

**Vedecká rada Fakulty elektrotechniky a informatiky
Slovenskej technickej univerzity v Bratislave**

Ing. Martin Gažo

**Návrh efektívnych metód riadenia radiálneho
magnetického ložiska**

Autoreferát dizertačnej práce

Na získanie vedecko-akademickej hodnosti
philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:
5.2.14 Automatizácia a riadenie

Bratislava 2013

Dizertačná práca bola vypracovaná v externej forme doktorandského štúdia na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity v Bratislave.

Predkladateľ: **Ing. Martin Gažo**
Ústav Riadenia a Priemyselnej Informatiky,
Fakulta elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej
univerzity, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Školiteľ: **Prof. Ing. Peter Hubinský, PhD.**
Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty
elektrotechniky a informatiky, Slovenskej technickej univerzity,
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti:

Autoreferát bol rozoslaný dňa:

Obhajoba dizertačnej práce sa koná:
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia,
vymenovanou predsedom spoločnej odborovej komisie dňa

číslo odboru : 5.2.14, odbor doktorandského štúdia: Automatizácia a riadenie

na Ústave riadenia a priemyselnej informatiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky,
Slovenskej technickej univerzity, Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Predseda spoločnej odborovej komisie Automatizácia na STU v Bratislave :

Garant študijného programu Automatizácia a riadenie na FEI STU
Prof. Ing. Štefan Kozák, PhD.
Ústav riadenia a priemyselnej informatiky,
STU v Bratislave
Ilkovičova 3, 812 19 Bratislava

Názov: Návrh efektívnych metód riadenia radiálneho magnetického ložiska

Anotácia Dizertačná práca má jeden z hlavných cieľov návrh, modifikáciu a aplikáciu tak konvenčných ako aj moderných štruktúr a metód modelovania a riadenia aplikovaných na riešenie komplexných úloh riadenia súvisiacich s výskumom a vývojom aktívnych radiálnych magnetických ložísk (ďalej len RML), ich možných konštrukčných riešení a využitie v praxi. Autor práce aplikoval, rozšíril a otestoval konvenčné a moderné metódy riadenia založené na analytických a experimentálnych matematických modeloch. S podporou CAD a MKP nástrojov bol v práci navrhnutý a skonštruovaný magnetický obvod RML. Z nameraných údajov a vypočítaných konštrukčných parametrov bol vytvorený všeobecný matematický model RML pre rôzne pracovné režimy. Na základe matematického modelu boli navrhnuté štruktúry regulácie a vypočítané optimálne parametre regulátorov pre jednotlivé pracovné režimy RML. Kvalita regulácie pre navrhované štruktúry regulácie a vypočítané optimálne parametre boli overené experimentálne a simuláciami na matematickom modeli. Regulačné obvody pre RML boli rozšírené a modifikované tak, aby umožnili kvalitné riadenie aj s rešpektovaním vonkajších poruchových veličín. Vytvorené komplexné regulačné štruktúry z výpočtom optimálnych parametrov regulátora, boli implementované na RPL na rôzne pracovné režimy. Výsledky dizertačnej práce sú teoretického a praktického charakteru a predstavujú jednu z efektívnych aplikácií v oblasti výskumu, vývoja a aplikácií metód automatického riadenia.

Annotation

The main objectives of the thesis is the proposal, modification and application of the conventional as well as the modern structures and methods focused on the study of the current issues of active radial magnetic bearings (AMB), their possible structural solutions and usage in praxis. The author of the work applied, extended and tested the conventional methods of control based on the analytical and experimental mathematical models. With the participation of CAD and FEM tools there have been designed the magnetical circuit AMB and the proposal of construction of testing equipment which have been realized. There have been created the mathematical model of AMB from the found, measured and calculated parameters capable to work in different operating modes. The regulatory circuits for the specific operating modes have been designed. The correctness of the proposal of the regulation circuits and selected parameters have been verified by simulations. Because of various findings and observations, the regulating circuits have been completed and modified by the connections which restrict the external fault parameters. These modified regulating circuits have been applied to the real physical model of AMB in various operating modes.

OBSAH

| | |
|---|----|
| Annotation | 3 |
| OBSAH | 4 |
| Úvod..... | 5 |
| Cieľ dizertačnej práce..... | 6 |
| Tézy dizertačnej práce | 6 |
| 1. Prehľad súčasného stavu magnetických ložísk..... | 6 |
| 1.1 Časti ložísk | 7 |
| 1.2 Vlastnosti ložiska | 8 |
| 2. Matematický model a overenie vlastností jednoosovej sústavy..... | 8 |
| 2.1 Polohový systém magnetického závesu | 10 |
| 2.2 Reálny experiment magnetického závesu..... | 14 |
| 3. Návrh modelu a polohového systému magnetického ložiska vo zvislej osi | 19 |
| 3.1 Schéma modelu riadenia zvislej osi magnetického ložiska | 22 |
| 3.2 Priebeh regulácie vo zvislej osi magnetického ložiska | 22 |
| 3.3 Diskrétna forma algoritmu riadenia a vplyv periódy vzorkovania na kvalitu riadenia...23 | |
| 3.4 Reálny experiment magnetického závesu s dvoma cievkami..... | 24 |
| 4. Nastavenie komponentov reálnej zostavy..... | 31 |
| 4.1 Experimentálne výsledky | 32 |
| 4.2 Elektromagnetický záves – EZ..... | 32 |
| 4.3 Diferenciálne zapojenie elektromagnetov – DZ..... | 32 |
| Záver | 35 |
| Splnenie cieľov dizertačnej práce: | 36 |
| Zoznam publikácií autora..... | 37 |
| Literatúra | 38 |

Úvod

Hlavným cieľom dizertačnej práce je návrh metód a algoritmov pre riadenie aktívnych magnetických ložísk. V dnešnej dobe sa aktívne magnetické ložiská používajú mnohých priemyselných aplikáciách. Magnetické ložiská a vysokootáčkové motory s permanentnými magnetmi prinášajú technický pokrok do konštrukcie vzduchových a chladiacich kompresorov a zvyšujú účinnosť z 75 % na 85 %. Magnetické ložiská sú súčasťou nových riešení s priamym pohonom s premenlivými otáčkami, ktoré umožňujú nahradiť skrutkové kompresory odstredivými turbostrojmi. V systémoch so vzduchovými a chladiacimi kompresormi prispievajú k zvýšeniu účinnosti. Táto technická zmena znižuje prevádzkové náklady v takých oblastiach, ako napr. vzduchotechnika, priemyselné chladenie a v naftovom a plynárenskom priemysle. Na uvedených úsporách sa podieľajú nasledujúce prednosti ML: nižšia spotreba energie, vyššia spoľahlivosť, nedochádza k opotrebovaniu častí ložiska a tým je dosiahnutá dlhšia prevádzková trvanlivosť v podstate žiadne nároky na mazanie.

Štruktúra práce je delená do ôsmich nadväzujúcich kapitol.

V 1. kapitole s názvom Prehľad súčasného stavu magnetických ložísk je uvedená klasifikácia, vlastnosti a časti magnetických ložísk. V tejto kapitole sú opísané základné princípy magnetickej levitácie, ktorá je základom pre pochopenie fyzikálnych vlastností.

V 2. kapitole s názvom Praktické aplikácie je uvedený stručný prehľad magnetických ložísk a ich využite v praxi. Podrobnejšie sú tu opísané jednotlivé časti radiálneho magnetického ložiska a jeho vlastnosti.

V 3. kapitole s názvom Snímače polohy sú uvedené niektoré vybrané snímače polohy, ktoré sa dajú využiť na snímanie požadovanej polohy pri magnetickej levitácii a aktívneho magnetického ložiska.

V 4. kapitole s názvom Matematický model sú uvedené matematické modely magnetického závesu s jednou cievkou. V tejto časti je odvodená linearizácia mechanického systému, polohový systém magnetického závesu a reálny experiment.

V 5. kapitole s názvom Návrh modelu a polohového systému magnetického ložiska vo zvislej osi opísané základné teórie fyzikálneho modelu, ktoré boli už objavené od roku 1842. V tejto časti práce je odvodená konfigurácia závesu s dvoma elektromagnetmi, ktorá bola následne odsimulovaná a experimentálne overená.

V 6. kapitole s názvom Návrh modelu polohového systému je opísaný polohový model 3 osového magnetického ložiska, zároveň je tu uvedená základná interakcia medzi jednotlivými osami a simulačný model radiálneho magnetického ložiska.

V 7. kapitole s názvom Návrh modelu 5 osového systému sú popísané štruktúry riadenia a overenie dynamických vlastností uzavretého regulačného obvodu.

V 8. kapitole s názvom Aplikácie RPL na reálny systém RML je opísaný reálny experiment jeho nastavenia, diferenciálne zapojenie a experimentálne výsledky.

Cieľ dizertačnej práce

V rámci teoretickej časti dizertačnej práce:

1. Navrhnuť riadenie 5-osového systému s radiálnym a axiálnym magnetickým ložiskom. Overiť dynamické vlastnosti na hybridnom simulačnom modeli systému. Cieľom návrhu je získať analýza vlastnosti pre návrh a realizáciu fyzikálneho modelu radiálneho ložiska.
2. Navrhnuť a overiť vlastnosti modelu magnetického závesu na základe vytvoreného magnetického modelu, návrhu štruktúr regulácie, výpočtu, optimálnych parametrov regulátora a simulácií pre 3 fázové ložisko.
3. Experimentálny návrh komplexného návrhu magnetickej levitácie s dvoma cievkami a implementáciou algoritmov riadenia.
4. Navrhnuť a realizovať fyzikálny model na základe simulačných a experimentálnych riešení s využitím najnovších poznatkov v uvedenej oblasti.

Tézy dizertačnej práce

1. Analýza súčasného stavu metód modelovania a riadenia pre magnetické ložiská.
2. Teoretický rozbor princípov magnetickej levitácie a odvodenia príslušných matematických vzťahov pre syntézu navrhovaných regulačných obvodov. Návrh komplexného systému magnetickej levitácie s jednou a s dvoma cievkami. Realizácia experimentálneho pracoviska jeho verifikácia, oživenie a realizácia experimentálnych meraní.
3. Zovšeobecnenie vedeckých poznatkov pre princípy magnetickej levitácie a magnetických ložísk, prínosy pre ich využitie vo výskume, výučbe a v technickej praxi.

1. Prehľad súčasného stavu magnetických ložísk

V dnešnej dobe sú známe riešenia aktívnych radiálnych magnetických ložísk (ďalej už len RML) hlavne v oblasti odbornej verejnosti. Známe sú použitia v rôznych strojoch, využívaných v oblastiach výroby elektrickej energie, úpravy vzduchu, potravinárskom priemysle a ďalšie.

V oblastiach výroby elektrickej energie sa používajú na zníženie mechanických strát vyprodukovaných v klasických ložiskách. Avšak úspory nie sú pomerne vysoké, rádovo stotiny až desatiny percent z celkovej účinnosti stroja. Z druhej strany pri vysokej produkcii elektrickej energie u generátoroch vo vysokých výkonových triedach sa úvodná investícia v

krátkej dobe vráti. Pre ilustráciu pri takomto systéme magnetického ložiska môžu náklady na jeho obstaranie presiahnuť 100 000 €.



Obr.1.:a.) Generátor s aktívnymi magnetickými ložiskami, Synchrony [25], b.) Turbomolekulárna vákuová pumpa, Pfeiffer [2, s.19][33], c.) Turbo kompresor, SKF [35]

Ako ďalší príklad by sa mohlo uviesť množstvo použití kde nie je možné použiť oleje, vazelíny alebo iné lubrikanty z dôvodu znečistenia prostredia laboratória alebo v prípade oblasti potravinárskeho priemyslu.

Aktívne magnetické ložiská sú ideálne v prípade použitia v extrémnych podmienkach. Ako extrémne podmienky možno uviesť ako vysoká teplota 350 – 500°C ale aj veľmi nízka teplota cca -80 až -140°C. V prípade nízkych teplôt sú schopné magnetické ložiská z toho vyťažiť a to z dôvodu nižšieho merného odporu vinutí (supravodič), čo má za následok nielen nižšie joulove straty vo vinutiach ale aj zvýšenie celkovej efektívnosti stroja.

Magnetické ložisko je zložitá elektromechanická sústava, ktorá využíva magnetické pole k levitácii pohyblivých častí ložiska bez priameho dotyku s pevnou časťou. Podľa toho či k svojej funkcii potrebuje alebo nepotrebuje elektrickú energiu sa rozlišujú magnetické ložiská na aktívne a pasívne. Z hľadiska prenosu síl sa delia na radiálne a axiálne.

Výrazné zvýšenie výkonu magnetických ložísk umožnil progresívny softvérový riadiaci algoritmus. Tento vývoj vytvára nové príležitosti pre odolné, hospodárne a energicky úsporné konštrukcie s takýmito univerzálnymi ložiskami. Nápad využiť magnetické pole k podopreniu predmetu sa po prvýkrát objavil už v polovici devätnásteho storočia.

V uplynulých dvoch desaťročiach umožnil technický pokrok ekonomickú realizáciu mnohých uložení s magnetickými ložiskami. V súčasnej dobe sú vyvíjané progresívne algoritmy pre programové vybavenie, ktoré umožnia dosiahnuť neuveriteľné výkony.

1.1 Časti ložísk

Systémy magnetických ložísk sa skladajú z troch hlavných častí: ovládacie jednotky ložiska, snímače, riadiace jednotky a riadiaci algoritmus.

Radiálne magnetické ložisko sa podobá elektromotoru, namiesto točivého momentu generuje príťažlivú silu, ktorá zdvíha hriadeľ. Typický radiálny stator sa skladá zo štyroch oddelených ovládacích jednotiek. Každá jednotka je tvorená dvoma pólmi, na ktorých je navinutá cievka. Pri prechode elektrického prúdu cievkou vzniká príťažlivá sila, ktorá

pôsobí na feromagnetický rotor (zostavený z plechov alebo masívny). Vzduchová medzera medzi statorom a rotorom predstavuje spravidla 0,5 mm až 2 mm.

U magnetického axiálneho ložiska je masívny ocelový kotúč pripojený k hriadeľu a po oboch stranách je opatrený prstencovým statorom. Stator môže mať jedno alebo dve vinutia, ktoré generujú magnetický tok. Axiálny stator, ktorý je buď masívny, alebo vytvorený z dielov, skladanými z orientovaných plechov, rozširuje šírku pásma odozvy sily. V strojoch, v ktorých nepôsobí príliš veľké axiálne zaťaženie, sa dajú radiálne ložiská nahradiť kuželovými ložiskami, ktoré môžu vykonávať pohyb v radiálnom i axiálnom smere. Axiálne ložisko nahrádza takéto riešenie a prispieva k zvýšeniu celkovej dĺžky životnosti stroja.

Aktívne magnetické ložiská využívajú príťažlivé sily. Snímače polohy hriadeľa zaisťujú spätnú odozvu pre riadiaci systém. Spravidla sa používajú indukčné snímače, umiestnené na piatich osiach (štyroch radiálnych a jednej axiálnej). Snímače vysielajú lineárny výstupný signál a môžu pracovať v širokom rozsahu prevádzkových teplôt. Prúdy v magnetickom ložisku sú regulované a sledované riadiacou jednotkou, ktorá využíva riadiaci algoritmus pre zmenu síl v ložisku, a teda pre ovládanie polohy hriadeľa

1.2 Vlastnosti ložiska

Magnetické ložiská nepotrebujú mazanie. Z toho dôvodu sú obzvlášť vhodné pre stroje, ktoré pracujú vo vzduchoprázdne, pri vysokých alebo nízkych (atmosferických) teplotách alebo v agresívnych kvapalinách. V zásade sa dajú magnetické ložiská využiť v akomkoľvek stroji, v ktorom nesmie dôjsť ku kontaminácii mazivami alebo časticami oteru alebo ak používanie mazív je nezlučiteľné s výrobným procesom.

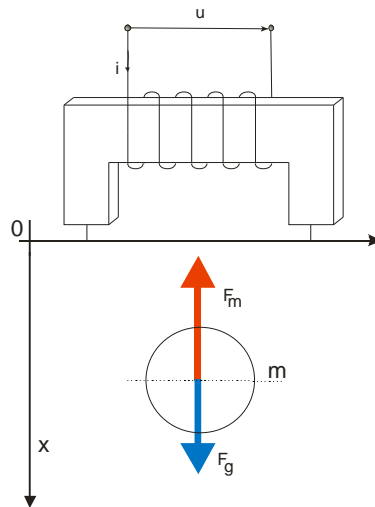
Také požiadavky sú charakteristické napr. pre linky na výrobu polovodičov a potravinársky a nápojový priemysel. Prevádzka bez mazív znamená, že nemusí byť používané mazanie a súvisiace pomocné systémy, ako napr. čerpadlá a filtre, čo sa prejaví znížením celkových nákladov na nákup zariadení.

Nízke rotačné straty hriadeľa sú ďalšou charakteristickou vlastnosťou magnetických ložísk. Je teda možné zvoliť motor s nižším výkonom a dosiahnuť vyššiu účinnosť. Nízke straty napovedajú, že prevádzkové teploty sú spravidla menšie než u ložísk iných typov, ako napr. valivých či hydrodynamických, a teda že sú kladené nižšie nároky na chladenie celého zariadenia.

