

HARDWARE IMPLEMENTATION OF ACTIVE MAGNETIC BEARING CONTROL

J. Pulchart^{*}, M. Turek⁺

Summary: The previous research of control methods to control fast nonlinear systems was verified by simulation of control of an active magnetic bearing (AMB). A hardware implementation of control of the AMB is developed to verify the simulation results. Requirements to the implementation are modularity, easy assembling and availability of development tools for used microcontrollers. The hardware implementation of AMB is used to improve the model of AMB for future simulation testing of intelligent control methods.

1. Úvod

Aktivní magnetické ložisko (AML) je rychlý, nestabilní a nelineární systém a proto jeho řízení představuje složitý úkol. Nelinearita soustavy způsobuje obtížné řízení pomocí klasických PID regulátorů odvozených pro lineární systémy. Pro zlepšení kvality regulace je možné využít speciálních robustních metod řízení založených na algoritmech umělé inteligence. Několik těchto metod bylo již simulačně ověřeno v předcházejících pracích (Březina, T., Turek, M., Pulchart, J., 2005; Pulchart, J., Březina, T., Turek. M., 2005). Pro další výzkum je však potřebné tyto algoritmy ověřit na reálném AML a zpřesnit použitý model AML k dalšímu simulačnímu ověřováním robustních metod řízení.

Původní model kompenzoval gravitaci, uvažoval nelinearitu pouze u elektromagnetického subsystému a rotor byl nahrazen hmotným bodem. Snímací systém polohy rotoru byl považován za ideální, tj. bez zpoždění a nelinearit.

Tento článek řeší jeden z možných způsobů hardwarové implementace řízení AML a popisuje rozdíly mezi modelovou simulací a reálným chováním AML. Zabývá se použitým reálným modelem AML, snímači polohy rotoru, akčním a řídícím členem systému řízení. Jejich možným funkčním způsobem propojení s důrazem na jednoduchou implementaci, cenu použitých součástek a snadným vývojem softwaru pro použitý řídící členu.

2. Reálný model řízení AML – regulační schéma

Jak již bylo popsáno v úvodu pro další výzkum robustních metod řízení založených na umělé inteligenci je potřeba vytvořit reálný model řízení AML pro možné ověření těchto metod. Dále je důležité zpřesnění použitého modelu v simulacích.

^{*} Jaroslav Pulchart, Ing., VUT v Brně, FSI ÚAI, Technická 2, 616 69 Brno, ypulch00@stud.fme.vutbr.cz

⁺ Milan Turek, Ing., VUT v Brně, FSI ÚAI, Technická 2, 616 69 Brno, yturek00@stud.fme.vutbr.cz

Pro prvotní oživení reálného řízení AML je použito základní regulační schéma skládající se z několika bloků (popsaných v následujících kapitolách) a celkové principiální regulační schéma je znázorněno na obr.1.

- 1. regulovaného systému aktivní magnetické ložisko,
- 2. *snímacího členu* indukční snímače polohy a přizpůsobovacího obvodu výstupního signálu ze snímače,
- 3. *akčního členu* tranzistorové MOSFET spínače elektromagnetů AML,
- 4. *řídícího členu* regulátor založený na vhodném mikrokontroléru s libovolnou implementací řídícího algoritmu (v tomto článku použit PID regulátor).



Obr. 1: regulační schéma řízení AML.

2.1 Získání charakteristik pro odvození akčního a snímacího členu

Reálný model AML obsahuje čtyři elektromagnety ve dvou osách x, y. Parametry AML jsou uvedeny v tab. 1. Cívky elektromagnetů jsou napájeny hlavním napájecím napětím $u_{1,2,3,4}=48.2 V$, v při plném zapnutí je odběr cívek $i_{1,2,3,4}=0.18 A$. Doba mezi změnou polohy rotoru z jedné krajní polohy do druhé je 31 *ms* (viz. obr. 2).

Tab.	1:	parametry	reálného	modelu	AML
------	----	-----------	----------	--------	-----

Parametr	Popis	Hodnota	Jednotka
m	hmotnost rotoru	200	g
d	vzduchová mezera	$1.4 \cdot 10^{-3}$	m
R	odpor cívek elektromagnetů	266	Ω
L	Indukčnost elektromagnetů	$2.6 \cdot 10^{-3}$	Н

Při takto rychlých změnách polohy rotoru je potřebné, aby snímače dokázaly dostatečně rychle zaznamenat změnu polohy. Pro plný výkon je nutné mít snímače schopné zaznamenáváni polohy minimálně po 0.1 ms. Takovéto snímače jsou bohužel velmi drahé a obtížně sehnatelné. Pro naše ověření metod řízení (i jejich odolnosti na nepřesnosti a zpoždění) není nutné mít takto rychlé snímače. Postačují snímače s rychlosti snímání kolem 1 ms. Je však nutné pracovat při nižších napětí na cívkách elektromagnetů (nižší tuhost), kde je změna polohy rotoru pomalejší a počítat s problémy v blízkosti elektromagnetů (výrazně větší síly a tudíž i větší zrychlení).



