

Ing. Martin Jar u-ka

Autoreferát dizerta nej práce

NÁVRH SYSTÉMU POLOHOVANIA RADIÁLNEHO MAGNETICKÉHO LOpISKA

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe: **Automatizácia a riadenie**

v študijnom odbore 5.2.14. automatizácia

Miesto a dátum: Bratislava, 9.9.2015

**SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA
V BRATISLAVE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY**

Ing. Martin Jar u-ka

Autoreferát dizerta nej práce

NÁVRH SYSTÉMU POLOHOVANIA RADIÁLNEHO MAGNETICKÉHO LOpISKA

na získanie akademickej hodnosti doktor (philosophiae doctor, PhD.)

v doktorandskom študijnom programe:

Automatizácia a riadenie

Miesto a dátum: Bratislava, 9.9.2015

Dizerta ná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia

Na Ústav Robotiky a Kybernetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Slovenskej technickej univerzity
Ilkovi ova 3, 812 19 Bratislava

Predkladate : Ing. Martin Jar u-ka
Ústav Robotiky a Kybernetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Slovenskej technickej univerzity, Ilkovi ova 3, 812 19 Bratislava

Trkolite : Prof. Ing. Milan fialman, PhD.
Ústav Robotiky a Kybernetiky, Fakulta elektrotechniky a informatiky,
Slovenskej technickej univerzity, Ilkovi ova 3, 812 19 Bratislava

Oponenti: Prof. Ing. Boris Rohá - I kiv, PhD.
Strojnícka Fakulta, STU Bratislava
Prof. Ing. Ján Vittek, PhD.
Elektrotechnická fakulta, filinská univerzita

Autoreferát bol rozoslaný: 15.10.2015

Obhajoba dizerta nej práce sa koná: 28.10.2015

Na Ústave Robotiky a Kybernetiky, Fakulty elektrotechniky a informatiky,
Slovenskej technickej univerzity, Ilkovi ova 3, 812 19 Bratislava

Prof. Dr. Ing. Milo-Oravec, dekan FEI STU

Názov

Návrh systému polohovania radiálneho magnetického ložiska

K ú ové slová

Aktívne magnetické ložisko, PID regulátor, menič

Anotácia

Cieľom práce je navrhnuť optimálnu zštruktúru polohového riadenia pre radiálne magnetické ložisko, ktorá zabezpečí maximálnu dynamiku a presnosť. V práci je navrhnutý a realizovaný fyzikálny model systému pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami, na ktorom je testované navrhnuté polohové riadenie. V rámci návrhu fyzikálneho modelu sa bralo ohľad na možné poruchové veličiny a fyzikálny model bol upravený tak aby ich eliminoval. V rámci práce je podrobnejšie riešená problematika snímania polohy a spracovania signálov. Okrem toho sa práca zaoberá návrhom a realizáciou hysterézného PWM regulátora prúdu s preklápaným riadením v meničoch pre ložiská s dôrazom na dynamiku regulácie a spotrebovanú energiu. Pre polohové riadenie je navrhnutý a realizovaný adaptívny PID regulátor. Parametre PID regulátora sú navrhnuté metódou rozmiestňovania pólov. V závere práce sú zhodnotené dosiahnuté vlastnosti systému pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami.

Title

Positioning system design of the radial magnetic bearing

Key words

Active magnetic bearing, PID controller, inverter

Annotation

The aim of this dissertation work was to design the optimal structure of the position control for radial magnetic bearing that ensures the maximum dynamics and precision. The physical model of the drive system with the active magnetic bearings was designed and implemented, as well. In mentioned physical model, the designed position control was tested with reference to the possible disturbance variables and the physical model has been adjusted to eliminate them. As part of the work, the issue of position sensing and signal processing were further detailed solved. Furthermore, the work dealt with design and implementation of hysteretic PWM current controller with a triggered control in converters for bearings with an emphasis on control dynamics and consumed energy. Consequently, the adaptive PID controller was designed and implemented for position control. PID controller parameters were designed with pole placement method. In conclusion, the achieved features of the drive system with active magnetic bearings were evaluated.

Obsah	
Úvod	5
<i>Ciele dizerta nej práce</i>	6
1. Magnetické ložiská . sú asný stav problematiky	7
1.1 <i>Základná klasifikácia magnetických ložisk</i>	7
1.2 <i>Vlastnosti magnetických ložisk</i>	8
1.3 <i>Pokročilé programové vybavenie</i>	8
1.4 <i>Ekonomické zhodnotenie aplikácie AML</i>	9
1.5 <i>Aktívne magnetické ložiská ako mechatronický systém</i>	9
2 Návrh a realizácia fyzikálneho modelu pohonu s aktívnym magnetickým ložiskom so 6. stupňami voľnosti	10
2.1 <i>Model radiálneho magnetického ložiska (RML)</i>	10
2.1.1 <i>Diferenciálny elektromagnetický záves RML</i>	11
2.1.2 <i>Linearizovaný model diferenciálneho elektromagnetického závesu</i>	12
2.1.3 <i>Konstrukčné riešenie RML</i>	13
2.2 <i>Model axiálneho magnetického ložiska (AXML)</i>	14
2.2.1 <i>Konstrukčné riešenie AXML</i>	15
2.3 <i>Aktívny len - Meni pre AML</i>	15
2.3.1 <i>Meni a jeho modifikácia</i>	15
2.3.2 <i>Návrh a realizácia hysterézného PWM regulátora s preklápaným riadením</i>	17
2.4 <i>Vyhodnocovanie polohy rotora AML</i>	22
2.4.1 <i>Spracovanie signálov polohy</i>	23
2.5 <i>Konstrukčné riešenie systému pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami</i>	25
3 Návrh a realizácia riadiaceho systému pohonu s AML na vývojovom systéme dSpace 1103	27
3.1 <i>Prepojenie a možnosti ovládania dSpace 1103 s fyzikálnym modelom AML</i>	27
3.2 <i>Návrh a realizácia systému autokalibrácie rozsahu snímania polohy</i>	28
4 Návrh a realizácia algoritmov riadenia aktívneho magnetického ložiska	31
4.1 <i>Regulačný obvod prúdu - ROP</i>	31
4.2 <i>Syntéza regulačného obvodu polohy - ROPL</i>	31
4.3 <i>Návrh adaptívneho regulačného obvodu polohy - ROPL</i>	33
4.4 <i>Overenie navrhnutého riadenia na simulácii modelí RML</i>	36
4.5 <i>Overenie navrhnutého riadenia na reálnom systéme RML</i>	37
4.6 <i>Návrh a realizácia identifikácie hmotnosti rotora na reálnom systéme pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami</i>	40
5 Návrh vhodných metód potlačenia poruchových veličín.	44
Záver	46
Splnenie cieľov dizerta nej práce	47
Zoznam publikácií autora	49
Použitá literatúra	50

Úvod

Hlavným cieľom dizerta nej práce je spracovanie a využitie najnovších výskumných a aplikatívnych riešení v problematike návrhu a realizácie pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami - AML. Aktívne magnetické ložiská - AML nahrádzajú v mnohých aplikáciách ložiská s olejovým mazaním. Medzi hlavné výhody použitia AML v rotačných strojach patria najmä tieto: nie sú zdrojom kontaminácie nečistôt ani častickej oteru, znižujú mechanické straty, znižujú vibrácie strojov, majú vyššiu spoľahlivosť a umožňujú komplexnú diagnostiku stroja. Napriek týmto výhodám použitie magnetických ložisk bolo v minulosti obmedzené veľkosťou magnetických ložisk, zložitou integráciou magnetických ložisk do stroja, potrebou veľkého externého riadiaceho systému a vysokými nákladmi. Pokroky v technológii magnetických ložisk, vrátane miniaturizácie, a integrácie umožňujú prekonať mnoho z týchto obmedzení. V súčasnosti sa riadiace systémy zmenšujú, ale súčasne sa zvyšuje ich výkon použitím integrovanej architektúry. Redukcia veľkosti znamená, že riadiaci systém môže byť integrovaný do stroja čím sa eliminuje nutnosť použitia samostatného krytu regulátora. Miniaturizácia a integrácia umožňujú osadiť integrované magnetické ložisko do štandardného motora.

Pohon vybavený AML zabezpečuje monitoring stavu ložisk bez ďalších investícií do hardvéru. Štandardizáciou, integráciou a inováciou výroby, náklady na magnetické ložiská klesli. Sú súčasne vyvinuté systémy môžu byť dodávané výrobcami zariadení a konečným užívateľom za oveľa nižšiu cenu, než v minulosti. V nových aplikáciách je možné znížiť veľkosť, zložitú a náklady na magnetické ložiská. Magnetické ložiská netreba mazaním. Preto sú obzvlášť vhodné pre stroje, ktoré pracujú vo vzduchoprázdne, pri vysokých alebo nízkych (kryogénnych) 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, resp. ak nie je používanie mazív zlučiteľné s výrobným procesom. Takéto požiadavky sú charakteristické napr. pre linky na výrobu polovodičov, v potravinárskom alebo nápojovom priemysle. Prevádzka bez mazív však tiež znamená úsporu nielen prevádzkových (mazivá a údržba), ale aj obstarávacích nákladov, pretože odpadá nákup potrebných pomocných zariadení, ktoré súvisia s prevádzkou mazacieho systému (napr. erpadlá a filtre)

Nízke mechanické straty motora, rotačné straty hriade a sú ďalšou charakteristickou vlastnosťou magnetických ložisk. Je teda možné zvoliť motor s nižším výkonom a dosiahnuť vyššiu účinnosť. Nízke straty napovedajú, že prevádzkové teploty sú spravidla nižšie ako u ložisk iných typov (napr. valivých či hydrodynamických) a sú teda kladené nižšie nároky na chladenie celého zariadenia. Niektoré spôsoby použitia priamo využívajú vzduchovú medzeru - napr. procesy, ktoré vyžadujú prietok procesnej kvapaliny alebo materiálu. Využitie na biologické a farmaceutické účely, vrátane spracovania živých buniek, predstavujú len dva prípady možných aplikácií. Magnetické ložiská je možné hermeticky utesniť, vďaka čomu budú vhodné pre použitie v technologických procesoch založených na agresívnych kvapalinách, ktoré by inak mohli poškodiť utesnenie. Ložiská môžu tiež ponoriť do procesných kvapalín pod tlakom, bez toho aby bolo nutné ich utesňovať - sú teda aplikovateľné v hygienicky citlivých procesoch (napr. v potravinárskom priemysle).

Ciele dizerta nej práce

Cieľom dizerta nej práce je výskum, vývoj, návrh a realizácia fyzikálneho modelu pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami a aplikácie moderných metód automatického riadenia v oblasti polohového riadenia radiálneho magnetického ložiska a zároveň zníženia spotreby energie na prevádzku.

Dizerta ná práca rieši komplexnú problematiku aktívnych magnetických ložísk. Má 4 vedecké ciele, ktoré sú navzájom prepojené a na sebe závislé :

1. Návrh a realizácia fyzikálneho modelu pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami so 6. stupňami voňosti.
2. Návrh a realizácia vhodného radiaceho systému pohonu na vývojovom systéme dSpace 1103.
3. Návrh robustných algoritmov riadenia aktívneho magnetického ložiska - AML s 5.ťmi stupňami voňosti.
4. Návrh a aplikácia vhodných metód a opatrení pre potlačenie poruchových veličín.

1. Magnetické ložiská – súčasný stav problematiky

Myšlienka využiť magnetické pole na levitáciu predmetu sa prvýkrát objavila už v polovici devätnásteho storočia. V uplynulých dvoch desaťročiach umožnil technický pokrok ekonomickú realizáciu mnohých úloh s magnetickými ložiskami. V súčasnej dobe sú vyvíjané pokrokové softvérové algoritmy riadenia, ktoré umožňujú realizovať výrazné zvýšenie výkonu aktívnych magnetických ložísk.

1.1 Základná klasifikácia magnetických ložísk

Magnetické ložiská sú aplikované v troch prevedeniach. Prvým prevedením je pasívne magnetické ložisko. Pasívne magnetické ložisko (PML) dosahuje bezkontaktnú levitáciu objektu trvalými magnetickými príťažlivými alebo odpudivými silami. V závislosti na konfigurácii je možná stabilizácia v radiálnom a axiálnom smere. Pasívnou magnetickou levitáciou je možné, aby sa stabilizovali všetky stupne vonosti telesa. Hodnoty tuhosti sú určené geometrickou konfiguráciou ložiska a jeho materiálovými vlastnosťami. Samotné PML poskytuje tlmenie blízke nule, ktoré spravidla musí byť doplnené viskózne-elastickými, elektrodynamickými alebo inými tlmiacimi prvkami. PML nemá žiadne aktívne tlmiace zložky, čo je lacné, malé a mechanicky jednoduché riešenie magnetického ložiska [6].

Druhým prevedením je hybridné magnetické ložisko. Hybridné (bearingless) ložisko je špeciálna forma AML. V bearingless motore je funkcia ložiska integrovaná s motorom, spoločne vinutia generujú sily ložiska spolu s momentom motora. Rovnako ako u AML sú nevyhnutné snímače polohy rotora a výkonová elektronika. Mechanická integrácia elektrického motora a magnetického ložiska je realizovaná na tom istom železnom jadre. Vinutia sú spoločné pre napájacie prúdy motora a ložiska. To zjednodušuje mechanický systém, ale zvyšuje zložitosť riadenia elektrického systému [6].

Tretím prevedením je aktívne magnetické ložisko. Aktívne magnetické ložiská-AML nahrádzajú v mnohých aplikáciách ložiská s olejovým mazaním. Použitie AML v rotačných strojoch prináša viaceré výhody, ako je možnosť riadenia polohy rotora, nie sú zdrojom kontaminácie, neistota ani astícioteru a vibrácie. Napriek týmto výhodám použitie magnetických ložísk bolo v minulosti obmedzené veľkosťou magnetických ložísk, potrebou veľkého externého riadiaceho systému a nemalými zriaďovacími nákladmi. Pokroky v technológii magnetických ložísk, vrátane miniaturizácie, a integrácie umožňujú prekonať mnoho z týchto obmedzení. V dôsledku toho magnetické ložiská nahrádzajú ložiská s olejovým mazaním v mnohých nových typoch strojov v rôznych priemyselných odvetviach [7].

Kapacita zaťaženia radiálneho ložiska je daná priemerom rotora, aktívnou dĺžkou magnetického obvodu a zodpovedajúcemu ekvivalentu tlaku v ložisku. Tlak v magnetickom ložisku je niekoľkonásobne menší než je tlak v klzných ložiskách, ktoré majú olejové mazanie. Pre rovnaké zaťaženie, veľkosť magnetického ložiska bude všeobecne väčšia. Inováciami bola veľkosť radiálnych magnetických ložísk znížená o viac ako 30 percent. Tlak v radiálnom ložisku bol zvýšený zväzšením plochy pólových nastavcov statora. Súčasne je znížený vonkajší priemer statora rozdelením toku a izoláciou elektromagnetov. Dĺžka radiálneho magnetického ložiska bola zmenšená tým, že snímače polohy sú umiestnené priamo v elektromagnetoch.

V súčasnosti sa riadiace systémy zmenšujú, ale súčasne sa zvyšuje ich výkon použitím integrovanej architektúry. Riadiaci systém realizuje digitálne spracovanie signálov, generujú analogové signály pre spínanie tranzistorov v zosilovači a zabezpečuje sieťovú komunikáciu. Tým sa odstraňujú D/A prevodníky medzi riadiacim systémom a zosilovačmi.

Redukcia veľkosti znamená, že riadiaci systém môže byť integrovaný do stroja, čím sa eliminuje nutnosť použitia samostatného krytu regulátora. Miniaturizácia a integrácia umožňujú osadiť integrované magnetické ložisko do štandardného motora.

Historicky, relatívne vysoké náklady magnetických ložísk limitovali oblasti aplikácií. Štandardizáciou, integráciou a inováciou výroby, náklady na magnetické ložiská klesli. Sú asne vyvinuté systémy môžu byť dodávané výrobcami zariadení a konečným užívateľom za oveľa nižšiu cenu, než v minulosti. V nových aplikáciách je možné znížiť veľa, zložitosti a náklady na magnetické ložiská [7].

1.2 Vlastnosti magnetických ložísk

Magnetické ložiská netreba mazať. Preto sú obzvlášť vhodné pre stroje, ktoré pracujú vo vzduchoprázdne, pri vysokých alebo nízkych (kryogénnych) 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, resp. ak nie je používanie mazív zlučiteľné s výrobným procesom. Takéto požiadavky sú charakteristické napr. pre linky na výrobu polovodičov, v potravinárskom alebo nápojovom priemysle. Prevádzka bez mazív však tiež znamená úsporu nielen prevádzkových (mazivá a údržba), ale aj obstarávacích nákladov, pretože odpadá nákup potrebných pomocných zariadení, ktoré súvisia s prevádzkou mazacieho systému (napr. erpadlá a filtre) [8].

Nízke mechanické straty motora, rotačné straty hriade a súvalzou charakteristickou vlastnosťou magnetických ložísk. Je teda možné zvoliť motor s nižším výkonom a dosiahnuť vyššiu účinnosť. Nízke straty napovedajú, že prevádzkové teploty sú spravidla nižšie ako u ložísk iných typov (napr. valivých a hydrodynamických) a sú teda kladené nižšie nároky na chladenie celého zariadenia. Aktívne magnetické ložiská umožňujú riadiť vzduchovú medzeru hriade a. Niektoré spôsoby použitia priamo využívajú vzduchovú medzeru, napr. procesy, ktoré vyžadujú prietok procesnej kvapaliny alebo materiálu. Využitie na biologické a farmaceutické účely, vrátane spracovania živých buniek, predstavujú len dva prípady možných aplikácií. Magnetické ložiská je možné hermeticky utesniť, vďaka čomu budú vhodné pre použitie v technologických procesoch založených na agresívnych kvapalinách, ktoré by inak mohli poškodiť vinutie. Ložiská môžu tiež ponoriť do procesných kvapalín pod tlakom, bez toho aby bolo nutné ich utesňovať - sú teda aplikovateľné v hygienicky citlivých procesoch (napr. v potravinárskom priemysle) [8].

Na rozdiel od valivých alebo hydrodynamických ložísk dosahujú magnetické ložiská oveľa vyššie obvodové rýchlosti, a to až 250 m / s, čo zodpovedá otáčkám kováčovému úslu 4,5 milióna n x d (kde n sú otáčky za minútu a d priemer v mm). Vďaka týmto rýchlostiam je možné realizovať veľa nových aplikácií, ako napr. vysokorýchlostné vretená obrábacích strojov a vodíkový cirkulátor, ktorý vyvinula a vyrobila spoločnosť SKF Revolve pre americké laboratórium US National Laboratories [8].

1.3 Pokročilé programové vybavenie

Programové vybavenie MBScope spoločnosti SKF Revolve ponúka niektoré jedinečné možnosti a to nový spôsob kompenzácie nevyváženosti hriade a dvomi spôsobmi. Jeden spôsob je založený na otáčaní hriade a okolo geometrickej osi a druhý na presnom riadení hriade a, ktoré odstráni hádzanie vyvolané nevyváženosťou. Valzou jedinečnou možnosťou je modulovanie sily v ložisku. Systémy aktívnych magnetických ložísk môžu byť používané ako budič, ktorý moduluje silu v ložisku so zámerom vyvolať vibrácie. Valzou jedinečnou možnosťou je schopnosť regulovať zírku vzduchovej medzery umožňujúce meniť polohu hriade a, a dokonca vyvolať i jej osciláciu. Táto vlastnosť nachádza uplatnenie pri kompenzácii opotrebenia brúsneho kotúča a alebo nastavení vzdialenosti valcov papierenských strojov. Jednou z možností je aj vybavenie magnetických ložísk vlastným systémom bezdemontážnej diagnostiky, ktorý umožňuje dovoľujúci prístup ku komplexnej diagnostike stroja

bez požiadavky na ďalšie prístrojové vybavenie. V neposlednom rade je jedine ná moŇnos nastavenia a uprav magnetických loŇisk priamo na mieste. Je moŇné nastavi ich tuhos a parametre tlmenia; to umoŇuje bezpe ne prekona kritické otá ky a ohybové reŇimy.

1.4 Ekonomické zhodnotenie aplikácie AML

Optimálne vyuŇitie predností uloŇenia s magnetickými loŇiskami vo ve kých turbosústrojoch je zaloŇené na ekonomickom posúdení nákladov na Ňivotný cyklus (technickú Ňivotnos) zariadení, t.j. na údrŇbu, energiu, súvisiace sú asti umiestnené mimo vlastný systém, náhradné diely a pod. PouŇitie systému magnetických loŇisk umoŇuje prevádzku bez olejového mazania, chladiaceho systému, prevodovky (vysokootá kový motor s plynulou reguláciou otá ok je spojený priamo s kompresorom). Nie je teda nutné po íta s náhradnými dielmi pre zariadenia umiestené mimo vlastný systém, o najviac zvyzuje prevádzkovú spo ahlivos zariadení. V porovnaní so systémami, ktoré pouŇívajú olejové mazanie loŇisk, sú nároky na pravidelnú údrŇbu výrazne niŇšie, pretoŇe nie je nutný spotrebný materiál ani rýchlo opotrebované diely. Absencia pomocných zariadení zniŇuje tieŇ po et moŇných zdrojov porúch. Systém magnetických loŇisk spotreboáva zlomok energie v porovnaní s hydrodynamickým loŇiskom, pretoŇe pri otá aní nedochádza k styku, a tým ani k stratám trením. V aka tomu je moŇné dosiahnu výrazné zníŇenie nákladov na energiu (u turbosústrojov, napr. pri kompresore zemného plynu s výkonom vyzzím ako 1 MW aŇ 90 000 eur ro ne).

