

# 50. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium

September, 19-23, 2005

**Maschinenbau  
von Makro bis Nano /  
Mechanical Engineering  
from Macro to Nano**

**Proceedings**

Fakultät für Maschinenbau /  
Faculty of Mechanical Engineering

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

## Impressum

- Herausgeber: Der Rektor der Technischen Universität Ilmenau  
Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Peter Scharff
- Redaktion: Referat Marketing und Studentische Angelegenheiten  
Andrea Schneider
- Fakultät für Maschinenbau  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Kurtz,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. med. (habil.) Hartmut Witte,  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Gerhard Linß,  
Dr.-Ing. Beate Schlütter, Dipl.-Biol. Danja Voges,  
Dipl.-Ing. Jörg Mämpel, Dipl.-Ing. Susanne Töpfer,  
Dipl.-Ing. Silke Stauche
- Redaktionsschluss: 31. August 2005  
(CD-Rom-Ausgabe)
- Technische Realisierung: Institut für Medientechnik an der TU Ilmenau  
(CD-Rom-Ausgabe) Dipl.-Ing. Christian Weigel  
Dipl.-Ing. Helge Drumm  
Dipl.-Ing. Marco Albrecht
- Technische Realisierung: Universitätsbibliothek Ilmenau  
(Online-Ausgabe) [ilmedia](#)  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau
- Verlag:  Verlag ISLE, Betriebsstätte des ISLE e.V.  
Werner-von-Siemens-Str. 16  
98693 Ilmenau

© Technische Universität Ilmenau (Thür.) 2005

Diese Publikationen und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt.

ISBN (Druckausgabe): 3-932633-98-9 (978-3-932633-98-0)  
ISBN (CD-Rom-Ausgabe): 3-932633-99-7 (978-3-932633-99-7)

Startseite / Index:

<http://www.db-thueringen.de/servlets/DocumentServlet?id=15745>

A. Pavlenko / W. Grintschenkov / N. Beljaev / A.Gummel / D.Batishchev / E. Kallenbach

## **Mechatronischer Entwurf schnellwirkender elektromagnetischer Aktoren**

Elektromagnetische Aktoren (EMA) sind mechatronische Systeme, die als Ganzheit entwickelt und optimiert werden müssen [3]. Einige Aspekte des Entwurfs schnellwirkender elektromagnetischer Aktoren wurden in den Arbeiten [1]-[3] bereits veröffentlicht. Das Hauptaugenmerk wurde auf die Berechnung und Optimierung sowie auf den Entwurf der Elektromagnete mit vorgegebenen statischen und dynamischen Kennwerten gelegt. Die geforderten dynamischen Kennlinien konnten durch bestimmte Konstruktionsmaßnahmen aber auch durch speziell angepasste Form der verwendeten Steuerimpulse erreicht werden. Der vorliegende Beitrag stellt eine Weiterentwicklung der Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet dar.

Die Gesamtmasse und die Abmessungen der elektromagnetischen Aktoren werden oft durch die Gesamtanordnung und den vorhandenen Bauraum festgelegt und können deshalb nur in einem relativ kleinen Bereich variiert werden. Deswegen ist es sinnvoll, beim Entwurf solcher Aktoren eine spezielle Methodik zu verwenden, womit die Form und die Parameter der Steuerimpulse unter Berücksichtigung der Magnetgrundform und der Geometrieparameter bestimmt werden können.

Für die Erzeugung der Steuerimpulse werden Leistungsstellglieder eingesetzt, die oft in den Aktor integriert werden. Digitale Steuersignale, die die Form der Stromimpulse in den Wicklungen vorgeben, werden entweder durch einen lokalen Mikrokontroller oder durch den Zentral-Bordcomputer erzeugt. Die traditionellen Methodiken [4] können für den Entwurf solcher Systeme nur bedingt eingesetzt werden. In unserer Arbeitsgruppe wurde deshalb ein Verfahren verwendet, das ein Parallelentwurf des elektromagnetischen Antriebs (EMA) von der Auswahl der Grundform bis zur Softwareentwicklung für den Mikrokontroller ermöglicht. Die Methodik wird zurzeit weiterentwickelt. Im vorliegenden Beitrag werden einige Elemente dieser Methodik vorgestellt, die beim Entwurf mehrerer EMA für verschiedene Einsatzgebiete bereits erfolgreich verwendet wurden. Bild 1 veranschaulicht die Gesamtstruktur des Entwurfsprozesses.

