

Simulation mechatronischer Systeme im Schaltungssimulator

Demonstrator: Festplatte

Dirk Dammers¹, Georg Pelz², Lars Voßkämper¹

1) Dolphin Integration GmbH
Bismarckstr. 142a, D – 47057 Duisburg
mems@dolphin-integration.com

2) Infineon Technologies AG
St.-Martin Str. 76, D-81541 München
Georg.Pelz@infineon.com

Kurzfassung

Eine Entwicklungskosten reduzierende Simulation kompletter mechatronischer Systeme gewinnt mehr und mehr an Bedeutung. Die Beschreibung des mechanischen Verhaltens zusammen mit dem elektrischen und elektronischen Verhalten in einem Simulator umgeht fehleranfällige Simulatorkopplungen. Zur Modellierung von Systemen mit unterschiedlichen Domänen und analogen und digitalen Signalen eignet sich die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS hervorragend. Die Erstellung einer Modellbibliothek von grundlegenden physikalischen Effekten, die innerhalb mechatronischer Systeme vorkommen, läßt eine schnelle Systemmodellierung zu. Als Beispiel für die Modellierung und der guten Wiederverwendbarkeit solch einer Modellbibliothek soll die Simulation eines Festplattenantriebes und der Bewegung des Festplattenarms einer Computer-Festplatte beim "Spurwechsel" dienen.

Einleitung

Die Simulation kompletter elektronischer Systeme hat bereits ihren festen Platz im Designprozeß eingenommen. Wünschenswert ist die Simulation kompletter Systeme, d.h. die Elektronik mit der angeschlossenen Peripherie, wie z.B. Sensoren und Aktuatoren. So können sowohl die Testanzahl an teuren Prototypen, als auch die Zeit vom Entwurf bis hin zum fertigen Produkt minimiert werden.

Des weiteren sind Simulationen mit gekoppelten Simulatoren, die jeweils nur innerhalb einer Domäne arbeiten, anfälliger für Fehler, da sie zwecks Datenaustausches, aufgrund der Interaktion zwischen den verschiedenen Domänen, synchronisiert werden müssen. Es ist also sinnvoll einen Simulator einzusetzen, der in der Lage ist, den gesamten Simulationsbereich abzudecken. Ein solcher Simulator ist der Simulator SMASHTM der Firma Dolphin Integration, der neben den Hardware-Beschreibungssprachen ABCD, C, SPICE und Verilog-HDL auch VHDL und VHDL-AMS unterstützt.

Für "mechatronische" Simulationen bietet sich die Hardware-Beschreibungssprache VHDL-AMS (Very high speed integrated circuit Hardware Description Language – Analog and Mixed Signal) an, mit der sich nicht nur zeitdiskrete Systeme modellieren und simulieren lassen, sondern auch Systeme mit zeitkontinuierlichen Eigenschaften, wie z.B. Schaltungen mit gemischten logisch- analogen Signalen (ADC, DAC, PLL), Systeme unterschiedlicher

Domänen (MEMS, MOEMS, MST, μ Lab), analoge Verhaltensbeschreibungen und Testumgebungen.

Das hier vorliegende Beispiel der Simulation eines Festplattenlaufwerkes beruht auf der Modellierung grundlegender physikalischer Effekte, die in oder zwischen den einzelnen Komponenten auftreten. Der Vorteil dieser Modellierungsart liegt, neben Wiederverwendbarkeit bereits modellierter und validierter Effektmodelle, darin, daß der Designer entscheiden kann ob er bestimmte Effekte berücksichtigt oder nicht, so kann er auch Einfluß auf die Simulationsgeschwindigkeit und -genauigkeit nehmen.

Elektromechanische Komponenten eines Festplattenlaufwerkes

Die elektromechanischen Komponenten eines Festplattenlaufwerkes sind in Abbildung 1 dargestellt. Der Festplattenantriebsmotor (Spindle Motor) wird benötigt, um die Datenplatten (Disks) in einer konstanten Geschwindigkeit rotieren zu lassen. Der Armantrieb (Voice-Coil Motor) bewegt die Arme (Loadbeam) mit den Schreib-/Leseköpfen (RW-Head) um Daten auf der angewiesenen Spur zu schreiben oder zu lesen.