1.5 Aktívne magnetické loŇiská ako mechatronický systém

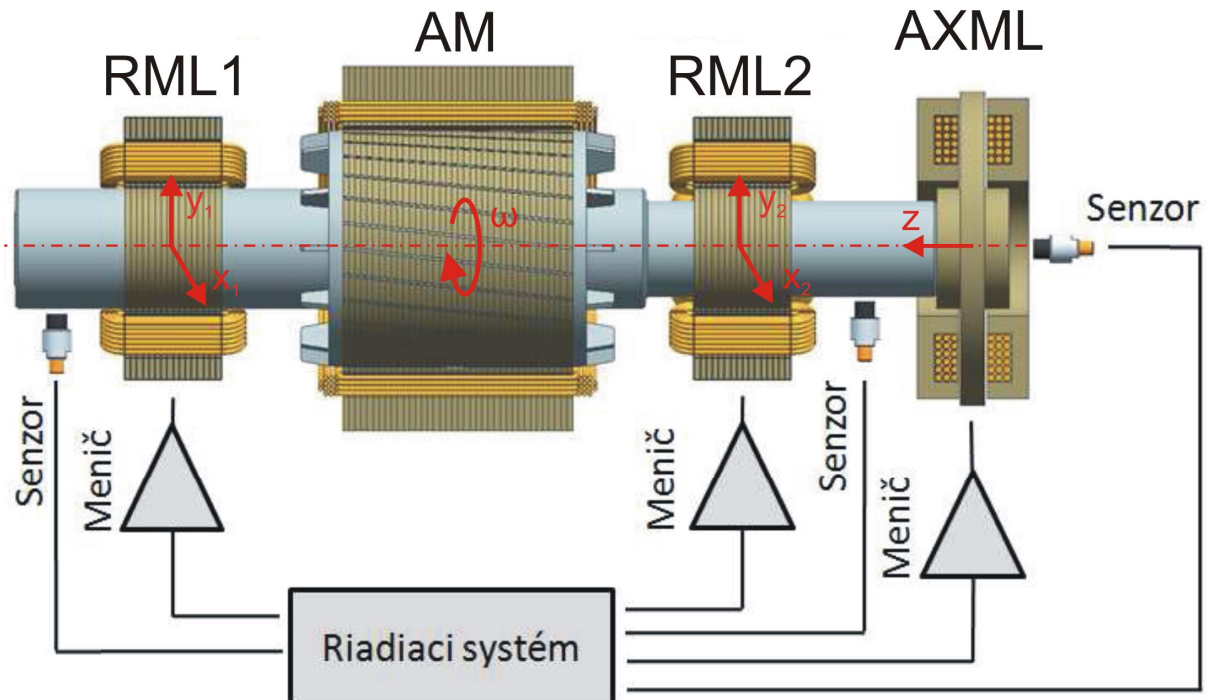
Návrh AML má vzetky vlastnosti mechatronického prístupu. Pod a práce [9], je mechatronika interdisciplinárny vedný odbor, v ktorom spo lne interaktívne pôsobia nasledovné systémy:

1. Mechanické systémy (mechanické prvky, stroje, jemnej mechanike);
2. Elektronické systémy (mikroelektronika, výkonová elektronika, sníma e a technológie aktuátorov . ak ných lenov);
3. Informa né technológie (teória systémov, riadenie a automatizácia, softvérové inŇinierstvo, umelá inteligencia).

Riezenie úloh pre projektovanie mechatronických systémov sa vykonáva rovnako ako na mechanickej aj na íslicovo- elektronickej strane. Pritom vzájomné interakcie pri navrhovaní hrajú dŇleŇitú úlohu, pretoŇe mechanický systém ovplyv uje elektronický systém a naopak, elektronický systém má vplyv na konztrukciu mechanického systému. To znamená, Ňe systémové inŇinierstvo má cie navrhnu celkový integrovaný systém ("organický systém"), ktorý vytvára synergické efekty. alzím rysom mechatronických systémov je integrované íslicové spracovanie informácií. Okrem základných riadiacich funkcií, môŇu by realizované sofistikovanejšie riadiace funkcie ako napr. výpo et nemerate ných veli ín, adaptácia parametrov regulátora, detekcia a diagnostika porúch a v prípade porúch aj rekonfigurácia na redundancia zloŇiek. Preto sa mechatronické systémy vyvíjajú s adaptáciou alebo niekedy s u ením správania, ktoré môŇe by tieŇ ozna ená ako inteligentná mechatronika [9].

2 Návrh a realizácia fyzikálneho modelu pohonu s aktívnym magnetickým ložiskom so 6. stupňami voľnosti

Cieľom je navrhnuť mechatronický systém aktívnych magnetických ložísk (AML), zobrazený na Obr. 2.1 s využitím poznatkov z [29], [42], [44]. Celý systém pozostáva z troch aktívnych magnetických ložísk, ktoré zabezpečujú riadenie polohy rotora v piatich osiach a asynchrónneho motora, ktorý zabezpečuje riadenie polohy (rýchlosti) rotora v osi z.



Obr. 2.1. Mechatronický pä osí systém [5]

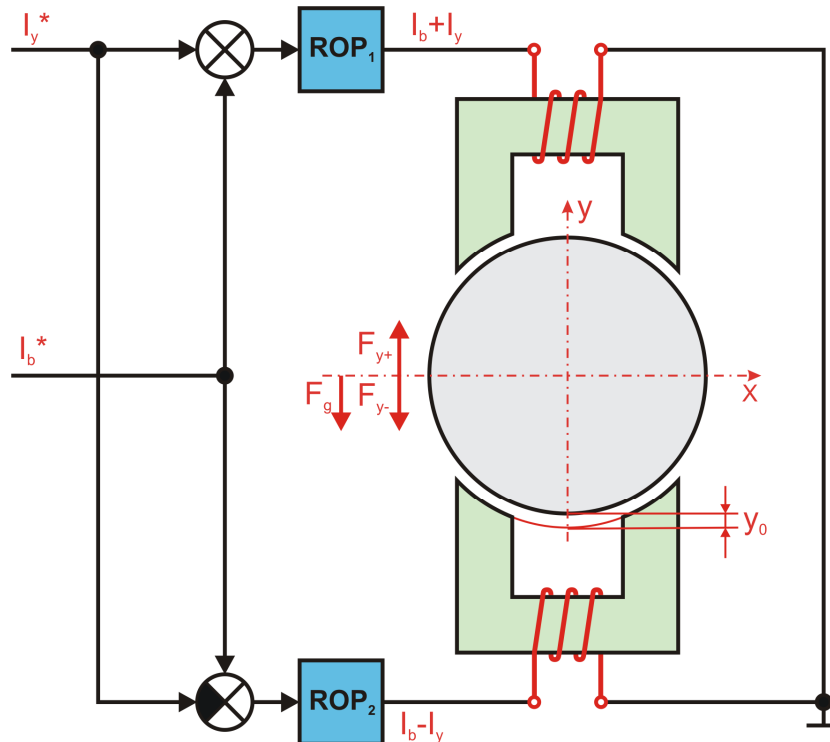
Daný systém obsahuje dva typy aktívnych magnetických ložísk. Princiálne sú tieto ložiskové jednotky podobné, odlišujú sa iba mechanickou konštrukciou. Prvým typom je axiálne magnetické ložisko (AXML), ktoré zabezpečuje riadenie polohy v osi z. Druhým typom je radiálne magnetické ložisko (RML). Celý systém obsahuje dve ložiskové jednotky tohto typu. Ložisko RML1 zabezpečuje riadenie polohy v osi x_1, y_1 a RML2 zabezpečuje riadenie polohy osi x_2, y_2 . Systém alej obsahuje aj snímače polohy (senzory). Tieto snímače slúžia ako spätná väzba pri riadení polohy rotora. Cievky jednotlivých jednotiek magnetických ložísk sú budené výkonovými meničmi. Zber dát zo snímačov polohy a zasielanie akčných zásahov do meničov zabezpečuje riadiaci systém.

2.1 Model radiálneho magnetického ložiska (RML)

Pre návrh riadenia a identifikáciu porúch v stroji zavedieme niekoľko zjednodušujúcich predpokladov. Zanedbaním gyroskopického efektu a väzieb medzi ložiskovými väziami získame model jedného radiálneho ložiska. Takýto model je síce menej presný model ložiska ak sa pozeráme na celý systém ako celok, no získame model samotného radiálneho ložiska. Tento fakt je výhodou, ak sa pomocou modelu spätne identifikujú sily v danom ložisku. Tento výpočet je menej výpočtový a je zdrojom aj informácií o poruche na rotore na konkrétnom mieste. V rámci zjednodušenia modelu ložiska neuvažujeme nasýtenie elektromagnetického obvodu a neuvažujeme zmenu indukčnosti vplyvom zmeny vzduchovej medzery.

2.1.1 Diferenciálny elektromagnetický záves RML

Diferenciálny elektromagnetický záves (DEZ) obsahuje pre jednu os dve cievky v diferenciálnom zapojení ako je to znázornené na Obr. 2.2. Zabezpečuje aktívne riadenie sily v dvoch kvadrantoch (1 stupeň voľnosti).



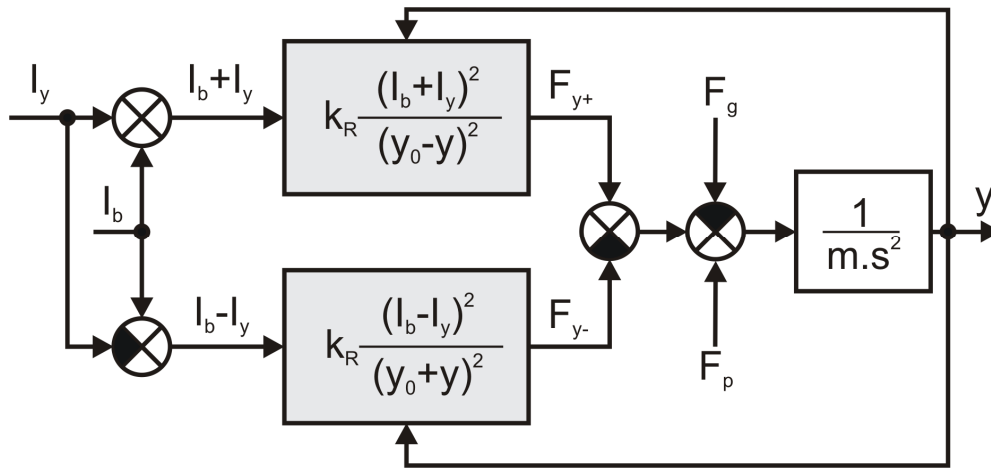
Obr. 2.2. Diferenciálny elektromagnetický záves [18]

Diferenciálny elektromagnetický záves je ovládaný prostredníctvom riadiaceho rozdielového prúdu I_y a prúdom I_b . Prúd I_b je tzv. biasový prúd a udáva nám tuhosť systému. Vzťah pre silu F_y pôsobiacu na rotor popisuje rovnica (2.1). V tejto rovnici je zahrnutý aj biasový prúd I_b .

$$F_y = F_{y+} - F_{y-}$$

$$F_y = k_R \left(\frac{(I_b + I_y)^2}{(y_0 - y)^2} - \frac{(I_b - I_y)^2}{(y_0 + y)^2} \right) \quad (2.1)$$

Celkový model nelineárneho modelu DEZ je znázornený na Obr. 2.3. V modeli nie je uvažované nasýtenie magnetického obvodu. Premenná y_0 predstavuje nominálnu vzduchovú medzeru medzi rotorom a statorom RML. V modeli sú zohľadnené aj poruchové veličiny. Suma poruchových síl je tvorená dvomi zložkami síl. Prvá je statická tiaž rotora RML vyjadrená silou F_g . Druhá zložka je dynamická sila F_p , ktorá predstavuje sumu poruchových síl prevažne tvorených nevyváženosťou rotora.



Obr. 2.3. Model diferenciálneho elektromagnetického závesu [18]

Rovnová0ny stav pre tento systém je daný rovnos ou síl F_g a F_y . Z tejto rovnosti je potom možné vyjadri prúd I_{y0} (2.2).

$$F_y = F_g = k_R \frac{4I_b I_{y0}}{y_0^2}$$

$$I_{y0} = \frac{F_g y_0^2}{k_R 4I_b} \quad (2.2)$$

2.1.2 Linearizovaný model diferenciálneho elektromagnetického závesu

Pre potreby syntézy regula ných obvodov sa nelineárny systém DEZ linearizuje pre pracovný bod P_0 . Pracovný bod P_0 je daný (2.3).

$$F_y = F_{y0} + \Delta F_y \quad F_{y0} = F_g = mg$$

$$I_y = I_{y0} + \Delta I_y$$

$$y = y_0 + \Delta y \quad (2.3)$$

Prírastok sily je potom definovaný ako parciálne derivácie sily F_y pod a prúdu i_y a polohy y (2.4).

$$\Delta F_y = \frac{\partial F_y}{\partial i_y} \Big|_{P_0} \Delta i_y + \frac{\partial F_y}{\partial y} \Big|_{P_0} \Delta y$$

$$\Delta F_y = K_{iy} \Delta i_y + K_y \Delta y \quad (2.4)$$

Parciálnymi deriváciami sily F_y sú definované zosilnenia K_{iy} a K_y (2.5)

$$K_{iy} = \frac{\partial F_y}{\partial i_y} \Big|_{P_0} = 4k_R \frac{I_{y0}}{y_0^2}$$

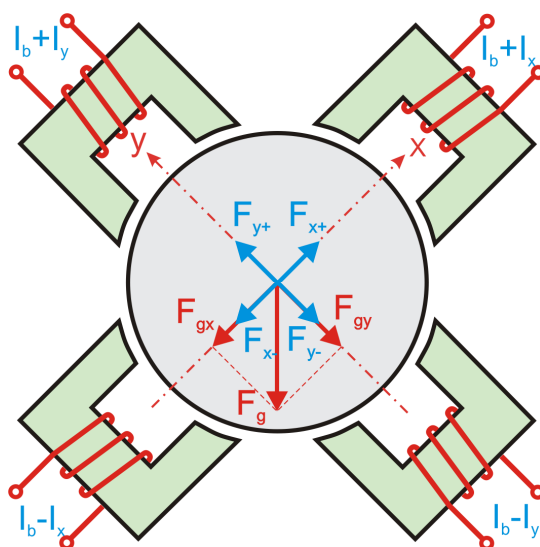
$$K_y = \frac{\partial F_y}{\partial y} \Big|_{P_0} = 4k_R \frac{I_{y0}^2}{y_0^3} \quad (2.5)$$

Po zavedení premenných $\Delta I_y \equiv i_y$ $\Delta y \equiv y$ je prírastok sily daný vz ahom (2.6).

$$\Delta F_y \equiv F_y = K_{iy}i_y + K_{yy}y = m \frac{d^2 y}{dt^2} \quad (2.6)$$

2.1.3 Konýtruk né rieýenie RML

Radiálne magnetické lo0isko zabezpe uje riadenie polohy rotora v dvoch osiach, ktoré sú na seba kolmé. Preto pozostáva z dvoch diferenciálnych elektromagnetických závesov. Jeden DEZ zabezpe uje riadenie polohy rotora v osi x a druhý v osi y. Pre lepšie symetrické rozlo0enie tepla v statore je vhodné pooto i stator RML o 45° tak ako je to znázornené na Obr. 2.4 [18].



Obr. 2.4. Sústava radiálneho magnetického lo0iska pooto ená o 45° [18]

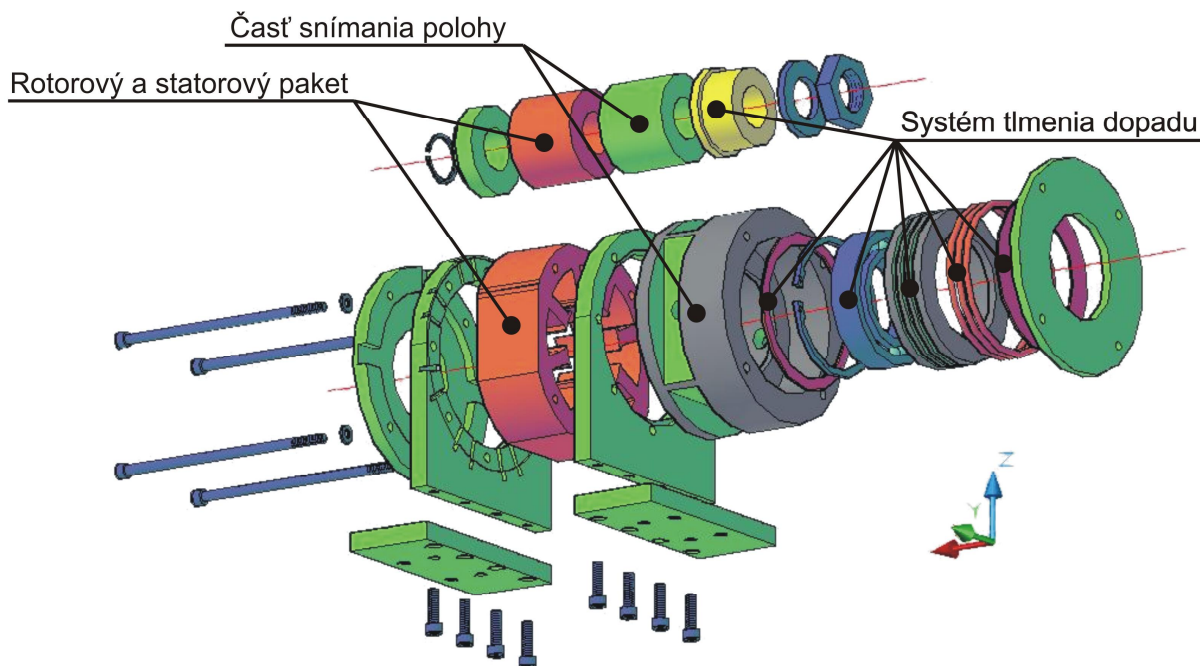
Pooto ením statora RML sa gravita ná sila rotora F_g rozlo0í na sily F_{gx} a F_{gy} pod a Pytagorovej vety ako popisuje vz ah (2.7). V tomto prípade je tia0 rotora kompenzovaná silami F_{y+} a F_{x+} . Vo vz ahu (2.2) je sila F_g nahradená silou F_{gy} . Jednou nevýhodou tohto pooto enia je, 0e stúpne celková spotreba RML. Pre tento prípad je DEZ pre osi x a y zhodný. Tento fakt u ah uje návrh riadenia pre celkový systém RML [18].

$$F_{gx} \equiv F_{gy} = F_g \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (2.7)$$

V rámci práce sme sa sna0ili nadviaza na diplomovú prácu [5]. V citovanej diplomovej práci bol vyriešený návrh elektromagnetického obvodu RML a testovacia konztrukcia. Po testovaní navrhnutého systému bolo potrebné upravi mechanickú konztrukciu RML, aby bola vhodná pre osadenie do 5-osového systému. Zmeny spo ívali v doplnení systému tlmenia dopadu a umiestnenie así pre upevnenie sníma ov polohy na tú istú stranu ako je systém tlmenia dopadu. Konztrukcia bola doplnená o prírubové ulo0enia medzi jednotlivými asami pre zvýšenie odolnosti vo i radiálnym silám.

Finálny 3D návrh fyzikálneho modelu RML, na ktorom bude verifikované navrhované riadenie je zobrazený na Obr. 2.5. Celý model RML pozostáva z troch hlavných así. Prvú hlavnú as tvorí rotorový a statorový paket. Táto as tvorí dvojicu diferenciálnych elektromagnetických závesov. Druhá as vytvára miesto pre umiestnenie sníma ov pre získanie aktuálnej polohy rotora v osiach x a y. Poslednú as tvorí systém mechanických

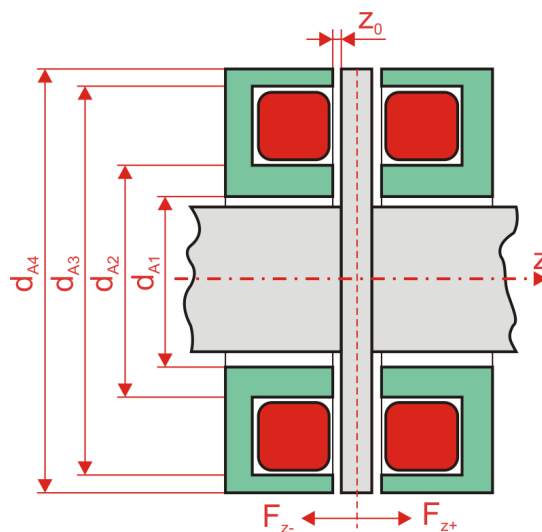
limitov a tlmenia dopadu. Tento systém zabráni poškodeniu RML v prípade kolíznych situácií ako sú napríklad zlé navrhnuté riadenie, výpadok napájacieho zdroja, porucha ak ného lena a podobne. Tento systém pozostáva z rotorového puzdra vyrobeného z bronzu pre lepšie k zanie pri dopade. Rotorové puzdro dopadá na valivé lo0isko, ktoré je odpru0ené od statickej konztrukcie prostredníctvom sO%krú0kov [19]. Tieto krú0ky pri dopade rotora na valivé lo0isko pohltia energiu nárazu ím zabránia poškodeniu ktorejko vek ásti stroja.



Obr. 2.5. 3D návrh fyzikálneho modelu RML.

2.2 Model axiálneho magnetického ložiska (AXML)

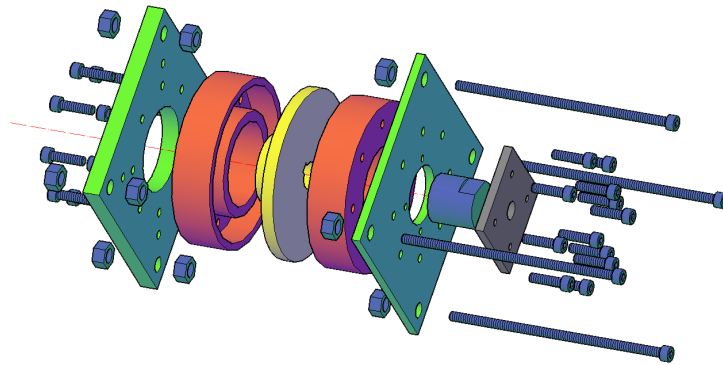
Axiálne magnetické lo0isko slú0i na polohové riadenie z-ovej osi celého systému. Principiálne je tie0 zalo0ené na princípe diferenciálneho elektromagnetického závesu. Systém axiálneho magnetického lo0iska je znázornený na Obr. 2.6. Pozostáva z dvoch prstencových elektromagnetov a jedného rota ného disku. Model AXML je analogicky vytváraný pod a modelu RML. .



Obr. 2.6. Sústava axiálneho magnetického lo0iska. [1]

2.2.1 Konýtruk né riešenie AXML

Pre stabilizáciu polohy rotora v osi z, sme kompletne navrhli axiálne magnetické ložisko. Navrhnutý 3D model tohto ložiska je na Obr. 2.7. Celá ložisková jednotka pozostáva z dvoch elektromagnetov (červená farba) a rota ného disku (ltá farba). Rota né disk sa aretuje na hriade rotora pomocou medenej matice, ktorá zároveň slúži ako plocha pre meranie polohy v osi z. Ložisková jednotka je konštruovaná tak, aby sa uchytila na jedno radiálne magnetické ložisko. Mechanické limity a systém tlmenia pre túto riadenú os je už vyriešený v rámci jednotiek radiálnych magnetických ložísk.