2. Matematický model a overenie vlastnosti jednoosovej sústavy

V podstate sa jedná o využitie magnetického poľa alebo magnetickej sily. Pochopenie princípov magnetickej levitácie môže viesť k určitému inovatívnemu riešeniu problémov. Hlavnou časťou modelu je ocelová guľička vznášajúca sa v magnetickom poli cievky obr .
2.1. Štruktúru modelu a jeho parametre získame na základe rovnováhy síl. Pohybová rovnica je založená na rovnováhe všetkých síl pôsobiacich na guľičku, t.j. gravitačná sila F_g ,

elektromagnetická sila F_m , sila zrýchlenia F_d , hmotnosť guľôčky m , vzdialenosť a gravitačná konštanta g (1).

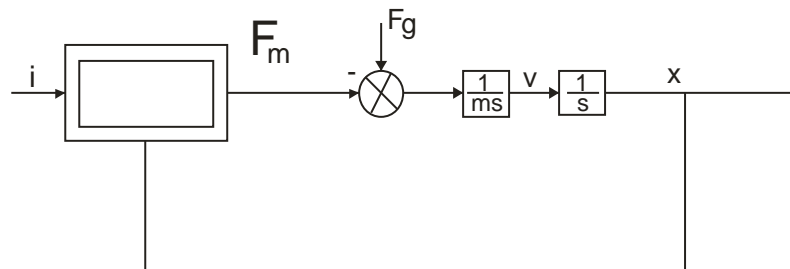


Obr. 2.1 Jednoosový systém (magnetický záves) [7]

$$F_d = F_g - F_m = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad 2.1$$

$$F_g = m \cdot g \quad 2.2$$

$$F_m = f \left(\frac{i}{x} \right)^2 \quad 2.3$$



Obr. 2.2 Bloková schéma lineárneho obvodu

Aby sme s modelom mohli pracovať potrebujeme celý systém linearizovať. Linearizáciou mechanického systému dostaneme:

$$F_d = F_g - F_m = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad 2.4$$

$$F_g = F_{g0} \quad 2.5$$

$$x = X_0 + \Delta x$$

$$F_m = F_{m0} + \Delta F_m \quad 2.5$$

$$-\Delta F_m = m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} \quad 2.7$$

$$F_{g0} = F_{m0} \quad 2.8$$

$$F_{g0} - \Delta F_m - F_{m0} = m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} \quad 2.9$$

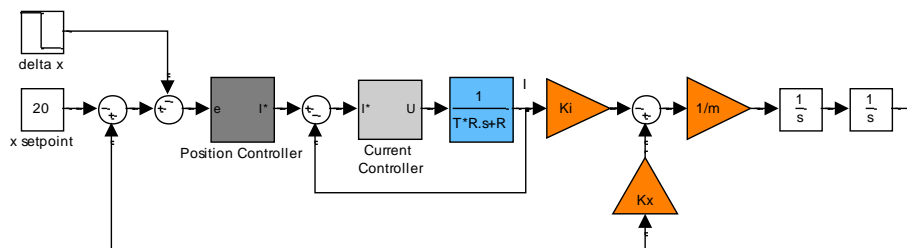
$$-\Delta F_m = m \frac{d^2 \Delta x}{dt^2} \quad 2.10$$

$$\Delta F_m = \frac{\partial f}{\partial i} \Delta i + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x = K_i \Delta i - K_x \Delta x \quad 2.11$$

Po linearizácii sme získali model regulovanej sústavy, pomocou ktorého môžeme navrhovať polohový systém závesu .

2.1 Polohový systém magnetického závesu

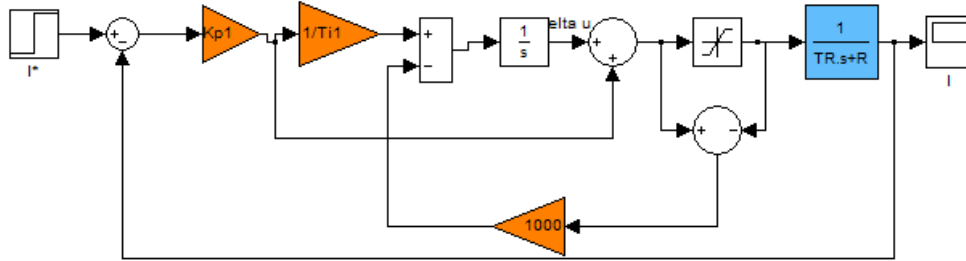
Pre overenie teoretických poznatkov ako prípravu pre pokusy na reálnej sústave bol navrhnutý a realizovaný polohový systém magnetického závesu . Simulačná schéma znázornená na obr. 2.1.1. obsahuje regulačný obvod prúdu elektromagnetu a nadradený regulačný obvod polohy s PID regulátorom. Model slúži na návrh regulátorov prúdu, polohy a overenie kvality regulácie .



Obr. 2.3.1 Polohový systém magnetického závesu

Použitie parametre pre simulačný a reálny model magnetického závesu sú nasledovné: hmotnosť guľôčky: $m = 0.006 \text{ kg}$; vzdialenosť guľôčky od solenoidu: $x_0 = 0.020 \text{ m}$; odpor solenoidu: $R = 9.6 \ \Omega$ indukčnosť cievky (solenoidu): $L = 0.394 \text{ H}$ a 2020 závitov; konštanta prúdu: $K_i = 341.62 \text{ N/A}$, konštančná vzdialenosť: $K_x = 27.85 \text{ N/m}$, magnetická konštanta: $T = L/R = 0.041 \text{ s}$.

Pre návrh regulátorov bola zvolená metóda pole-placement. S touto metódou boli zrealizované výpočty parametrov regulátorov. Regulátor prúdu bol navrhnutý tak aby mal podobné pásmo priepustnosti ako reálny systém, čo je približne 150-200 Hz.



Obr. 2.1.4 Regulačný obvod prúdu pri použití PI regulátora

Výpočet parametrov regulátora prúdu PI nech $G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right)$: potom prenosová

funkcia riadenia je
$$G(s) = \frac{M(s)}{N(s)} = \frac{(1 + T_i s) \frac{K_p}{RT_i}}{s^2 + \left(\frac{R + K_p}{RT} \right) s + \frac{K_p}{RT_i T}}$$

Charakteristický polynóm prenosovej funkcie je $N(s) = s^2 + \left(\frac{R + K_p}{RT} \right) s + \frac{K_p}{RT_i T}$

Želaný charakteristický polynóm nech obsahuje dvojicu komplexných združených pólů:

$$N_0(s) = s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2$$

$N_0(s) = s^2 + B_{i0}s + B_{o0}$ nech $N(s) = s^2 + B_i s + B_o$ potom z podmienky $N(s) = N_0(s)$

Vypočítame

parametre regulátora

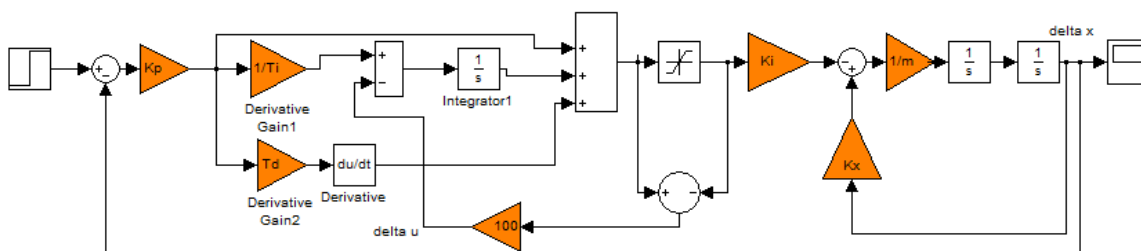
$$B_i = B_{i0} \Rightarrow \frac{R + K_p}{RT} = (2\xi\omega_0) \tag{2.1.1}$$

$$B_o = B_{o0} \Rightarrow \frac{K_p}{RT_i T} = (\omega_0^2)$$

$$K_p = 2\xi\omega_0 RT - R$$

$$T_i = \frac{2\xi\omega_0 T - 1}{T\omega_0^2}$$

2.1.2



Obr. 2.1.5 Regulačný obvod polohy pri použití PID regulátora

Pri návrhu regulátora polohy sa zanedbáva dynamika regulačného obvodu prúdu.

Výpočet parametrov PID regulátora $G_R(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$:

$$G(s) = \frac{M(s)}{N(s)} = \frac{\frac{K_P K_I s}{m} + \frac{K_P K_I}{T_i m} + \frac{s^2 (T_d K_P K_I)}{m}}{s^3 + \left(\frac{T_d K_P K_I}{m}\right) s^2 + \left(\frac{K_P K_I + K_X}{m}\right) s + \frac{K_P K_I}{m T_i}}$$

Charakteristický polynóm systému je

$$N(s) = s^3 + \left(\frac{T_d K_P K_I}{m}\right) s^2 + \left(\frac{K_P K_I + K_X}{m}\right) s + \frac{K_P K_I}{m T_i}$$

$$N(s) = N_0(s)$$

Potom platí $N_0(s) = (s^3 + (2\xi + k)\omega_0 s^2 + (1 + 2\xi k)\omega_0^2 s + k\omega_0^3)$

$$N_0(s) = s^3 + B_{20} s^2 + B_{10} s + B_{00}$$

$$N_0(s) = s^3 + B_2 s^2 + B_1 s + B_0$$

$$B_2 = B_{20} \Rightarrow \frac{T_d K_P K_I}{m} = (2\xi + k)\omega_0$$

$$B_1 = B_{10} \Rightarrow \frac{K_P K_I + K_X}{m} = (1 + 2\xi k)\omega_0^2$$

$$B_0 = B_{00} \Rightarrow \frac{K_P K_I}{m T_i} = k\omega_0^3$$

2.1.3

Parametre PID regulátora vypočítané metódou pole-placement

$$K_P = \frac{\omega_0^2 m + 2\xi k \omega_0^2 m - K_X}{K_I}$$

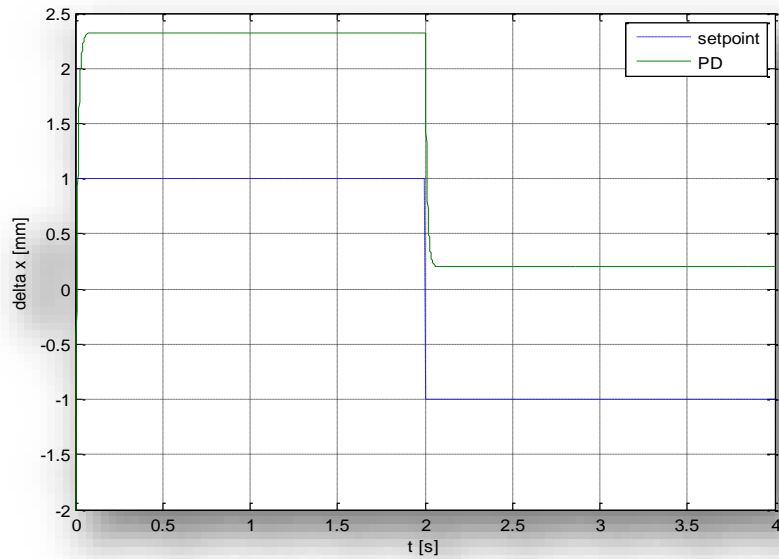
$$T_i = \frac{K_P K_I}{k \omega_0^3 m}$$

$$T_d = \frac{2\xi \omega_0 m + k \omega_0 m}{K_P K_I}$$

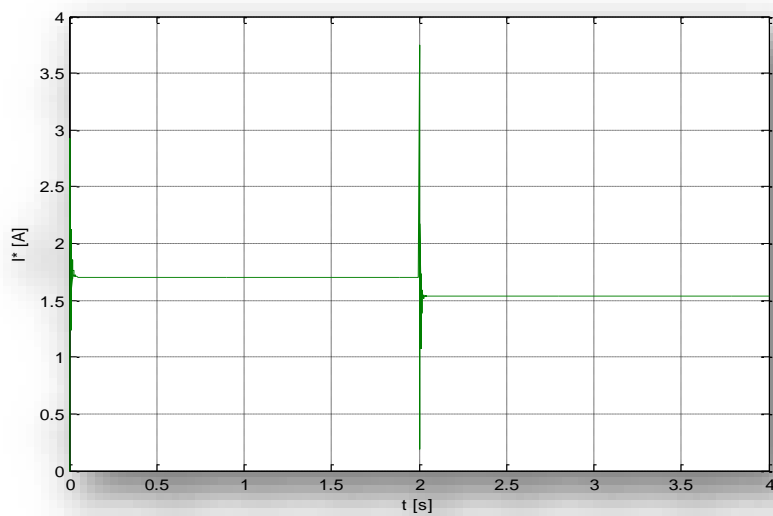
2.1.4

Najskôr bola využitá metóda pole-placement na návrh PD regulátora polohy. Pracovný bod je $X_0 = 20$ mm. Výsledky boli postačujúce, bez preregulovania, avšak ako sme predpokladali, obsahovali veľkú statickú regulačnú odchýlku.

Pri experimentoch boli overené kvality pre rôzne hodnoty nastaviteľných parametrov: t.j. pásma priepustnosti (ω_0), tlmenie (ξ) a posuvu jednoduchého pólu (k).

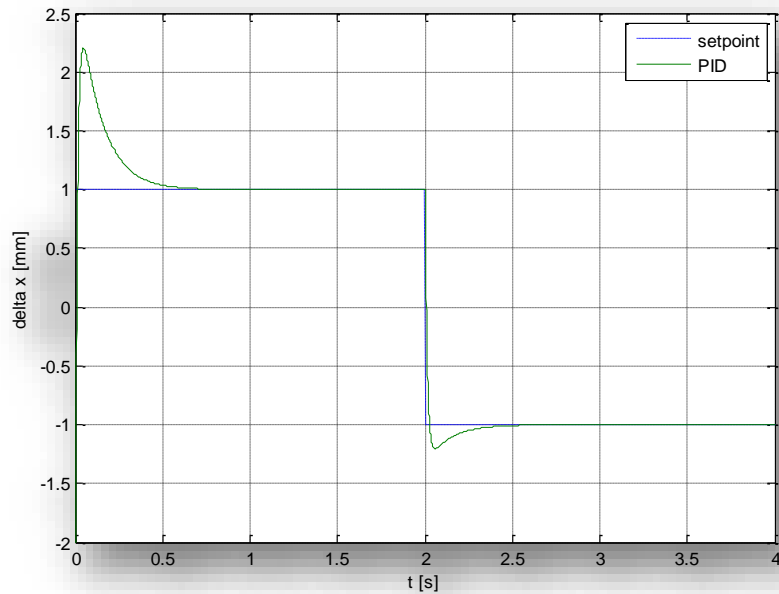


Obr. 2.1.6 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy s PD regulátorom polohy ($\xi=1$, $w_0=15$ rad/s, $k=80$)

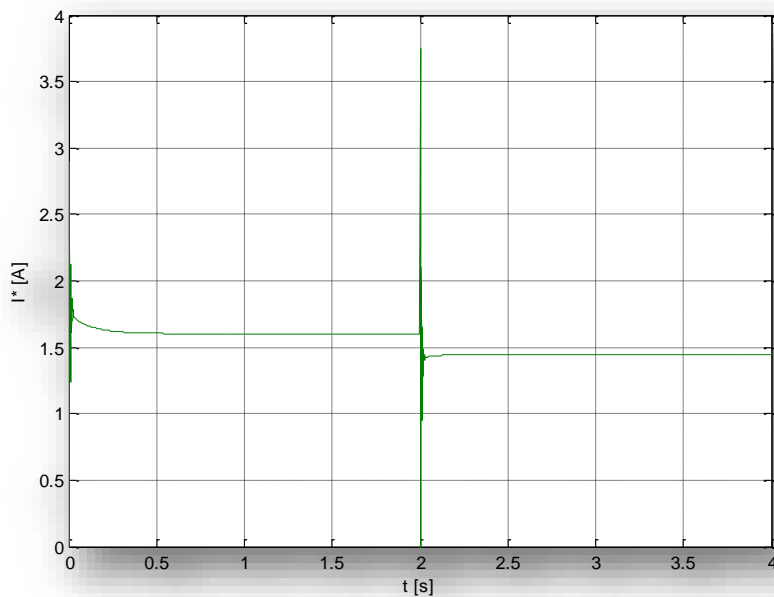


Obr. 2.1.7 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- prúdu s PD regulátorom polohy – akčný zásah ($\xi=1$, $w_0=15$ rad/s, $k=80$)

Na potlačenie statickej chyby bol využitý aj PID regulátor, avšak zaznamenali sme značné preregulovanie obr.2.1.6