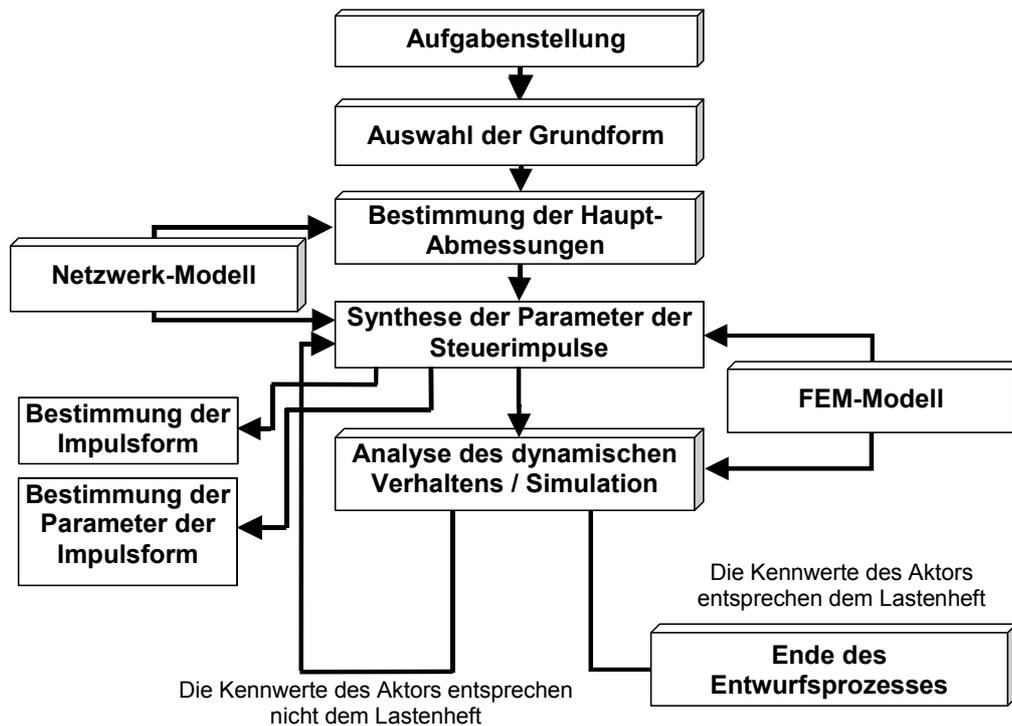


Bild 1 - Struktur des Entwurfsprozesses von elektromagnetischen Aktoren

Die Dimensionierung basiert auf den Formeln, die in [1], [3] erarbeitet wurden, und besteht aus zwei Phasen. In der ersten Phase werden Netzwerkmodelle verwendet. In dieser Entwurfsphase werden die Näherungswerte der Abmessungen bestimmt, die den vorgegebenen dynamischen Kennwerten entsprechen. Die Masse und das Volumen des Systems werden minimiert. Die Schaltzeit und die Geschwindigkeit der Bewegung des Ankers am Ende des Hubs werden als Restriktionen vorgegeben. In der zweiten Phase findet eine Feindimensionierung des EMA mit einem FEM-Programm statt.

Das Schlüsselement der vorgeschlagenen Methodik ist das kombinierte Modell des EMA, das entsprechende Modelle für den Elektromagneten sowie für die Steuerung beinhaltet. Für jede Entwurfsphase wurde ein entsprechendes Modell des Aktuators entwickelt. Das erste Modell wurde mit dem Programm *DesignLab (P Spice)* erstellt, das durch die speziell entwickelten Modellbibliotheken erweitert wurde und konnte dadurch für die Berechnung dynamischer Vorgänge in elektromechanischen Systemen verwendet werden. Die Modellstruktur eines Elektromagneten mit zwei Wicklungen ist im Bild 2 dargestellt.

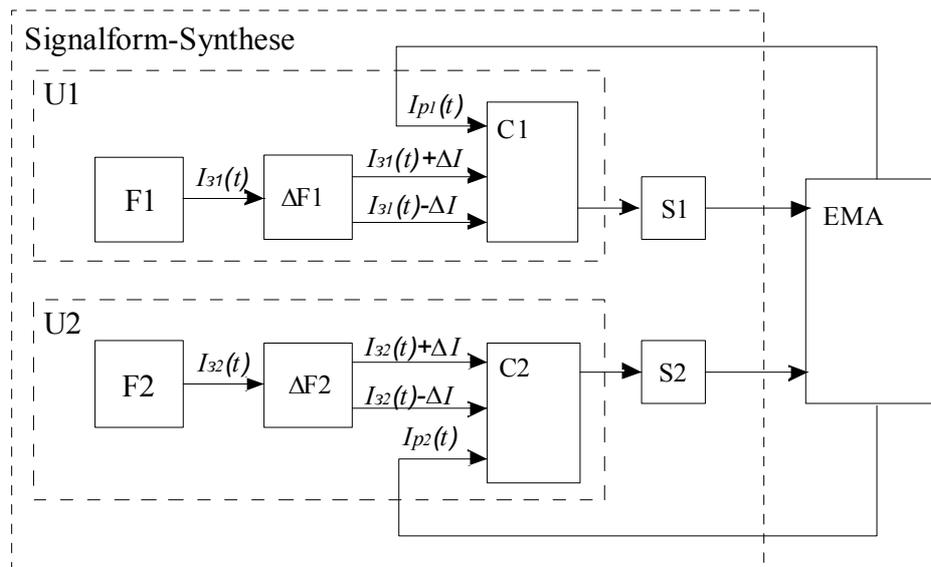


Bild 2 - Struktur des ersten Modells

$F1, F2$  – Module für die Erzeugung der Steuersignale für die entsprechenden Wicklungen des EMA;  
 $\Delta F1, \Delta F2$  – Module zur Erzeugung des „Stromkorridors“;  
 $C1, C2$  – Komparatoren zum Vergleich der aktuellen Stromwerte mit den Sollwerten;  
 $S1, S2$  – elektronischen Schaltelemente;  
 $EMA$  – Modell des elektromagnetischen Aktors

Alle Strukturelemente einschließlich Elektromagnet werden in *DesignLab (Pspice)* als entsprechende Komponentenmodelle implementiert.