Obr. 2.7. 3D model AXML

2.3 Aký len - Meni pre AML

Celý systém AML obsahuje celkovo 10 elektromagnetov, ktoré potrebujú pre svoju inos výkonové prvky . menie. Menie zabezpečuje regulačný obvod prúdu cievkou elektromagnetu. Pre tento účel sú vhodné menie tvorené výkonovými polovodičovými prvkami.

2.3.1 Menie a jeho modifikácia

Na riadenie prúdu cievkami elektromagnetov máme k dispozícii polovodičové menie od firmy MicroStep. Menie nie je možné podrobne popísať, nakoľko jeho návrh je duževným vlastníctvom firmy MicroStep. Preto je opis menieov strohý a popis je zameraný viac na prevedené úpravy. Menie boli pôvodne určené na polohové riadenie s jednosmerným motorom. Menie komunikovali s nadriadeným riadiacim systémom prostredníctvom komunikačného rozhrania RS485. Pri návrhu úprav a možností riadenia sme využili poznatky z [36], [38], [40], [41]. Tieto menie prezli radom úprav, aby splnili naze požiadavky. Naze požadované parametre na menie sú nasledovne:

- rozsah prúdu 0 . 10A
- riadenie analógovým vstupom 0 . 10V
- prevod medzi napätím a prúdom 1:1
- možnosť pripojenia napájania pre výkonovú časť 12 . 100V AC
- možnosť synchronizácie PWM menieov (binárny vstup a výstup)
- možnosť blokovania H mosta (binárny vstup)
- možnosť riadenia nabíjajúceho medziodvodu a signalizácia stavu (binárny vstup a výstup)

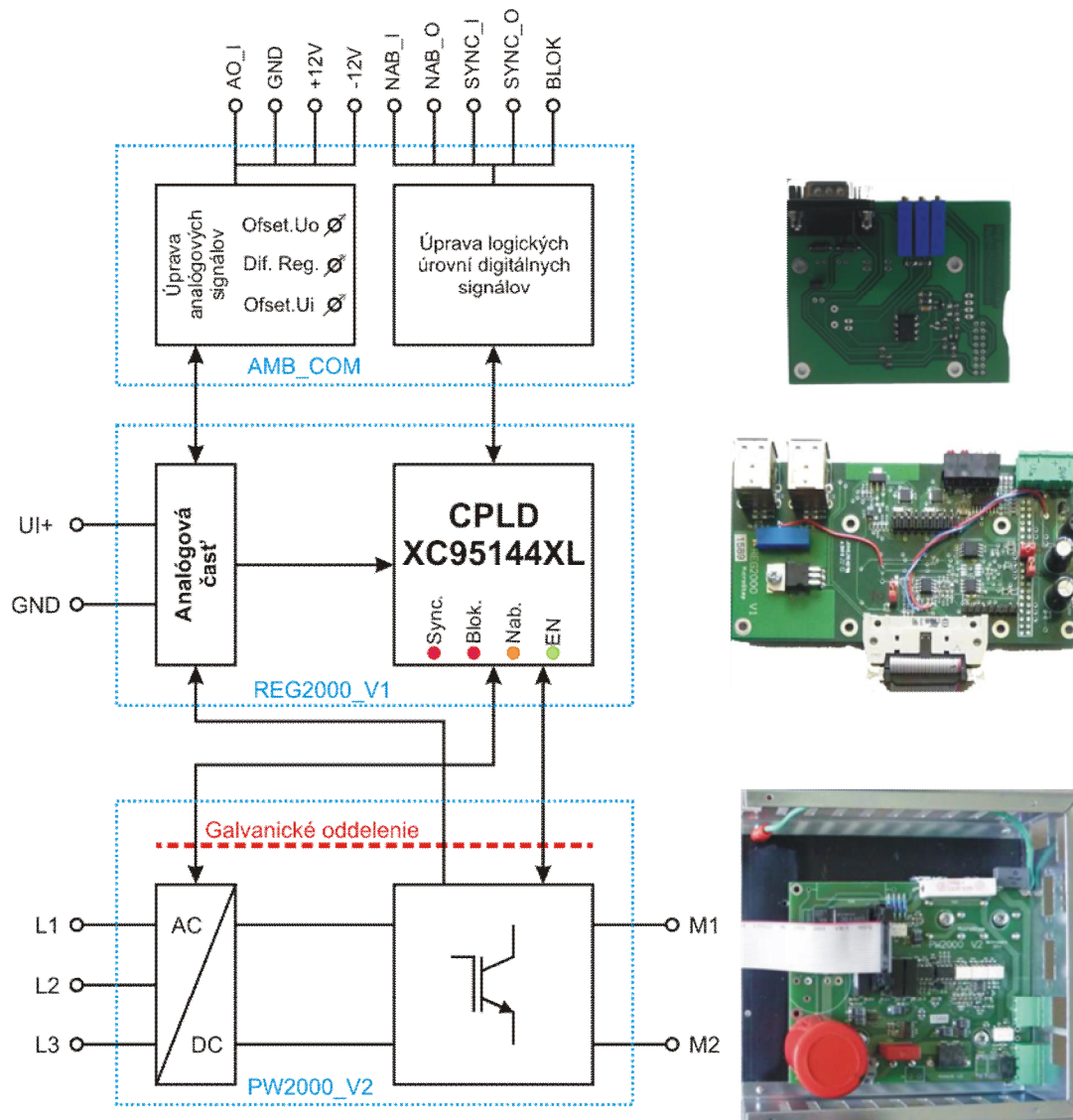
Z pôvodného menie a sme využili dosku výkonovej časti a PW2000_V2 a riadiacu časť REG2000_V1. K týmto časťam sme navrhli dosku, ktorá zabezpečuje komunikáciu menie a s

nadriadeným systémom dSpace 1103, prostredníctvom paralelných, digitálnych a analógových signálov. Bloková ztruktúra mení a je znázornená na Obr. 2.8.

Výkonová časť je dimenzovaná pre prúdy do 20A. Pre naše potreby postačuje polovica. Úprava pre riadenie prúdu do 10A spočívala v zmene súčiastok pre snímanie prúdu v celom rozsahu. Doska PW2000_V2 obsahuje trojfázový usmerovač. Striedavé napätie sa privádza na svorky L1 a L3. Usmernené napätie na medziobvodu je filtrované kondenzátorom. Keďže na celý systém magnetických ložísk je potrebných 10 mení, tak nabíjanie kondenzátora na medziobvodu je ovládané. Napätie medziobvodu napája výkonový modul, v ktorom využívame H most pre reguláciu prúdu v celom rozsahu. Regulovaný prúd je snímaný ako úbytok napätia na výkonovom odpore. Riadiace signály pre H most, riadenie nabíjania medziobvodu a snímaný prúd sú galvanicky oddelené od nadriadenej dosky REG2000_V1.

Riadenie výkonovej časti zabezpečuje doska REG2000_V1. Doska je rozdelená na dve časti. Prvá časť spracováva analógové signály. Druhá časť zabezpečuje spracovanie digitálnych signálov. Táto časť je založená na CPLD obvode XC95144XL. CPLD je programované v jazyku VHDL. Prostredníctvom tohto programovateľného logického hradla je riadený H most a zároveň komunikácia s dSpace 1103. Analógová časť tvorí operačné zosilňovače a komparátory, ktoré tvoria väzbu medzi analógovou a digitálnou časťou. Na tejto doske sú tiež osadené LED diódy, ktorých funkcia závisí od programu uloženom v CPLD. V našom prípade sme jednu LED diódu využili ako kontrolu funkčnosti synchronizácie mení. Druhá LED informuje, či je H most blokovaný alebo odblokovaný. Tretia LED nám dáva informáciu o stave medziobvodu, či je v stave nabíjania. Posledná LED poukazuje na stav mení, kedy je kondenzátor na medziobvodu nabitý, H most odblokovaný a regulácia prúdu beží bez poruchy.

Pre prepojenie mení navzájom medzi sebou a pripojenie k dSpace 1103 sme navrhli dosku, ktorá zabezpečuje zmenu napäťových signálov TTL a upravuje analógový signál, ktorý nám dáva informáciu o hodnote skutočného regulovaného prúdu. CPLD XC95144XL pracuje na napäťovej úrovni 3,3V a systém dSpace 1103 na úrovni 5V. CPLD obvod je napäťovo kompatibilný aj s 5V napäťovou úrovňou, aby sa neovplyvnili všetky časti, všetky digitálne signály sú upravované na potrebné úrovne. Informácia o skutočnej hodnote regulovaného prúdu je zosilnená na rozsah 0-10A = 0-10V a filtrovaná dolnopriepustným filtrom 1. radu s frekvenciou rezu 100kHz. Na doske sú tiež osadené trimery, pomocou ktorých sa nastavujú ofsety analógových hodnôt vstupu a výstupu mení. Posledný trimmer slúži na nastavenie rozdielu medzi dvomi komparátorskými úrovňami.



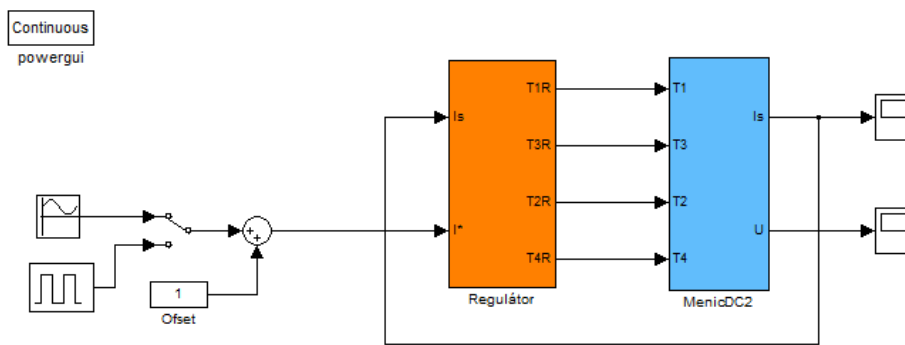
Obr. 2.8. Štruktúra mení a pre magnetické ložisko

2.3.2 Návrh a realizácia hysterézného PWM regulátora s preklápaným riadením

Konstrukcia mení a nám ponúka možnosť aplikovať iba hysterézne typy regulátorov, nakoľko prepojenie medzi analogovou časťou a CPLD je tvorené komparátormi. Pri návrhu samotného regulátora prúdu sme brali do úvahy viaceré faktory. Hlavnými faktormi je kvalita regulácie a spotreba energie. Pri magnetických ložiskách je spotreba systému veľmi dôležitým faktorom. Ak by spotreba systému presiahla straty, ktoré sú v klasických ložiskách tak by bol systém neefektívny. Preto sme sa zamerali na spôsoby riadenia tranzistorov vo výkonovom H moste, aby sme dosiahli lepšiu kvalitu riadenia a zároveň nižšiu spotrebu systému. Testovali sme a porovnávali unipolárne a bipolárne úplne riadenie tranzistorov v H moste.

Pre overovanie riadenia sme najprv vytvorili model mení a v prostredí Matlab Simulink. Vytvorili sme model H mosta pomocou prvkov z SimPowerSystems toolboxu. K H mostu je pripojená RL záťaž reprezentujúca vinutie elektromagnetu. Odpor vinutia elektromagnetu je v závislosti od vzduchovej medzery nemenný, no indukčnosť pre radiálne magnetické ložisko sa pohybuje v rozmedzí 21 - 95mH. Regulátor prúdu sme preto testovali pre tieto hraničné stavy, čím zaisťujeme stabilitu pre celý rozsah. Simulačné schéma je znázornená na Obr. 2.9. Pozostáva z vyššie popísaného H mosta v spojení s RL záťažou a bloku regulátora.

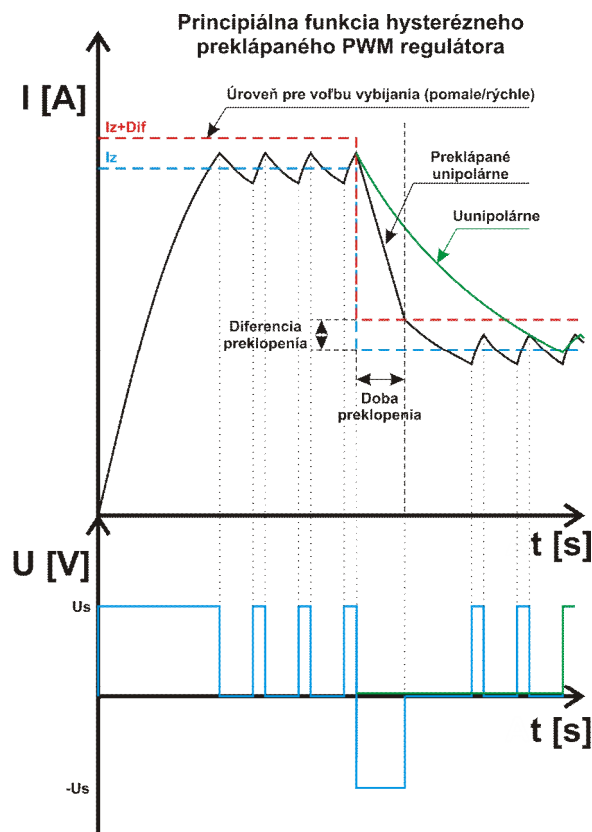
Požadovaný priebeh prúdu sme volili sínusového a obdĺžnikového tvaru. Pre zhodnotenie uvádzame len výsledky pre obdĺžnikový priebeh.



Obr. 2.9. Simulovaný model regulačného obvodu prúdu

Na simulovanom modeli sme sa venovali overovaniu hysterézných regulátorov, ktoré prakticky neustále pracujú v limitných stavoch. Testovali sme hysterézný regulátor s riadením H mosta v unipolárnom úplnom a bipolárnom režime riadenia. Pri testovaní sme uvažovali napätie medziobvodu 108V a frekvenciu nosnej PWM 31,25kHz. V simuláciách sme uvažovali indukčnosť vinutia 21 a 95mH.

Nazím cieľom bolo dosiahnuť lepšiu dynamiku regulácie prúdu smerom nahor aj nadol s čím nižším zvlnením prúdu. Princiálne bližšie k našim požiadavkám mal regulátor s unipolárnym režimom riadenia. Zvlnenie v okolí regulovaného prúdu a jeho závislosť od zmeny indukčnosti záťaže je omnoho lepšie ako pri bipolárnom režime riadenia. Dynamika pri regulácii prúdu smerom nahor je pod našimi požiadavkami a jej strmosť je daná indukčnosťou pripojenej záťaže a napätia na medziobvode. Problém nastáva pri dynamike regulácie prúdu smerom nadol. Ako sme zistili pri bipolárnom režime riadenia, privedením opačnej polarita napätia na záťaž je možné energiu z vinutia rýchlejšie vybiť a tým rýchlejšie vyregulovať prúd smerom nadol. Pri oboch režimoch riadenia regulátory pracujú v dvoch stavoch. Po našich zisteniach sme dospeli k záveru, že potrebujeme vytvoriť hysterézný regulátor, ktorý bude mať na výstupe tri stavy. Podobné riešenie sa využíva ako prediktívne riadenie pri meniacich pre krokové motory, kedy pri mikrokovaní presne vieme ktorým smerom je prúd regulovaný a podľa toho sa preklápa riadenie. V našom prípade sme museli preklápanie zabezpečiť iným spôsobom, keďže nevieme o budú nasledujúcej v procese regulácie. Princiálne riešenie je znázornené na Obr. 2.10. Riešenie pozostáva z prídania ďalšej komparatívnej úrovne, ktorá zabezpečuje preklápanie unipolárneho režimu riadenia. Celý regulátor teda pracuje ako trojstavový hysterézný regulátor. Dynamiku regulácie smerom nadol je možné nastaviť diferenciou medzi komparatívnymi úrovňami.

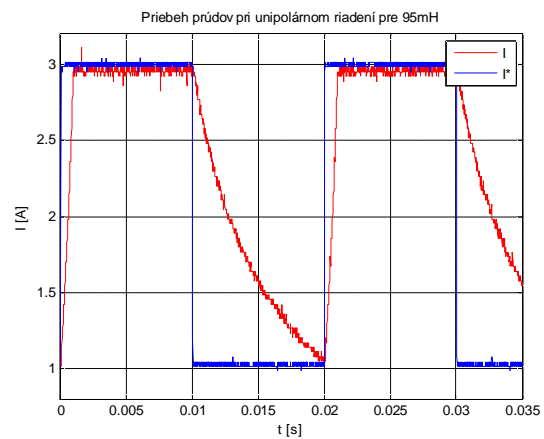
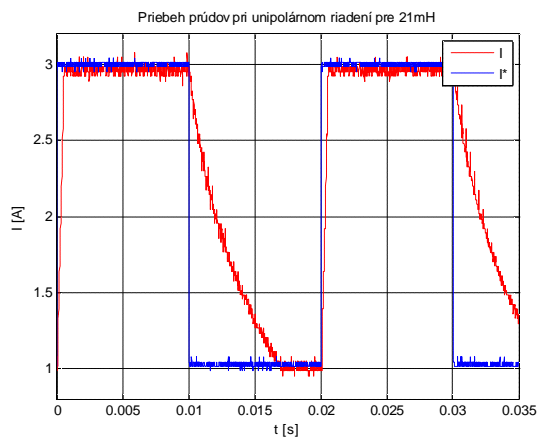


Obr. 2.10. Princíp preklápaného režimu riadenia

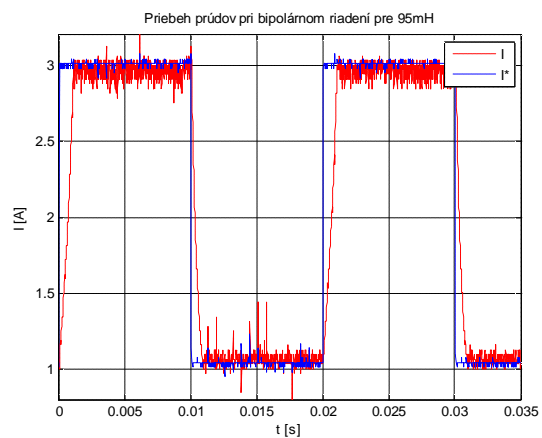
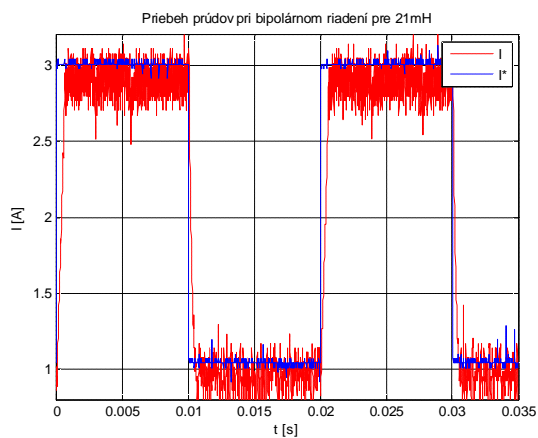
Ako je vidieť na Obr. 2.10. hodnota regulovaného prúdu prebehne nad komparatívnou úrovňou. Tento jav je spôsobený tým, že reálny komparátor nie je ideálny a vyhodnotenie trvá určitý čas. Čiže oneskorenie spôsobí logický vyhodnocovací obvod a čas otvorenia resp. zatvorenia tranzistorov v H moste. Ak sa diferencia medzi komparatívnymi úrovňami nastaví príliš malá regulátor bude v stave, ktorý je zhodný s bipolárnym režimom riadenia.

Následne sme navrhnuté typy regulátorov testovali na reálnom meništi, ktorý je popísaný vyššie. V rámci menišťa sme algoritmus riadenia tranzistorov programovali v jazyku VHDL do CPLD 95XC144XL. Výsledky, ktoré sme dosiahli sa mierne odlišujú od simulácií.

Na Obr. 2.11 sú namerané výsledky na testovacom magnetickom obvode s naprogramovaným hysteréznym regulátorom s unipolárnym režimom riadenia H mosta. Měrenia boli prevádzkané digitálnym osciloskopom DSO2090. Nosná frekvencia PWM modulácie je 31,25kHz, napätie medziobvodu 108V. Z nameraných priebehov sme zistili, že výsledky sú porovnateľné so simuláciami výsledkami s predpokladanými rozdielmi. Predpokladaný rozdiel bol vo väčšom zume regulovaného prúdu v okolí požadovanej hodnoty. Dynamika regulačného procesu smerom nahor a nadol je mierne odlišná oproti simuláciam výsledkom. Následne sme testovali hysteréznym regulátor s bipolárnym režimom riadenia H mosta. Výsledky sú zobrazené na Obr. 2.12. Principiálne sme opäť dosiahli výsledky porovnateľné so simuláciami výsledkami. Opäť bol zúžom v okolí regulovaného prúdu vyžší, ba priam nevyhovujúci.

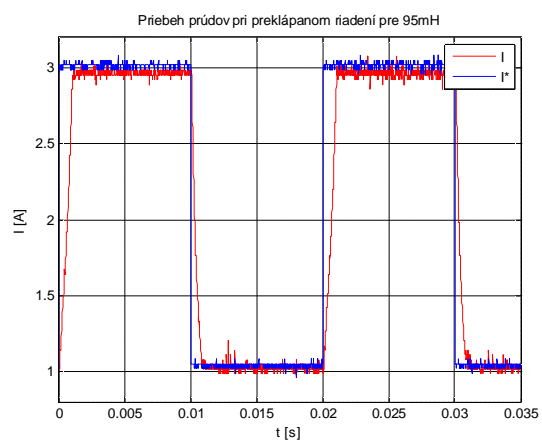
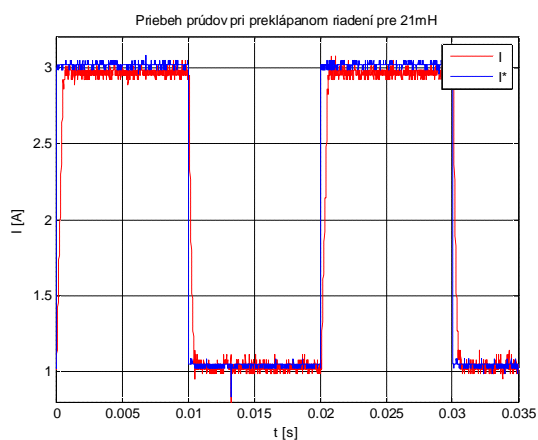


Obr. 2.11. *Priebehy prúdov na reálnom systéme pre unipolárny re0im riadenia*



Obr. 2.12. *Priebehy prúdov na reálnom systéme pre bipolárny re0im riadenia*

Posledným testovaným regulátorom bol nami navrhnutý trojstavový hysterézný regulátor s prepínaným unipolárnym riadením H mosta. Diferencia medzi komparáciami bola experimentálne nastavená na 130mA. Výsledky experimentov sú zobrazené na Obr. 2.13. Získané výsledky splnili naše požiadavky, o sa týka veľkosti zumu v okolí 0iadaného prúdu a dynamiky regulácie smerom nahor aj nadol.



