

Der Block Korrektur ist nötig, weil trotz der Identifikation im angepassten Modell immer noch Ungenauigkeiten auftreten und weil auch vereinzelte Differenzen zwischen den gegenseitigen Belastungszyklen auftreten (Störungen). Es ist nicht immer zu gewährleisten, daß die vom Algorithmus optimierten Schaltzeitpunkte in den Steuersignalen rechtzeitig auftreten. Des-

die Parameter des Modells werden so korrigiert, daß ein „Best-fit“-Modell entsteht. Für die Korrektur der Parameter wurde ein iteratives Verfahren gewählt, in dem die Simulationsergebnisse auf die Meßergebnisse eines kompletten Zyklus „gefitet“ werden.

Das identifizierte Systemmodell wird angewandt für das Bestimmen der optimalen Steuersignale im Block Optimierung. Das Systemmodell wird angewandt zur Ermittlung jener optimalen Schaltzeitpunkte in den Steuersignalen der 2/2-Wege-Ventile und jenes Anfangszustandes des Hydrospei-

chers, wofür die Energieverlustfunktion einen minimalen Wert hat.

$$E_{\text{Verlust}} = \text{Pumpenenergie} - \text{Lastenergie} \quad (1)$$

$$E_{\text{Verlust}} = \int_0^T \left[p_p(t) \times q_p(t) - p_1(t) \times q_1(t) \right] dt \quad (2)$$

Für den Lastdruck und den Lastvolumenstrom wird der charakterisierte Lastzyklus $\underline{w}(t)$ verwendet. Der Pumpendruck und der Pumpenvolumenstrom sind abhängig von den Steuersignalen $\underline{u}(t)$ und vom

halb werden bei praktischer Anwendung der Optimierungsergebnisse die Nebenbedingungen nicht genau erfüllt sein. Eine Korrektur der Steuersignale (Schaltzeitpunkte) am Ende jedes Zyklus ist deswegen notwendig. Die Abweichungen in den Steuersignalen werden mit Hilfe einer Fuzzy-Regelung korrigiert.

Das Maß an Nichterfüllung $u_{fuzzy}(i)$ der Nebenbedingungen in Zyklus i wird als Kombination der tatsächlichen Nichterfüllung $s(i)$ und deren Änderung pro Zyklus $s'(i)$ in einer einzigen Zahl ausgedrückt:

$$u_{fuzzy}(i) = c_1 \cdot s(i) + c_2 \cdot s'(i) \quad (4)$$

Diese Gleichung ist bekannt unter dem Namen „Sliding-Surface“ [3]. In dieser Gleichung wird $s(i)$ als Funktion des vom Optimierungsprogramm bestimmten Anfangsdruckes, des tatsächlich auftretenden Druckes und der Nichterfüllung der Lastnebenbedingungen bestimmt.

Anhand jenes Maßes wird vom Fuzzy-Controller eine Normkorrektur berechnet. Durch Verwendung der Sliding-Surface war es möglich, den Fuzzy-Controller sehr einfach und kurz zu halten. Die Sliding-Surface bringt eine gewisse Dämpfung ins System, ohne den Fuzzy-Controller zu erweitern.

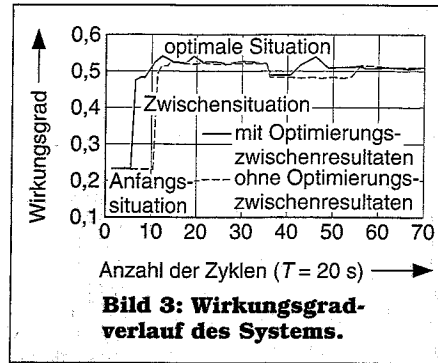


Bild 3: Wirkungsgradverlauf des Systems.

Bild: Verfasser

Nachdem die Normkorrektur bestimmt worden ist, wird von einem Expertensystem ein Schaltzeitpunkt gewählt und die Normkorrektur für diesen Schaltzeitpunkt angepaßt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß ein zyklisch belastetes System, das nach der erklärten Strategie geregelt wird, allen Anforderungen entspricht:

► Die Energieverluste im System werden minimiert durch das Optimierungsprogramm, das ein Modell des Systems verwendet. Das Modell gibt eine genaue Beschreibung des Systems, weil dessen Parameter kontinuierlich mittels eines Identifikationsverfahrens bestimmt werden.