Das zweite Modell wurde mit dem Programm *Maxwell Schematic Capture* erstellt, das die Simulation der elektromechanischen und der pneumatischen Systeme einschließlich Steuerung ermöglicht. Dabei wird das dynamische Modell des Elektromagneten aus dem Programm *Maxwell 2D* exportiert. Die Struktur dieses Modells ist im Bild 3 dargestellt.

Folgende Bezeichnungen wurden verwendet:  $S1, S2$  – Leistungsstellglieder der entsprechenden Wicklungen;  $EMA$  – das Modell des Elektromagneten;  $F1, F2$  – Module zur Erzeugung der Steuerimpulse für die entsprechenden Wicklungen;  $V1, V2$  – Module zur Berechnung der Ankergeschwindigkeit;  $F3$  – Module zur Erzeugung der Einschwing-Impulse;  $V(x)_1$  – Module zur Vorgabe der Einschwing-Geschwindigkeit;  $V(x)_2$  – Module zur Vorgabe der Umschalt-Geschwindigkeit.

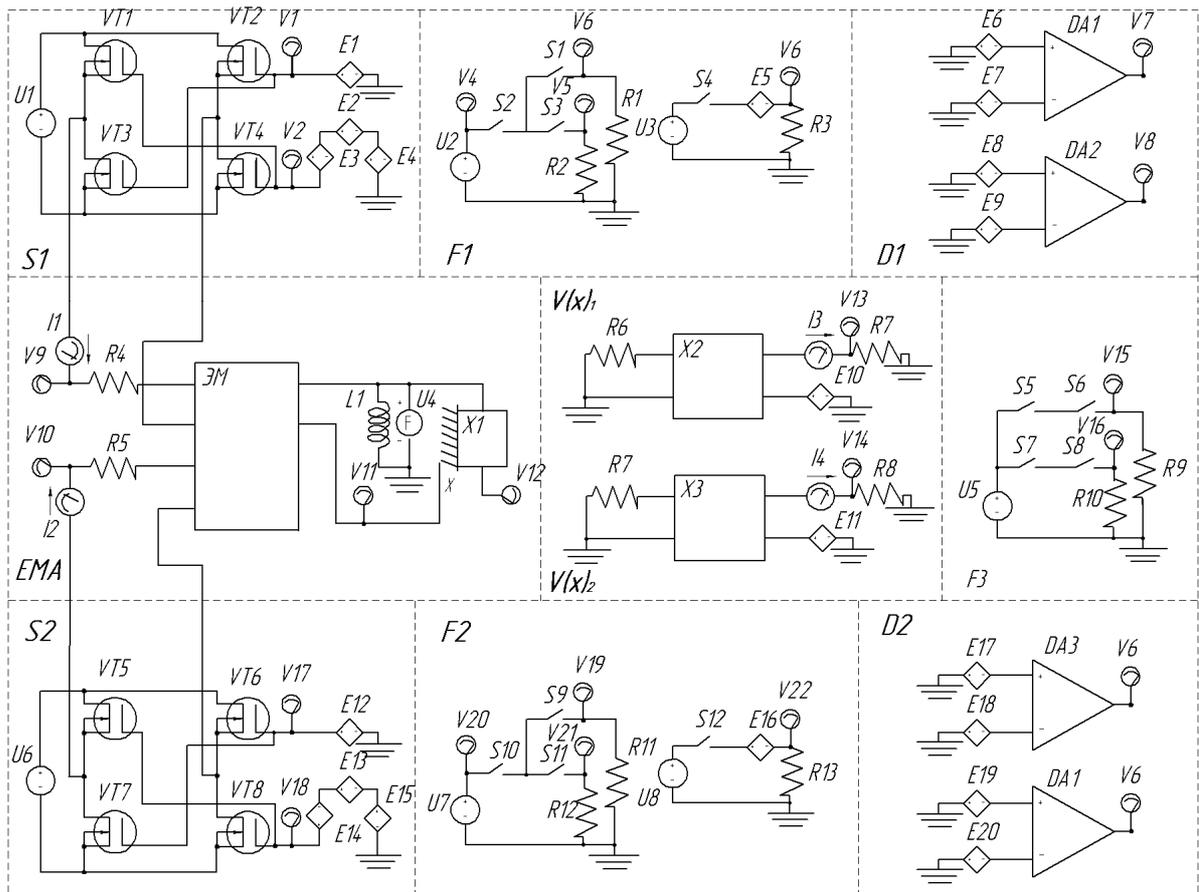


Bild 3 - Struktur des zweiten Modells

Mit dem Modell können die dynamischen Verläufe des elektromagnetischen Aktors mit den Leistungsstellgliedern und der Ansteuerungsschaltung simuliert werden. Das Modell ermöglicht außerdem eine Parametersynthese der Steuersignale, die den geforderten Verlauf der Durchflutung bei der Umschaltung gewährleisten und womit die Anstiegsgeschwindigkeit der Kraft, die Geschwindigkeit des Ankers am Ende des Hubs, die Schaltzeit usw. bestimmt werden können.