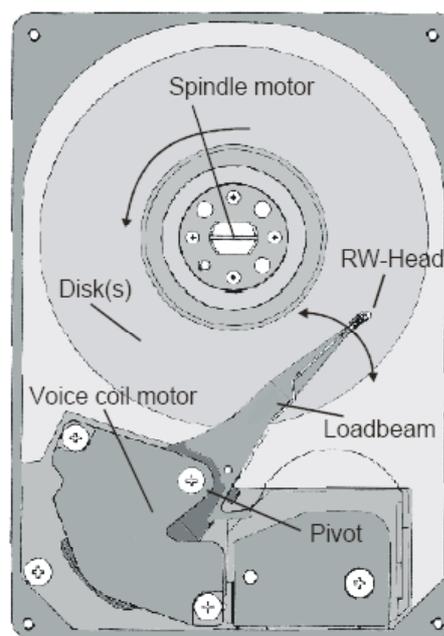


Abbildung 1: elektromechanische Komponenten eines Festplattenlaufwerkes

Identifizierung der physikalischen Effekte

Folgende physikalische Effekte wurden in den Komponenten identifiziert und deren Modellgleichungen in VHDL-AMS implementiert.

Als Beispiel für die Modellierung der mechanischen Domäne dienen die Datenplatten und die Arme mit den Schreib-Leseköpfen. Das Verhalten der Datenplatten und der Arme kann mit den unten aufgeführten Effekten hinreichend genau beschrieben werden:

- Massenträgheitsmoment
- Dämpfung beweglicher Strukturen im Medium
- Reibungsverluste, z.B. Lagerreibung

Der Festplattenantriebsmotor ist ein gutes Beispiel für eine komplexere mechatronische Komponente. Bei diesem Motor handelt es sich um einen bürstenlosen Gleichstrommotor mit Permanentmagneten am Rotor. Die Spulen des Motors sind um den Stator in den Nuten angeordnet. Abbildung 2 zeigt den Querschnitt eines solchen Motors ohne Statorwicklungen.

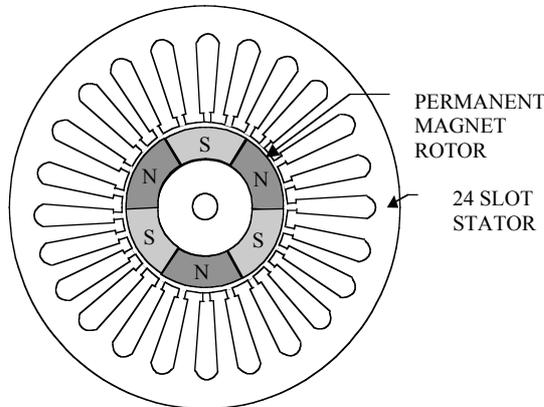


Abbildung 2: Schema eines bürstenlosen Permanentmagnetgleichstrommotors

Der die Statorwicklungen durchfließende elektrische Strom erzeugt die magnetischen Pole, die mit dem Magnetfeld der Permanentmagnete des Rotors das Antriebsmoment erzeugen. Mit Hilfe einer gezielt gesteuerten Bestromung der Statorwicklungen wird ein konstant drehendes Ständerfeld erzeugt, das den Läufer in eine konstante Rotation versetzt.

Die folgenden elektrischen Effekte wurden für das Modell des mechatronischen Systems berücksichtigt:

- elektrischer Widerstand in Wicklungen
- Kapazität zwischen Spulen und Stator
- Induktivität der Statorwicklungen
- Gegenseitige Induktion benachbarter Induktivitäten

Die mechanischen Effekte:

- Massenträgheitsmoment des Rotors
- Dämpfung beweglicher Strukturen im Medium
- Reibungsverluste, z.B. Lagerreibung
- Wirbelstromverluste

Bereits jetzt zeigen sich die Vorteile einer Effektbibliothek, da die Modelle der Massenträgheit, der Dämpfung und der Reibung, die zuvor für Arm und Datenplatte eingesetzt wurden, wiederverwendet werden können.