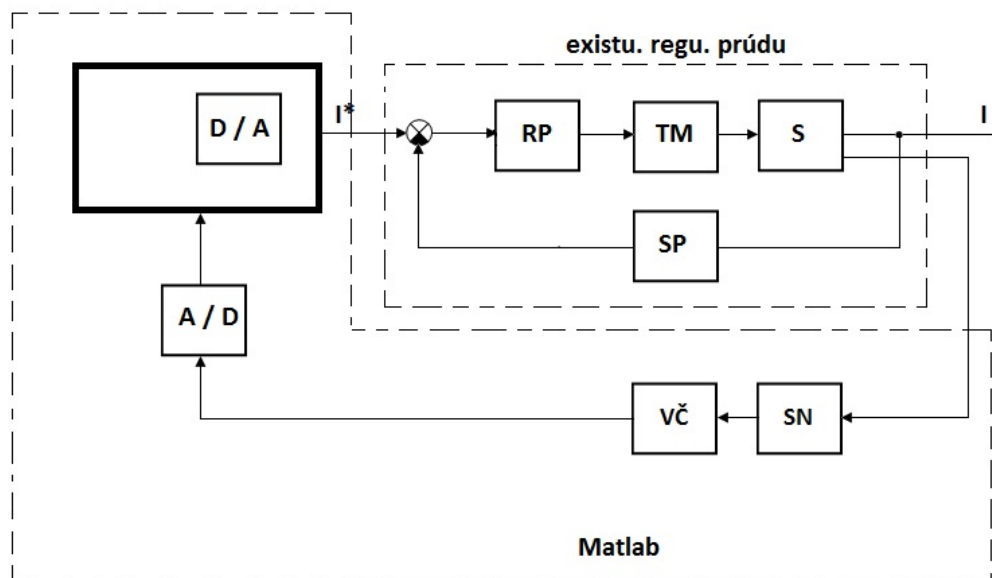
Obr. 2.1.8 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy s PID regulátorom ($\xi=1$, $w_0=15$ rad/s, $k=80$)



Obr. 2.1.9 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- prúdu s PID regulátorom polohy – akčný zásah ($\xi=1$, $w_0=15$ rad/s, $k=80$)

2.2 Reálny experiment magnetického závesu

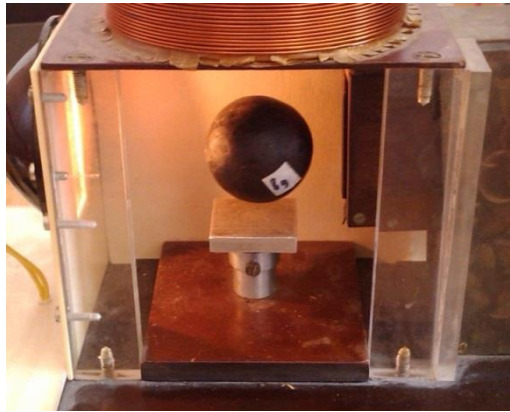
Bol vykonaný reálny experiment na sústave magnetického závesu, ktorá bude bližšie popísaná v ďalšej časti. Bloková schéma je nasledovná:



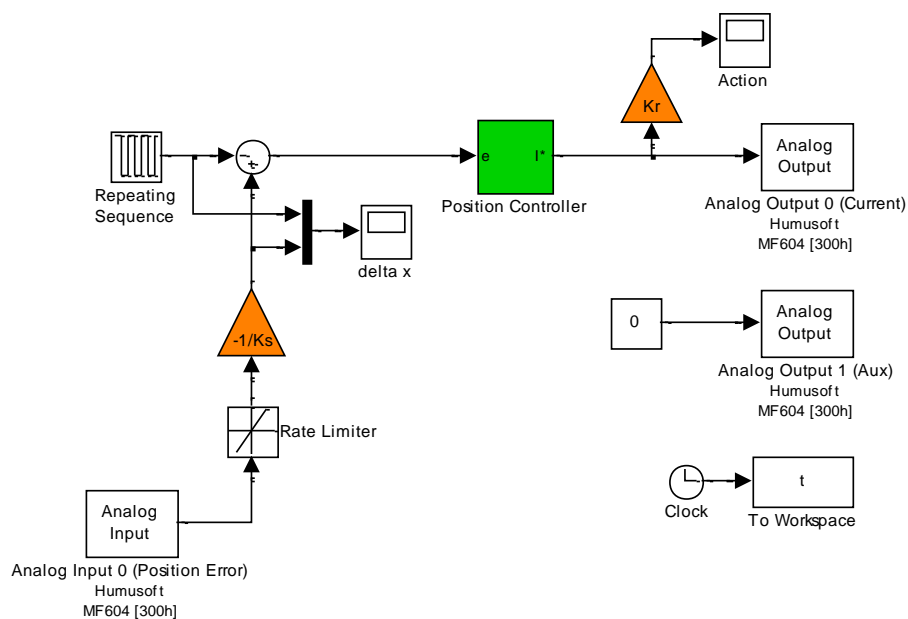
Obr. 2.2.1 Bloková schéma reálneho experimentu

Bloková schéma reálneho experimentu sa skladá D/A prevodníka, RP- regulátora prúdu, TM –tranzistorového meniča, S- sústavy, SP- snímača prúdu, SN- optického snímača polohy, VČ- vyhodnocovacieho člena a A/D prevodníka.

Simulačné výsledky boli verifikované aj na reálnom zariadení. Jednalo sa o starší laboratórny model magnetického závesu. Súčasťou modelu bol už navrhnutý a vytvorený regulátor prúdu. Tento regulátor bol identifikovaný a jeho parametre boli využité v simulácii. Vzhľadom na to, že sa jednalo už o starší analógový typ regulátora, vstup aj výstup do regulátora musel byť filtrovaný. Výstupný prúd musel byť filtrovaný, tento signál obsahuje výrazné impulzné poruchy, ktoré systém destabilizovali. Akčným členom modelu magnetického závesu bola cievka s 2020 závitmi. Nevýhodou tejto cievky bola nestálosť parametrov, spôsobené ohrevom pretekaným prúdom, čo má za následok zmenu odporu cievky a tým aj zmenu ostatných parametrov. Vzhľadom k tejto skutočnosti bola cievka opatrená externým chladiacim systémom, ktorý zabezpečoval relatívne konštantnú teplotu cievky. Pod spomínanou cievkou sa nachádzala komora, v ktorej bolo umiestené pokusné teleso. Výchylka telesa bola meraná pomocou optického snímača polohy, ktorý zaznamenával výchylku telesa od rovnovážnej polohy. Samotný regulátor žiadanej polohy telesa bol realizovaný prostredníctvom vstupno-výstupnej karty Humusoft MF604 a riadiaceho programu vytvoreného v prostredí Matlab-Simulink. Vstupom do riadiaceho algoritmu bola filtrovaná odchýlka polohy telesa od zvolenej rovnovážnej polohy a želaná hodnota polohy telesa. Výstupom regulátora bola žiadaná hodnota prúdu pre prúdový regulátor, ktorý bol umiestený v riadiacej časti cievky. Samotný regulátor bol realizovaný ako PI resp. PID regulátor s anti wind-upom. Schéma bola zostavená v Real Time Toolboxe, s cieľom využitia regulácie v reálnom čase.

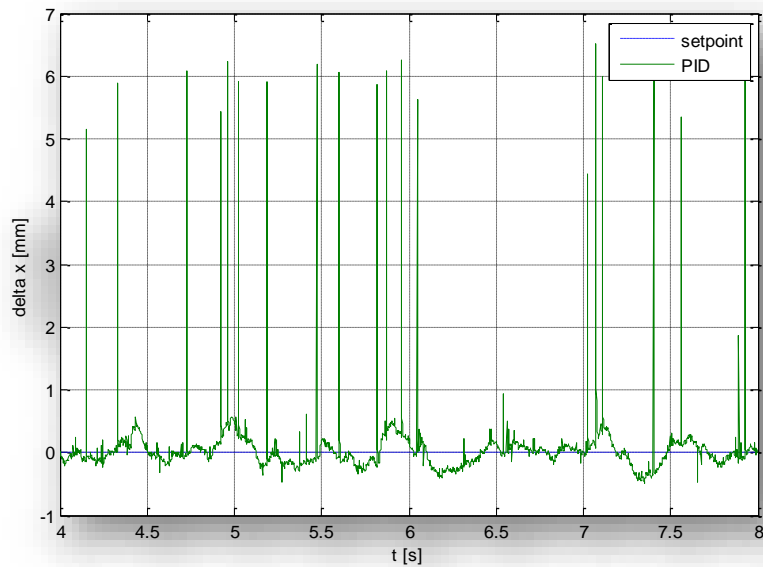


Obr. 2.2.2 Sústava magnetickej levitácie



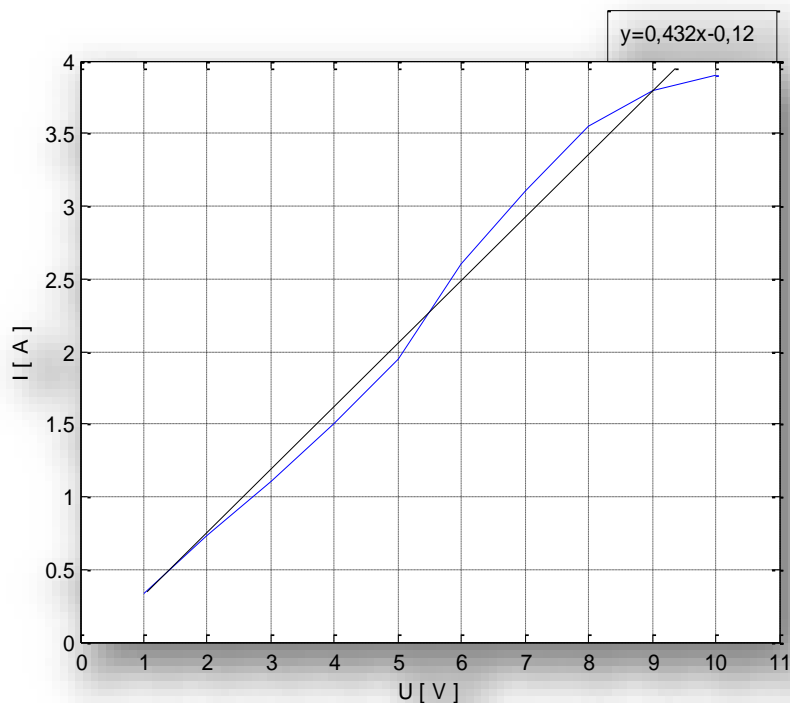
Obr. 2.2.3 Bloková schéma prepojenie sústavy magnetickej levitácie s regulátorom polohy

Na začiatku experimentu boli identifikované parametre modelu, aby mohli byť korektne navrhnuté jednotlivé regulátory. Po vhodnom návrhu parametrov regulátora boli vykonané série experimentov. Pre PID regulátor boli menené želané hodnoty polohy skokovo v rozsahu ± 3 mm. Pre PD regulátor v rozsahu ± 1 mm. Bližší popis jednotlivých experimentov sa nachádza v nasledovnej časti kapitoly.



Obr. 2.2.4 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- poruchy vo výstupnom signály polohy

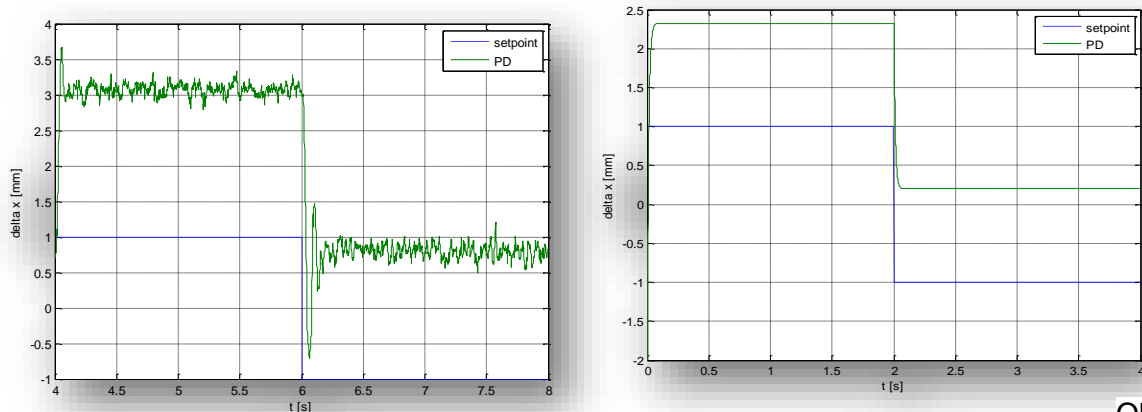
Na určenie zosilnenia snímača polohy boli vykonané série jednoduchých experimentov, v ktorých bola guľôčka daná do dvoch polôh vzdialených 5mm od centrálnej polohy. Meranie nebolo veľmi presné, ale pre naše účely bolo postačujúce. Parametre sústavy ako aj parametre vnútorného regulátora prúdu boli neznáme a preto sme museli danú sústavu identifikovať. Nameraná prechodová charakteristika bola dostatočne lineárna a preto sme určili zosilnenie $K_r = 0.43 \text{ V/A}$.



Obr. 2.2.10 Vstupno-výstupná charakteristika sústavy s regulátorom prúdu

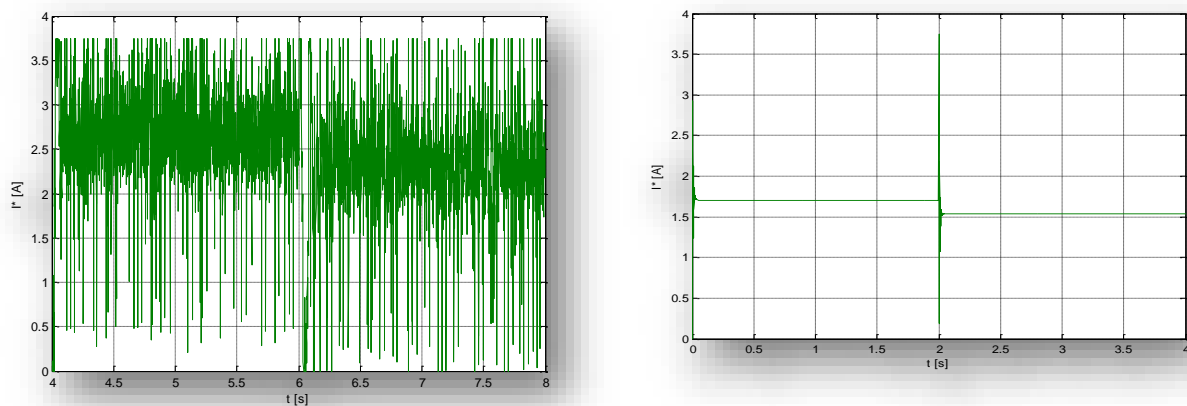
Potom, čo boli určené všetky zosilnenia a podarilo sa nám odfiltrovať poruchy senzora polohy, začal regulátor pracovať tak, ako bol navrhnutý. Schéma prepojenia s reálnou sústavou je na obr. Obr. 2..3

Najvýraznejší rozdiel medzi reálnym meraním a simuláciou bol v extrémnom zašumení prúdového signálu. Bolo to spôsobené príliš veľkou derivačnou zložkou v regulátore. A taktiež veľmi zašumený bol aj signál zo snímača polohy. Filtrácia neprichádzala do úvahy z dôvodu nestability systému aj pri použití časových konštánt na úrovni milisekúnd. Testované boli oba navrhnuté regulátory a výsledky boli veľmi podobné simulačným.

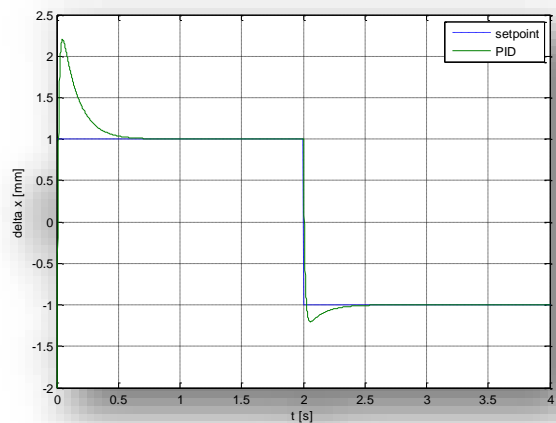
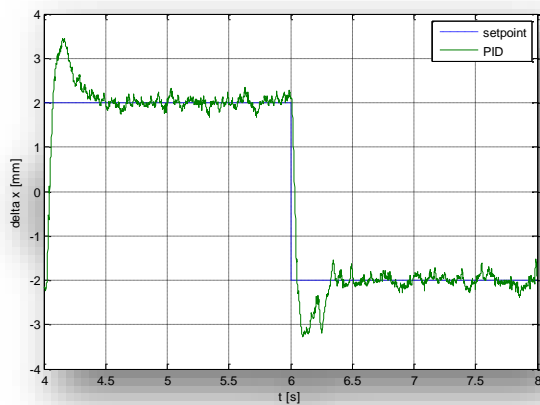


Obr.