Obr. 2: Poloha rotoru v čase při přepnutí elektromagnetů v jedné ose zatížené gravitační silou F_g

Akční člen musí být schopný regulace napětí na cívkách (a tím ovlivňovat procházející proud elektromagnety) v takové rychlosti, aby se požadovaná elektromagnetická síla projevila v co nejkratším okamžiku. Z obr.2 lze usoudit, že tuto změnu můžeme provádět alespoň 100 krát rychleji než je max. doba náběhu, tedy například jednou za 0.3 *ms*. Tato frekvence není pro spínací obvody problém a lze dosáhnout i řádově rychlejšího spínání bez použití speciálních obvodů.

3. Snímací člen

Snímací člen je složen ze snímačů polohy a přizpůsobovacím obvodem pro regulátor. Zvoleny jsou indukční snímače polohy s lineární výstupní charakteristikou firmy Baumer elektric IWRM08I9501/S35 (Baumer elektric, 2003) (výběr z technického popisu je v tab.2). Výstupní veličinou je proud v rozsahu 0..10*mA*.

Tech. data	hodnota	Tech. data	hodnota	
rozlišení 5 <i>mAl i</i>		odstup signálu/šum	86 <i>db</i>	
chyba linearity	5 %	konverze	420 <i>mA</i> -05V	
rozsah výstupního signál	0-10 <i>mA</i>	vnitřní napěťová	10 V	
opakovatelnost	±0.01 mm	reference		
nanáiení	15 - 30V	napájení	±15 V	
max. zátěžový rezistor na výstupu pro 15V	900 Ω	vnitřní snímací odpory	$75 \pm 0.75 \Omega$	

Tab. 2: Technická specifikace indukčního)
snímače polohy IWRM08I9501/S35.	

Tab. 3: Výběr z	parametrů	obvodu	RCV420.
-----------------	-----------	--------	---------

Z technických parametrů indukčního snímače lze odvodit (zvlnění výstupního signálu, hystereze) maximální rozlišitelnost (na měřeném rozsahu $x, y \in \langle 0, 1.4 \rangle mm$) na cca. 200 hodnot. Pro zvýšení přesnosti měřené veličiny (odstranění systematických chyb, nelinearity, teplotní závislosti) je použito *diferenciální zapojení* dvou indukčních snímačů (obr.3).

Pro další zpracování regulátorem (mikrokontrolérem) je potřeba převést proud na napětí pro následující digitalizaci AD převodníkem. Jako univerzální řešení je převést tento proudový rozsah na napětí o rozsahu u_x , $u_y \in \langle 0,5 \rangle V$. Pro převod je použit převodník od Burn-Brown RCV420 (Burr-Brown Corporation, 1997) (viz. tab.3).

Konverzní obvod RCV420 má univerzální použití a lze jej snadno modifikovat. Klasické zapojení (bez diferenciálního propojení snímačů) je schopné využít pouze výstupní rozsah $u_x, u_y \in \langle 0, 2.5 \rangle V$ pro $i_x, i_y \in \langle 0, 10 \rangle mA$. Lze však snadným způsobem zapojení modifikovat pro diferenciální propojení snímačů (viz obr.3, kde jsou využity vstupy IN+ a IN-) a tak získat rozsah výstupního napětí od $u_x, u_y \in \langle -2.5, 2.5 \rangle V$. Toto napětí je potřeba posunou do kladných hodnot $u_x = u_x + 2.5 V$ (platí i pro osu y). K čemuž je využita vnitřní napěťová reference 10 V a přes odporový napěťoví dělič (R4, R3) lze získat přesných 2.5 V. Důležité je odebírat minimální proud z odporového děliče napětí, čehož je docíleno použitím operačního zesilovače (OZ) OPA237 (zapojený jako sledovač) s vysokým vstupním odporem, který zaručí zanedbatelný proudový oděr. Výstupní napětí z OZ je využito pro posunutí výstupního napětí obvodu RCV420 na $u_x, u_y \in \langle 0, 5 \rangle V$ a tím i dvojnásobnou přesnost (rozlišitelnost cca. 400 poloh).