Die elektromagnetischen Effekte:

- Gegeninduktion des rotierenden Läuferfeldes in die Ständerwicklungen

Die elektromechanischen Effekte:

- Das Antriebsmoment des elektromagnetischen Feldes
- Das Gegenmoment zwischen Stator und Rotor

Im Gegensatz zu dem Festplattenantriebsmotor besteht der Stator des Armantriebsmotors aus einem Permanentmagneten, wo hingegen der Rotor die Spule trägt. Abbildung 3 zeigt die Struktur eines Armantriebsmotors mit Arm und Schreib-/Lesekopf.

Aufgrund der Bauform ist der Bewegungsbereich eines solchen Motors auf 20°-40° beschränkt.

Auch hier läßt sich wieder ein Teil der zuvor genannten Modelle für den Armantrieb - unter Verwendung anderer Parameter - wiederverwenden.

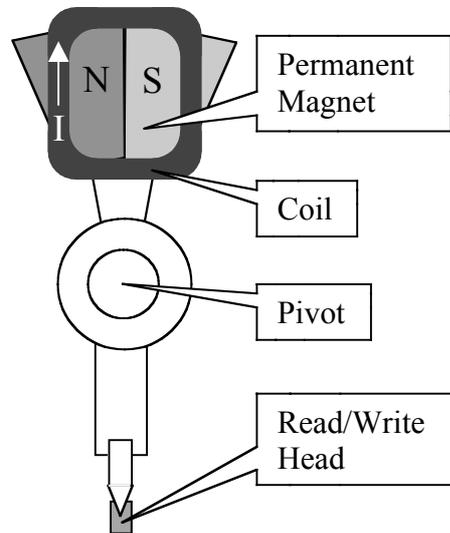


Abbildung 3: Schema des Voice-Coil-Motors

Die folgenden elektrischen Effekte wurden für das Modell des mechatronischen Systems berücksichtigt:

- elektrischer Widerstand in Wicklungen
- Induktivität der Statorwicklung

Die mechanischen Effekte:

- Massenträgheitsmoment des Rotors
- Dämpfung beweglicher Strukturen im Medium
- Reibungsverluste, z.B. Lagerreibung

Die elektromagnetischen Effekte:

- Gegeninduktion des rotierenden Läuferfeldes in die Ständerwicklungen

Die elektromechanischen Effekte:

- Antriebsmoment des elektromagnetischen Feldes

Implementation in VHDL-AMS

In VHDL-AMS sind wir nicht an vorgegebenen Variablen gebunden. Das ist ein Vorteil, da wir Variablentypen nichtelektrischer Domänen, die wir simulieren wollen, implementieren können. VHDL-AMS bietet eine hervorragende Möglichkeit zur Definition von benutzerdefinierten Variablentypen. Tabelle 1 zeigt die Definitionen der Fluß- und Potentialvariablen, wie sie vom IEEE empfohlen werden und für dieses System hervorragend geeignet sind.

Variablentyp	elektrisches Netzwerk	Rotationsbewegung	Translationsbewegung
"through" Fluß-Variable	Strom i	Drehmoment T	Kraft F
"across" Potential-Variable	Spannung v	Winkel φ	Weg x

Tabelle 1: Variablentypen der implementierten Ports für jede Domäne

Die restriktive Port-Definition garantiert sowohl die Kompatibilität der Effektmodelle untereinander, wenn man sie miteinander verbinden will, als auch eine einfache Erweiterbarkeit der Modellbibliothek.