► Strukturelle Änderungen im Lastzyklus oder Umschaltungen auf einen ganz anderen Belastungszyklus werden vom Block Belastungsfestlegung ermittelt und an den Rest der Regelung durchgegeben. Das System paßt sich automatisch an.

► Vereinzelt Differenzen zwischen den einzelnen Belastungszyklen werden von der Korrektur durch Anpassung der Schaltzeitpunkte in den Steuersignalen in Angriff genommen.

► Die Korrektur regelt durch Anpassung der Schaltzeitpunkte auch andere Störungen weg, wie die immer auftretenden Ungenauigkeiten im Systemmodell, die Nichterfüllung der Nebenbedingungen verursachen.

Mit einem Prüfstand sollte überprüft werden, wie weit die Theorie des lernenden hydraulischen Systems mit der Wirklichkeit übereinstimmt. Mit Hilfe eines für das System entwickelten Prüfstandes wurde die beschriebene Regelstrategie erfolgreich getestet. Das Verwenden von Mikroprozessoren und die Integration von Elektronik spielten bei dem Prüfstand eine wichtige Rolle.

Am Prüfstand wird der Lastzyklus von einer Lastsimulationsanlage nachgebildet. Die Lastsimulationsanlage kann mit Hilfe ihrer eigenen Regelung jeden beliebigen Sollzyklus nachbilden.

Bild 3 zeigt den Zeitverlauf des gemessenen Wirkungsgrades. Bis zu Zyklus 35 gewährleistet die Korrektur die Erfüllung der Nebenbedingungen. Im Zyklus 35 tritt eine Laständerung auf, die Last wird neu charakterisiert und eine neue Optimierung durchgeführt. Nach einigen Zyklen ist der Wirkungsgrad wieder optimal. Im Vergleich zu herkömmlichen energieeinsparenden Maßnahmen, wie zum Beispiel ein Speichersystem oder ein Mehrpumpensystem, die für diesen Lastzyklus Wirkungsgrade unter 35% haben, sind beträchtliche Verbesserungen möglich.

Literatur

[1] van der Burgt, J. A. H.: Der Hydrospeicher, Modellierung mittels des Bondgraphens. Diplomarbeit TU Eindhoven/Niederlande 1988.
 [2] Seebregts, A. J.: Implementation of a Projected Gradient Method for the Optimization of Energy Consumption in a Hydraulic System with an Accumulator. Diplomarbeit. TU Eindhoven/Niederlande 1988.
 [3] van der Burgt, J. A. H.: A New Approach to Saving Energy in Cyclic Loaded Hydraulic Systems: Learning Hydraulic Systems. Dissertation TU Eindhoven, Niederlande 1994.

Gut Ding braucht Weile

Forscher der Bayer AG, Leverkusen, ist es gelungen, die Eigenschaften von elektrorheologischen Flüssigkeiten zu verbessern. Betriebstemperaturen bis zu 150°C und eine Versuchsdauer von 2.000 Stunden überstand die Flüssigkeit schadlos. Tests bei Anwendern sollen nun die Praxistauglichkeit beweisen.

Die physikalische Eigenschaft elektrorheologischer Flüssigkeiten brachte der Amerikaner Willis Winslow erstmals 1947 ins Gespräch. Damals berichtete er: „...bestimmte Schlammarten zeigen einen beachtlichen Anstieg des Strömungswiderstandes, wenn man sie einem elektrischen Feld von vier Kilovolt aussetzt“. Versuche, dieses Phänomen zu vermarkten, schlugen fehl. 1967 griff man in Großbritannien Winslows Pionierarbeit auf, mit dem Ziel, sie industriell zu nutzen.

Die Entwicklung marktfähiger Produkte scheiterte damals an der Beschaffung geeigneter Suspensionen.

Bei Bayer ist man nun in der Lage, Flüssigkeiten reproduzierbar und im industriellen Maßstab herzustellen zu können. In der Hydraulik könnte die Flüssigkeit in bestimmten Fällen Ventiltfunktionen übernehmen. In Stoßdämpfern und Schwingungsdämpfern kann mit dieser Flüssigkeit das Dämpfungsverhalten auf einfache Weise variiert werden. In Kleinkupplungen kann die elektrorheologische Flüssigkeit Drehmomente übertragen. Dieser Erfolg kann sich sehen lassen. Ob er den Durchbruch bewirken kann, hängt davon ab, wieviel die Anwender für die Flüssigkeit zu bezahlen bereit sind. Derzeit müßten sie, gemessen an derzeitigen Preisen, mehr als das Fünffzigfache dafür locker machen. *BeKu*