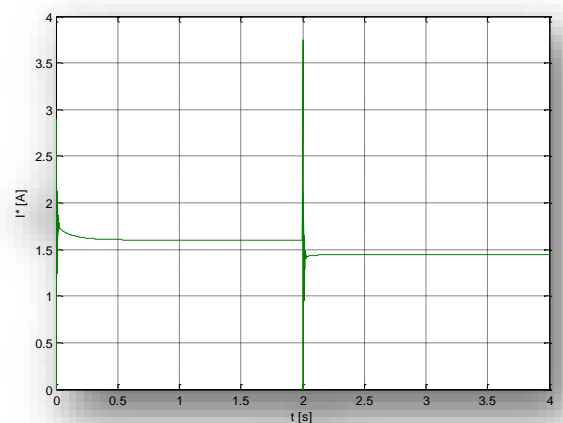
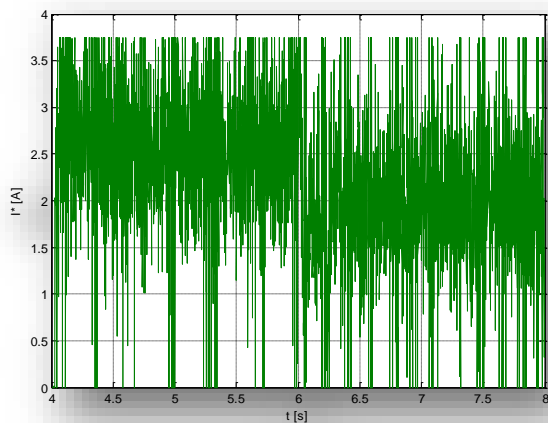
2.2.3. Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy s PD regulátorom polohy na ľavej strane reálna sústava a na pravej simulácia ($\xi=1$, $w_0=15$ rad/s, $k=80$)



Obr. 2.2.11 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy s PD regulátorom polohy – akčný zásah na ľavej strane reálna sústava a na pravej simulácia ($\xi=1$, $w_0=15$ rad/s, $k=80$)



Obr. 2.2.12 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy s PID regulátorom polohy na ľavej strane reálna sústava a na pravej simulácia ($\xi=1$, $\omega_0=15$ rad/s, $k=80$)



Obr. 2.2.13 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy s PID regulátorom polohy – akčný zásah na ľavej strane reálna sústava a na pravej simulácia ($\xi=1$, $\omega_0=15$ rad/s, $k=80$)

Vyhodnotenie experimentov:

Pri riadení magnetickej levitácie syntézy riadenia štruktúry PD boli zistené, že aj pri simulácii aj pri reálnom modeli nám vznikla trvalá regulačná odchýlka. Pri návrhu tejto štruktúry boli overené, že na riadenie magnetickej levitácie nám nestačí použiť štruktúru riadenia PD regulátora. Tento jav bol objavený aj pri simulačnom a aj pri reálnom modeli magnetickej levitácie. Časový priebeh akčného zásahu pri reálnej sústave a pri simulácii. Pri použití syntézy riadenia PID regulátora nebol vzniknutý tento jav. Podľa experimentov (obr. 2.2.5) boli dosiahnuté želané hodnoty aj napriek tomu, že priebeh bol zašumený.

3. Návrh modelu a polohového systému magnetického ložiska vo zvislej osi

Samuel Earnshaw teorém (Earnshaw, 1842) dokázal, že nie je možné dosiahnuť levitáciu použitím kombinácie permanentných magnetov a elektrických nábojov. Levitácia znamená stabilný záves objektu voči gravitácii. Existuje niekoľko výnimiek, ktoré

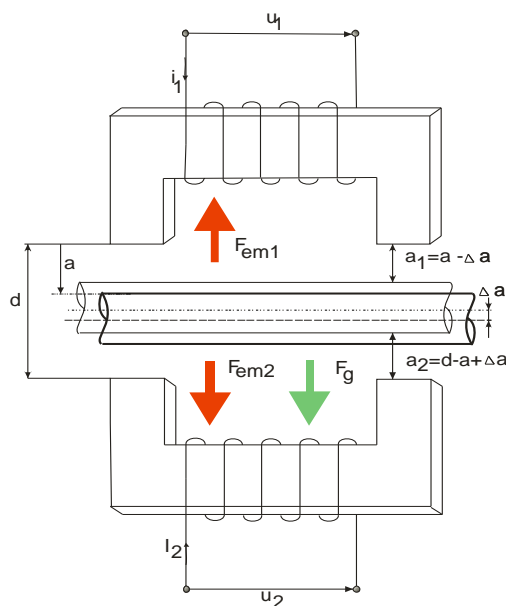
porušujú tieto domienky (Braunbeck, 1939), (Jayawant, 1981): kvantová mechanika, rotácia, diamagnetismus, premenlivé polia a spätná väzba. Prvý záznam o systéme, ktorý ponúkol alternatívu miesto štandardného riešenia "kofajnica a koleso" bol vznášajúci vlak vyvinutý Girardom v roku 1864 (Sinha, 1987). V roku 1937 Beams a Holes použili elektromagnetický záves na testovanie pevnosti materiálu. Ich patent o AMB sa datuje k roku 1941. Technológia AMB začala pracovať s digitálnou riadiacou technikou pod pracovným vedením Habernanna (Habermann a Liard, 1979) a Schweitzera (Schweitzer, 1976). Prvé medzinárodné sympóziu o technológii aktívneho magnetického ložiska sa konalo v roku 1988, kedy bola aj založená spoločnosť Medzinárodné Združenie Magnetických ložísk profesormi: prof. Schweitzer, prof. Allaire (University of Virginia) a prof Okada (Ibaraki University).

V súčasnej dobe existuje po celom svete mnoho výskumných centier a spoločností zameraných na výskum AMS a AMB. Majú svoje vlastné individuálne skúšobné súpravy a skúsenosti v tejto oblasti výskumu. Výsledky sú prezentované a diskutované vedcami a vývojovými inžiniermi počas medzinárodného sympózia o magnetických ložiskách (ISMB), ktoré sa organizuje každé dva roky. Ďalšia konferencia, ktorá zdieľa otázku technológie magnetickej levitácie je medzinárodná konferencia o magnetických levitačných systémoch a lineárnych pohonoch. Výskum vlastnosti a riadenia AMS umožňuje prenos poznatkov a metód na AMB, ktorý je jeho súčasťou. Vývoj materiálov, mikroelektroniky, počítačovej vedy, nelineárneho riadenia, modelingu a simulácií spôsobili, že AMLS je dnes dostupnejšou technológiou. V súčasnej dobe je potrebná podrobná analýza a optimalizácia všetkých komponentov AMLS z dôvodu minimalizácie zložitosti a nákladov.

V posledných rokoch sa počet strojov s aktívnymi magnetickými ložiskami navrhoval za účelom odstrániť lubrikanty, vibrácie, hluk a dosiahnuť vysokej rýchlosti a zaťaženia. Tieto systémy sú komplikované vzhľadom na konštrukciu mechanických, elektrických a elektronických obvodov. Pre uskutočnenie návrhu je potrebné vykonať širokú škálu analýz - od štádia konštrukcie, až po vývoj architektúry riadiaceho algoritmu. Metóda konečných prvkov môže byť nástrojom pre analýzu magnetického poľa. Mnohí vedci, ktorí pracujú na magnetických ložiskách alebo na hybridných motoroch (kombinácia AMB a elektrického stroja) používajú túto metódu v štádiu navrhnutia projektu. Numerická analýza umožňuje skontrolovať, či nová navrhnutá štruktúra AMB je efektívna vzhľadom na levitačné sily, vlastnosti magnetického poľa a vzájomných elektro-mechanických pôsobení.

Metóda konečných prvkov bola tiež použitá na analýzu magnetického toku vo vzduchovej medzere a radiálnych síl v miniatúrnych hybridných motoroch (Kanebako a kol., 2002), (Ohmori a kol., 2002). V miniatúrnych systémoch sa vyskytujú základné modelingové chyby z dôvodu rozptylu indukcie a inými nelineárnymi efektmi, ktoré sú zanedbávané pri väčších systémoch. Vhodná konštrukcia AMB je kompromisom medzi mnohými požiadavkami a mala by sa líšiť pre rôzne aplikácie. Vývoj stroja vybaveného AMB si žiada spoluprácu mnohých odborníkov na mechaniku, štruktúru materiálov, elektroniku a riadenia. Vhodná konštrukcia stroja, optimálna štruktúra AMB a prislúchajúci ovládací algoritmus umožňujú dosiahnuť modernú priemyselnú jednotku.

Základom AMLS funkčnosti je elektromagnetická sila vytváraná elektromagnetom (pozri Obr. 3.1), ktorá môže byť vypočítaná s pomocou Maxwellových rovníc.



Obr. 3.1. Konfigurácie zavesenia rotora s dvoma elektromagnetmi

Ide o súbor rovníc, ktoré opisuje vzťahy medzi základnými elektromagnetickými veličinami. Tieto veličiny sú intenzita elektrického poľa E , prúdová hustota D , intenzity magnetického poľa H , indukcia magnetického poľa B , hustota prúdu J a elektrická hustota náboja ρ . Všeobecne pre polia ktoré sa menia v čase, Maxwelllove rovnice a rovnice kontinuity môžu byť zapísané ako diferenciálne rovnice, ktoré dokážu riešiť metódu konečných prvkov.

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (3.1)$$

$$\nabla \cdot D = \rho, \nabla \cdot B = 0 \quad (3.2)$$

$$\nabla \cdot J = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.3)$$

Elektromagnetická sila sa počíta použitím energie magnetického poľa, W :

$$F_{em} = -\frac{\partial W}{\partial a}, W = \frac{1}{2} \int BHdV \quad (3.4)$$

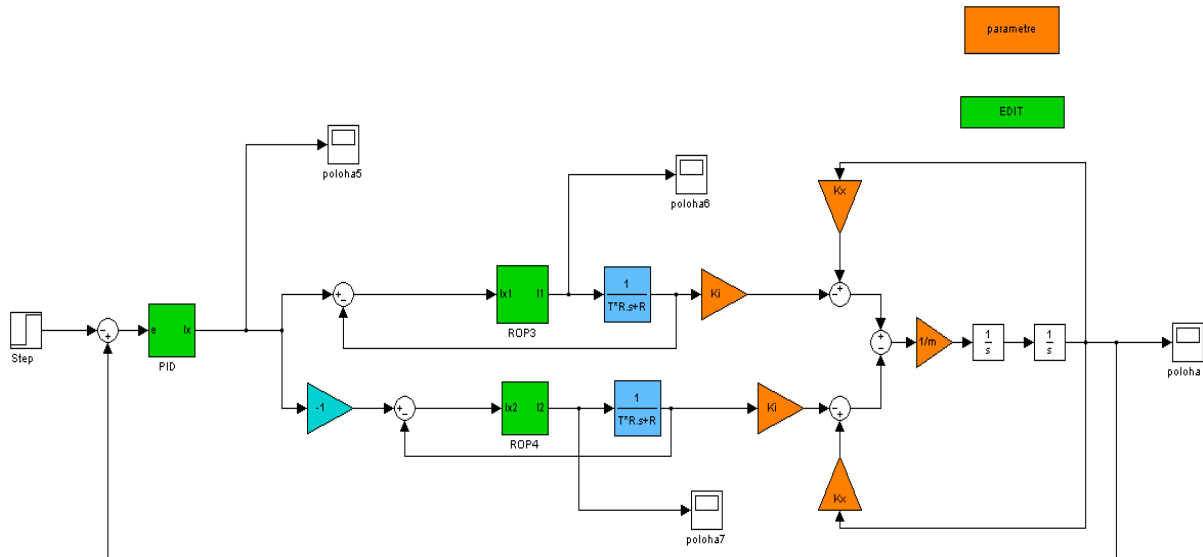
kde F_{EM} je elektromagnetická sila, a je vzdialenosť medzi zdrojom poľa a rotorom a V je objem vzduchovej medzery. Nastavenie telesa na požadovanú vzdialenosť a elektromagnetická sila môže byť vypočítaná s ohľadom na hustotu magnetického toku, prúdu v cievke i , indukčnosť cievky L a vzdialenosť telesa a .

$$F_{em}(B) = A \cdot B^2 \mu_0^{-1}, F_{em}(a, i) = -\frac{Ki^2}{4a^2}, F_{em}(a, i) = \frac{1}{2} \frac{dL(a)}{da} i^2 \quad (3.5)$$

kde: $K = \mu_0 N^2 A$ je elektromagnetická konštanta, A plocha vyjadreného pólu, μ_0 - permeabilita vákuu a N - počet závitov cievky.

3.1 Schéma modelu riadenia zvislej osi magnetického ložiska

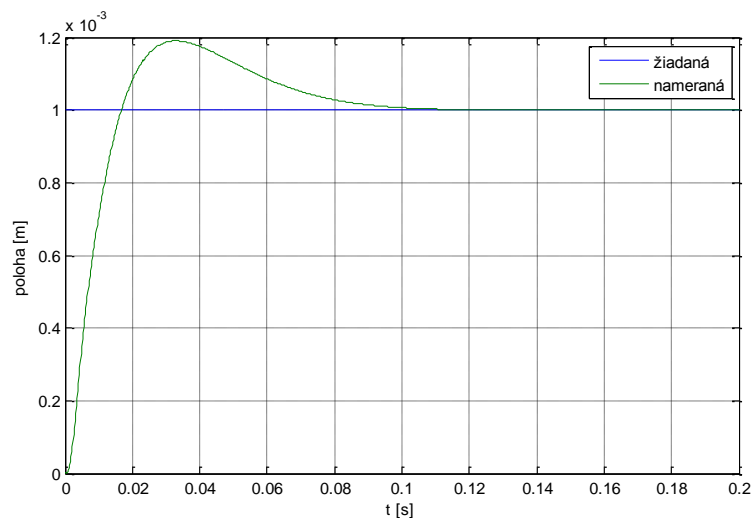
Riadenie obidvoch cievok bolo navzájom spojené ako je možné vidieť na Obr.3.1.1 Na zostrojenie schémy regulačného obvodu zvislej osi bol použitý model magnetického závesu, ktorý bol ďalej rozšírený na dve cievky, navzájom regulačne prepojené. Zo schémy je vidieť, že ak sa rotor približuje k jednej cievke prúd do nej sa znižuje a zároveň prúd do protiaľhlej cievky sa zväčšuje.



Obr.3.1.1 Bloková schéma regulačného obvodu magnetického ložiska vo zvislej osi

3.2 Priebeh regulácie vo zvislej osi magnetického ložiska

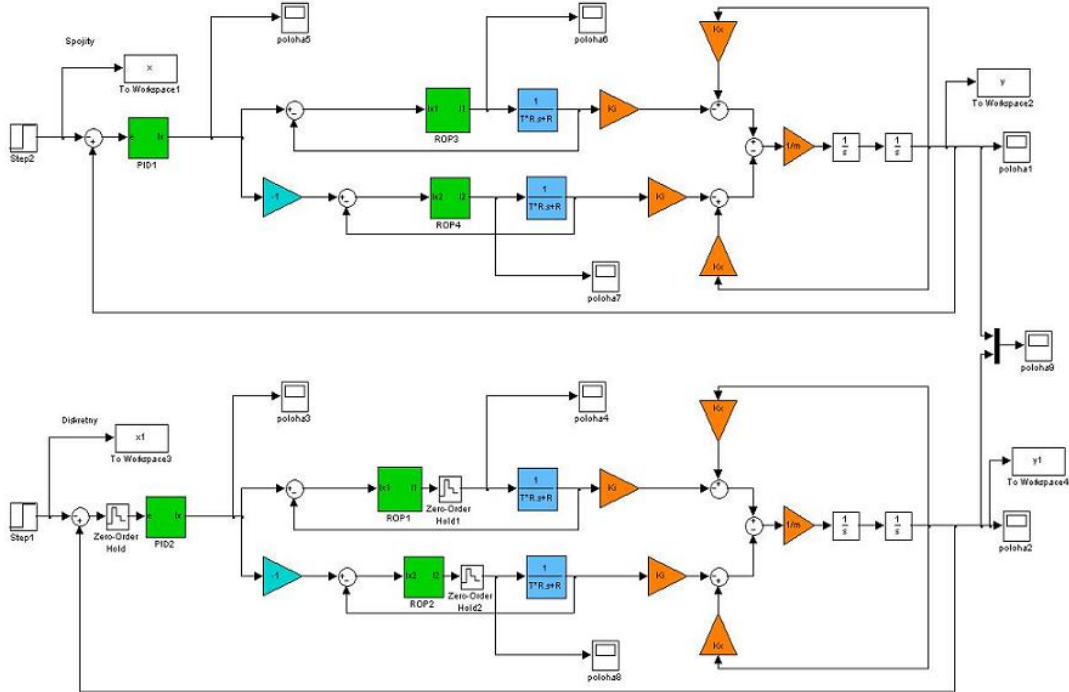
Na Obr.3.2.1 vidíme priebeh regulácie magnetického ložiska vo zvislej osi pri skoku želanej polohy o 1 mm. Snažili sme sa rôznym nastavením hodnôt ω_0 , ξ a k optimálne nastaviť PID regulátor, ale ako vidieť z priebehu nepodarilo sa nám odstrániť preregulovanie. Želanú polohu sme dosiahli za 0,11 sekundy.