Ein elektromechanisches Beispiel der Effektimplementation ist in Listing 1 gezeigt, in der die Formel des Antriebsmomentes einer Phase (siehe Gleichung 1) umgesetzt wurde.

$$T_{dn} = C_t \cdot i_{pn} \cdot \sin(A \cdot \Theta - (N - 1) \cdot \frac{2\pi}{P})$$

Gleichung 1: Antriebsmoment

- A : Anzahl der Polpaare des Rotors
- C_t : Drehmomentkonstante
- i_{pn} : Phasenstrom
- N : Phasennummer
- P : Anzahl der Phasen
- S : Winkelgeschwindigkeit des Rotors
- T_{dn} : erzeugtes Antriebsmoment der Phase
- θ : Rotorwinkel

```

LIBRARY IEEE;
USE IEEE.MATH_REAL.ALL;
USE IEEE.ELECTRICAL_SYSTEMS.ALL;
USE IEEE.MECHANICAL_SYSTEMS.ALL;

ENTITY drive_torque IS
  GENERIC (Ct      : REAL := 3.0e-3;
           A       : REAL := 2.0;
           N       : REAL := 1.0;
           P       : REAL := 3.0;
           theta0  : REAL := 0.0);
  PORT (TERMINAL elec_p,
        elec_n: ELECTRICAL;
        TERMINAL rot_p,
        rot_n: ROTATIONAL);
END ENTITY drive_torque;

ARCHITECTURE simple OF drive_torque IS
  QUANTITY upn ACROSS ipn THROUGH elec_p TO
  elec_n;
  QUANTITY theta ACROSS Tdn THROUGH rot_p TO
  rot_n;
  QUANTITY S: angular_velocity;

BEGIN

  ipn == upn / 1.0e-6;
  Tdn == Ct * ipn * sin(A * theta + theta0 -
  (N - 1.0) * MATH_2_PI / P);
  S == theta'DOT;

END ARCHITECTURE simple;

```

Listing 1: Implementation des Antriebsmomentes in VHDL-AMS

Modellierung des Systems

Zur Modellbildung der Motoren müssen die vorliegenden, in VHDL-AMS implementierten Modelle, miteinander verbunden werden. Aufgrund der vorher definierten Fluß- und Potentialvariablen sind diese Modelle portkompatibel. Die Erstellung der Netzliste der Motoren kann manuell vorgenommen werden, oder aber auch automatisch mit einem Netzlistengenerator aus einem Schaltplaneditor. Dazu müssen zu jedem VHDL-AMS-Modell Symbole erstellt werden, die dann miteinander im grafischen Editor verschaltet werden können.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 4 die Verschaltung der Modelle des Armantriebsmotors.

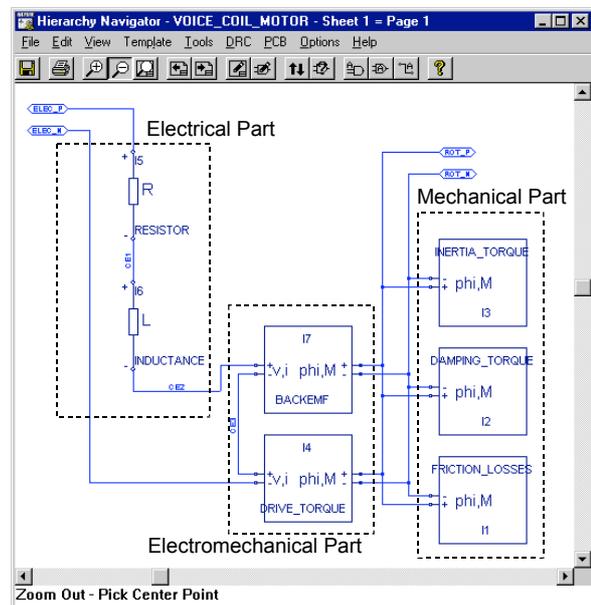


Abbildung 4: Schaltbild des Armantriebsmotors

Simulation

Nachdem die grundlegenden physikalischen Effekte identifiziert, in VHDL-AMS implementiert und miteinander kombiniert wurden, wurde ein einfaches Modell einer Antriebsregelschaltung entwickelt, um das elektromechanische Makrosystem zu vervollständigen.

Die Simulationsergebnisse des Anlauf- und Abschaltverhaltens des Festplattenantriebssystems sind in Abbildung 5 dargestellt. In den ersten 800ms wird die Spannungsversorgung dem Motor zugeschaltet. Danach werden die Schalter der Spannungsversorgung wieder geöffnet. Nach weiteren 100ms werden die Motorklemmen mit Masse verbunden.