Mit der vorgeschlagenen Methodik und den dargestellten Modellen wurden mehrere Aktoren für verschiedene Einsatzgebiete entwickelt. Im Bild 4 werden z.B. zwei Konstruktionen der EMA für den Gaswechselventil (a) und den Lufttaktventil (b) eines Verbrennungsmotors dargestellt.

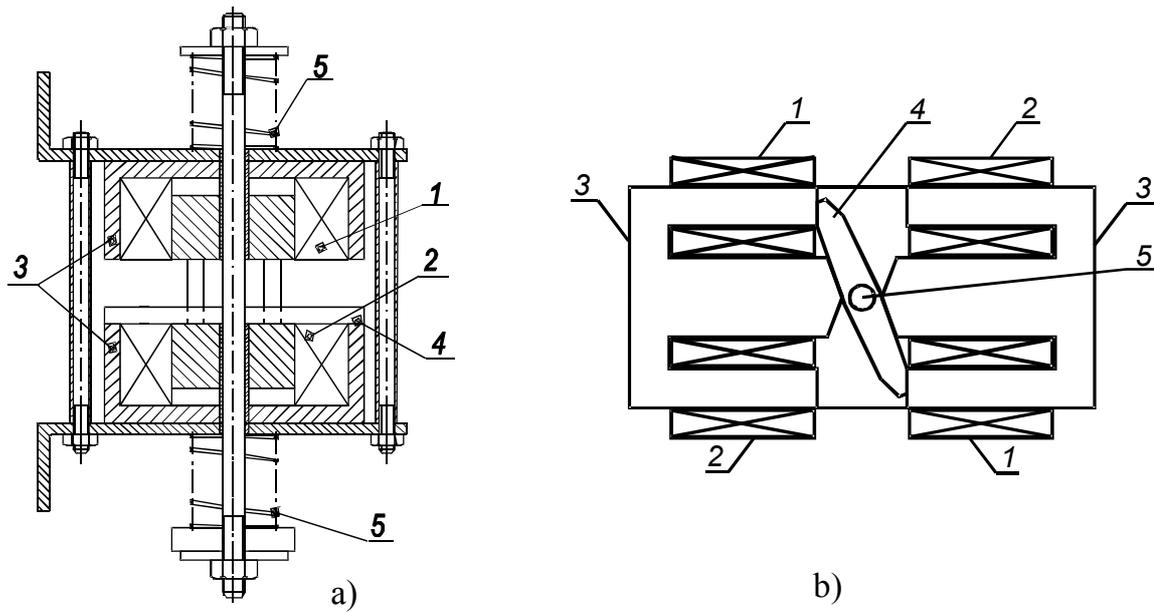


Bild 4 - Konfiguration der magnetischen EMA: a) Topfmagnet; b) E - Magnet:  
 1, 2 - Steuerungswicklungen, 3 - Joch, 4 - Anker, 5 - Feder

Die Simulationsergebnisse für den elektromagnetischen Antrieb mit dem Topfmagneten werden im Bild 5 dargestellt. Bei der Umschaltung findet eine sanfte Abbremsung des Ankers am Ende des Hubs statt (Bild 5), das die Richtigkeit der durchgeführten Synthese der Steuerimpulse unter Beweis stellt. Es ist offensichtlich, dass die Einschwingung mit drei Steuerimpulsen erreicht werden kann.