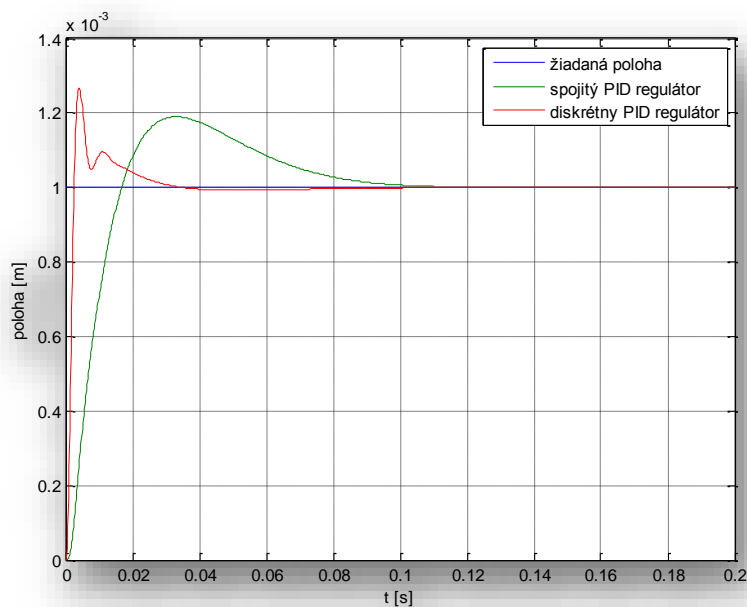
Obr.3.2.1 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy s PID o 1 mm ($\xi=1$, $\omega_0 = 100$ rad/s, $k=1$)

3.3 Diskrétna forma algoritmu riadenia a vplyv periódy vzorkovania na kvalitu riadenia

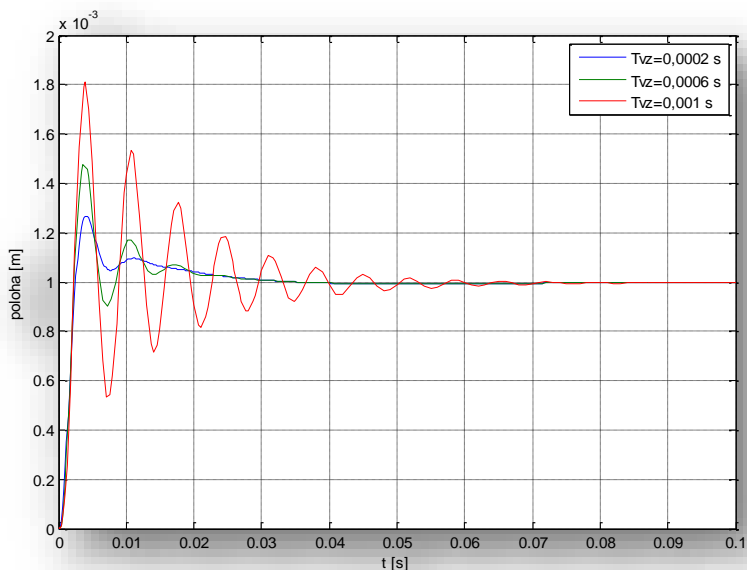
K priblíženiu reálnemu modelu sústavy bol navrhnutý diskrétny model riadenia. V tejto časti boli ukázané diskrétny riadenia, ich porovnanie so spojitym riadením a vplyv periódy vzorkovania na kvalitu riadenia polohy rotora v magnetickom ložisku.



Obr.3.3.1 Spojitý a diskretný regulačný obvod magnetického ložiska vo zvislej osi



Obr.3.3.2 Porovnanie časových priebehov regulácie spojitého a diskretného regulátora ($T_v=2 \times 10^{-4}$)



Obr.3.3.3 Časový priebeh periódy vzorkovania

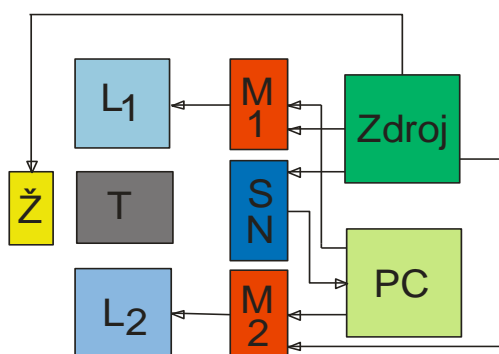
Ako vidieť z Obr.3.3.2 diskretný regulátor má väčšie prerogulovanie ako spojité, čo sa vzhľadom na charakter sústavy dalo očakávať.

Na Obr.3.3.3 je vidieť aký má obrovský vplyv perióda vzorkovania na kvalitu regulácie. Vnáša nestabilitu a kmitavý priebeh regulácie. Pri našich experimentoch bola použitá perióda vzorkovania $T_{vz}=2 \times 10^{-4}$. Pri perióde vzorkovania väčšej ako 10^{-3} sa už daná sústava zvislej osi magnetického ložiska nedala regulovať.

3.4 Reálny experiment magnetického závesu s dvoma cievkami

Vykonaný reálny experiment na sústave magnetického závesu skladajúci sa z antimagnetickej konštrukcie a s dvoch cievok, ktoré sú bližšie popísané v ďalšej časti.

Bloková schéma je nasledovná:

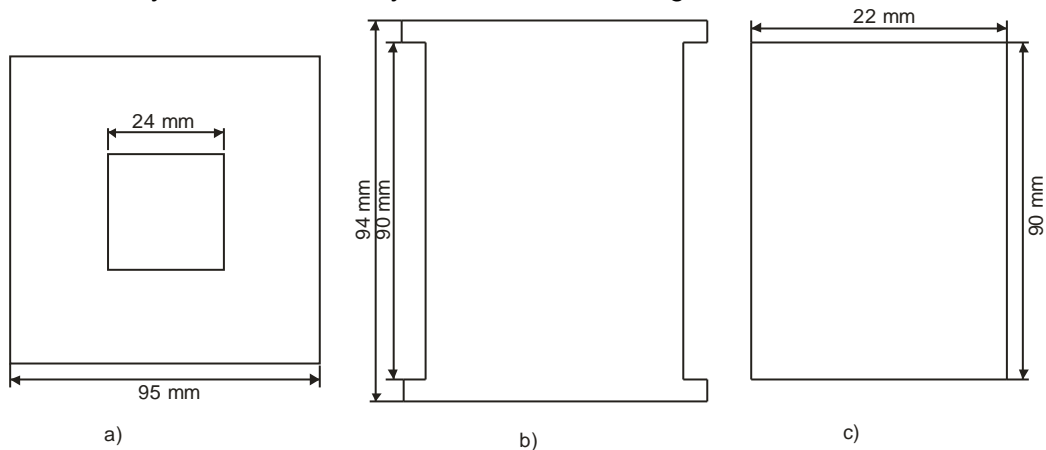


Obr. 3.4.1 Bloková schéma reálneho experimentu

Bloková schéma popis:

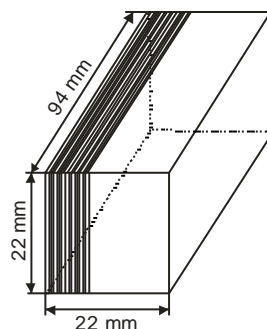
bloková schéma sa skladá s dvoch cievok L_1 a L_2 , každá cievka bola navinutá Cy lakovaným vodičom priemeru 1,3mm s 900 závitmi, odbočky po 300 závitoch, ktoré boli napájané z meničov M_1 a M_2 . Zdrojové napätie pre Meniče bolo 12V a boli riadené (ovládané) cez výkonný počítač (PC). Snímač S_n kvôli presnému lineárnemu a dynamickému riadeniu musel

byť napájaný stabilizovaným napätím (presne) 9 V, aby bola vylúčená chybovosť. (inak hrozí jeho poškodenie). Preto bol zvolený stabilizovaný samostatný zdroj napájania určený výhradne pre snímač S_n . Žiarovka Z bola napájaná 12 V použili sme tu kvalitnú halogénovú žiarovku vyššej triedy, ktorá má jasné biele svetlo. Žiarovka nám zabezpečila dostatok svetla ktoré dopadalo na snímač S_n . Ďalším dôležitým faktorom bolo použitie snímača CCD (snímačov) ILX551A od firmy SONY. Pre kvalitu a rýchlosť riadenia navrhovaných obvodov bola použitá meracia karta od firmy Humusoft model MF624, ktorá bola spojená s výkonným počítačom. Reálny model bol riadený cez Matlab-Simuling ver. 6.2.

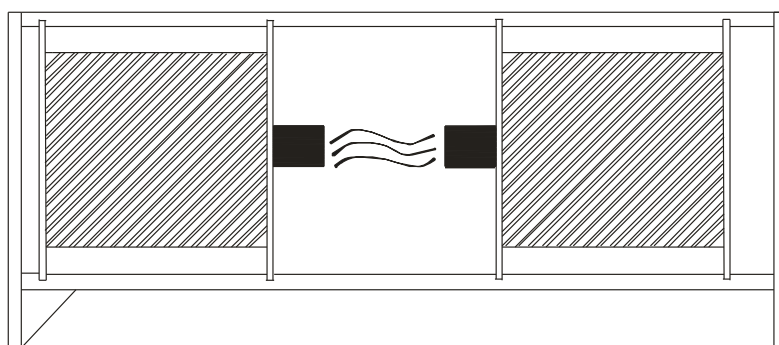


Obr. 3.4.2 Jednotlivé časti magnetického závesu a ich rozmery (kostra cievok): a) predná a zadná časť ktorá je rovnaká, b),c) vnútorná časť

Na obrázku boli popísané jednotlivé časti magnetického závesu s dvoma cievkami. Každá cievka sa skladala z kostry. Materiál na kostru bol zvolený kuprex hrúbky 1mm, ktorý bol nemagnetický aby nám nerušil magnetické vlnenie. Po zložení a zafixovaní kostry bola druhá časť nasadená na trn a navinutá na závit na navíjacom stroji, po každých tristo závitoch bola vyhotovená odbočka, (čiže cievka sa dá výkonovo rozdeliť podľa potrieb reálneho experimentu). Výkonové rozdelenie cievky malo za úlohu citlivo nastaviť presné dynamické riadenie reálneho experimentu. Celkovo mala každá cievka 900 závitov. Závitv boli z medeného lakovaného drôtu o priemere 1,3 mm. Každá vrstva bola oddelená izolačným materiálom, pre tento účel bola použitá sklotextilná impregnovaná štruktúra s výbornými izolačnými vlastnosťami a dlhou životnosťou, aby bolo zabránené medzizávitovému skratu. Na stavbu jadra boli použité orientované plechy, ktoré majú vynikajúce elektromagnetické vedenie a tak zosilňujú tok magnetického vlnenia. (využívajú sa tiež vo výkonových transformátoroch napätia). Rozmery jadra sú v nasledujúcom obrázku č. 3.4.3. Na každé jadro bolo použitých 54 plechov, ktoré boli vložené do jadra cievky. Celková konštrukcia magnetického závesu s dvoma cievkami reálneho experimentu je na obr. 3.4.4



Obr.3.4.3 Jadro magnetického závesu



Obr. 3.4.4 Konštrukcia reálneho experimentu magnetického závesu s dvoma cievkami

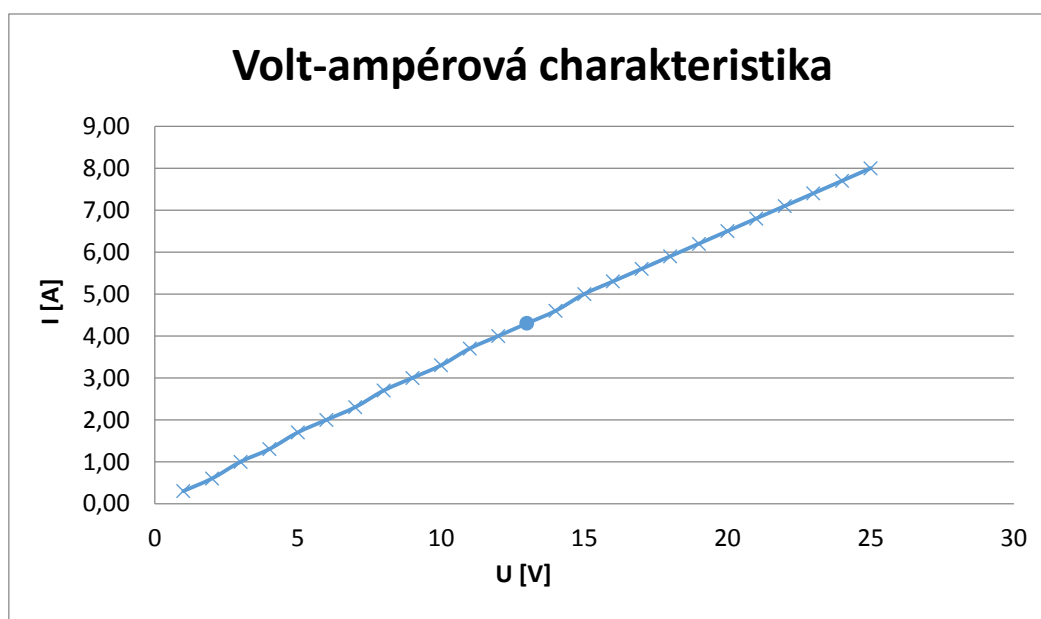
Volt-ampérová charakteristika cievok

| | | | | | | | | | | |
|--------------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|------------|------------|----------|------------|
| U [V] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| I [A] | 0.3 | 0.6 | 1 | 1.3 | 1.7 | 2 | 2.3 | 2.7 | 3 | 3.3 |

| | | | | | | | | | |
|------------|-----------|------------|------------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 3.7 | 4 | 4.3 | 4.6 | 5 | 5.3 | 5.6 | 5.9 | 6.2 | 6.5 |

| | | | | |
|------------|------------|------------|------------|-----------|
| 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| 6.8 | 7.1 | 7.4 | 7.7 | 8 |

Tab. 3.4.1 Volt- ampérová charakteristika cievok



Obr.3.4.5 Volt- ampérová charakteristika dynamických cievok

Z obrázku vidíme, že volt-ampérová charakteristika dynamických cievok je lineárna. Cievka bola dimenzovaná na 25V a 8 A. Pri aplikácii reálneho experimentu bola cievka zapojená len na polovičný výkon 12V a 5A, čím bolo odbúranie zahrievania cievky, aby boli vylúčené chybovosti a následne menenie odporu pri zmene teploty. Pre kvalitu a rýchlosť riadenia navrhovaných obvodov bol odpor celej cievky pri maximálnom zaťažení 3,125Ω. Pri reálnom modeli bol použitý len polovičný výkon a tak náš odpor bol 3 Ω. Indukčnosť cievky L bola schopnosť, pri ktorej sa časovou zmenou elektrického prúdu prechádzajúceho cievkou indukovalo na jej svorkách napätie.

Výpočet indukčnosti cievok boli vykonané podľa vzorcov, ktoré vychádzajú zo základného vzťahu.

$$L = N^2 * \Lambda \quad (4.1)$$

N - počet závitov cievky → 900

Λ - (lambda) magnetická vodivosť - súvisí s vyhotovením a tvorom cievky

$$\Lambda = \mu_0 * \mu_r * \frac{S}{l} \quad (4.2)$$

μ₀ – permeabilita vákua → 4*π*10⁻⁷ ~ 1.26*10⁻⁶ H m⁻¹

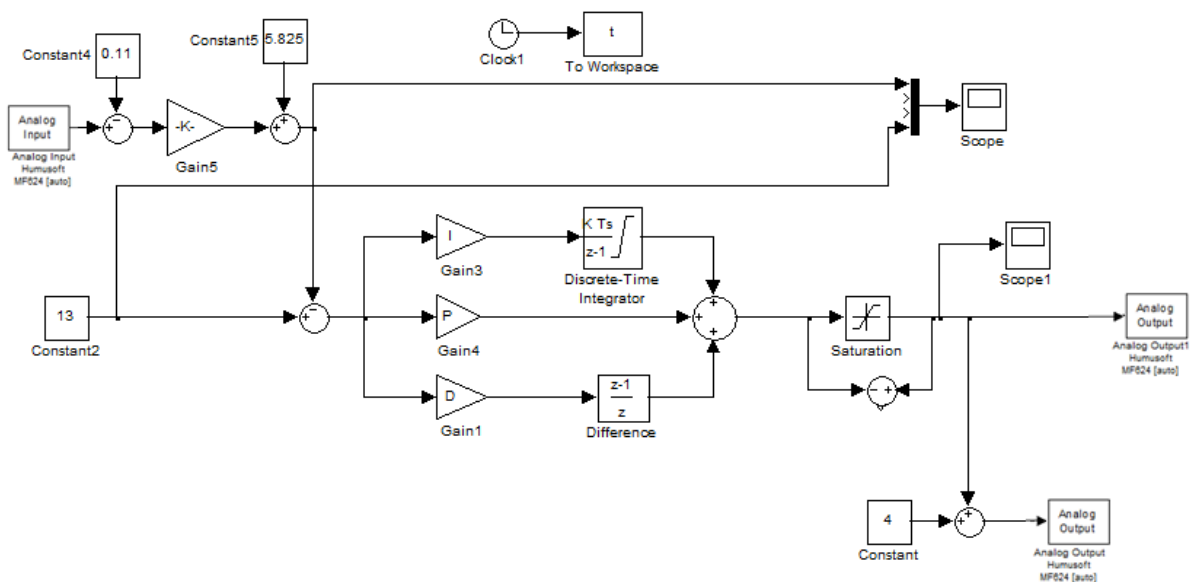
μ_r - relatívna permeabilita → 0.999 990 meď