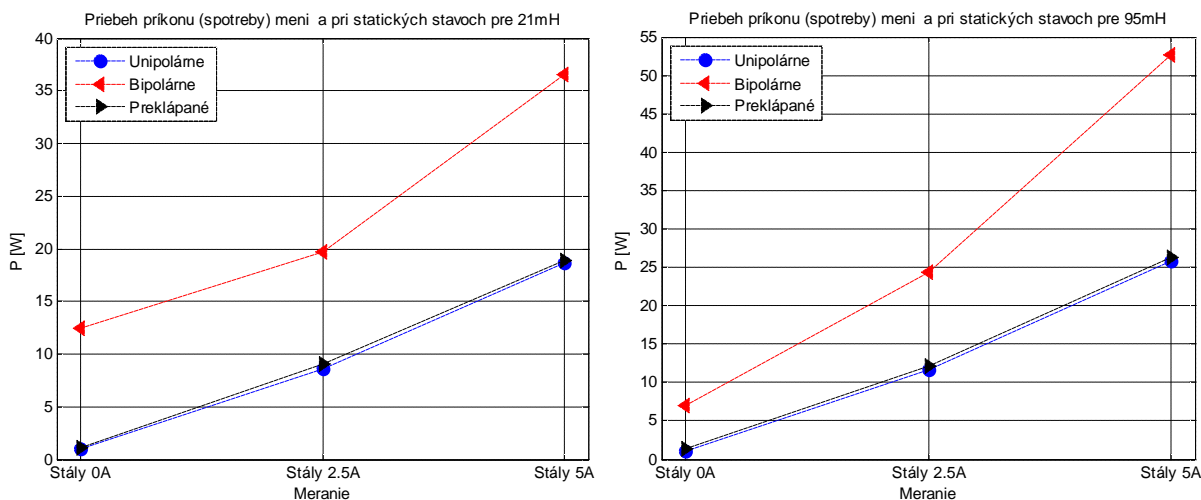
Obr. 2.13. *Priebehy prúdov na reálnom systéme pre preklápaný re0im riadenia*

Nazim cie om bolo nie len zabezpe enie dobrej kvality regulácie prúdu, ale aj minimalizovanie spotreby energie. Preto sme pre navrhnuté regulátory merali spotrebu v dvoch stavoch. Prvým stavom bol dynamický stav, t.j. stála zmena i_{d} prúdu. Tieto experimenty boli prevádzané spolu s predchádzajúcimi experimentmi. Ako i_{d} signál sme opä pouili obd ůnikový signál z 1A na 3A a z 0,5A na 1,5A s frekvenciou 50Hz. Druhým stavom je statický stav kedy sme na mení postupne privádzali konztantné hodnoty i_{d} prúdov a pritom merali spotrebu energie. Meranie spotreby energie sme realizovali mimo mení a. Meranie spo ívalo v meraní prúdu te úceho do usmer ova a na výkonovej asti mení a pri striedavom napájanom napätí 77V.

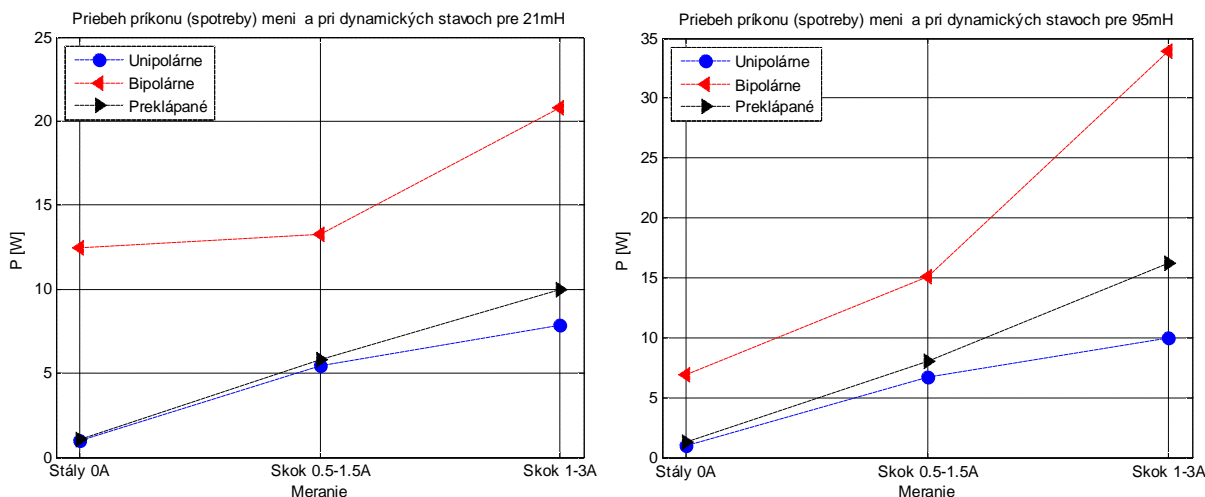
Na Obr. 2.14 sú priebehy príkonu (spotreby) výkonovej asti mení a pre jednotlivé re0imy riadenia H mosta pri regulácií na statickú hodnotu prúdu 0A, 2,5A a 5A. Z nameraných priebehov je vidie , ůe nami navrhnuté preklápané riadenie má spotrebu zhodnú s unipolárnym re0imom riadenia.

Na Obr. 2.15 sú priebehy príkonu výkonovej asti mení a pre dynamické zmeny i_{d} prúdov. Konkrétne sú to skokové zmeny z 0,5 na 1,5A a skokové zmeny z 1 na 3A s frekvenciou 50Hz. Na týchto priebehoch je vidie , ůe nami navrhnuté preklápané riadenie má mierne vyzziu spotrebu ako unipolárne riadenie, no stále je omnoho ni0zia ako pri bipolárnom re0ime riadenia.

Nazím cie om bolo navrhnú také riadenie pre mení , aby sme zabezpe ili kvalitný ak ný zásah a zároveň minimalizovali spotrebu energie. Priebehy namerané z reálneho systému sú dôkazom, ůe sa nám podarilo navrhnú vhodné a energeticky menej náro né riadenie prúdu cievkou AML. Minimalizácia spotreby má za následok, ůe v magnetickom obvode AML sa premie a menej energie na teplo. Preto AML nepotrebuje prídavné chladenie.



Obr. 2.14. Priebehy príkonu mení a pre jednotlivé re0imy riadenia pri statických prúdoch



Obr. 2.15. *Priebehy príkonu mení a pre jednotlivé re0imy riadenia pri dynamicky sa meniacich prúdoch*

2.4 **Vyhodnocovanie polohy rotora AML**

Pre riadenie polohy rotora systému AML je potrebná informácia o polohe rotora [36]. Polohu je možné vyhodnotiť viacerými spôsobmi. Jedným zo spôsobov je použitie snímača na meranie polohy. Existuje aj spôsob merania polohy bez použitia snímača, ako to opísané v [35], [37], [41]. Takýto spôsob riadenia polohy sa nazýva bezsnímačové riadenie alebo sensorless riadenie. Je založené na princípe zmeny parametrov elektromagnetického obvodu, čím sa mení indukčný vinutie AML. Zmenou indukčnosti induktora sa dá pomocou estimátorov (pozorovateľov) vyhodnotiť poloha rotora AML. Výhodou riadenia bez snímača polohy je, že náklady na realizáciu zariadenia výrazne klesnú. Nevýhodou je, že takéto meranie je závislé od parametrov magnetického obvodu, ktoré sa vplyvom teploty menia.

Pre tento účel je najvhodnejší snímač na báze vírivých prúdov, ktoré ponúka viacerými firmami ako napr.: Micro-epsilon, Vibrometer, Kaman measuring, Lion Precision a iné. K dispozícii máme snímač od firmy Kaman. Konkrétne typy KD2310-2S a KD2310-3U1, je zobrazený na Obr. 2.16. Skladá sa z troch častí. Prvou časťou je samotný senzor pre meranie polohy. Druhou časťou je kalibrovaný vodič, ktorý slúži na prepojenie senzora a vyhodnocovej jednotky. Poslednou časťou je vyhodnocoacia jednotka, ktorej výstupom je hodnota napätia zodpovedajúca meranej polohe.

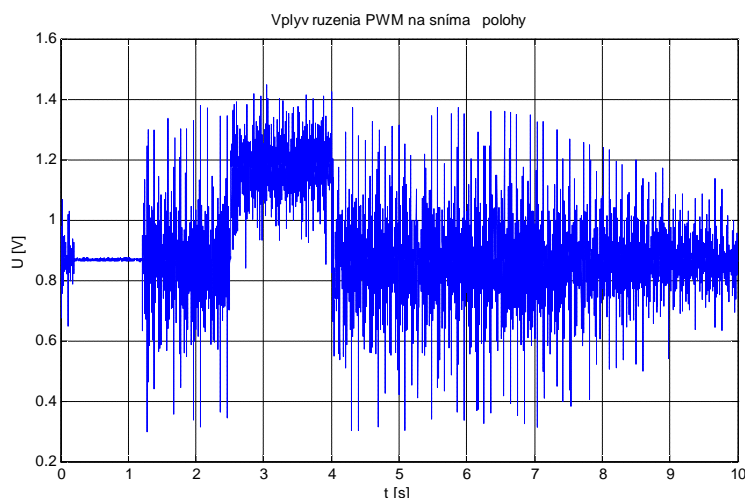


Obr. 2.16. *Snímač polohy KD2310-3U1[17]*

Snímač typ 2S je v tienenom prevedení a je odolnejší vo i ruženiam, ktoré vytvárajú elektromagnetické obvody v jeho okolí. Tento snímač je zároveň vhodnejší pre meranie vzdialenosti zakrivených plôch ako je rotor v RML. Snímač 3U1 je citlivejší na zakrivenie plochy od ktorej je meraná vzdialenosť. Tento snímač je v netienenom prevedení a je náchylnejší na elektromagnetický smog, ktorý vytvára stator RML. Ďalej, ktorý je vnázaný do merania vzdialenosti je možné eliminovať vhodným spracovaním signálov, napríklad použitím filtrov.

2.4.1 Spracovanie signálov polohy

Ako už bolo popísané vyššie snímače na báze vírivých prúdov majú rad výhod a preto sú vhodné na použitie v takýchto aplikáciách. Tieto snímače avšak majú jednu nevýhodu. Ich nevýhoda vyplýva z ich princípu činnosti. Ak sú snímače osadené v blízkosti magnetických obvodov tak sú rušené vírivými prúdmi, ktoré vznikajú v magnetickom obvode vplyvom spínania napätia na cievky. V nazvom prípade máme k dispozícii dva typy snímačov. Snímač KD2310-2S je v tienenom prevedení, takže je menej náchylný na rušenie, no aj tak zúž nedokáže potlačiť úplne. Snímač KD3210-3U1 je v netienenom prevedení a je viac náchylný na rušenia od magnetického obvodu. Takýto problém je zobrazený na Obr. 2.17. Na obrázku je časová závislosť napätia na výstupe modulátora snímača α . Napätie priamo reprezentuje polohu v pomere $1V = 1mm$. Snímač polohy je aplikovaný na nami navrhnuté radiálne magnetické ložisko, ktorého vinutia sú buďdené vyššie popísaným meničom. Na priebehu je do času 1,1s vypnuté buďdenie elektromagnetického obvodu. Vtedy je hodnota o polohe rotora zo snímača pomerne presná a s malým šumom. V čase $t=1,1s$ bolo spustené buďdenie vinutí RML, čo sa prejavilo na snímanej polohe rotora veľkým šumom. Od cca 6s bolo napätie na medziobvode meniča plynule znižované. Na priebehu je vidieť, že veľkosť šumu je závislá na veľkosti tohto napätia.

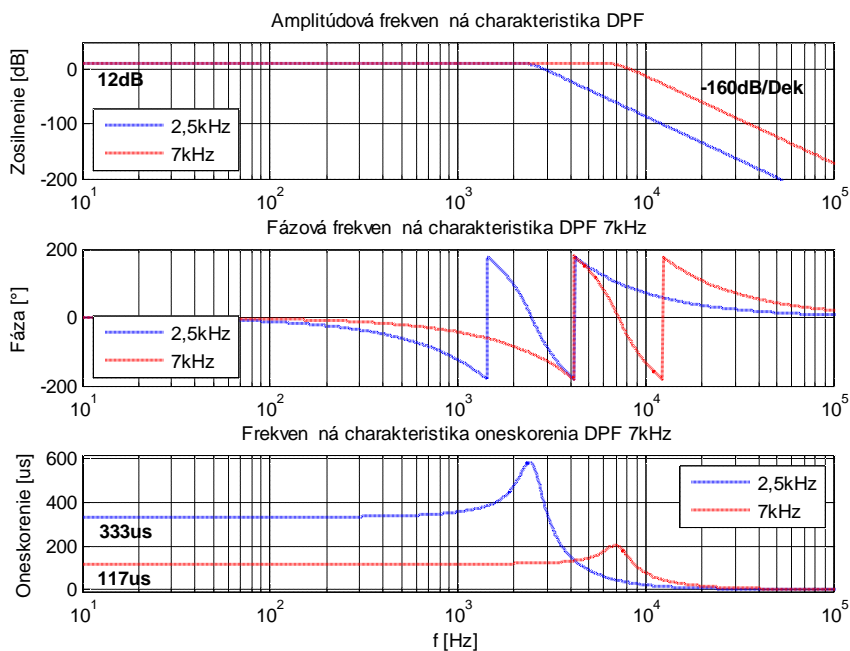


Obr. 2.17. Vplyv magnetického obvodu na snímač polohy

Jedným z riešení názho problému by teda bolo zníženie napätia na medziobvode. Takéto riešenie avšak neprichádza do úvahy, keďže by sme tým znížili dynamiku akéhokoľvek zásahu. Pri testovaní sme zistili, že šum sa ešte zväčšuje ak sa v rámci magnetického obvodu spustia ďalšie meniče. Často nie je možné potlačiť tento vplyv priniesla synchronizácia nosnej frekvencie PWM pre všetky meniče na jednom magnetickom obvode. Ďalším riešením potlačenia je použitie vhodného filtra na potlačenie šumu [39]. Riešenie filtrácie je vhodné previesť ešte v analógovej podobe ako sa uvádza v [2], [20]. Riešenie spočíva v použití aktívneho dolnopriepustného filtra (DPF). V [20] je aplikovaný DPF 2. rádu s frekvenciou rezu 2,5kHz. V [2] je aplikovaný DPF 8. rádu s frekvenciou rezu 7kHz. Pre náš systém sme sa rozhodli navrhnuť a aplikovať aktívny dolnopriepustný filter 8. rádu s frekvenciou rezu 7kHz,

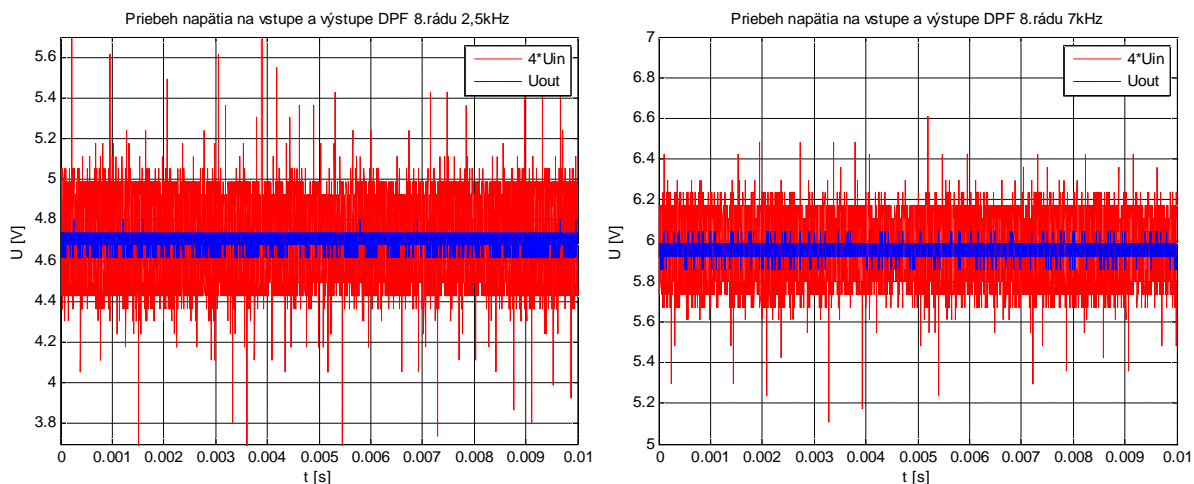
pre sníma polohy KD2310-2S a 2,5kHz pre sníma polohy KD2310-3U1. Pre návrh filtrov sme použili softvér FilterPro vo ne dostupný na stránke Texas Instruments. Filter sme navrhli s použitím [21] ako zapojenie ztyroch aktívnych dolnopriepustných filtrov 2.rádu s opera ným zosil ova om v neinvertujúcom zapojení. Neinvertujúce zapojenie sme zvolili preto aby bolo možné v prípade potreby použiť jednotlivé stupne filtrácie. Výstup demodulátora sníma a nám dáva informáciu o polohe v rozmedzí 1 - 2V. Nadriadený DSP ma rozsah analógového vstupu +-10V. Preto je prvý stupe filtrácie zároveň aj napä ový zosil ova so zosilnením 4.

Frekvenc né charakteristiky nami navrhnutých filtrov pre frekvenciu rezu 2,5kHz a 7kHz sú na Obr. 2.18. Útlm za frekvenciu rezu pri navrhnutých filtroch je 160dB/Dek. Tento útlm spôsobí, že pri filtri s frekvenciou rezu 2,5kHz sú signály s frekvenciou nad 4kHz úplne potla ené. Pri filtri s frekvenciou rezu 7kHz je táto frekvencia nad 10kHz.



Obr. 2.18. Frekvencné charakteristiky DPF 8.rádu

Tieto frekvencie sú dostatočne nízke nato, aby potlačili vplyv zumu na snímačoch, ktorý vzniká od nosnej PWM modulácie menšou, ktorá je na úrovni 31,25kHz. Zároveň je táto frekvencia dostatočne vysoká aby neovplyvovala dynamiku riadenia, ktorej pásmo priepustnosti sa pohybuje v okolí 10Hz. Vplyv filtrácie na reálnom systéme je zobrazený na Obr. 2.19.

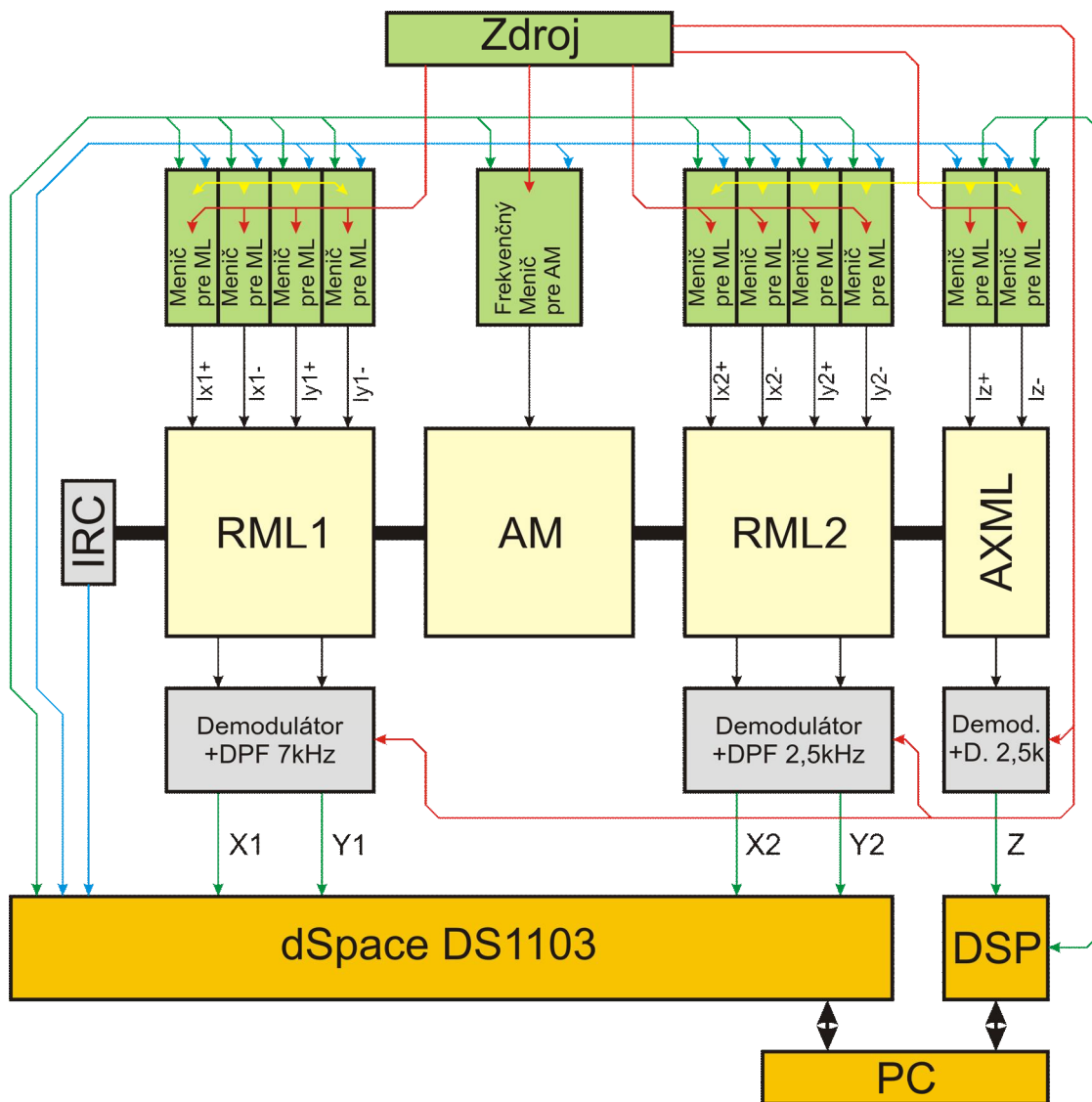


Obr. 2.19. Vplyv filtrácie na informáciu o polohe

alzie spracovanie signálov je možné prostredníctvom digitálnych filtrov na nadriadenom DSP. Tento spôsob je avzak vhodný ako posledná úprava signálu, keď analógový signál je vzorkovaný s periódou vzorkovania 200 μ s.