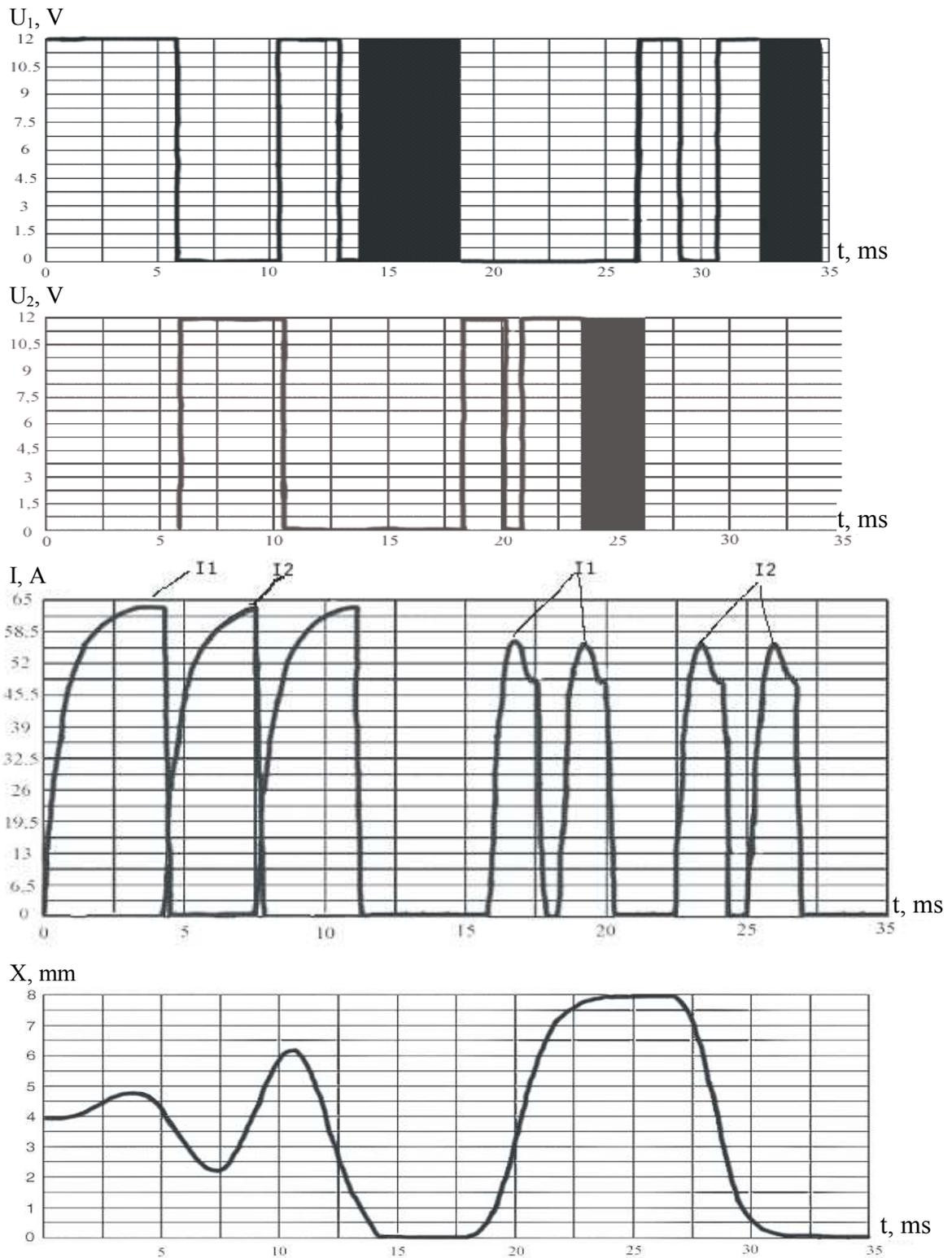


Bild 5 - Berechnete Verläufe der Steuerspannungen  $U_1$ ,  $U_2$ , der Ströme  $I_1$ ,  $I_2$  in den Wicklungen und der Position des Ankers  $X$

Ergebnisse der Simulation der EMA mit E-Magneten sind im Bild 6 dargestellt.