S - prierez jadra cievky → 0.000 484 m²

l - dĺžka cievky → 0.094 m

$$\Lambda = \mu_0 * \mu_r * \frac{S}{l} = 1.26 * 10^{-6} * 0.999 990 * \frac{0.000 484}{0.094} = 0.000016081 H$$

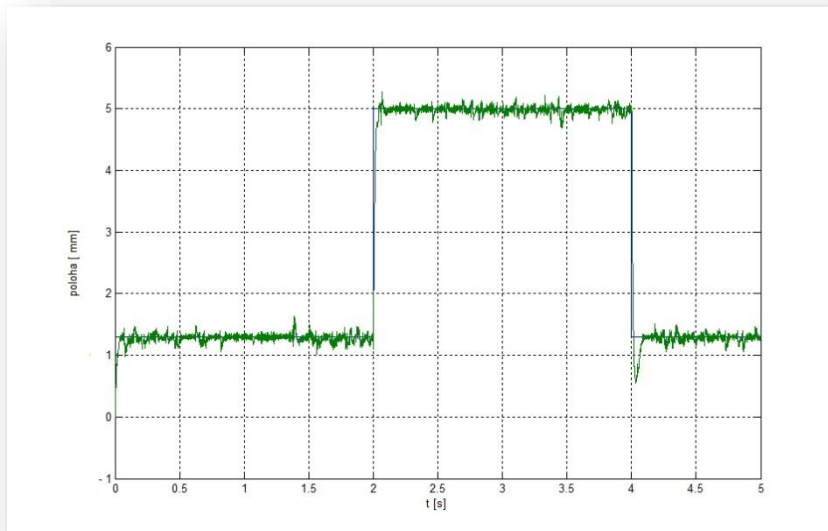
$$L = N^2 * \Lambda = 900^2 * 0.000016081 = \mathbf{13.0256 H}$$



Obr. 3.4.6 Schéma reálneho experimentu dvoch cievok

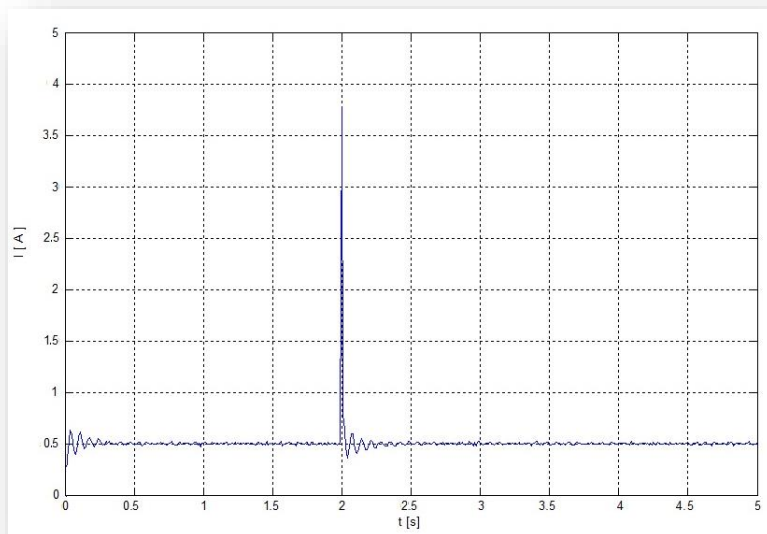
Na obr. 3.4.6 je schéma reálneho experimentu dvoch cievok. Pre kvalitu a rýchlosť riadenia navrhovaných obvodov bol reálny experiment realizovaný pomocou Matlab-Simuling a pomocou meracej karty Humusoft MF624 a použitia výkonového počítača. Na vstupe bol vykonaný prepočet, aby sme výsledky dostávali v milimetroch. Želané hodnoty boli zvolené

na 13mm. Na dosiahnutie želanej hodnoty bol použitý PID regulátor. Jednotlivé parametre regulátora boli vypočítané pomocou metódy rozmiestenia pólov. Cievky boli zapojené tak, aby sa navzájom odpudzovali a tým bol dosiahnutý požadovaný efekt. Chceli sme vyskúšať aj inú štruktúru návrhu riadenia napríklad PD, ale systém bol nestabilný. Pomocou regulátora PID bola dosiahnutá presná lineárna a dynamická hodnota riadenia magnetickej indukčnosti hornej cievky, ktorá mala za účel priťahovať levitujúce teleso. Druhá cievka mala za úlohu levitujúce teleso odpudzovať.



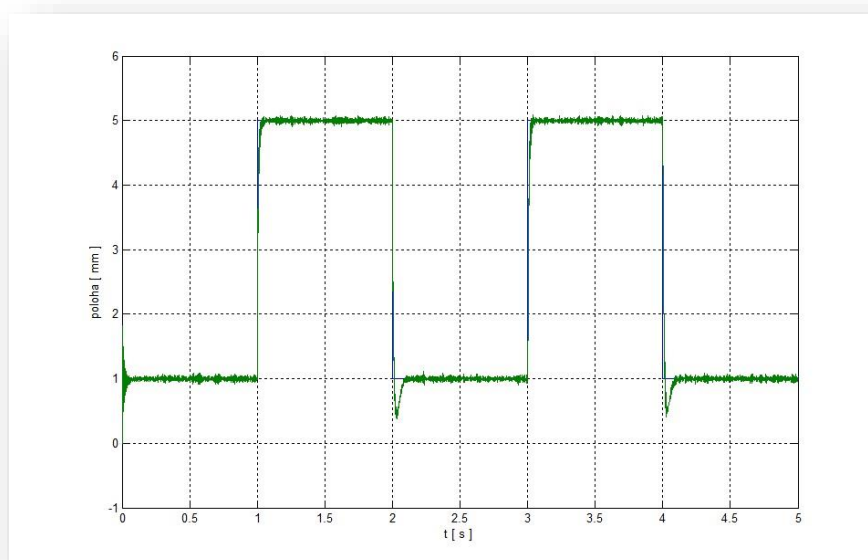
Obr. 3.4.7 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny reálneho experimentu polohy s jedným skokom pri želanej hodnote $w=1,3$ mm na 5 mm. (PID)

Na obr 3.4.7 je znázornený reálny experiment magnetického závesu. Modrou farbou je znázornená želaná hodnota a zelenou skutočná hodnota. Podľa priebehu vidíme že regulátor je dobre navrhnutý pretože dosiahol želanú hodnotu. Signál je trochu zašumený, ale tento jav nemôžeme vnímať ako chybu pretože pri reálnych experimentov musím sním počítať.



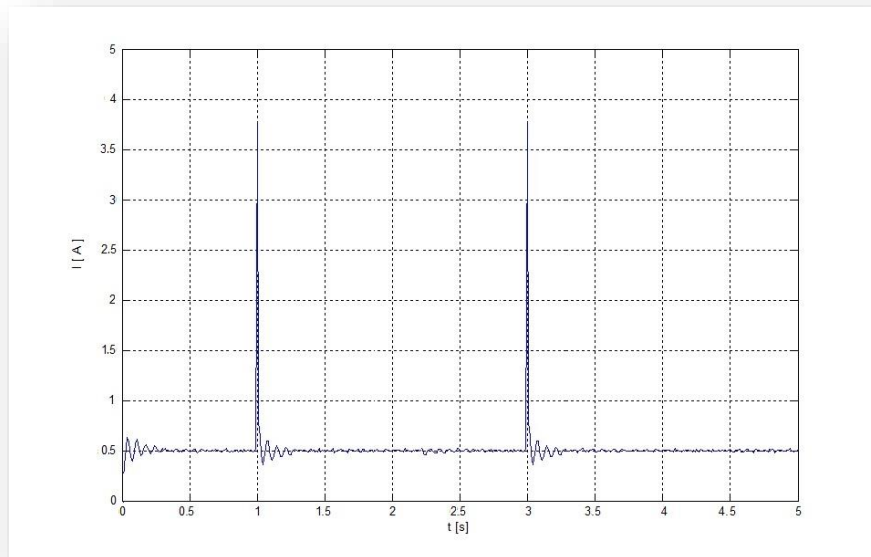
Obr. 3.4.8 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy pre reálny experiment priebehu prúdu pri zmene želanej polohy

Na obr. 3.4.8 vidíme priebeh prúdu. Signál je tiež zašumený. Pri hodnote 2 s sme spravili skok želanej polohy, aby sme otestovali regulátor či je dobré navrhnutý. Prúd sa nám zvýšil na hodnotu okolo 3.8 A. Po dosiahnutí želanej hodnoty nám prúd klesol na hodnotu 0.5 A. Ďalšom experimente bolo otestované ako by si poradil regulátor pri dvoch skokoch za sebou.



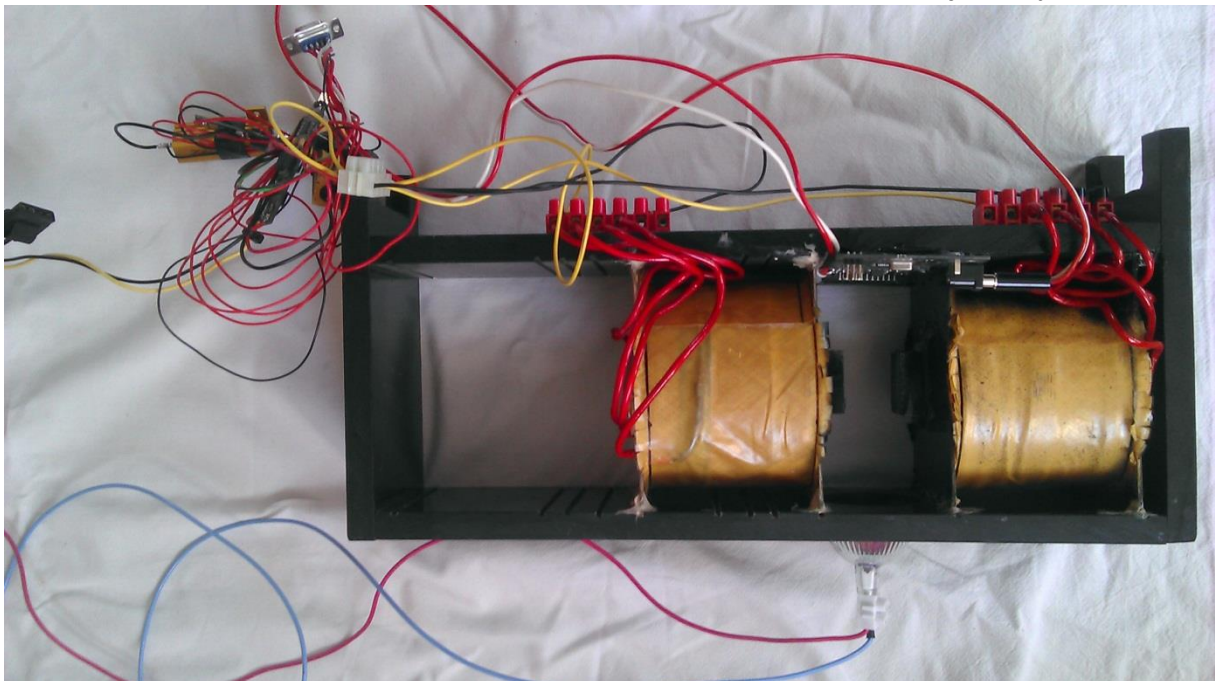
Obr. 3.4.9 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy pre reálny experiment priebehu s dvoma skokmi pri želanej hodnote $w=1,3$ mm na skok 5 mm (PID)

Na obr. 3.4.9 vidíme priebeh želanej polohy s dvoma skokmi. Modrou farbou je znázornená želaná poloha a zelenou farbou skutočná poloha. V čase 1 s sme spravili prvý skok. Regulátor nám želanú hodnotu dosiahol. Zapätí sme spravili ďalší skok v čase 3 s. Regulátor si s týmto skokom poradil a opäť dosiahol želanú hodnotu pri ktorej nám nevzniklo žiadne preregulovanie.



Obr. 3.4.10 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy pre reálny experiment priebehu prúdu pri zmene želanej polohy

Z obrázku 3.4.10 vidíme ako sa správa priebeh prúdu pri skokoch želanej polohy



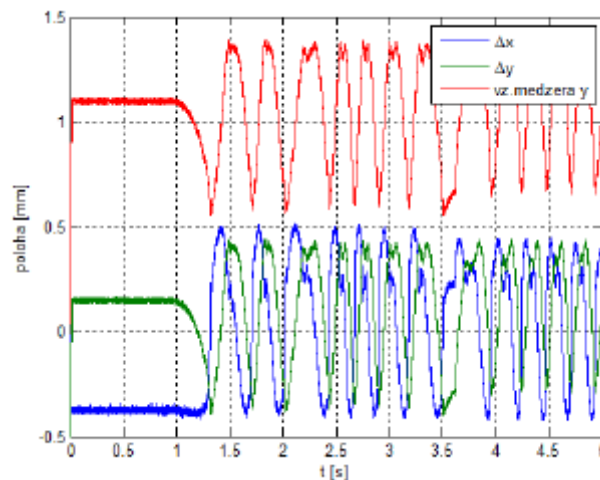
Obr. 3.4.11 reálny model magnetického závesu s dvoma cievkami

Zhodnotenie experimentu:

V tejto časti bol navrhnutý a úspešne otestovaný reálny experiment s dvoma cievkami. Pri tomto experimente sme sa stretli s rôznymi problémami. Veľké problémy vznikli pri regulácii, kde obe cievky mali navrhnutý samostatný regulátor a pôsobili proti sebe. Potom bol vymyslený iný spôsob zapojenia a to tak, že cievky sa budú navzájom odpudzovať. Zapojenie nám pomohlo pri regulácii. Ďalší problém nám vznikol pri zapojení snímača. Snímač ILX551A musí byť napájaný stabilizovaným jednosmerným zdrojom o hodnote 9V. Prvé zapojenie ktoré sme požili bolo, že jeden zdroj napájal žiarovku a snímač. Žiarovka nám dávala dostatok svetla aj pri 9 V. Problém nastal pri dlhšom používaní zdroja, ktorý sa zahrial a prestal byť stabilný. Preto bol použitý druhý zdroj, ktorý nám presne dodával stabilných 9 V. Pri návrhu regulátora boli použité aj iné štruktúry riadenia okrem PID. Systém bol nestabilný a štruktúra PI, alebo PD bola nedostatočná. Pri štruktúre PD nám vznikla trvalá regulačná odchýlka a pri PI štruktúre bol systém nestabilný. Pri vyriešení všetkých problém a návrhu štruktúry riadenia PID boli spravené experimenty obr. 3.6 a 3.8 ktoré boli stabilné a dosiahli želanú hodnotu. Na obr. 3.10 je fotografia reálneho modelu s dvoma cievkami. Tento reálny model bude naďalej slúžiť ďalším študentom, na ktorom si môžu overovať metodiku riadenia v rámci bakalárskych a diplomových prác .

4. Nastavenie komponentov reálnej zostavy

Pre aplikáciu na reálny systém bola použitá V/V karta HUMUSOFT MF624. Výstupy z karty jednotlivých výstupných (D/A) a vstupných (A/D) prevodníkov boli pre systém RML zapojené podľa obr.E5.2 - (príloha E dizertačnej práci). Karta je v tzv. "Target PC", kde boli realizované všetky výpočtové operácie a zber údajov pre následné spracovanie. Ovládanie bolo realizované cez program Matlab-Simuling a Real-time Toolbox. Pre nastavenie správnej výstupnej hodnoty snímačov polohy pre potreby regulačných obvodov boli vstupné signály upravované. Úprava spočívala pripočítaní alebo odpočítaní určitej hodnoty napätia z výstupného signálu snímačov polohy a to z dôvodu korekcie snímanej polohy. (príloha E - Obr.E5.1a dizertačnej práci). V prípade výstupných signálov z V/V karty do regulátora prúdu už výstup nebolo nutné upravovať z dôvodu bezpečnosti bolo implementované obmedzenie výstupnej veličiny (príloha E - Obr.E5.1b dizertačnej práci) vzhľadom na reálny systém regulátora prúdu.