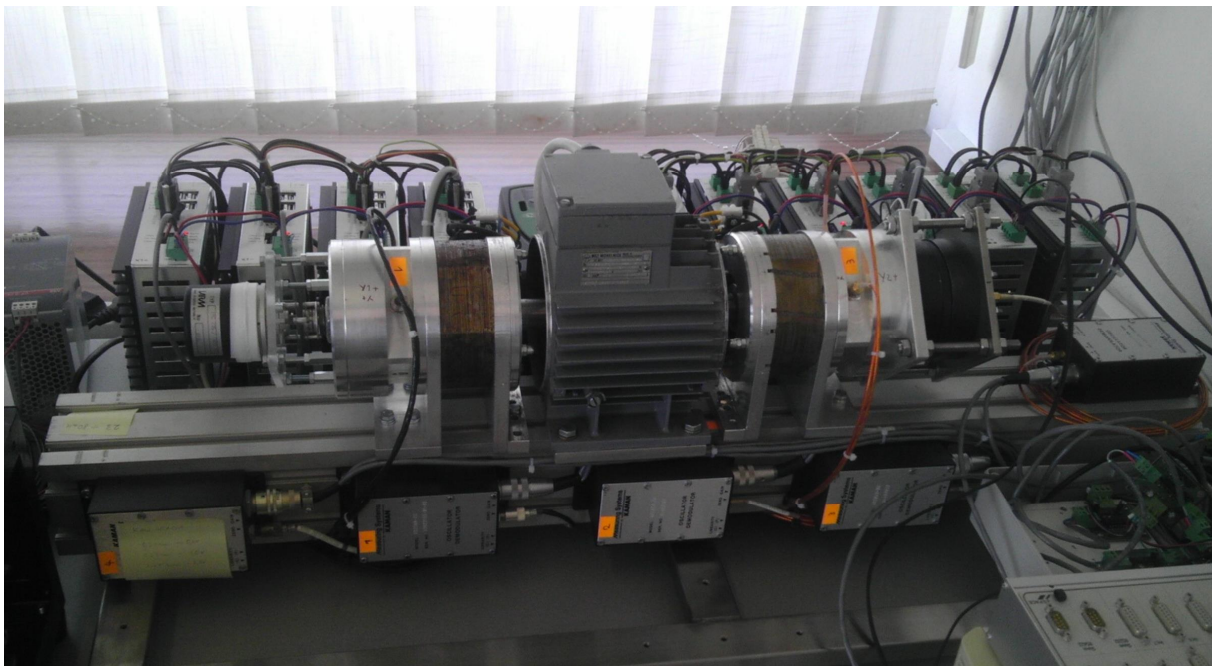
2.5 Konštrukčné riešenie systému pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami

Celý systém AML obsahuje viacero častí. Bloková schéma celého systému je znázornená na Obr. 2.20. Pozostáva z troch ložiskových jednotiek. Prvá ložisková jednotka zabezpečuje polohovanie rotora celého systému v osiach x_1 a y_1 . Obsahuje samostatné radiálne magnetické ložisko RML1. Magnetický obvod ložiska je budovaný z tvoricou meničov pre magnetické ložisko. Nosný PWM signál v meničoch je v rámci tohto magnetického obvodu synchronizovaný. Synchronizácia je nutná, aby sa meniče navzájom neovplyvovali indukovaným napätím a zároveň aby sa minimalizoval шум tvorený vírivými prúdmi. Meniče sú riadené pomocou analógových a digitálnych signálov z nadriadeného riadiaceho systému dSpace DS1103. Pôvodne bol ako riadiaci systém uvažovaná karta MF624 od Humusoftu, no pre celý systém AML by nepostačovali periférie a rýchlosť spracovania procesorov. V rámci RML1 sú použité snímače KD2300-2S, ktorých výstupný signál je filtrovaný dolnopriepustnými filtermi 8. rádu s frekvenciou rezu 7kHz a zosilnením rovným 4.



Obr. 2.20. Bloková schéma systému pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami

alvou loiskovou jednotkou je radiálne magnetické loisko RML2. Táto loisková jednotka zabezpečuje polohovanie rotora systému v osiach x_2 a y_2 . Táto loisková jednotka je mechanicky spojená s poslednou loiskovou jednotkou AXML. AXML zabezpečuje polohovanie rotora v osi z . Táto loisková jednotka je budená dvojicou meníčov, ktorej nosná PWM je synchronizovaná so ztvoricou meníčov pre RML2. Obidve loiskové jednotky využívajú snímače polohy KD2300-3U1, ktorých signály sú filtrované DPF 8. rádu s frekvenciou rezu 2,5kHz a zosilnením rovným 4. Loisková jednotka RML2 je riadená z nadriadeného systému dSpace DS1103. Axiálne magnetické loisko AXML je riadené ako samostatná jednotka z DSP STM32f407. Riadenie tejto loiskovej jednotky muselo byť osamostatnené z dôvodu nedostatku periférií systému dSpace DS1103. Poslednou časťou je pohonná jednotka tvorená asynchrónnym motorom AM v spojení s frekvenčným meničom. Použitý je ztvoripólový asynchrónny motor s nominálnym výkonom 0,55kW. Vinutia motora sú zapojené do hviezdy. Pôvodná vzduchová medzera magnetického obvodu motora bola zväznená, aby bolo možné polohovanie rotora jednotkami RML. Tým sa znížila väzba magnetického obvodu a tým sa znížil aj celkový výkon motora. AM je riadený frekvenčným meničom Control Techniques SKBD200110 s nastaveným skalárnym riadením podľa [22]. Ovládanie meniča je zabezpečené s nadriadeného systému dSpace DS1103. Na AM je možné ovládať pomocou digitálnych signálov funkcie "Start/Stop", a smer otáčania. Pomocou analógového signálu 0-10V je možné riadiť frekvenciu v nastavenom rozsahu. Tento ovládací signál bol z dôvodu nedostatku analógových výstupov na systéme dSpace prevádzaný cez PWM signál s frekvenciou 40kHz a amplitúdou 5V. Signál bol následne upravený aktívnym dolnopriepustným filtrom druhého rádu s frekvenciou rezu 50Hz a zosilnením 2. Touto úpravou sa docielil riadiaci signál pre frekvenčný menič v rozsahu 0-10V. Systém ešte obsahuje IRC snímač, ktorý dáva informáciu o polohe natočenia a rýchlosti rotora celého systému. Celý systém je napájaný z jedného napájacieho zdroja, ktorý vytvára napätia potrebné pre jednotlivé časti. Takto popísaný reálny systém je zobrazený na Obr. 2.21.



Obr. 2.21. Reálny systém pohonu s aktívnymi magnetickými loiskami

3 Návrh a realizácia riadiaceho systému pohonu s AML na vývojovom systéme dSpace 1103

Pre riadenie systému pohonu s aktívnymi magnetickými loiskami je potrebný riadiaci systém s vyznívým výkonom a možnosťou pripojenia väčšieho počtu periférií. Jedným zo systémov, na ktorom bolo testované riadenie pre jedno radiálne loisko je meracia karta MF624 od firmy Humusoft. Tento systém avšak nepostačuje ani na riadenie jednej loiskovej jednotky, keďže doba vzorkovania pod 1ms spôsobovala pád riadiaceho systému a zamrzenie hodnôt na výstupoch. Takéto zamrzenie výstupov by mohlo mať deštruktívny vplyv na elektromagnetickú ochranu loiskovej jednotky. Meracia karta MF624 podľa [23] disponovala malým počtom vstupných a výstupných portov. Ako vhodnejší riadiaci systém sa ukázal systém dSpace DS1103. Tento riadiaci systém oproti karte MF624 ponúka lepšie možnosti pripojenia periférií a taktovo obsahuje vlastné procesorové jednotky, ktoré zvládajú prácu s periódou vzorkovania pod 1ms.

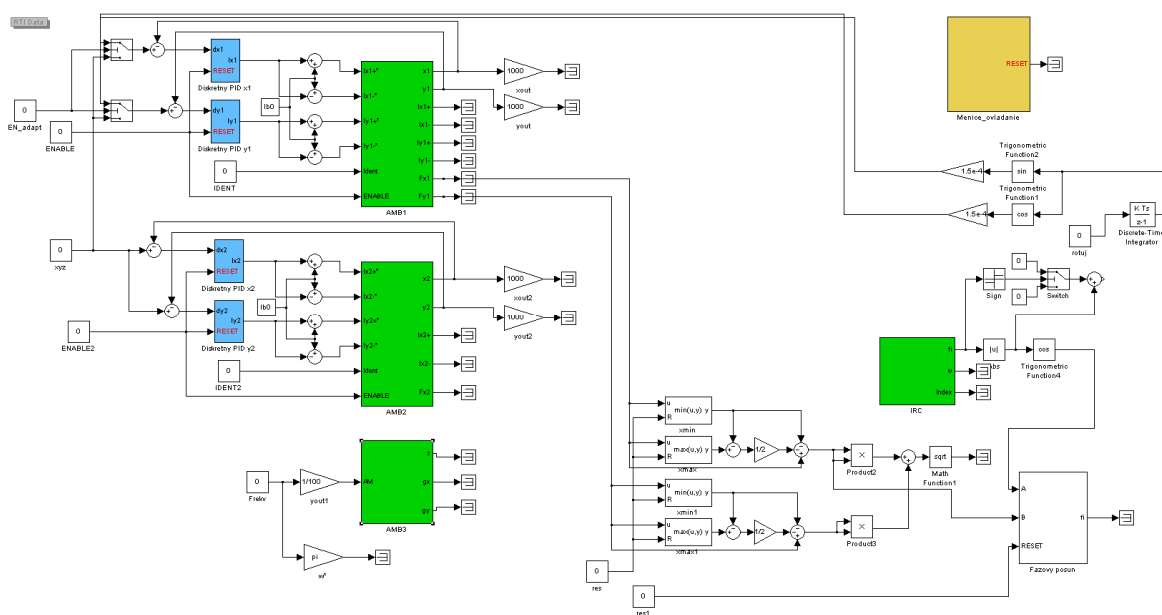
3.1 Prepojenie a možnosti ovládania dSpace 1103 s fyzikálnym modelom AML

Celý systém AML je prepojený so systémom dSpace 1103 prostredníctvom 38 signálov. Pre každú loiskovú jednotku je možné riadiť digitálnym signálom nabíjať ku medziobvodu meničov. Riadiaci signál sa privádza na prvý menič v rámci jednej loiskovej jednotky. Status nabíjačky je privádzaný ako riadiaci signál pre ďalší menič. Status posledného meniča je späť privedený do systému dSpace. Takéto zapojenie zabezpečí postupné spínanie medziobvodu. Takéto spínanie je vhodné pre rovnomerné zaťaženie napájacieho zdroja a tým nemôže dôjsť k preťaženiu tohto zdroja. Status posledného meniča zároveň dáva do systému prostredníctvom digitálneho vstupu informáciu o stave, keďže je pripravený na odblokovanie výkonovej osi. Výkonovú ochranu všetkých meničov pre jednu loiskovú jednotku je možné odblokovať jedným digitálnym riadiacim signálom. Každý menič pre loiskovú jednotku je riadený analógovým výstupom a prostredníctvom analógového vstupu je snímaná hodnota skutočného prúdu. V rámci daných loiskových jednotiek je ešte prostredníctvom analógových vstupov snímaná poloha rotora. Systém dSpace obsahuje len 8 D/A prevodníkov, preto nie je možné realizovať polohové riadenie pre všetky osi. Možnosťou je využitie PWM signálov, ktorých nosná frekvencia sa dá nastaviť do 5MHz a následne pomocou dolnopriepustného filtra s vhodnou frekvenciou rezu upraviť signál na analógový. Túto možnosť nakoniec nebolo možné realizovať, keďže rozlišovacia schopnosť plnenia PWM signálu je závislá na nosnej frekvencii. Pri nastavenej nosnej frekvencii 5MHz je možné nastaviť plnenie PWM len na úrovni 0%, 50% a 100%, čo je nevyhovujúce. Aby sme zachovali rovnakú dynamiku riadenia musel by mať dolnopriepustný filter frekvenciu rezu na úrovni cca 100kHz. Frekvencia nosnej PWM by teda musela byť aspoň 2MHz. V tomto prípade by bola rozlišovacia schopnosť PWM signálu nedostačujúca. Takýmto systémom je ovládaná iba frekvencia otáčania AM, keďže pri riadení AM nie je potrebná vysoká dynamika riadenia. V tomto prípade je nosná frekvencia PWM zvolená na 40kHz a frekvencia rezu dolnopriepustného filtra na 50Hz.

Pre polohové riadenie axiálneho loiska bolo potrebné realizovať riadiaci systém, ktorý dokáže spracovávať algoritmus spracovania signálu a PID so vzorkovacou periódou 200 μ s. Zároveň musí taký systém obsahovať 1 A/D prevodník a 2 D/A prevodníky s parametrami podobnými systému dSpace. Vhodným je DSP s 32-bitovým jadrom ARM typu STM32F407. Podľa [26] obsahuje 2 D/A prevodníky a 3 A/D prevodníky s rozlišovacou schopnosťou 12 bit pri napätí 0-3V. Taktovacia frekvencia je do 168MHz. Na názere účely sme použili vývojový kit STM32F4-Discovery. Tento vývojový kit už obsahuje programátor a je možné ho priamo pripojiť podľa [27] k nami navrhnutému zariadeniu AXML. V rámci tohto systému sa

zabezpečí len autokalibrácia rozsahu snímača a a polohové riadenie v osi z. Riadenie mení ovládanie zostáva zo systému dSpace.

Celý obsluhovaný program a riadenie pre AML sú vytvorené v prostredí Matlab Simulink. Celému systému dSpace ponúka knižnicu. Štruktúra riadenia pre jeho zložitosť je tvorená v subsystémoch pre lepšiu prehľadnosť. Na obrázku Obr. 3.1. je zobrazená celková schéma systému, ktorá obsahuje viacero samostatných blokov. Žltý blok zabezpečuje riadenie digitálnych signálov pre všetky meniče v rámci AML. Ale sú dva samostatné celky pre ložiskové jednotky RML1 a RML2. Tieto celky pozostávajú z bloku AMB a dvoch regulátorov so štruktúrou PID. Tieto riadenia obsahujú riadiaci signál "enable", ktorý spúšťa a polohové riadenie v danej ložiskovej jednotke. Ale obsahuje signál "ident", ktorý spúšťa autokalibráciu rozsahu snímača. Celková schéma ešte obsahuje blok IRC snímača, ktorý nám dáva údaje o polohe a rýchlosti otáčania rotora. Posledným blokom je blok AMB3, ktorý zabezpečuje riadenie frekvencie asynchrónneho motora a zároveň poskytuje informácie merané na axiálnom magnetickom ložisku. V rámci schémy je ešte zopár ďalších blokov, ktoré slúžia na identifikáciu veľkosti odstredivej sily a identifikácie fázového posunu tejto sily voči polohe z IRC snímača.



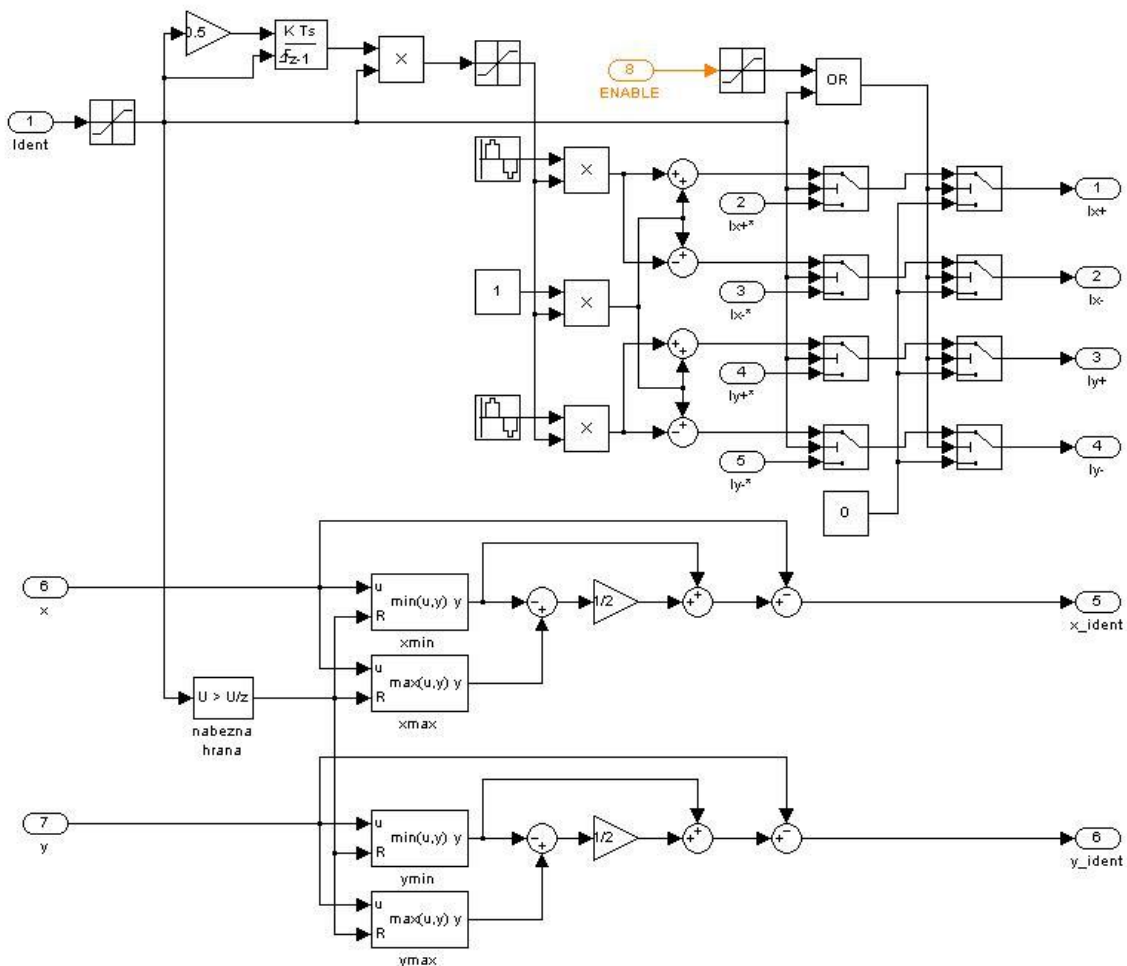
Obr. 3.1. Bloková schéma systému AML v prostredí Matlab Simulink

3.2 Návrh a realizácia systému autokalibrácie rozsahu snímača ovládania polohy

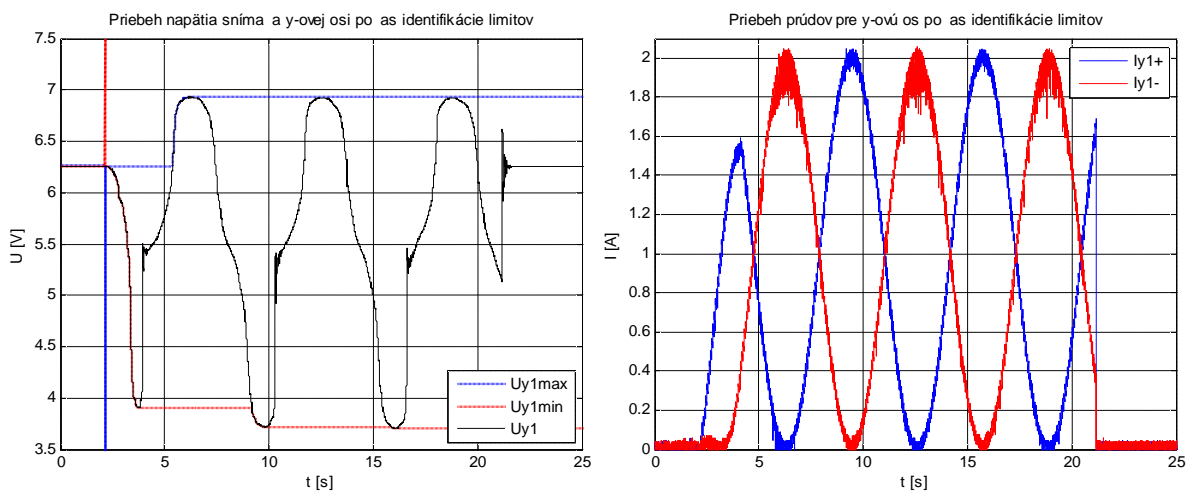
Systém autokalibrácie je na názor zariadení AML potrebné riešiť, pretože snímače polohy a demodulátory sú staršie. Starnutie spôsobuje, že analógové obvody menia svoje charakteristiky vplyvom času a teploty. V reálnych podmienkach by systém AML prešiel inováciou. V názornom prípade je nutné pred každým meraním previesť autokalibráciu rozsahu snímača ovládania polohy. Bloková schéma pre identifikáciu limitov je zobrazená na Obr. 3.2.

Systém identifikácie limitov sa skladá z dvoch hlavných častí. Prvou časťou je ovládanie meniča. Pomocou prepínača v závislosti od signálu "enable" je menič privádzaná daná hodnota prúdu buď 0A ak "enable = 0", alebo hodnota prúdu je rovná prúdom na vstupe do bloku ak je "enable = 1". Spustenie identifikácie zabezpečuje vstup "ident". Ak je tento signál rovný "1" pre jednotlivé meniče sa začnú generovať prúdy s plynulým náběhom amplitúdy. Pre os x je generovaný sínusový priebeh s amplitúdou 2A. Pre os y je generovaný priebeh rovnakých parametrov s tým rozdielom, že signál je fázovo posunutý o 90°. Tento posun zabezpečí, že rotor AML sa bude v danej ložiskovej jednotke odvíjať po mechanických dorazoch. Pri náběhovej hrane signálu "ident" sa zároveň resetnú

bloky v druhej hlavnej asti. Táto čas zabezpečuje hľadanie minima a maxima snímanej polohy, určenie rozsahu a posun súradnicového systému do stredu rozsahu. Hľadanie rozsahov snímačov pre jednu radiálnu ložiskovú jednotku obsahuje jeden generátor priebehov a dve separátne časti, ktoré identifikujú limity pre os x a os y. Na Obr. 3.3. je znázornená identifikácia limitov a prúdy generované pre menič v osi y1 na reálnom systéme. Identifikácia je spustená v čase $t=2s$. Pri spustení je na priebehoch limitov vidieť ako sa resetnú bloky hľadajúce minimum a maximum rozsahu snímača.