Obr. 3: Schéma zapojení RCV420. Obr. 4: PCB převodníku proud-napětí.



Obr. 5: Reálný model AML s diferenciálním zapojením senzorů polohy rotoru.

4. Implementace akčního členu

Akční člen se stará o provedení akčního zásahu z regulátoru. V případě řízení AML se stará o přivedení požadovaného napětí na cívky elektromagnetů. Pro co nejsnazší implementaci, ověření funkčnosti zapojení a množstvím použitích součástek se jedná o jednoduchý spínací prvek složený z

- 1. galvanického oddělení regulátoru s výkonovou částí AML (optočlen 6N137)
- 2. spínacího prvku elektromagnetů (MOSFET tranzistor IRF9540B).

Jelikož změna polohy rotoru AML nenastává okamžitě (setrvačnost) lze, místo plynulé regulace napětí na cívkách elektromagnetů, použít pulsně šířkovou modulaci (PWM), k docílení stejného efektu jako by se jednalo o plynulou regulaci napětí. S tím rozdílem, že se uplatňuje efektivní hodnota napětí. Proto je tento obvod velmi jednoduchý a umožňuje pouze dva stavy a to sepnuto-vypnuto. Má to však některé nevýhody:

- je potřeba vyšších frekvencí spínání z důvodu malé setrvačnosti rotoru a odstranění tím způsobených vibrací,
- 2. dochází k zpětným proudovým nárazům indukovaných v cívkách elektromagnetů.

Odstranění první nevýhody není náročné – (jak bylo v bodu 2.1 uváděno) pro řízení postačuje provádět změnu napětí na cívkách elektromagnetů alespoň frekvencí 3.3 kHz, lze tuto frekvenci zvednout například o řád na 33 kHz. Navržený spínací obvod (viz. obr.6) je schopen kvalitního spínání do 50 kHz. Výsledná použitá frekvence PWM je závislá na použité implementaci regulátoru a jeho hodinovém kmitočtu. Druhá nevýhoda je odstraněna odvedením zpětného proudového nárazu přes rychlou schotkyho diodu zpět do zdroje mimo spínací tranzistor.





Obr. 6: Schéma spínacího obvodu a jeho PCB.



Obr. 7: Osazené PCB spínače.



Obr. 8: Akční člen pro spínání elektromagnetů AML.

5. Implementace řídícího členu

Řídící člen je implementován mikrokontrolérem od firmy Atmel ATMega64. Tento obvod byl vybrán pro svoji snadnou dostupnost, dostupnost vývojových nástrojů (gcc, winavr, iccavr, avrstudio) a snadnou výrobou programovacích a ladících obvodů (JTAG, ISP).

ATMega64 (Atmel Corporation, 2005) patří do rodiny 8b. RISC mikrokontrolérů založených na jádře AVR. Jádro AVR je schopné provést až jednu instrukci v jednom hodinovém taktu, tedy na frekvenci 20 *MHz* dosahuje výkonu až 20 *MIPS*. Její 4kB vnitřní RAM paměti pro data programu a 64kB FLASH pro program je dostačujících pro jednoduché algoritmy, jako je PID regulátor (8% využití vnitřních pamětí) i pro metodu CARLA (Březina, T., Turek, M., Pulchart, J.) (15% paměti programu a 50% paměti dat).

Následující periférie jsou potřebné pro řízení AML, a musí je obsahovat libovolná implementace regulátoru. Je samozřejmě možné použít externí obvody:

- 1. Dva 10 bitové AD převodníky (mohou být multiplexované) pro získání polohy rotoru v osách x, y. Přesnost AD převodníku závisí na přesnosti použitých snímačů a přizpůsobovacího obvodu, 10b. dostačuje k rozlišení $2^{10}=1024$ hodnot z převáděného vstupního napěťového rozsahu $u_{vstupni} \in \langle 0, 5 \rangle V$. ATMega64 je schopna, pro frekvenci externího krystalu 20 *MHz*, se zachováním přesnosti 10b., konverze analogového signálu na číslo za 0.083 *ms*.
- 2. Čtyři samostatné 8 bitové PWM kanály pro regulaci napětí na jednotlivých cívkách elektromagnetů AML (256 možných úrovní napětí). 8 bitové PWM je zvoleno z důvodů použitého mikrokontroléru jehož vnitřní datová sběrnice je 8 bitová a tedy přenos mezi AVR jádrem a PWM modulem probíhá nejrychleji.
- 3. Univerzální synchronní/asynchronní sériová linka (USART) využita pro jednoduchou komunikaci s hlavním počítačem pomocí rozhraní RS232.