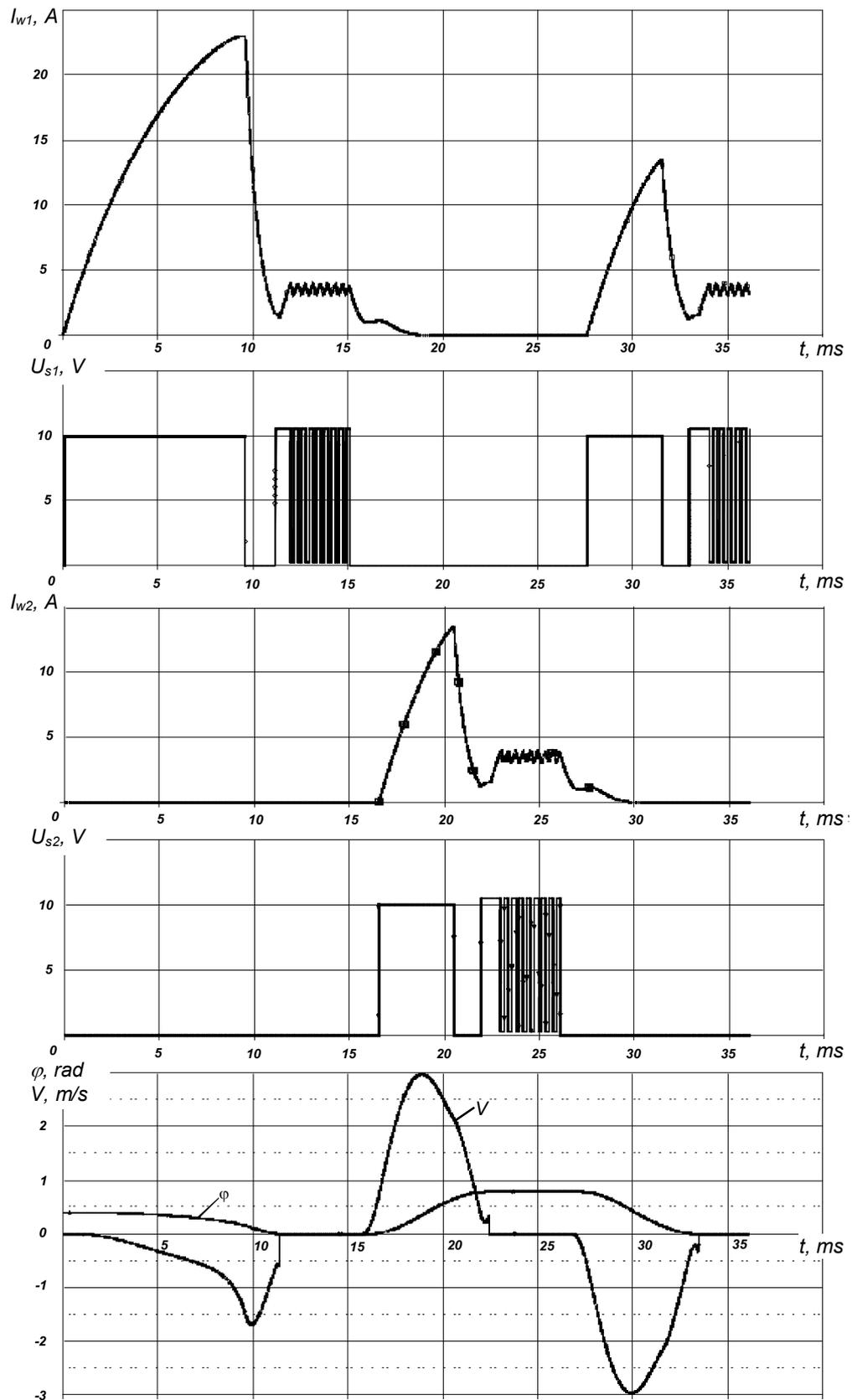
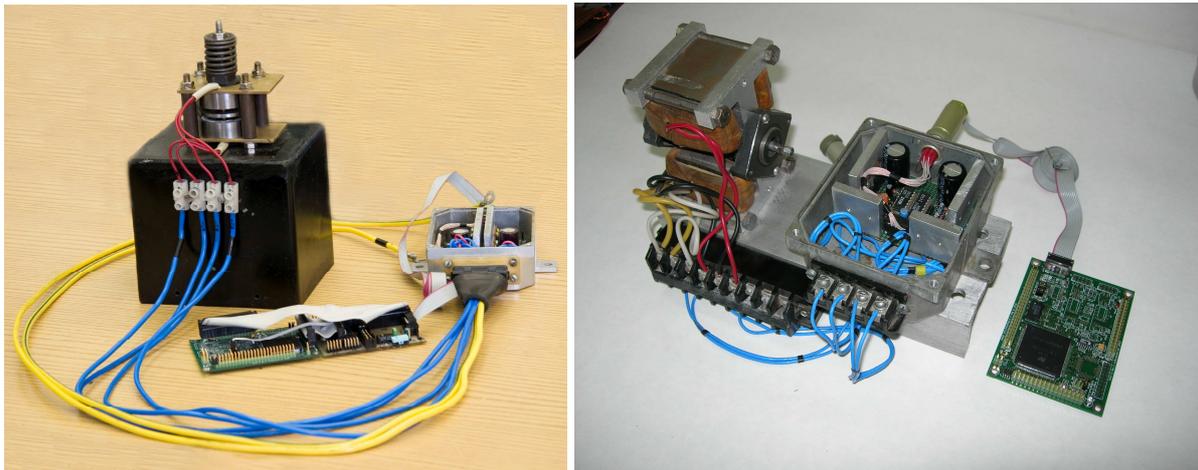


Bild 6 - Diagramme der Steuersignale  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$ , des Stroms in den Wicklungen  $I_{w1}$ ,  $I_{w2}$ , des Drehwinkels  $\varphi$  und der linearen Geschwindigkeit der Ankerbewegung  $V$  für den Antrieb mit E-Magneten

Die im Bild 6 dargestellten Simulationsergebnisse für den Drehmagnet zeigen eine gute Übereinstimmung der berechneten dynamischen Kennwerten des Aktors mit vorgegebenen Werten der Schaltzeit und der Ankergeschwindigkeit am Ende des Hubs.

Als Ergebnis der Entwurfs wurden Muster der elektromagnetischen Aktoren des Gaswechselventils (Bild 7a) und des Lufttaktventils (Bild 7b) gefertigt.



a)

b)

Bild 7 - Aufgebaute Versuchsmuster der EMA des Gaswechselventils (a) und des Lufttaktventils (b) für Verbrennungsmotoren

Die entsprechenden dynamischen Verläufe für die aufgebauten Muster sind in den Bildern 8 und 9 dargestellt. Es ist z.B. im Diagramm der Ankerbewegung (Bild 8) sichtbar, dass während des Schaltvorgangs das Steuerungssystem den vorgegebenen Stromverlauf in der Wicklung erzeugt, wodurch der Anker am Ende des Hubs sanft an den Pol ankommt und zum Pol angezogen wird. Außerdem sichern die Fang-Impulse am Ende des Hubs die vorgegebene Endgeschwindigkeit. Das Einschwing-Diagramm der Ankerbewegung bis zum Anschlag stimmt gut mit den im Bild 5 dargestellten Simulationsergebnissen überein.