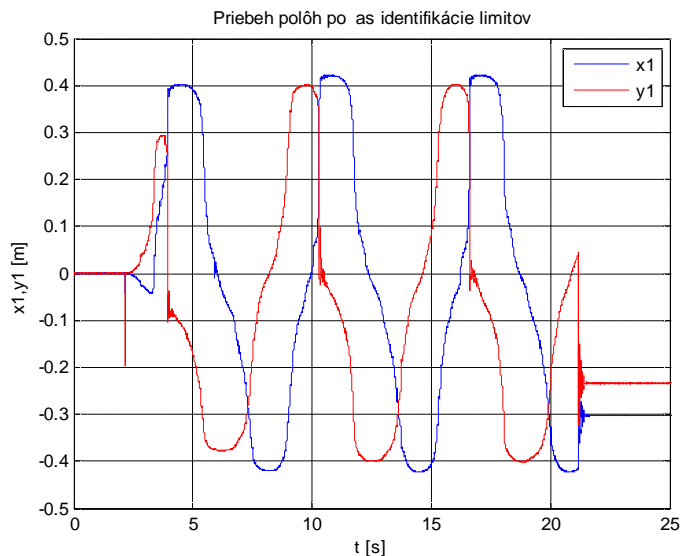


Obr. 3.2. Subsystém Identifikácie limitov snímačov polohy



Obr. 3.3. Identifikácia limitov osi y1

Z priebehov identifikácie limitov je vidie , 0e na získanie rozsahu sníma ov posta uje aby rotor v danej lo0iskovej jednotke preziel 2-krát po vzetkých mechanických limitoch. Priebeh výslednej polohy rotora je znázornený na Obr. 3.4. Na priebehoch polôh je opä vidie ztart identifikácie v 2 sekunde a koniec identifikácie cca v 22 sekunde kedy sa rotor vrátil do dolnej úvrate.



Obr. 3.4. Priebeh polôh po as identifikácie limitov

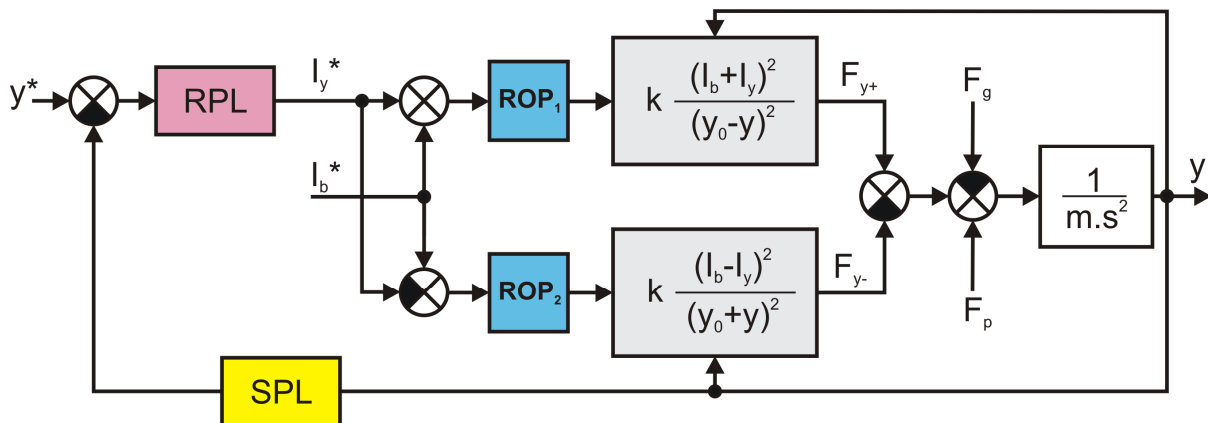
Na nami navrhnutom zariadení bola pri ka0dej mechanickej poruche spravená mechanická kompenzácia. Pre menšie mechanické poruchy je mo0né na výstupy identifikovanej polohy pri ítava ofsety polôh. Pod mechanicou poruchou rozumieme testovanie lo0iskovej jednotky pri vyzých prúdoch a zle nastavených parametroch riadenia, kedy sa rotor AML dostáva na mechanický limit s ve kou silou, ktorá mô0e mechanicke pozkodi lo0iskovú jednotku.

Pre axiálne magnetické lo0isko je tento algoritmus identifikácie limitov naprogramovaný do prídavného DSP STM32F407.

4 Návrh a realizácia algoritmov riadenia aktívneho magnetického ložiska

Návrh riadenia je zameraný na riadenie diferenciálneho elektromagnetického závesu - DEZ, ktorý zabezpečuje polohové riadenie systému AML pre osi x_1, y_1, x_2, y_2, z . Pozostáva zo syntéz regulálnych obvodov prúdu a polohy. Vychádzali sme s poznatkov získaných v [31], [32], [33], [34], [43].

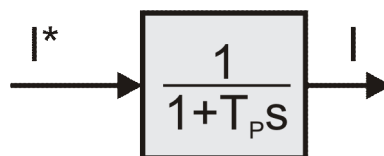
Princíp riadenia polohy pre jednu os v RML je znázornený na Obr. 4.1. Bloková schéma obsahuje sústavu DEZ, regulárne obvody prúdu - ROP₁ a ROP₂, alej obsahuje regulátor polohy - RPL a sníma polohy - SPL.



Obr. 4.1. Bloková schéma riadenia polohy DEZ

4.1 Regulačný obvod prúdu - ROP

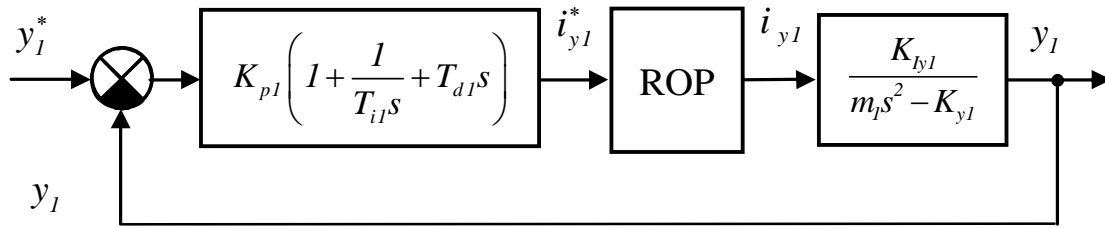
Regulačný obvod prúdu. ROP sme uvažovali náhradný model s prenosom prvého rádu a časovou konštantou $T_p = 600\mu s$. Bloková schéma náhradného modelu je znázornená na Obr. 4.2.



Obr. 4.2. Náhradný model regulačného obvodu prúdu

4.2 Syntéza regulačného obvodu polohy - ROPL

Navrhujeme 5 ROPL a to pre RML1 (ROPL-x1, ROPL-y1) a pre RML2 (ROPL-x2, ROPL-y2) a pre axiálne ložisko ROPL_z. Syntézu PID regulátora polohy odvodíme v ďalšej časti pre os y_1 ložiska RML1. Pri syntéze parametrov regulátora polohy ROPL vychádzame z blokovej schémy uvedenej na Obr. 4.1 s týmito zjednodušujúcimi predpokladmi. Uvažuje sa linearizovaný model DEZ v okolí pracovného bodu. Zanedbáva sa dynamika regulátorov prúdu. Dynamiku regulačných obvodov prúdu vyjadrenú pásmom priepustnosti $f_{0_ROP} = 265,26\text{Hz}$ možno zanedbať preto, lebo dynamika regulačného obvodu polohy je rádovo nižšia $f_{0_ROPL} \approx 10\text{Hz}$. Pri návrhu regulátora sa neuvažujú dynamické vlastnosti snímača a polohy + filtrov. Bloková schéma ROPL pre RML1 os y_1 je znázornená na Obr. 4.3.



Obr. 4.3. Model ROPL pre syntézu regulátora polohy

Parametre regulátora PID získame použitím metódy rozmiestovania pólov [28]. Vychádza sa z prenosu uzavretého regulačného obvodu (4.1)

$$G(s) = \frac{M(s)}{N(s)} = \frac{\frac{K_{p1}K_{ly1}}{T_{i1}m_1} (1 + T_{i1}s + T_{d1}T_{d1}s^2)}{s^3 + \frac{K_{p1}K_{ly1}T_{d1}}{m_1}s^2 + \frac{K_{p1}K_{ly1} - K_{y1}}{m_1}s + \frac{K_{p1}K_{ly1}}{T_{i1}m_1}} \quad (4.1)$$

Charakteristický polynóm $N(s)$ je tretieho rádu.

$$N(s) = s^3 + \frac{K_{p1}K_{ly1}T_{d1}}{m_1}s^2 + \frac{K_{p1}K_{ly1} - K_{y1}}{m_1}s + \frac{K_{p1}K_{ly1}}{T_{i1}m_1} \quad (4.2)$$

Želaný polynóm $N_0(s)$ nech obsahuje dvojicu komplexne združených pólov a jeden reálny pól.

$$N_0(s) = (s^2 + 2\xi_1\omega_1s + \omega_1^2)(s + k_1\omega_1) \quad (4.3)$$

Porovnaním jednotlivých mocnín charakteristického a želaného polynómu $N(s) = N_0(s)$ získavame parametre PID regulátora polohy.

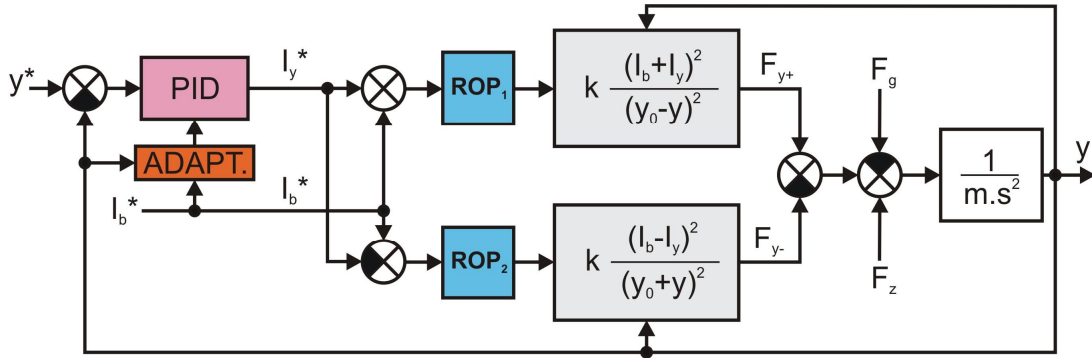
$$\begin{aligned} T_{d1} &= \frac{m_1\omega_1(k_1 + 2\xi_1)}{K_{p1}K_{ly1}} \\ K_{p1} &= \frac{m_1\omega_1^2(2\xi_1k_1 + 1) + K_{y1}}{K_{ly1}} \\ T_{i1} &= \frac{K_{p1}K_{ly1}}{m_1k_1\omega_1^3} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Dynamika regulačných obvodov polohy v osiach x a y RML1 a RML2 je zhodná. Platí:

$$\xi_1 = \xi_2, \omega_1 = \omega_2, k_1 = k_2 \quad (4.5)$$

4.3 Návrh adaptívneho regulačného obvodu polohy - ROPL

Navrhujeme 4 ROPL a to pre RML1 (ROPL-x1, ROPL-y1) a pre RML2 (ROPL-x2, ROPL-y2). Systém diferenciálneho magnetického závesu je nelineárny a návrh parametrov regulátora pre jeden pracovný bod nie je príliš vhodný. Rotor AML síce bude stabilizovaný v danom pracovnom bode, no pri poruchách sa vychýli, čo by mohlo spôsobiť nestabilitu systému. Pre zabezpečenie stability regulačného obvodu je vhodné parametre regulátora poítať pre aktuálny pracovný bod. Bloková schéma s pridaním takejto adaptácie systému je zobrazená na Obr. 4.4 [30].



Obr. 4.4. Bloková schéma ROPL s blokom adaptácie [30]

Blok adaptácie zabezpečuje spojité prepojenie parametrov K_p , T_d a T_i adaptívneho PID regulátora. Syntéza regulačného obvodu polohy vychádza z linearizovaného modelu DEZ, ako je to znázornené na Obr. 4.3. Zosilnenia v linearizovanom DEZ sú dané podľa Kap.2.1.2 vzáhom (4.6).

$$K_{iy} = 4k_R \frac{I_{y0}^2}{y_0^2}$$

$$K_y = 4k_R \frac{I_{y0}^2}{y_0^3}$$
(4.6)

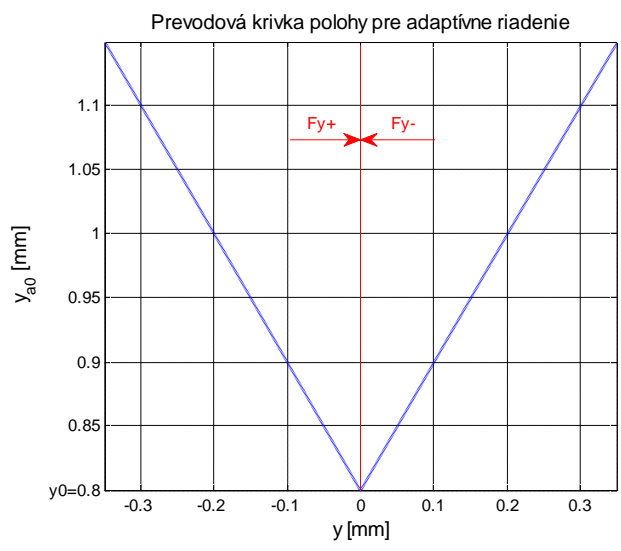
Prúd I_{y0} je daný vzáhom (4.7) ako I_{y01} , pre ložiskovú jednotku RML1 a I_{y02} , pre ložiskovú jednotku RML2. Nominálna poloha y_0 , konštanta elektromagnetu k_R , gravitačné zrýchlenie g a biasový prúd I_b^* sú pre obe ložiskové jednotky totožné.

$$I_{y01} = \frac{F_{gy1} y_0^2}{k_R 4I_b^*}, F_{gy1} = \frac{m_1 g}{\sqrt{2}}$$

$$I_{y02} = \frac{F_{gy2} y_0^2}{k_R 4I_b^*}, F_{gy2} = \frac{m_2 g}{\sqrt{2}}$$
(4.7)

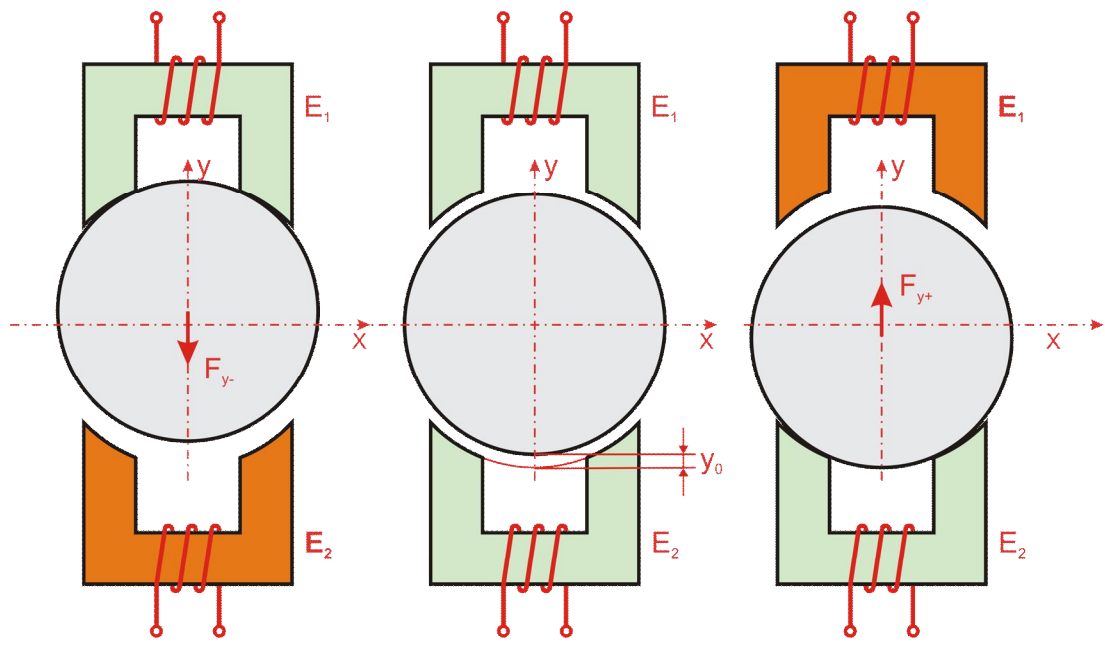
Pre zavedenie adaptácie do systému zavedieme adaptačnú polohu y_a , ktorá sa mení v závislosti od polohy rotora y podľa vzáhu (4.8). Prevodová krivka polohy na základe vzáhu (4.8) je zobrazená na Obr. 4.5.

$$y_a = y_0 + |y|$$
(4.8)



Obr. 4.5. Prevodová krivka polohy pre blok adaptácie

Na Obr. 4.6. je znázornený princíp polohovania v DEZ. Ak je rotor v nominálnej polohe $y_0=0,8mm$, elektromagnety $E1$ a $E2$ zabezpečujú udržanie rotora v tejto polohe. Ak sa rotor blíži k hornej úvrati ako je to v prípade vľavo, elektromagnet $E2$ musí túto zmenu vykompenzovať. V tomto prípade je vzduchová medzera medzi rotorom a elektromagnetom $E2$ väčšia ako y_0 . V poslednom prípade, obrázok vpravo, sa rotor blíži k dolnej úvrati. V tomto prípade musí tento stav eliminovať elektromagnet $E1$. V tomto prípade je vzduchová medzera medzi rotorom a elektromagnetom $E1$ opäť väčšia ako y_0 . Preto zavedenie adaptívnej polohy y_a zabezpečuje prepočet adaptívnych parametrov PID regulátora z linearizovaného modelu, určených pre elektromagnet v DEZ kde je väčšia vzduchová medzera.

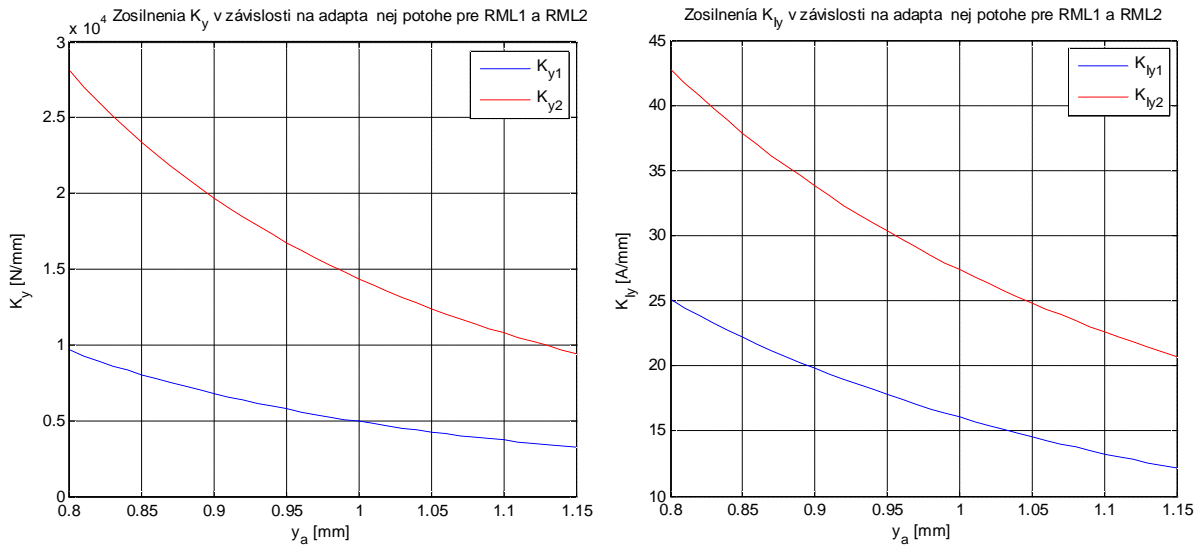


Obr. 4.6. Princíp pohybu rotora v DEZ

Po zavedení adaptívnej polohy do vzťahu (4.6), získame estimované zosilnenia \tilde{K}_{iy} a \tilde{K}_{y} podľa vzťahu (4.9), pre adaptívne riadenie polohy. Priebehy estimovaných zosilnení v závislosti od adaptívnej polohy y_a pre ložiskové jednotky RML1 a RML2 sú znázornené na

Obr. 4.7. Pre ložiskovú jednotku RML1 sa zosilnenie \tilde{K}_y mení v rozsahu 3244-9635N/mm a zosilnenie \tilde{K}_{iy} v rozsahu 12,13-25,07A/mm. Pre ložiskovú jednotku RML2 sa zosilnenie \tilde{K}_y mení v rozsahu 9442-28047N/mm a zosilnenie \tilde{K}_{iy} v rozsahu 20,70-42,77A/mm.

$$\begin{aligned}\tilde{K}_{iy} &= f_1(I_{y0}, y_a) = 4k_R \frac{I_{y0}}{y_a^2} \\ \tilde{K}_y &= f_2(I_{y0}, y_a) = 4k_R \frac{I_{y0}^2}{y_a^3}\end{aligned}\quad (4.9)$$



Obr. 4.7. Priebeh zosilnení v závislosti od polohy pre RML1 a RML2

V bloku adaptácie sa na základe získaných estimovaných zosilnení \tilde{K}_{iy} a \tilde{K}_y prepoítavajú parametre adaptívneho PID regulátora podľa vzorca (4.10).

$$\begin{aligned}\tilde{T}_{d1} &= \frac{m_1 \omega_1 (k_1 + 2\xi_1)}{\tilde{K}_{p1} \tilde{K}_{iy}} \\ \tilde{K}_{p1} &= \frac{m_1 \omega_1^2 (2\xi_1 k_1 + 1) + \tilde{K}_{y1}}{\tilde{K}_{iy1}} \\ \tilde{T}_{i1} &= \frac{\tilde{K}_{p1} \tilde{K}_{iy1}}{m_1 k_1 \omega_1^3}\end{aligned}\quad (4.10)$$

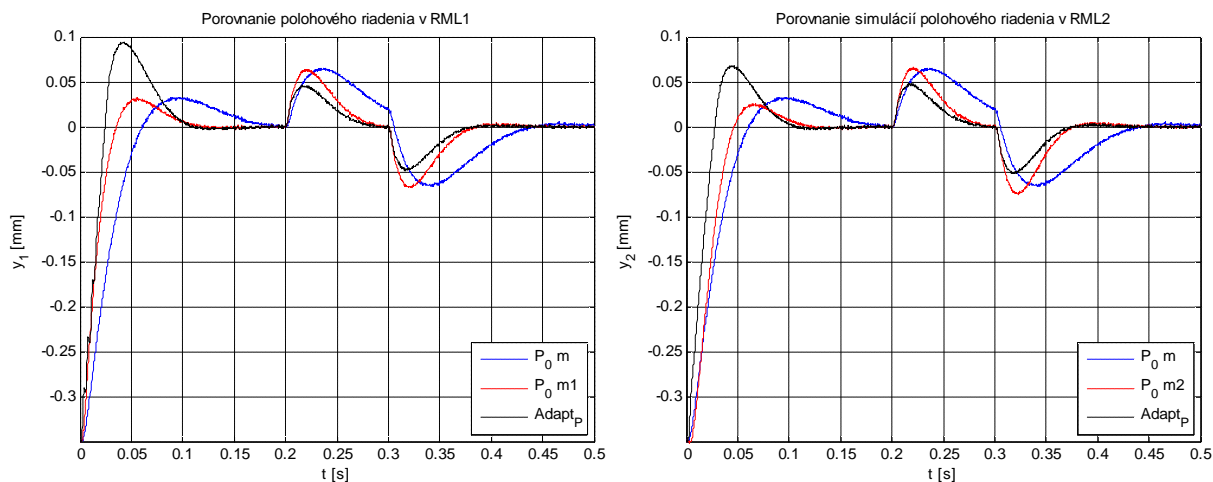
Pre navrhnuté riadenie boli vykonané simulované experimenty. Experimenty boli vykonané pre staticky vypoítané parametre PID ROPL pre pracovný bod P_0 v nominálnej polohe $y_0 = 0,8mm$. Simulácie pre daný pracovný bod boli vykonané s uvažovaním hmotnosti rotora m a následne $m1$ pre RML1 a $m2$ pre RML2. Následne sme simuláciu overili navrhnuté adaptívne riadenie s uvažovaním hmotností $m1$ a $m2$. Simulovaný experiment pozostával zo simulácie zdvihu rotora RML z dolnej úvrate do pracovnej polohy. Parametre PID regulátora pre jednotlivé simulácie sú uvedené v tabuľke Tab. 4.1. Hmotnosť rotora ovplyvuje spolu s pásmom priepustnosti Parameter K_p . Pre adaptívny PID nadobúda tento parameter a0 dvojnásobnú hodnotu.