Je možné též využít dalších vlastností/modulů použitého mikrokontroléru:

- 4. Dva 8bitové I/O porty, jeden pro nastavování vnitřních parametrů regulátoru a druhý pro rychlou indikaci stavů regulátoru pomocí LED diod, nebo LCD panelu.
- 5. Obsahuje-li mikrokontrolér CAN2/USB sběrnici je možné ji využít pro rychlejší komunikaci s nadřízeným počítačem.



Obr. 9: Schéma zapojení universální desky ATMega64.

6

Použitý mikrokontrolér ATMega64 není bohužel vhodný pro náročnější realtime řídící aplikace. Například použití aproximačních metod založených na lokálně váženém učení k řízení rychlých soustav (jako je řízení AML, zde již je výkon AVR jádra nedostatečný). Např. výpočet exponenciální funkce s reálným číslem o přesnosti 4B trvá AVR jádru na 20 *MHz* celých 0.35 *ms*.



Obr. 10: PCB universální desky s mikrokontrolérem ATMega64

Je-li nutné implementovat řídící algoritmus, který je paměťově i časově náročný (výpočty s plovoucí desetinou čárkou) je potřeba využít jiný mikrokontrolér či digitální signálový procesor (DSP). Jako vhodná varianta může být 16b. mikrokontrolér od firmy Freescale MC9S12XD512, který obsahuje 32kB RAM pro data a 512kB FLASH pro program.

6. Vývojové nástroje pro mikrokontroléry na jádře AVR

Mikrokontroléry rodiny AVR mají velmi velkou základnu uživatelů i podporu třetích stran (výrobců). Lze tedy snadno získat potřebnou dokumentaci a vývojové nástroje.

Pro programování mikrokontrolérů AVR lze použít zapojení ISP (In-System Programmer), jehož výroba je velmi snadná i cenově nenáročná. Nebo využít obvodu JTAG, což je univerzální, otevřené, standardizované rozhraní pro komunikaci mezi řídícím počítačem a mikrokontrolérem (umožňuje i ladění programu online). S těmito obvody umí komunikovat většina softwaru pro vývoj na platformě AVR.

Pro vývoj je možné využít programovacího jazyka C a assembleru. Jako výborný překladač jazyka C pro AVR je volně dostupný balík z GNU kolekce *GCC* a k němu dodávané knihovny usnadňující vývoj *lib-avr*.

Editor jazyka C a assembleru je možné použít lib. textový editor. V operačním systému MS Windows lze použít *Programes Notepad*, který je součástí balíku *WinAVR* (obsahuje též překladač GCC, lib-avr, dokumentaci a software pro programování AVR pomocí ISP a JTAG). Pro operační systém Linux jsou k dispozici stejné vývojové nástroje.

Existuje též integrované vývojové prostředí (IDE) přímo od firmy Atmel AVRStudio volně dostupné k použití. Umožňující spouštění a ladění vytvořeného programu v simulovaném prostředí zvoleného mikrokontroléru.

7. Použitý PID regulátor

Pro prvotní otestování funkčnosti vytvořených členů regulace AML je naprogramován PID regulátor pro každou z os (1).

$$u_{x} = K_{p} \cdot e_{x} + K_{d} \cdot \frac{\Delta e_{x}}{\Delta t} + K_{i} \cdot \sum e_{x},$$

$$u_{y} = K_{p} \cdot e_{y} + K_{d} \cdot \frac{\Delta e_{y}}{\Delta t} + K_{i} \cdot \sum e_{y},$$

$$e_{x} = w_{x} - d_{x},$$

$$e_{y} = w_{y} - d_{y}.$$
(1)

Kde u_x, u_y jsou akční zásahy pro jednotlivé osy AML, w_x, w_y je požadovaná poloha, d_x, d_y je aktuální poloha rotoru (reprezentována celým číslem o přesnosti použitého AD převodníku) a e_x, e_y je regulační odchylka od požadované hodnoty. Akční zásah může nabývat celých čísel z intervalu $u_x, u_y \in \langle -255, 255 \rangle$.

Každá osa elektromagnetu je řízena dvěma PWM kanály. Je-li hodnota u_x , u_y kladná je přivedena na první PWM kanál v ose x či y (druhý kanál je odpojen), je-li záporná je přivedena na druhý PWM kanál v absolutní hodnotě (spuštěn protější elektromagnet) (první kanál je odpojen). Výstup čtyř PWM kanálů z mikrokontroléru je přiveden k akčnímu členu. Perioda vzorkování je zvolena, podle doby trvání výpočtu akčního zásahu a rychlosti senzorů polohy, na $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$.