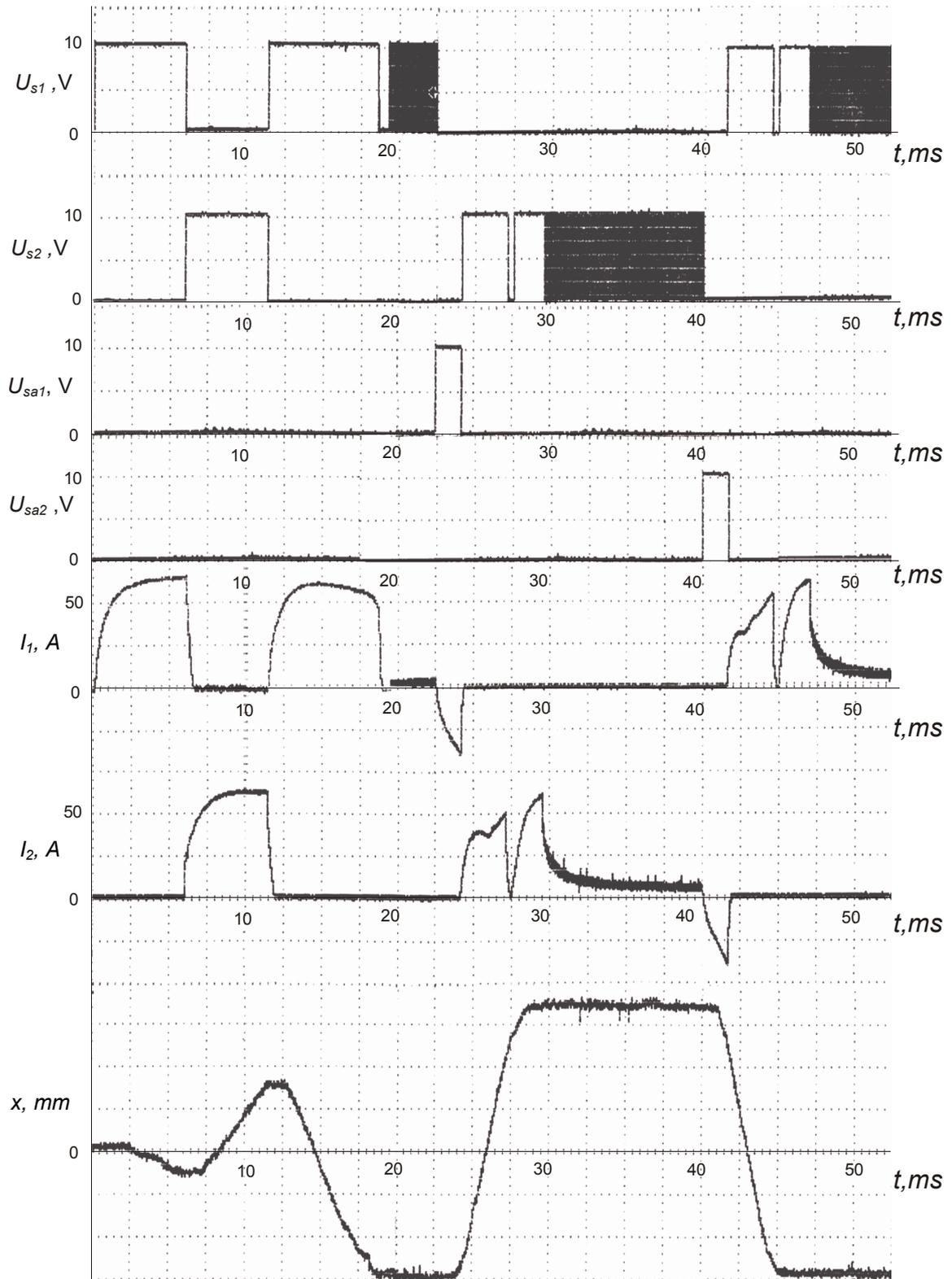


Bild 8 - Gemessene Signalverläufe des Aktors für das Gaswechselventil

( $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$  - Steuerimpulse in den entsprechenden Spulen des Elektromagneten;  $U_{s,a1}$ ,  $U_{s,a2}$  - Abfall-Steuerimpulse an den entsprechenden Spulen;  $I_1$ ,  $I_2$  - Ströme in den entsprechenden Spulen des Elektromagneten;  $X$  - Hub des Ankers)