Tab. 4.1 Parametre PID

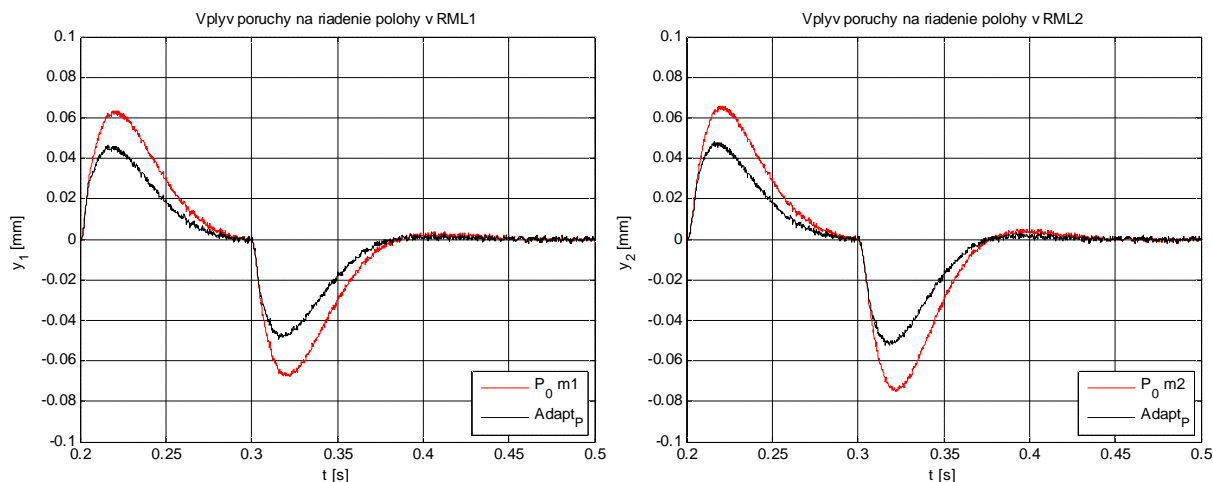
	f [Hz]	k [-]	[-]	K_p [A/mm]	T_i [ms]	T_d [ms]	K_y [N/mm]	K_{iy} [A/mm]
P_0 pre m	6	3,5	1	3047	69,4	15,9	141220	95,97
P_0 pre m1	10	3,5	1	3118	41,5	9,6	9635	25,07
P_0 pre m2	10	3,5	1	3388	45,1	8,8	28047	42,71
Adapt pre m1	11	3,5	1	7103-3692	34,4-36,9	9,6-8,9	3244-9635	12,13-25,07
Adapt pre m2	11	3,5	1	7287-3962	35,3-39,6	9,3-8,3	9442-28047	20,69-42,71

4.4 Overenie navrhnutého riadenia na simula nom modeli RML

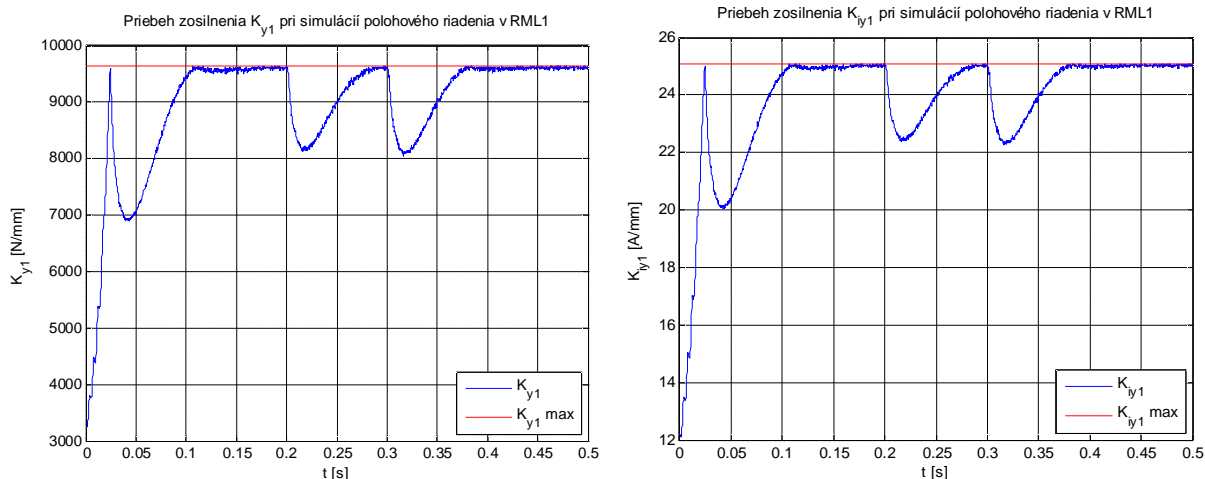
Výsledky simulácií polohovania sú znázornené na Obr. 4.8. Biasový prúd bol nastavený na hodnotu $I_b=0,6A$. Simula ný model a reálny systém mali nastavené obmedzenie ak ného zásahu na 3A. V rámci simula ného modelu sme simulovali impulz poruchy sily $F_p=10N$ od asu $t=0,3s$ do $t=0,5s$. Pri simuláciách adaptívneho prepo tu parametrov PID regulátora sa parametre linearizovaného modelu DEZ pre RML1 menili pod a Obr. 4.10.



Obr. 4.8. Priebeh simula ných polôh v RML1 a RML2



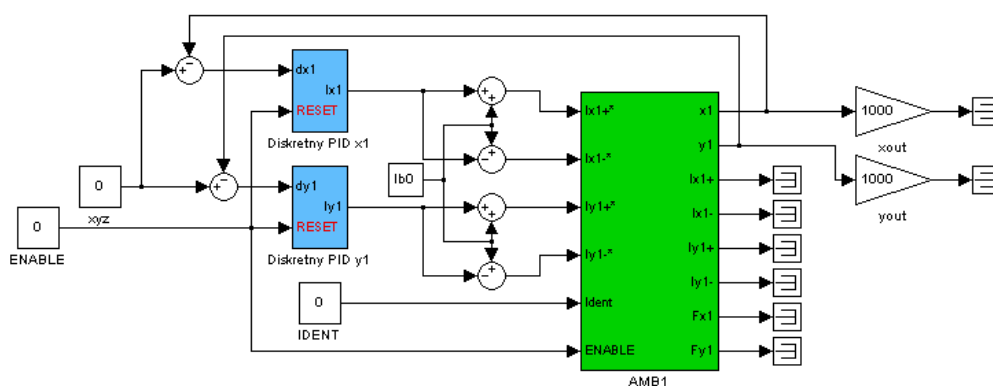
Obr. 4.9. Detail vplyvu poruchy na polohu v RML1 a RML2



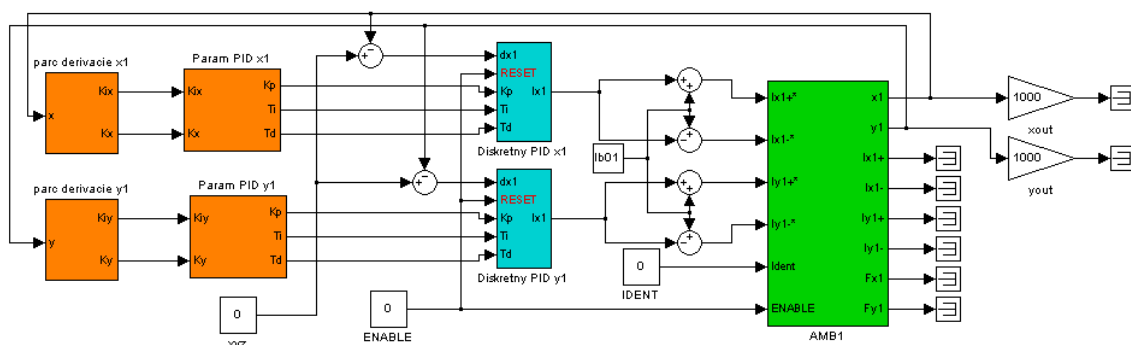
Obr. 4.10. Priebec zosilnení pre RML1 pri adaptívnom riadení.

4.5 Overenie navrhnutého riadenia na reálnom systéme RML

Na základe simulácií boli navrhnuté riadenia overené na reálnom systéme. Celková bloková schéma je znázornená na Obr. 3.1. Bloková schéma pre overovanie polohového riadenia s parametrami PID pre pracovný bod P_0 je znázornená na Obr. 4.11. Bloková schéma zabezpečuje riadenie polohy rotora pre RML1. Analogicky je navrhnuté riadenie pre ložiskovú jednotku RML2. Na Obr. 4.12 je znázornená bloková schéma regulačných slučiek polohy pre RML1 s realizáciou adaptívneho PID regulátora polohy. Regulačné obvody boli aplikované v diskretnej forme s periódou vzorkovania $200\mu\text{s}$.

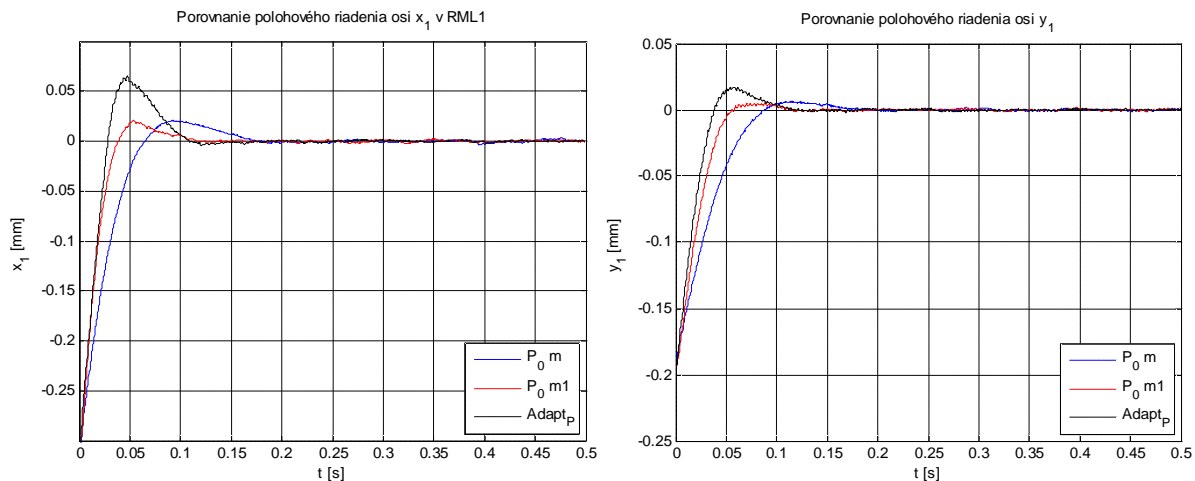


Obr. 4.11. Bloková schéma pre riadenie polohy na reálnom RML1

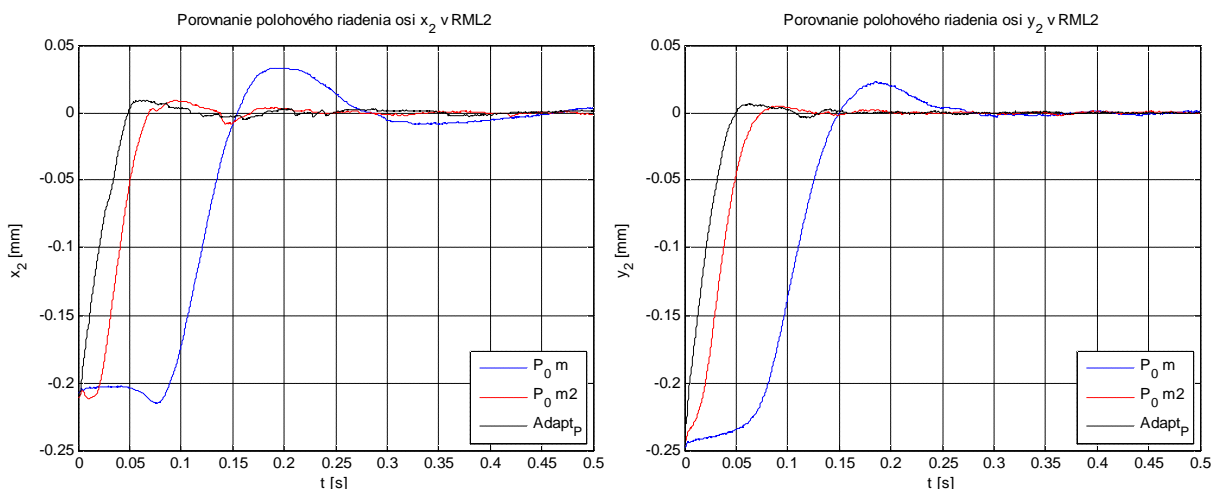


Obr. 4.12. Bloková schéma pre adaptívne riadenie polohy na reálnom RML1

Na Obr. 4.13 sú zobrazené porovnania polohovania pre RML1 a na Obr. 4.14 pre RML2. Porovnávané je riadenie s použitím parametrov PID vyíšených pre statický pracovný bod pre celkovú hmotnosť rotora, pre hmotnosti $m1$ a $m2$ a adaptívne parametre PID regulátora polohy pre hmotnosti $m1$ a $m2$. Ako najvhodnejšie riadenie sa ukázalo adaptívne riadenie. Kvantifikované výsledky sú uvedené v Tab. 4.2. Konkrétne sú uvádzané čas nábehu, čas regulácie (pásmo necitlivosti je $\pm 5\%$ z rozsahu), maximálne preregulovanie a presnosť polohovania v statickom režime. Opäť platí, že pri simuláciách RML1 je ROPL pre os y_1 totožný s x_1 , preto sú uvádzané simulácie len pre os y . Analogicky to platí aj pre jednotku RML2.



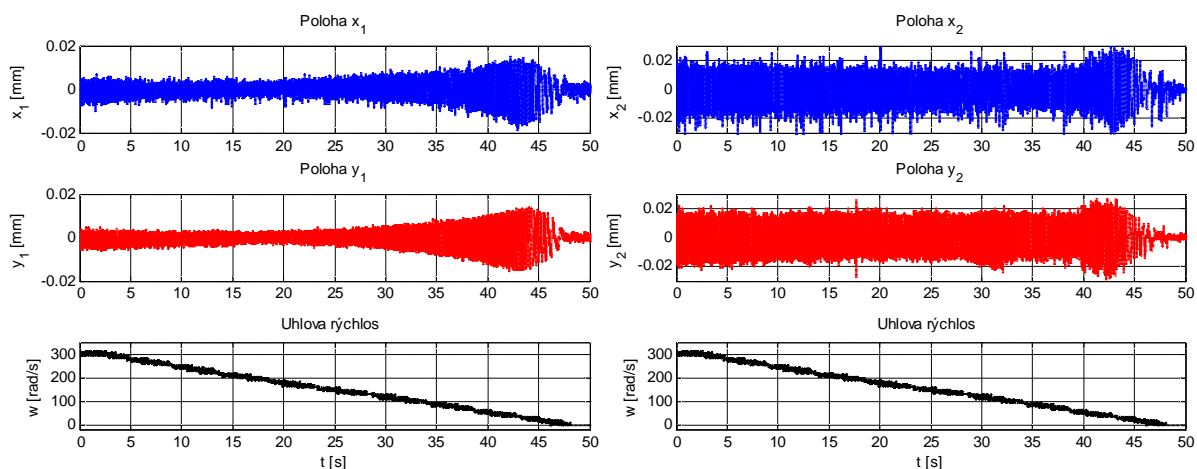
Obr. 4.13. Porovnanie navrhnutých regulátorov na reálnom systéme pre RML1



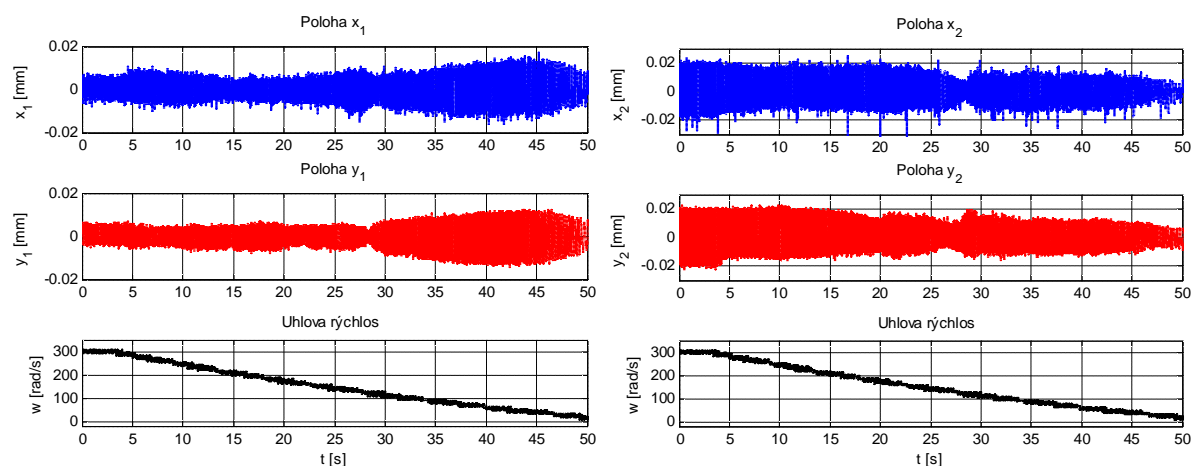
Obr. 4.14. Porovnanie navrhnutých regulátorov na reálnom systéme pre RML2

Pre navrhnuté parametre regulátorov sme následne overovali stabilitu a merali závislosť regulačnej odchýlky v závislosti na rýchlosti otáčania hriade. Rotor celého systému bol mechanicky upravený len finálnym sústružením funkčných častí. Proces brúsenia na guľato a vyvažovanie boli zámerné vynechané, aby bol rotor systému AML nevyvážený a nerovnomerný. Tento fakt nám poslúžil ako nekvantifikovaná dynamická záťaž prostredníctvom odstredivej sily a ťažiska, ktoré je mimo os rotácie. Rotor AML bol roztožený prostredníctvom asynchrónneho motora na uhlovú rýchlosť 300 rad/s a následne bola výkonová časť mení a odpojená, aby AM neovplyvoval výsledky merania. Meranie pozostávalo zo snímania polohy rotora AML po čas dobrehu z rýchlosti 300 rad/s na 0 rad/s. Na Obr. 4.15 je meranie pre parametre PID regulátora polohy vyíšené pre pracovný bod P_0 a celkovú hmotnosť rotora m . Pre pracovný bod P_0 s hmotnosťou $m1$ pre RML1 a $m2$ pre

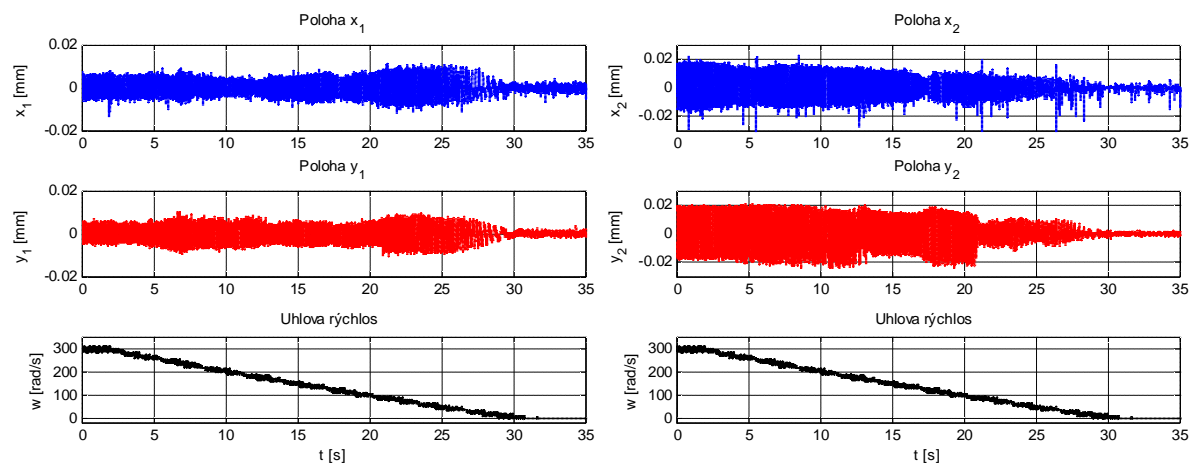
RML2 sú namerané priebehy znázornené na Obr. 4.16. Na Obr. 4.17 sú znázornené dosiahnuté výsledky pre adaptívny PID regulátor. Kvantifikované výsledky z uvedených meraní sú uvedené v Tab. 4.2. Konkrétne sú uvádzané presnosti polohovania v statickom režime pre 0 rad/s a v dynamickom režime maximum pre celý rozsah a pre 300 rad/s.