Před spuštěním regulace je potřeba provést kalibraci snímačů, ta probíhá následujícím způsobem. Rotor AML je přichycen vždy jedním z magnetů ke krajním polohám z os x i y a pro ně získáme krajní hodnoty $(x_{min}, x_{max}, y_{min}, y_{max})$. Z měřených hodnot je vypočítána požadovaná poloha (2). Jelikož se nikdy nepodaří umístit snímače přesně k povrchu rotoru ve všech krajních oblastech není plně využit výstupní rozsah ze snímačů.

$$w_x = (x_{max} + x_{min})/2, \ w_y = (y_{max} + y_{min})/2$$
 (2)

Nalezení vhodných parametrů PID regulátoru

Z prvotní neznalosti skutečného chování reálného modelu AML nebylo možné použít některou z metod pro návrh lineárního regulátoru. I metoda Ziegler-Nicholson selhává z důvodu okamžitého rozkmitání rotoru AML, ke kterému dojde, při zvednutí proporcionální složky. Nalezení vhodných parametrů tedy probíhá krok po kroku velmi pomalým zvyšováním proporcionální složky K_p a při následném rozkmitání rotoru je zvětšována derivační složka K_d , dokud není kmitání potlačeno. Následuje zvětšení proporcionální složky a celý postup se opakuje dokud jsme schopní derivační složkou zabránit rozkmitání rotoru. Jeli takto regulátor seřízen postačuje už nastavit integrační složku K_i na takovou hodnotu, abychom se zbavili trvalé regulační odchylky.

Parametr	Popis	Hodnota	Jednotka
K_{p}	proporcionální složka	0.45	
K _d	derivační složka	0.006	S
K _i	integrační složka	4	s^{-1}
Δt	perioda vzorkování	$5 \cdot 10^{-4}$	S
f_{PWM}	frekvence PWM je závislá na použitém mikrokontroléru, jeho PWM modulu a frekvenci krystalu	39	kHz

Tab. 4: nalezené vhodné parametry PID regulátoru



Obr. 11: Řízení AML pomocí PID regulátoru.

Na obr.11 je ukázána výsledná regulace AML s vhodně nataveným PID regulátorem. Dochází však k velkým překmitům a vibracím rotoru (též hluku), které odstraňují až účinnější metody návrhu řízení uvedené v navazujícím článku Turek, M., Březina, T. Pulchart, J., 2006. V tomto článku je ukázán i optimální návrh regulátoru pomocí získaných charakteristik reálného modelu AML.

8. Závěr

Navržené zapojení všech členů regulačního obvodu je schopné úspěšného řízení AML (ověřeno na implementaci řízení pomocí PID regulátoru). Jednotlivé členy lze snadno a levně sestavit (kromě samotných senzorů polohy) a je je možné dále upravovat či nahrazovat podle zvyšujících se požadavků na regulaci. Cenově nejnáročnější jsou snímače polohy rotoru AML na jejichž vlastnostech nejvíce závisí úspěšnost a kvalita regulace. Pro paměťově a výpočetně nenáročné algoritmy je možné nadále využívat řídící člen reprezentovaný mikrokontrolérem Atmel ATMega64. Pro náročnější algoritmy je jej však potřeba nahradit rychlejším mikrokontrolérem či DSP procesorem.

9. Poděkování

Tato práce je podporována českým ministerstvem školství pod projektem MSM 0021630518 "Simulační modelování mechatronických systémů".

10. Literatura

- Atmel Corporation (2004) *Atmega64(L) Complete*, http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc2490.pdf.
- Baumer elektric (2003), *Inductive sensor IWRM 08I9501* http://www.baumerelectric.com/en/shop/catalog/Induktive_Sensoren/Induktive_Analogsen soren_IWRM_08/IWRM_08I9501.html
- Burr-Brown Corporation (1997), *Precision 4mA to 20mA CURRENT LOOP RECEIVER*, http://www.selectronic.fr/includes_selectronic/pdf/Burr-Brown/RCV420.pdf
- Březina, T., Turek, M., Pulchart, J. (2005) *The Active Magnetic Bearing Control with Automatic Parallel Compensation*, Engineering MECHANICS, Vol. 12, No. 3, p. 149 155.
- Pulchart, J., Březina, T., Turek. M. (2005), *Nonlinear predictive controller with local approximator for active magnetic bearing*, Engineering MECHANICS, Vol. 12, No. A1, p. 11 17.
- Turek, M. Březina, T. Pulchart, J., (2006), *SELFLEARNING CONTROLLER OF ACTIVE MAGNETIC BEARING*, Engineering MECHANICS, schváleno k publikaci.

10 _____