Der erste Signalverlauf in Abbildung 5 zeigt die Winkelgeschwindigkeit des Rotors. Der zweite Verlauf das erzeugte Gesamtmoment. Die dritte Reihe stellt die 3 Phasen der Spannungsversorgung dar. Der unregelmäßige Kurvenverlauf des Momentes und der Winkelgeschwindigkeit resultieren aus der sehr einfachen Implementation der rotorwinkelabhängigen Steuerung der Spannungsversorgung.

Abbildung 6 zeigt die Simulationsergebnisse des Armantriebssystems, dessen Aufgabe es ist, die Schreib-Leseköpfe schnell über der angeforderten Festplattenspur zu positionieren. In einer ersten Annäherung wurde dazu der Winkel des Arms, d.h. der Rotorwinkel, in eine Festplattenspurnummer umgerechnet.

Die Simulation beginnt bei $t=0s$ mit Spur 0. Nach 1ms wird Spur 2000 angefordert, die der Schreib-Lesekopf bei $t=6,5ms$ erreicht. Bei $t=7ms$ wird Spur 500 angefordert. Diese wird bei $t=11,5ms$ erreicht.

Abbildung 6 zeigt das erzeugte Moment, die Winkelgeschwindigkeit des Arms, den Verlauf der Spannungsversorgung und die angeforderte, so wie die momentane Spurnummer.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Implementation der mathematischen Gleichungen in die Hardwarebeschreibungssprache VHDL-AMS war aufgrund der flexiblen und vielseitigen Möglichkeiten, die diese Sprache bietet problemlos möglich.

Die restriktive Port-Definition garantiert die Kompatibilität der Modelle untereinander und unterstützt damit die Erstellung einer Bibliothek elektrischer, mechanischer und elektromechanischer Modelle physikalischer Effekte. So werden die spezifischen Anforderungen an die Modellierung elektromechanischer Systeme bezüglich der unterschiedlichen Domänen bestens unterstützt. Mit der Wiederverwendbarkeit validierter Modelle wird die Systemmodellierung und Simulation einfacher, schneller und sicherer.

Die Implementation einer realen Motorsteuerung und Ansteuerlektronik läßt die Simulation des gesamten Festplattensystems zu. Die Entwickler können somit ihre Systeme virtuell testen und optimieren, ohne aufwendige Prototypen zu konstruieren.

In aktuellen Forschungen und Entwicklungen wird ein sogenannter Dual-Stage-Aktuator betrachtet, der dem Festplattenarm ein zusätzliches ansteuerbares Gelenk bietet. Damit können sowohl schnellere Spurwechsel, als auch zukünftig höhere Schreibdichten der Datenplatten erreicht werden. Eine Realisierungsmöglichkeit für Dual-Stage-Aktuatoren basiert beispielsweise auf dem Verfahren spannungsgesteuerter Piezo-Aktuatoren oder elektrostatischer Mikromotoren.

Eine Erweiterung des Armantriebssystems mit einem Modell des Schreib- Lesekopfarmes mit Dual-Stage-Aktuator bietet dem Schaltungsdesigner schon jetzt die Möglichkeit eine adäquate Ansteuerlektronik zu entwickeln.

Literatur

- [1] L. M. Voßkämper, R. Schmid and G. Pelz, "Combining Models of Physical Effects for Describing Complex Electromechanical Devices", IEEE/VIUF Workshop on Behavioral Modeling and Simulation (BMAS), Orlando, Florida, 2000.
- [2] Dammers D., Binet P., Pelz G. and Voßkämper L.M., "Motor Modeling Based on Physical Effect Models", IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation (BMAS), Santa Rosa, California, USA 2001
- [3] Pelz G., "The Virtual Disk Drive - Mixed-domain support for disk electronics over the complete life-cycle", IEEE International Workshop on Behavioral Modeling and Simulation (BMAS), Santa Rosa, California, USA 2001
- [4] J. R. Hendershot jr. and T. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", Magna Physics Publications ISBN 1-881855-03-1
- [5] M. Otter, "Objektorientierte Modellierung Physikalischer Systeme, Teil 1", at - Automatisierungstechnik 47 (1999) 1, R. Oldenbourg Verlag
- [6] P. Buttolo, D.Y. Hwang, P.H. Marbot, B. Hannaford, "Hard Disk Actuators for Mini Teleportation", Proceedings SPIE, Telemanipulator and Telepresence Technologies Symposium, Boston, 1994.
- [7] Pelz G., "Mechatronic Systems: Modelling and Simulation with HDLs", ISBN: 0-470-84979-7