Obr.4.1.: Časový priebeh signálu zo snímačov polohy pre potreby radiacích obvodov, pri vyosenom a rotačnom pohybe hriadeľa

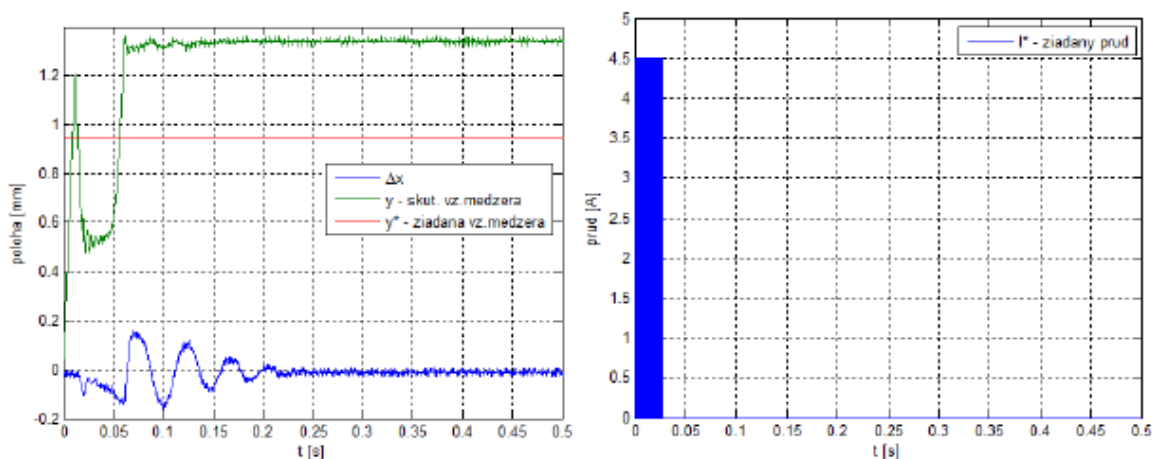
V úvode treba uviesť, že všetky modeli v spojení s reálnou sústavou pracujú v diskretnom režime s periódou vzorkovania $T_v = 4 \cdot 10^{-4} s$.

4.1 Experimentálne výsledky

V experimentálnych pokusoch boli aplikované odsimulované riadiace obvody pre rôzne pracovné režimy RML. Postupovať sa bude ako to bolo v prípade simulácii od jednoduchšieho pracovného režimu (EZ) až po záverečné (RML). Na záver sa výsledky porovnávajú a zhodnotia.

4.2 Elektromagnetický záves – EZ

Bol aplikovaný model EZ do reálneho systému. Aplikácia v systéme Matlab-imulink a Real Time Toolbox je uvedená v prílohe E – (Obr.E5.3 dizertačnej práci).

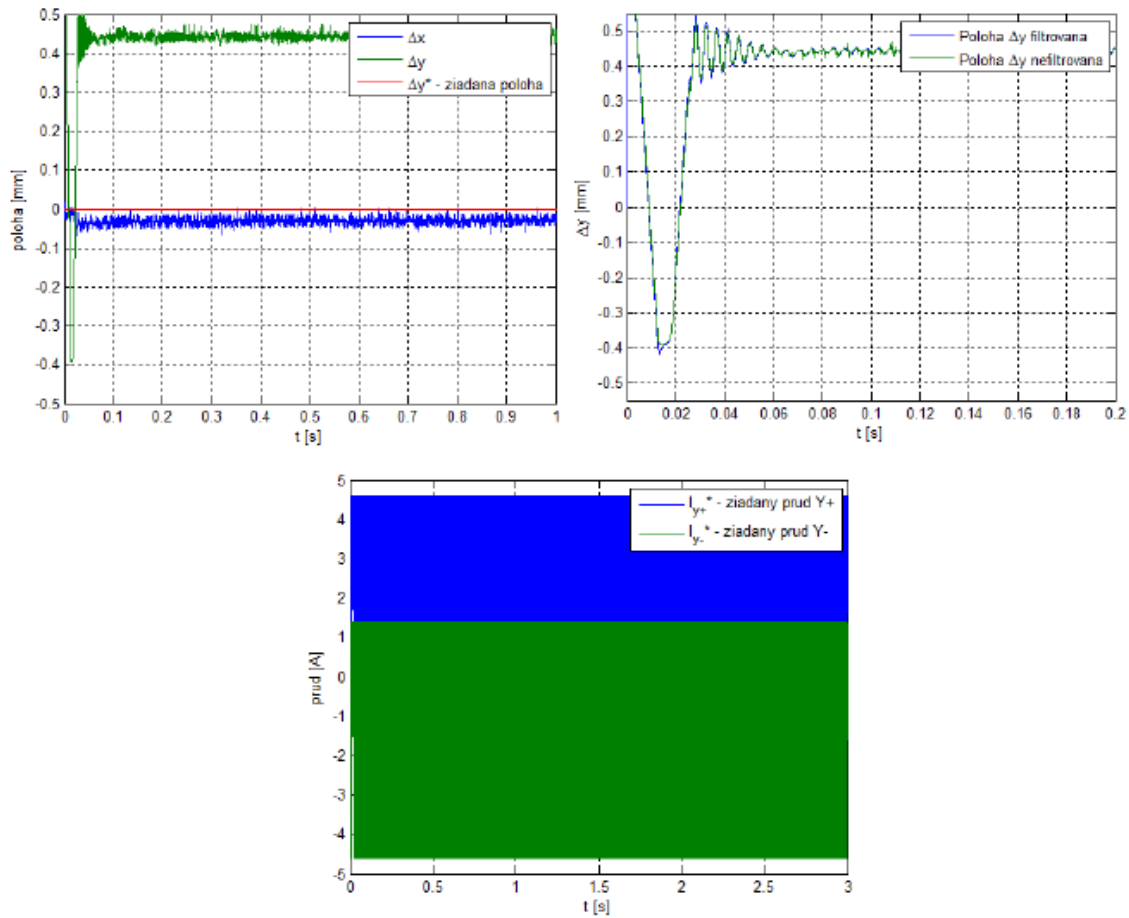


Obr.4.2.1 Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy rotora a prúdu pri experimente EZ a.) poloha rotora b.) žiadany prúd

Z obr. 4.2.1 je vidieť, že regulácia zaznamená regulačnú odchýlku a vykoná regulačný zásah. Na obr. 8.4.3a je elektromagnet, ktorý pritiahne rotor až na minimálnu úroveň vzduchovej medzery a následne sa rotor spustí na východiskovú pozíciu a tak zostáva rotor v tejto pozícii až do konca experimentu. Z obr.8.5b je zrejmé, že hodnota žiadaneho prúdu kedy sa v úvode žiada maximálny prúd až na úroveň obmedzenia a potom vznikne žiadaná hodnota nulová. Z uvedených výsledkov možno konštatovať, že systém nedokáže za daných okolností pracovať korektne čo preukázali aj vyššie spomenuté simulácie.

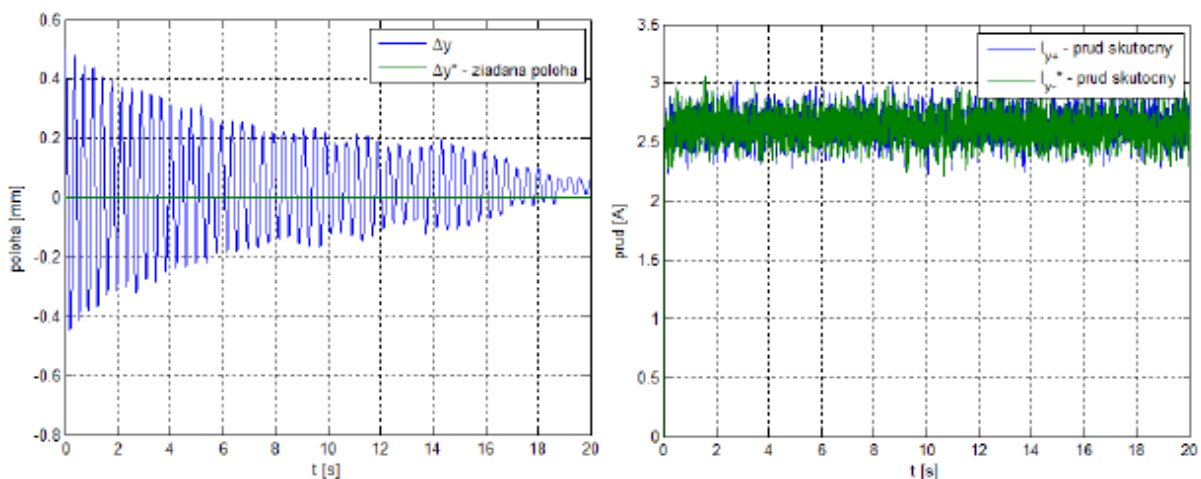
4.3 Diferenciálne zapojenie elektromagnetov – DZ

V prípade DZ pôsobia na rotor dva elektromagnety protíľahlo voči sebe. Z úsudku, že priamo z tohto dôvodu bude systém stabilnejší. Aplikoval sa model DZ (príloha D - obr.D4.7 dizertačnej práci) na reálny systém, uvedený v prílohe E – (obr.E5.4 dizertačnej práci).



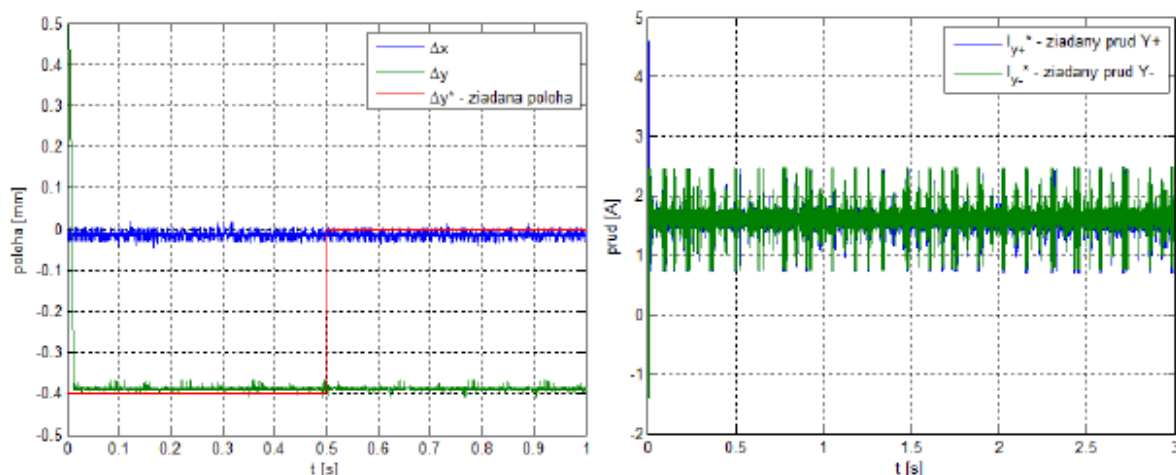
Obr.4.3.1: Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy rotora pri DZ, a.) celkový náhľad, b.) porovnanie vplyvu LPR, c.) Požadovaný prúd v DZ

Z výsledkov je zrejmé, že systém regulácie polohy je nevyhovujúci. Z výsledku polohy hriadeľa (obr. 4.3.1a) vidieť, že systém zareaguje presne opačne ako v prípade EZ. Po spustení sa rotor okamžite dostáva zo spodnej do vrchnej úvrate a tak zostáva až do konca experimentu. Z priebehov prúdov (obr.4.3.1c) vidieť, že elektromagnet (Y+) vo vrchnej úvrati RML je napájaný väčším prúdom ako elektromagnet v spodnej úvrati (Y-). Z tejto charakteristiky možno ešte vyčítať, že požadovaný prúd priamo z regulátora má výrazné oscilácie.



Obr.4.3.2: Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy podľa obr.D4.6 s prídavkom šumu do signálu polohy

Z výsledku bolo možné usúdiť, že systém je zo začiatku nestabilný ale pomaly prechádza do stabilnejšieho pásma. Prúd vo vinutiach nie je tak rozkmitaný ako v prípade DZ s LPR.



Obr.4.3.3: Časový priebeh výstupnej regulovanej veličiny- polohy experimentu na reálnom systéme

Experiment na reálnom systéme ukázal, že regulácia vôbec nereaguje na skokovú zmenu žiadanej polohy a rotor zostáva na východiskovej pozícii. Z priebehov prúdov vidieť, že akčná veličina regulátora polohy stále osciluje ale v prijateľnejších hodnotách v okolí budiaceho prúdu. Z tohto možno usúdiť, že regulácia reaguje len na impulzy vytvorených šumom.

Zhodnotenie experimentálnych výsledkov

Z výsledkov a pozorovaní vidieť, že v simuláciách nie sú obsiahnuté všetky fyzikálne javy, ktoré pôsobia na reálny systém. Celkovo je systém RML silno nelineárny a prirodzene nestabilný. Z tohto predpokladu by sa ďalšie skúmanie systému uberalo zisťovaním rôznych poruchových veličín a vplyvu všetkých súčastí systému RML na riadiaci systém pre dosiahnutie optimálnej regulácie.

Záver

Dizertačná práca je po obsahovej stránke rozdelená na tri časti.

- V prvej časti bol odsimulovaný a reálne overený magnetický záves s jednou cievkou. Simulačné výsledky v oblasti modelovania preukázali, že na základe linearizovaného modelu je uvedený model dostatočne presný pre úlohy okolo centrálnej pozície. Kvôli kompenzácii statickej chyby navrhnutý PID regulátor dosahoval lepšie výsledky pre našu aplikáciu ako PD regulátor. Dosiahnuté modelovacie a simulačné výsledky oblasti riadenia otvárajú cestu k ďalším experimentom a možnostiam odstránenia niektorých problémov (prítomnosť šumov), ktoré je nutné v budúcnosti vyriešiť. Ukázalo sa pri experimentoch, že jedným zo spôsobov vylepšenia metód riadenia by bolo použité senzora polohy s väčšou presnosťou.
- V druhej časti dizertačnej práce bol vytvorený matematický simulačný model magnetického závesu s dvoma cievkami. Tento model bol verifikovaný v prostredí Matlab-Simulink. Na základe výsledkov zo simulačného modelu bol navrhnutý vylepšený simulačný model s dvoma cievkami.

Konštrukcia magnetického závesu s dvoma cievkami prebiehala v dvoch krokoch:

1. najprv boli skonštruované dve kostričky (obr. 5.5.2). Na tieto kostričky bol postupne navinutý lakovaný drôt a každá vrstvu bola prekrytá izoláciou aby sme eliminovali skraty medzi jednotlivými vrstvami. Po návrhu cievok bola navrhnutá konštrukcia stojanu pre ich uchytenie (obr. 5.5.4). Ďalej boli navrhnuté a skonštruované meniče pre jednotlivé cievky. Meniče sú obmedzené na 5 A. Toto obmedzenie nám postačilo na navrhnutie riadenia magnetického závesu. Každá cievka bolo navrhnutá na vstupné napätie 25 V a prúd 8 A (tab. 5.5.1). Bol však aplikovaný polovičný výkon, aby sa nám cievka nezohrievala a nemenila nám vlastnosti.
2. V druhom kroku bol navrhnutý matematický model pre simuláciu 3 osového a 5 osového radiálneho magnetického ložiska.

Aktívne radiálne magnetické ložiská majú nepopierateľné výhody. Ako bolo uvedené v úvode tejto práce sa už magnetické ložiská a iné aplikácie magnetickej levitácie objavujú v praxi. V skutočnosti tieto riešenia nie sú príliš rozšírené vzhľadom na vstupné náklady a špecifickosť použitia. V úvode boli naznačené možnosti redukcie vstupných nákladov v systémoch, ktoré nevyužívajú snímače polohy. Z dosiahnutých výsledkov treba vyzdvihnúť, že elektromagnetický obvod RML bol vykonaný podľa návrhu a následné overovanie vlastností potvrdilo správnosť prístupu k návrhu. Pri navrhovaní regulačných obvodov polohy sa postupovalo na základe odborných skúseností, know-how a získaných vedomostí z publikácií autorov v celosvetovom rozsahu. Syntéza regulačných obvodov polohy obsahovala aj vnesenie možných okolitých rušivých vplyvov ako napr. nelineárna charakteristika elektromagnetického obvodu, saturácia v jadre elektromagnetu, šírkoimpulzná modulácia regulátora prúdu a šum vo výstupoch snímačov polohy. Po zhodnotení všetkých vplyvov bol vytvorený matematický model, ktorý reprezentoval celkovú charakteristiku RML. Boli vykonané rôzne simulačné experimenty v snahe dosiahnuť spoľahlivú a kvalitnú reguláciu. Už v tomto štádiu vznikali ďalšie úvahy o konštrukcii regulačných obvodov a ako obmedziť vplyvy vonkajších elementov rušenia. Získané výsledky a dosiahnutie

kvalitnej regulácie polohy v simulačných experimentoch boli nevyhnutnou súčasťou implementácie regulačných obvodov na reálny systém RML. Po implementácii na reálny systém RML bolo zistené, že v systéme sú ďalšie rušivé vplyvy, ktoré neboli zahrnuté v simulačných experimentoch a znemožnili chod fyzikálneho modelu RML.

Zhrnutie výsledkov dizertačnej práce

Cieľom dizertačnej práce bol návrh, modifikácia a aplikácii konvenčných ako aj moderných štruktúr riadenia, modelovania, simulácie aktívnych radiálnych magnetických ložísk (ďalej len RML) na základe ich konštrukčných parametrov a súčasným využívaním v praxi. Autor práce aplikoval, rozšíril a otestoval konvenčné metódy riadenia založené na analytických a experimentálnych matematických modeloch. S podporou CAD a MKP nástrojov bol navrhnutý magnetický obvod RML a návrh konštrukcie testovacieho zariadenia (magnetický záves s jednou a dvoma cievkami a magnetické ložisko). Z nameraných a vypočítaných parametrov obvodu bol vytvorený matematický model RML pre rôzne pracovné režimy. Na základe matematického modelu boli navrhnuté štruktúry regulácie a vypočítané optimálne parametre regulátorov pre jednotlivé pracovné režimy. Kvalita regulácie pre navrhované štruktúry regulácie a vypočítané optimálne parametre boli overené simuláciami na matematických modeloch. Navrhované regulačné obvody boli modifikované zároveň tak, aby umožnili riadenie aj s rešpektovaním vonkajších poruchových veličín. Komplexné regulačné štruktúry s výpočtom optimálnych parametrov regulátora, boli implementované na RPL na rôzne pracovné režimy.