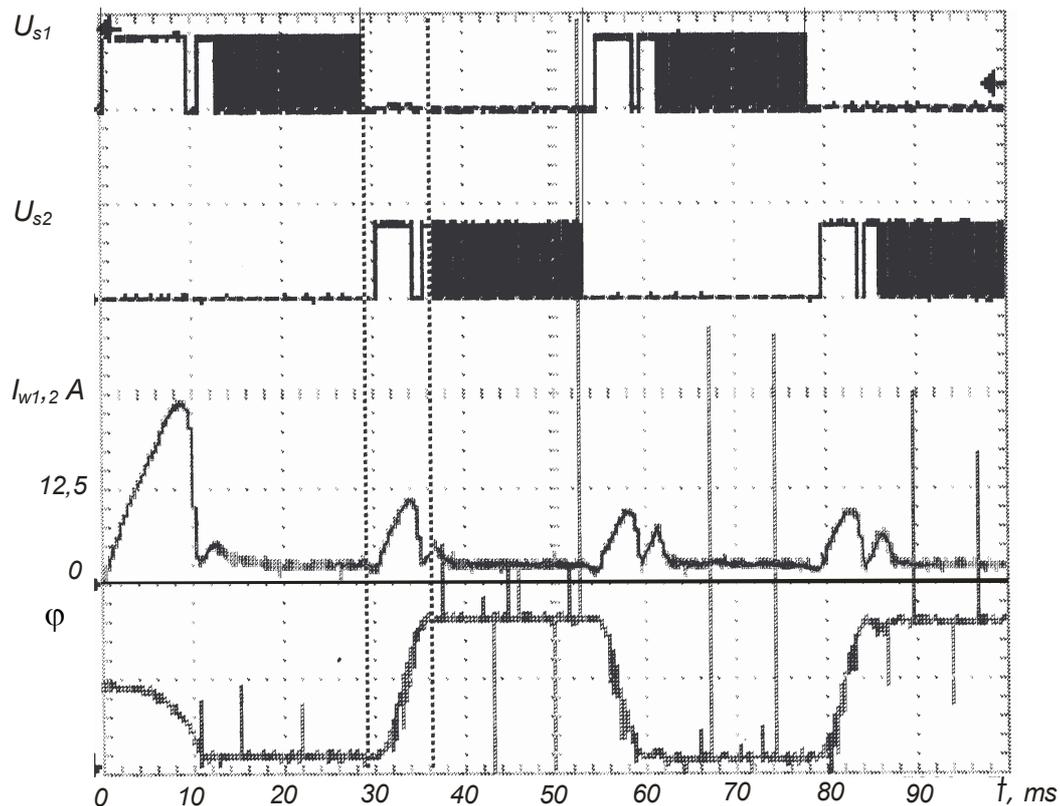


Bild 9 - Gemessene Signalverläufe des Aktors für das Lufttaktventil

( $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$  – Steuerimpulse;  $I_{w1}$ ,  $I_{w2}$  – Wicklungsströme;  $\varphi$  – Drehwinkel des Ankers)

Die im Bild 9 dargestellten dynamischen Verläufe zeigen eine gute Übereinstimmung mit den entsprechenden simulierten Spannungs-, Strom- und Positionsverläufen. Es ist keine Einschwingung für die Positionierung des Ankers bis zum Anschlag erforderlich.

#### Literatur- bzw. Quellenhinweise

- [1] Elsäßer, A.; Schilling, W.; Schmidt, J.; Kallenbach, E.; Beyer, F.: Schnelle magnetische Aktoren für die Impulsaufladung von Hubkolbenmotoren. 47. IWK Ilmenau, 23-26.9. 2002.
- [2] Belyaev, N.; Grinchenkov, V.; Kallenbach, E.; Pavlenko, A.: Entwurf schnellwirkender elektromagnetischer Aktoren nach dynamischen Kriterien. 47. IWK Ilmenau, 23-26.9. 2002.
- [3] Pavlenko A.V., Grinchenkov V.P., Belyaev N.P., Gummel' A.A.: Analyse und Synthese schnellwirkender elektromagnetischer Antriebe in mechatronischen Systemen. Izv. vuzov. Sev. - Kavk. region. Techn. nauki. - 2003. - Spezvip. Problemy Mehatroniki - 2003. - S. 21-24, in russisch.
- [4] C. Tai, A. Stubbs, T.C. Tsao Modeling and Controller Design of an Electromagnetic Engine Valve. Proceedings of American Control Conference June 2001, pp. 2890-2895.
- [5] Pavlenko, A.; Grinchenkov, V.; Beljaev, N.; Gummel, A.; Kallenbach, E.: Projektierung elektromagnetischer Aktoren mit wechselsinniger Ankerbewegung. 40. IWK Ilmenau 23.-26. 9. 2004

#### Autorenangaben

Prof. Dr. sc. techn. A.Pavlenko, Dr.-Ing. W. Grintschenkov, Dipl.-Ing. N. Beljaev, Dipl.-Ing. A.Gummel, Dipl.-Ing. D. Batishchev: SRSTU(NPI), ul. Prosveschenija 132, 346428 Novotscherkassk, Rostower Gebiet, Russland  
 Prof. Dr.-Ing. habil. E. Kallenbach: Steinbeis Transferzentrum Mechatronik Ilmenau, Ehrenbergstr. 11  
 98693 Ilmenau  
 Tel.: +49 (0)3677 66 85 00  
 Fax: +49 (0)3677 66 85 01