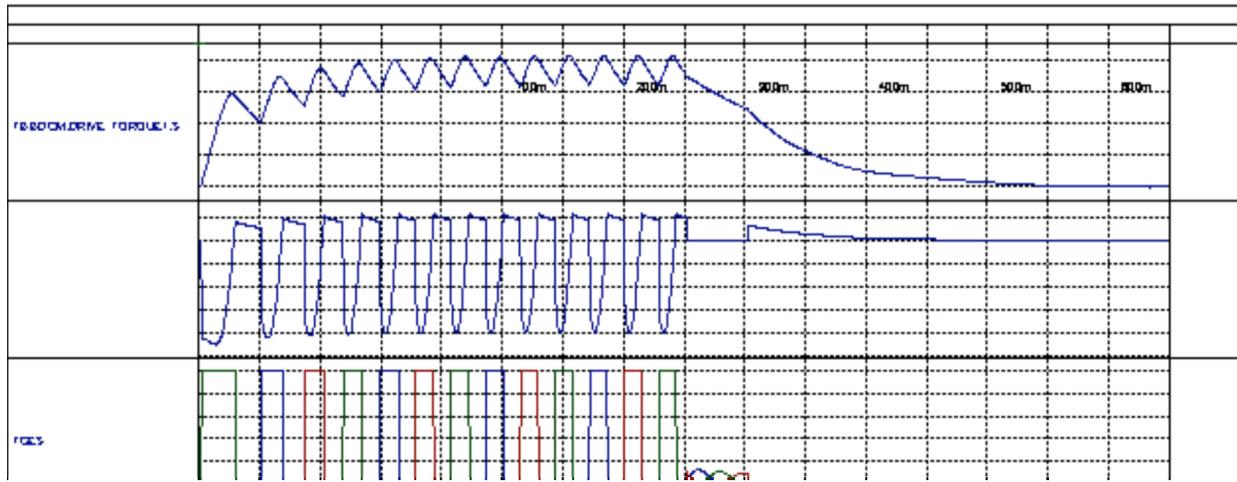


Abbildung 5: Simulation des Festplattenantriebssystems

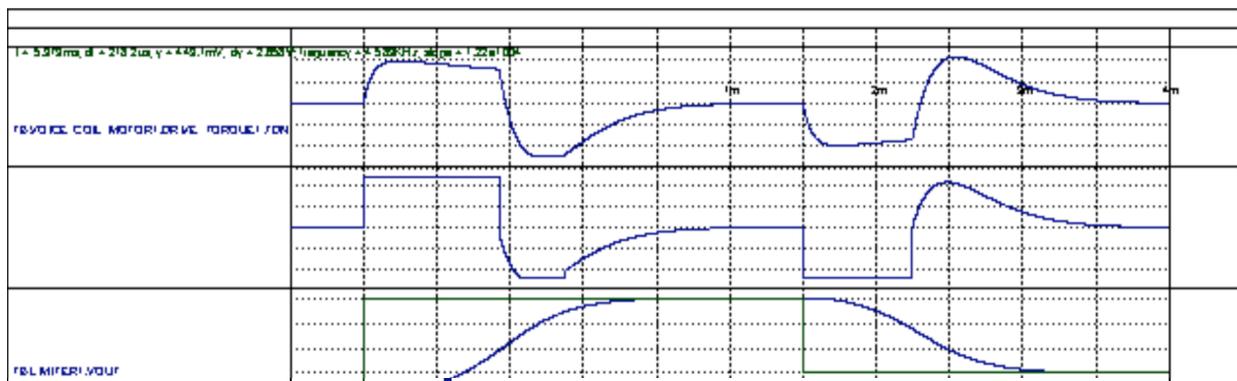


Abbildung 6: Simulation des Armantriebssystems