Hlavným výsledkom práce je vývoj nového magnetického ložiska, nové metódy riadenia pre magnetické závesy a SW modulov pre ovládanie a riadenie komplexného systému. Využitie výsledkov dizertačnej práce je možné pri vývoji nových ložísk a využitia navrhovaných SW modulov pri modelovaní a simulácii.

Splnenie cieľov dizertačnej práce:

1. Navrhnuť riadenie 5-osového systému s radiálnym a axiálnym magnetickým ložiskom. Overiť dynamické vlastnosti na hybridnom simulačnom modeli systému. Cieľom návrhu je získať požiadavky na návrh a realizáciu fyzikálneho modelu radiálneho ložiska.

Najjednoduchšia štruktúra regulátora poostáva zo samostatného riadenia každej osi. Výchylka hriadeľa x_1, y_1, x_2 a y_2 sú merané pomocou senzorov a zosilnené pomocou zosilňovača G_c , aby mohlo generovať požadované riadiace zásahy. Riadiace zásahy sú prevádzané pomocou radiálnych síl F_{x1}, F_{y1}, F_{x2} a F_{y2} na prúdové impulzy. Regulátory generujú prúdové impulzy pre jednotlivé osi. Pokiaľ uvažujeme gyroskopický efekt alebo vzájomný vplyv medzi osami x a y, potom je nutné pri návrhu regulátorov uvažovať aj tieto sily. Obrázok 7.5 ukazuje blokovú schému, regulátora, ktorý zahŕňa detekciu momentu hriadeľa, výchylku pri posunutiach a natočeniach. Na Obr.7.3.1 vidíme priebeh regulácie jednotlivých osí 5-osového magnetického ložiska. Ako je zrejmé z grafu priebeh regulácie z-tovej osi je rozdielny od regulácie ostatných osí. Je to spôsobené inými dynamickými vlastnosťami regulácie rotora v pozdĺžnej osi. Z-ová os je taktiež vyregulovaná omnoho neskoršie ako ostatné osi.

2. Nahrnúť a overiť vlastnosti modelu magnetického závesu pre 3 fázové ložisko.

Pri návrhu modelu a polohového systému 3-osového systému využijeme náš navrhnutý systém riadenia zvislej osi, ktorý je vlastne naše riadenie osi x. Toto riadenie je takmer identické s riadením osi y s tým rozdielom, že pri riadení oboch osí x a y je potrebné uvažovať interakciu medzi týmito osami. Táto interakcia je spôsobovaná gyroskopickým efektom. Os y budeme riadiť jednoduchým regulátorom založeným tiež na princípe dvoch cievok ležiacich oproti sebe v jednej rovine.

3. Experimentálny návrh magnetickej levitácie s dvoma cievkami.

Pri tomto experimente sme sa stretli s rôznymi problémami. Veľké problém nám vznikali pri regulácii, kde obe cievky mali navrhnutý samostatný regulátor a pôsobili proti sebe. Potom sme vymysleli iný spôsob zapojenie a to tak, že cievky sa budú navzájom odpudzovať. Toto zapojenie nám pomohlo pri regulácii. Ďalší problém nám vznikol pri zapojení snímača. Snímač ILX551A musí byť napájaný stabilizovaným jednosmerným zdrojom o hodnote 9V. Prvé zapojenie ktoré sme použili bolo, že jeden zdroj napájal žiarovku a snímač. Žiarovka nám dával dostatok svetla aj pri 9 V. Problém nastal pri dlhšom používaní zdroja, ktorý sa zahrial a prestal byť stabilný. Preto sme museli použiť druhý zdroj, ktorý nám presne dodával stabilných 9 V. Pri návrhu regulátora sme chceli použiť aj iné štruktúry riadenie okrem PID. Systém je dosť nestabilný a štruktúra PI, alebo PD bola nedostatočná. Pri štruktúre PD nám vznikala trvalá regulačná odchýlka a pri PI štruktúre bol systém nestabilný. Pri vyriešení všetkých problém a návrhu štruktúry riadenia PID sme spravili experimenty obr. 5.6 a 5.8 ktoré sú stabilné a dosiahli sme želanú hodnotu. Na obrázku 5.10 je fotografia reálneho modelu s dvoma cievkami. Tento reálny model bude naďalej slúžiť ďalším študentom, na ktorom si môžu overovať metodiku riadenia v rámci bakalárskych a diplomových prác .

4. Navrhnuť a realizovať fyzikálny model radiálneho magnetického ložiska s využitím najnovších poznatkov s uvedenej oblasti.

Bol realizovaný simulačný model ROP. Schému a vstupné parametre pre simuláciu ROP sú uvedené v prílohe D (obr.D4.1). Schéma navyše obsahuje systém ANTIWIND UP, ktorý obmedzuje výstupnú veličinu vzhľadom na reálne obmedzenia zdroja napätia. Simulačný model je spojený režime. Experiment spočíval v skokovej zmene v čase $t_0=0s$ žiadanej hodnoty prúdu z $I^*=0A$ na $I^*=1A$. Zvažovali sa aj variácie voliteľných parametrov tlmenia ξ a pásma priepustnosti $\omega_0 (f_0)$.

Zoznam publikácií autora

Slovenská technická univerzita v Bratislave
31000 FEI Ústav riadenia a priemyselnej informatiky

autor: Gažo Martin

Zoznam publikácií za roky 2010-2012

AFC Publikované príspevky na zahraničných vedeckých konferenciách

AFC1: Tvorba virtuálneho modelu polohového servosystemu pomocou Matlabu a EJS, Triaška, Stanislav -- Gažo, Martin, Tvorba virtuálneho modelu polohového servosystemu pomocou Matlabu a EJS. Posterus [online časopis] : Internetový časopis Vol. 3, Iss. 12. ISSN 1338-0087.

AFC2: SlimDriveline Software, Gažo, Martin -- Triaška, Stanislav, SlimDriveline Software. In Technical Computing Bratislava 2010 : 18th Annual Conference Proceedings.

- Bratislava, Slovak Republic, 20.10.2010. Bratislava: RT Systems, 2010, ISBN 978-80-970519-0-7.
- AFC3: SimDriveline Software, Gažo, Martin -- Triaška, Stanislav, SimDriveline Software. Posterus [online časopis] : Internetový časopis Vol. 3, Iss. 7. ISSN 1338-0087.
- AFC4: Riadenie magnetického ložiska, Gažo, Martin -- Žalman, Milan -- Foltin, Martin, Riadenie magnetického ložiska. In BYRON, P. Technical Computing Prague 2011 : 19th Annual Conference Proceedings. Prague, Czech Republic, November 8, 2011. Prague: Institute of Chemical Technology, 2011, ISBN 978-80-7080-794-1.
- AFC5: Merging Images Using Matlab, Triaška, Stanislav -- Gažo, Martin, Merging Images Using Matlab. In Technical Computing Bratislava 2010 : 18th Annual Conference Proceedings. Bratislava, Slovak Republic, 20.10.2010. Bratislava: RT Systems, 2010, ISBN 978-80-970519-0-7.
- AFC6: External Control of Magnetic Levitation Plant, Gažo, Martin -- Kurčík, Peter, External Control of Magnetic Levitation Plant. In KOZÁKOVÁ, A. ELITECH'10 : 12th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 26.5.2010. Bratislava: STU v Bratislave, 2010, ISBN 978-80-227-3303-8.
- AFC7: Active Magnetic Bearing Control in 3D Model, Gažo, Martin -- Kozák, Štefan -- Dúbravský, Jozef, Active Magnetic Bearing Control in 3D Model. In KOZÁK, Š. -- KOZÁKOVÁ, A. -- ROSINOVÁ, D. Kybernetika a informatika 2012 : Zborník abstraktov. Medzinárodná konferencia SSKI a FEI STU. Skalka pri Kremnici, 31. január - 4. február 2012. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2012, s. 83--84. ISBN 978-80-227-3642-8.
- AFC8: Active Magnetic Bearing Control in 3D Model, Gažo, Martin -- Kozák, Štefan -- Dúbravský, Jozef, Active Magnetic Bearing Control in 3D Model. In Elektro 2012 : 9th International Conference, May 21-22, 2012, Žilina - Rajecké Teplice. Žilina: Elektrotechnická fakulta, Žilinská univerzita, 2012, ISBN 978-1-4673-1178-6.
- AFC9: Mechatronic System of Levitation System, Gažo, Martin -- Kozák, Mechatronic System of Levitation System. PC13-Process Control 2013 : 19th International Conference on Process Control, June 18 – 21, 2013, Štrbské pleso High Tatras. Accepted conference submissions will be indexed in IEEE Xplore

Literatúra

- [1] Akira Chiba - Tadashi Fukao - Osamu Ichikawa - Masahide Oshima - Magnetic Bearings and Bearingless Drives, NEWNESS, 2005, ISBN: 0750657278, 400 str.
- [2] Schweitzer, Gerhard; Maslen, Eric H. (Eds.), Theory, Design, and Application to Rotating Machinery, Springer, 2009, ISBN 978-3-642-00496-4, XV, 535 str.
- [3] Luc BURDET, Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications, ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE, PhD Thesis: 3616(2006), 2006, 147 str.
- [4] Mochimitsu Komori - Chiaki Shiraishi, Superconducting bearings assisted by self-sensing AMBs in liquid nitrogen, Kyushu Institute of Technology, 8th International Symposium on Magnetic bearing, 26-28.8.2002, Mito Japan, 6 str.
- [5] B. Polajžer (Eds.), Decentralized PI/PD position control for active magnetic bearings, Electrical Engineering (2005), DOI 10.1007/s00202-005-0315-1
- [6] Ladislav Kučera, Robustness of Self-Sensing Magnetic Bearing, International Center for Magnetic Bearings, ETH Zurich, Switzerland, 10 str.
- [7] M. Emura (Eds.), The influence of cutting technique on the magnetic properties of

- electrical steels, *Journal of Magnetism and Mag. Materials* 254–255(2003)358–360, 3 str.
- [8] René Larsonneur, Mecos Traxler AG, Modeling and Analysis of Dynamic Mechanical Systems, Switzerland, 54 str.
- [9] Patrick T. McMullen – Co S. Huynh - Richard J. Hayes, COMBINATION RADIAL AXIAL MAGNETIC BEARING, Seventh International Symp. on Magnetic Bearings, August 23-25, 2000, ETH Zurich, 6 str.
- [10] Alfonz Traxler, Eigenschaften und Auslegung von berührungsfreien elektromagnetischen Lagern, EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH, Diss. ETH Nr. 7851, 1985, 149 str.
- [11] Simon E. Mushi - Zongli Lin - Paul E. Allaire - Stephen Evans, Aerodynamic crosscoupling in a flexible rotor: control desing and implementation, 11th International symposium on magnetic bearing, 26-29.8.2007, Nara, Japan, 6 str.
- [12] Boštjan Polajžer, Magnetic Bearings, Theory and Applications, Sciyo, 2010, 140 str.
- [13] Jianming Huang - Liuping Wang - Yang Huang, Continuous Time Model Predictive Control for a Magnetic Bearing System, PIERS ONLINE, VOL. 3, NO. 2, 2007, 7 str.
- [14] René Larsonneur, Design and control of active magnetic bearing systems for high speed rotation, Swiss federal insitute of technology Zurich, Diss. ETH No. 9140 (1990), 182 str.
- [15] P. Shcherbakov, MAGNETIC PROPERTIES OF SILICON ELECTRICAL STEELS AND ITS APPLICATION IN FAST CYCLING SUPERCONDUCTING MAGNETS AT LOW TEMPERATURES, Proceedings of RuPAC XIX, Dubna 2004, 3 str.
- [16] Tadahiko Shinshi (Eds.), PRECISION RADIAL MAGNETIC BEARING, Precision and Intelligence Laboratory, Tokyo Institute of Technology, Yokohama, Japan, Grant-in-Aid for Scientific Research No. 11555049 from JSPS, 2000, 4 str.
- [17] A. Belhadj - P. Baudouin - Y. Houbaert, Simulation of the HAZ and magnetic properties of laser cut non-oriented electrical steels, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 248 (2002) 34–44, 11 str.
- [18] Torbjörn A. Lembke, Design and Analysis of a Novel Low Loss Homopolar Electrodynamic Bearing, ISBN 91-7178-032-7, KTH Electrical Engineering - Doctoral Dissertation, 2005, 212 str.
- [19] Boštjan Polajžer (Eds.), DESIGN OF A RADIAL ACTIVE MAGNETIC BEARING, University of Maribor, Faculty of Electrical Engineering and Computer Science, Slovenia, 2002, 4 str.
- [20] Beat Aeschlimann, Control aspects of high precision active magnetic bearings, École polytechnique fédérale de Lausanne, Thèse No 2489 (2001), 133 str.
- [21] Philipp Imoberdorf - Thomas Nussbaumer - Johann W. Kolar, ANALYSIS OF A COMBINED RADIAL-AXIAL MAGNETIC BEARING FOR A HIGH-SPEED DRIVE SYSTEM, Power Electronic Systems Laboratory, ETH Zurich, Switzerland, 6 str.
- [22] Florian Lotch, Identification and automated controller desing for active magnetic bearing systems, Diss. ETH No. 14474, Swiss federal institute of technology Zurich, Switzerland, 2002, 254 str.
- [23] Simon Estomih Mushi, AN ACTIVE MAGNETIC BEARING TEST RIG FOR AERODYNAMIC CROSSCOUPLING: CONTROL DESIGN AND IMPLEMENTATION, Faculty of the School of Engineering and Applied Science, University of Virginia, 2008, 118 str.
- [24] Boštjan Polajžer, Design and Analysis of an Active Magnetic Bearing Experimental System, UNIVERSITY OF MARIBOR, FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING

- AND COMPUTER SCIENCE, Diss. thesis, UDC: 621.822:537(043.3), 2003, 77 str.
- [25] SYNCHRONY [online] [cit. 2012-03-08]
 URL: <<http://www.synchrony.com/products/magnetic-bearings/novaglides-magneticbearings.aspx>>
- [26] Žalman Milan, Akčné členy, Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2003, ISBN 80-227-1835-1, 209 str.
- [27] KAMAN Precision products [online] [cit. 2012-04-15]
 URL: http://www.kamansensors.com/html_pages/Legacy_Products.html
- [28] MICRO-EPSILON [online] [cit. 2012-04-20]
 URL: <<http://www.micro-epsilon.sk/displacement-position-sensors/eddy-currentsensor/index.html>>
- [29] LION Precision [online] [cit. 2012-03-02]
 URL: <http://www.lionprecision.com/inductive-sensors/eddy-current-sensors.html>
- [30] MEGGIT, Vibro-meter [online] [cit. 2012-02-26]
 URL: <http://energycatalog.vibrometer.com/index.php?option=com_mtree&task=viewlink&link_id=52&Itemid=56>
- [31] HUMUSOFT [online] [cit. 2012-04-26]
 URL: <<http://www.humusoft.cz/produkty/datacq/mf624/>>
- [32] dSPACE [online] [cit. 2012-03-17]
 URL: <<http://www.dspace.com/en/pub/home/products/hw/singbord/ppcconbo.cfm>>
- [33] Pfeiffer vacuum [online] [cit. 2012-03-17]
 URL: <<http://www.pfeiffer-vacuum.com/know-how/vacuum-generation/turbomolecularpumps/portfolio-overview/magnetic-levitation--turbopumps/>>
- [34] ENGINEER LIVE, SKF USA Inc., Lansdale, PA [online] [cit. 2012-04-27]
 URL: <http://www.engineerlive.com/Design-Engineer/Motors_and_Drives/Magnetic_bearings_and_permanent_magnet_high_speed_motors_/20862/>
- [35] Design World -New Levels of Performance with Magnetic Bearings, M.Hinckley, SKF USA Inc., Lansdale, PA [online] [cit. 2012-04-28]
 URL: <<http://www.designworldonline.com/articles/6490/243/New-Levels-of-Performance-with-Magnetic-Bearings.aspx>>
- [36] Servosystémy – prednášky, ÚRPI, FEI STUBA, [online] [cit. 2012-02-13]
 URL: <<http://servo.urpi.fei.stuba.sk/>>
- [37] Marek Mikuláš, Polohový systém radiálneho magnetického ložiska, Diplomová práca: FEI-5406-12317, FEI, STUBA, 2011, spoluriešiteľ
- [38] Y.X.Su - C.H.Zheng Dong Sun - B.Y.Duan, A Simple Nonlinear Velocity Estimator for High-Performance Motion Control, Transactionns Industrial Electronics, VOL.52, No.4,2005
- [39] Martin Kanský, Návrh systému riadenia radiálneho magnetického ložiska, Diplomová práca : FEI-123456,FEI,STUBA, 2012 spoluriešiteľ