Obr. 4.15. Porovnanie kvality navrhnutých regulátorov na reálnom systéme pre pracovný bod P_0 a hmotnosť m



Obr. 4.16. Porovnanie kvality navrhnutých regulátorov na reálnom systéme pre pracovný bod P_0 a hmotnosť m_1 pre RML1 a m_2 pre RML2



Obr. 4.17. Porovnanie kvality navrhnutých regulátorov na reálnom systéme pre adaptívny PID regulátor a hmotnosť m_1 pre RML1 a m_2 pre RML2

Tab. 4.2 Kvantifikácia dosiahnutých výsledkov na reálnom systéme AML

	RML1 P ₀ pre m	RML1 P ₀ pre m1	RML1 adapt pre m1	RML2 P ₀ pre m	RML2 P ₀ pre m2	RML2 adapt pre m2
as nábehu T _{x63%} [ms]	28,5	17,8	16,8	125,3	44,0	24,3
as nábehu T _{y63%} [ms]	38,4	26,2	20,2	112,1	39,3	22,5
as regulácie T _{xreg} [ms]	123,5	68,8	90,0	249,4	61,5	43,2
as regulácie T _{yreg} [ms]	68,7	43,1	65,2	214,5	62,0	42,8
Ve kos prer regulovania x _{max} [μm]	20,9	20,7	65,6	33,1	9,3	9,5
Ve kos prer regulovania y _{max} [μm]	6,5	5,6	17,4	22,8	5,0	6,7
Presnos x v statickom režime pri 0 rad/s [μm]	±2,9	±2,1	±1,5	±5,2	±2,4	±2,5
Presnos y v statickom režime pri 0 rad/s [μm]	±1,5	±1,3	±1,3	±2,0	±1,4	±1,3
Presnos x pri 300 rad/s [μm]	±5	±5	±5	±16	±19	±16
Presnos y pri 300 rad/s [μm]	±4,5	±4,5	±4,5	±16	±19	±18,5
Maximálna odchýlka x pri dynamickom režime [μm]	±14	±13	±10	±28	±19	±16
Maximálna odchýlka y pri dynamickom režime [μm]	±13	±11,5	±9	±25	±20	±19

Zhodnotenie

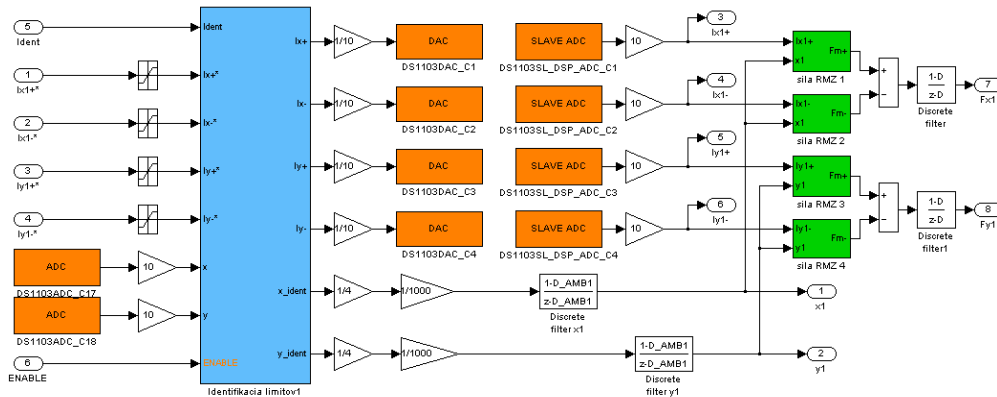
Z dosiahnutých simulovaných výsledkov môžeme usúdiť, že pre polohové riadenie v ložiskových jednotkách s uvažovaním definovaného pracovného bodu je výhodnejšie brať ohľad na hmotnosť rotora v danom bode. Adaptívnym riadením sa zabezpečí lepšia stabilita regulačného obvodu a zároveň pod dosiahnutých výsledkov aj lepšie potláči vplyv poruchy. Preto na základe simulovaných a nameraných grafických priebehov sú najvhodnejšie adaptívne prepoítavané parametre PID regulátora. Za najmenej vhodný výpočet môžeme považovať prepoítet pre definovaný pracovný bod ak rátame s celkovou hmotnosťou m rotora AML. Pri meraní zdvihu rotora do nominálnej polohy adaptívny regulátor eliminoval nelinearitu systému, ktorá sa chovala ako dopravné oneskorenie. Pre merania závislostí presnosti polohovania v závislosti od uhlovej rýchlosti sme zistili, že adaptívny PID regulátor potláča a rozkmit polohy pri nižších uhlových rýchlostiach. Pri vyšších uhlových rýchlostiach potláča tento rozkmit v menšej miere nakoľko čas nábehu je na úrovni 22-43ms a pri uhlovej rýchlosti 300 rad/s trvá jedna mechanická otáčka 20,9ms. Zvyšovaním uhlovej rýchlosti začínajú v rotore AML priaznivo pôsobiť Coriolisové sily, ktoré zväčša eliminujú odstredivé sily a tým stabilizujú rotor. Pri poslednom meraní pre adaptívny PID regulátor bola otestovaná aj uhlová rýchlosť 400 rad/s. Pri tejto rýchlosti bol rozkmit polohy porovnateľný s výsledkami získanými pre uhlovú rýchlosť 300 rad/s.

Pri poslednom meraní sme taktiež merali spotrebu pre jednotlivé ložiskové jednotky a dosiahli sme vynikajúce výsledky. Pre ložiskovú jednotku RML1 bol celkový príkon 11,55W, pre RML2 13,01W a pre jednotku AXML 11,52W. Celkový príkon na všetky ložiskové jednotky bol 36,08W.

4.6 Návrh a realizácia identifikácie hmotnosti rotora na reálnom systéme pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami

Identifikácia síl v ložiskových jednotkách systému pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami je vhodná z viacerých dôvodov. Prvým dôvodom je zistenie poruchových veličín ako je ve kos odstredivej sily nevyváženosti rotora. Taktiež je táto informácia vhodná pre

diagnostiku celého systému. Druhým dôvodom je identifikácia hmotnosti rotora v danom bode. Identifikácia prebieha v loiskových jednotkách RML1 v osiach x_1 , y_1 a RML2 v osiach x_2 , y_2 . Na Obr. 4.18 je zobrazený subsystém AMB1 (RML1). Zelenou farbou sú znázornené bloky identifikácie sily vyvinutej v jednotlivých elektromagnetoch.



Obr. 4.18. Subsystém AMB1 (RML1)

Identifikácia sily v loiskových jednotkách je realizovaná pre každú os zvlášť, a vychádza z nelineárneho modelu diferenciálneho elektromagnetického závesu pod a (4.11). Sila v DEZ je závislá na konstante elektromagnetu k_R , ktorá je nemenná a zhodná pre všetky osi identifikácie. alej je sila tvorená DEZ závislá od skutočného prúdu v jednotlivých elektromagnetoch, od nominálnej pracovnej polohy $x_0=y_0$ a od polohy rotora x_1 , y_1 . Pre loiskovú jednotku RML2 platia analogicky rovnaké vzťahy.

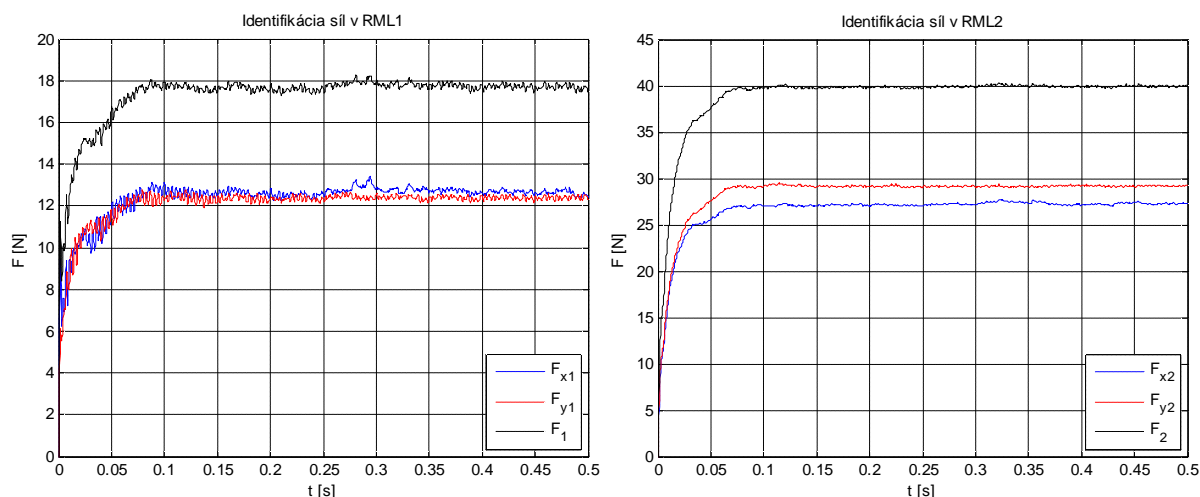
$$F_{x1} = F_{x1+} - F_{x1-} = k_R \frac{I_{x1+}}{(x_0 - x_1)^2} - k_R \frac{I_{x1-}}{(x_0 + x_1)^2}$$

$$F_{y1} = F_{y1+} - F_{y1-} = k_R \frac{I_{y1+}}{(y_0 - y_1)^2} - k_R \frac{I_{y1-}}{(y_0 + y_1)^2}$$
(4.11)

Výsledná sila vytvorená v DEZ je následne filtrovaná diskretným dolnopriepustným filtrom prvého rádu s frekvenciou rezu 100Hz. Výsledná sila v loiskovej jednotke RML1 je potom daná ako vektorový súčet síl generovaných v osiach x_1 a y_1 . Nakoľko je uhol medzi osou x_1 a osou y_1 rovný 90°, môžeme výslednú silu vyjadriť použitím Pytagorovej vety (4.12). Analogicky vzťah platí aj pre RML2.

$$F_1 = \sqrt{F_{x1}^2 + F_{y1}^2}$$
(4.12)

Nami navrhnutú identifikáciu síl sme aplikovali na reálnom systéme AML. Identifikácia síl bola realizovaná počas experimentu overovania kvality polohového riadenia pre adaptívny PID regulátor. Meranie pozostávalo zo zdvihu rotora z dolnej úvraty do nominálnej polohy. Pribeh generovaných síl je uvedený na Obr. 4.19.



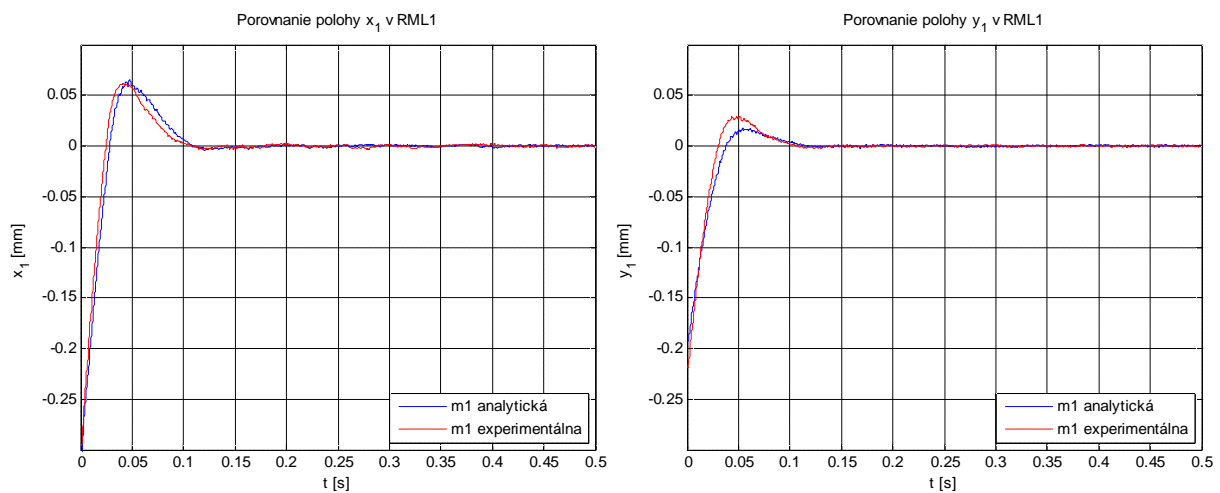
Obr. 4.19. Priebeh síl v ložiskových jednotkách RML1 a RML2

Sily generované v ložiskových jednotkách priamo odpovedajú tiaŕi rotora v jednotlivých bodoch zdvihu rotora. Celková tiaŕ rotora je daná ako súčet tiaŕi experimentálne identifikovaných v ložiskových jednotkách RML1 a RML2. Pre získané priebehy tiaŕe sme určili stredné hodnoty z ustálených stavov (0,1s a 0,5s). Hodnoty tiaŕových síl sme previedli na hmotnosti, ktoré sú uvedené v Tab. 4.3. V tabuľke sú uvedené aj hodnoty získané analyticky, vážením závesnou váhou ako je to popísané v kapitole 2.5. Hodnoty získané vážením a identifikáciou prostredníctvom modelu sú následne porovnané.

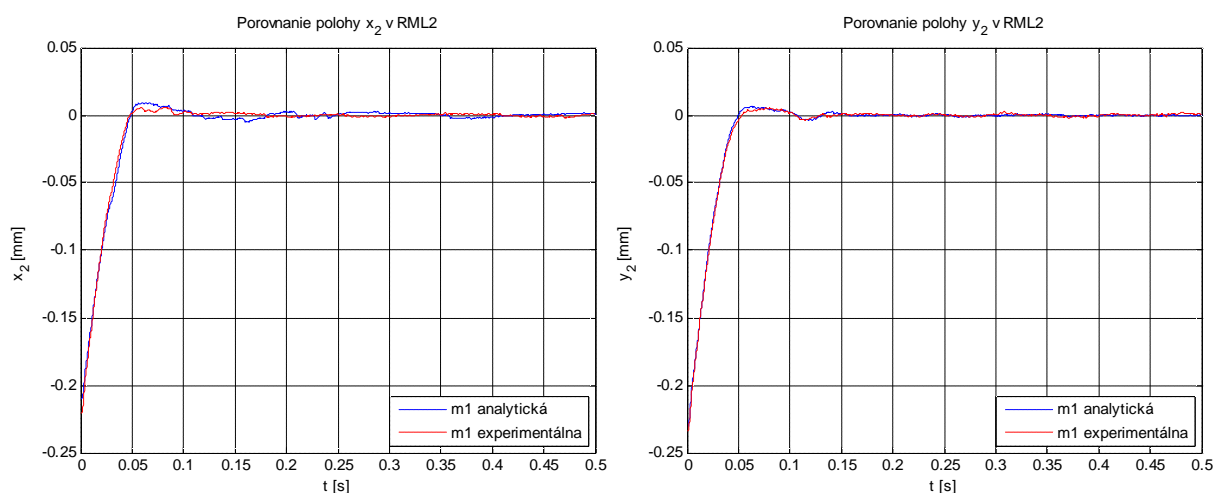
Tab. 4.3 Vyhodnotenie hmotností rotora AML

	m10 - závesnou váhou [kg]	m11 - identifikovaná [kg]	m11 - m10 [kg]
Hmotnosť v bode zdvihu RML1 - m1	2,17	1,81	-0,36
Hmotnosť v bode zdvihu RML2 - m2	3,70	4,07	+0,37
Celková hmotnosť m	5,87	5,88	+0,01

Pre experimentálne získané hmotnosti v daných bodoch zdvihu rotora sme realizovali nový experiment na reálnom systéme. Experiment pozostával zo zdvihu rotora z dolnej úvrate do nominálnej polohy. Pri experimente bol použitý adaptívny PID regulátor s uvažovaním experimentálne získanými hmotnosťami $m1$ pre RML1 a $m2$ pre RML2. Výsledky boli porovnané z výsledkami dosiahnutými pre adaptívny PID regulátor s analyticky získanými hmotnosťami $m1$ pre RML1 a $m2$ pre RML2. Porovnanie dosiahnutých výsledkov je na Obr. 4.20. a Obr. 4.21.



Obr. 4.20. Porovnanie adaptívneho polohovania v RML1 pre analytickú a experimentálne získanú hmotnosť m_1



Obr. 4.21. Porovnanie adaptívneho polohovania v RML2 pre analytickú a experimentálne získanú hmotnosť m_2

Zhodnotenie

Z dosiahnutých výsledkov môžeme usúdiť, že identifikované hmotnosti je možné použiť napríklad pre samonastavujúce zruťné regulátory. Ako je vidieť na Obr. 4.19, sily v rámci RML2 v osiach x_2 a y_2 nie sú totožné. Tento fakt môže byť spôsobený nepresným mechanickým nastavením ložiskovej jednotky. Takéto zistenie môžeme v reálnych podmienkach využiť na diagnostiku poruchy na ložisku a potrebu mechanickej kompenzácie. Hmotnosť identifikovaná pomocou modelu a hmotnosť zistená vážením v dobe zdvihu RML1 sa nezhodujú resp. je medzi nimi určitá nepresnosť. Táto nepresnosť môže byť spôsobená nepresným mechanickým nastavením. Táto nepresnosť môže byť tiež spôsobená tým, že pri meraní vážením sme za bod zdvihu považovali stred aktívnej časti rotora a pri identifikácii po zasadení riadenia polohy je táto rotora kompenzovaná celou aktívnou časťou rotora. Aplikáciou experimentálne získaných hmotností na adaptívne polohové riadenie sme zistili, že výsledky sú porovnateľné a teda parametre regulátora sú menej citlivé na zmenu hmotnosti.

5 Návrh vhodných metód potlačenia poruchových veličín.

Do reálneho procesu riadenia aktívneho magnetického ložiska vstupuje veľa množstvo poruchových veličín. Každá z poruchových veličín potrebuje analýzu vzniku, jej vplyv a možnosti jej kompenzácie. Veľký vplyv na riadenie a vstup poruchových veličín do systému je v rámci systému ako takého. Znamenný vplyv má presnosť a kvalita snímania polohy, kvalitný a rýchly akčný zásah, výkonný riadiaci systém a prepracované mechanické prevedenie.

Výberom vhodného snímača a zabezpečíme elimináciu poruchových veličín vplyvom zmeny a zneistenia prostredia. V názornom prípade sme využili snímač polohy na báze vírivých prúdov, ktoré neovplyvujú zmeny a zneistenie prostredia ako je popísané v kapitole 0. Preto môže byť ložisková jednotka použitá napríklad v erpadlách, kde pre erpávané médium prúdi aj priamo cez ložiskovú jednotku. Použitie tohto typu snímača a avšak vnáša do systému riadenia jednu poruchovú veličinu, ktorú je možné vhodným spôsobom eliminovať. Keďže snímač pracuje na báze vírivých prúdov a je v blízkosti elektromagnetického obvodu v ktorom sa tvoria vírivé prúdy, snímač polohy je nimi ovplyvnený. Tento fakt vnáša do meranej polohy značný шум. Keďže snímač používa modulárnu frekvenciu 1-2MHz a nosná PWM riadenia elektromagnetického obvodu je na úrovni desiatok kHz, je možné tento шум potlačiť použitím vhodných filtrov. V názornom prípade sme použili filtre ôsmeho rádu s frekvenciou rezu 2,5 a 7kHz, ktoré túto poruchu do systému potlačia ako je to popísané v kapitole 2.4.1.

Kvalitný a rýchly akčný zásah je v riadiacom procese vždy nevyhnutnou podmienkou. Kvalita a rýchlosť akčného zásahu je závislá od viacerých faktorov. Mení sa ako taký nie je a to taký dôležitý, ako jeho riadenie a implementácia do systému. V závislosti od riadenia sa odvíja veľa faktorov ako je dynamika riadenia шум v okolí ťadanej hodnoty a celkový príkon a straty procesom riadenia. Dynamika a шум v okolí ťadanej hodnoty sú taktiež závislé od nosnej frekvencie PWM a napätia použitého zdroja. Tieto parametre sa odvíjajú parametrov vinutí elektromagnetov v RML. V názornom prípade je indukčná nos elektromagnetov pomerne vysoká preto sme napájacie napätie na medziobvode menili a volili pomerne vysoko (108V). Nami navrhnutým unipolárnym preklápaným riadením sme zabezpečili jednak vysokú dynamiku riadenia ako aj nízky шум v okolí ťadanej hodnoty regulovaného prúdu a zároveň sme minimalizovali straty v meniči a ložiskových jednotkách ako je to popísané v kapitole 2.3. Minimalizáciou strát sme zároveň zabezpečili tepelnú stálosť systému čo má taktiež výrazný vplyv na riadenie polohy.

Od mechanickej konštrukcie závisí veľa poruchových veličín, ktoré môžu značne ovplyvniť riadenie polohy a jeho presnosť. Použitie vhodných materiálov na výrobu, mierne predimenzovanie, taktiež vhodné mechanické rozloženie a konečné opracovanie potláča veľa nežiaducich vplyvov, ktoré by mohli vniesť do systému ďalšie poruchové veličiny. V názornom prípade sme sa snažili snímač polohy držať o niečo ďalej od vinutí elektromagnetov pre základné potlačenie vplyvu vírivých prúdov. Ďalej sme systém AML doplnili o komplexný systém mechanického dopadu. Pozostáva z klzného a guľi kového ložiska v kombinácii s pružným tlmením ako je to popísané v kapitole 0. Tento systém ochráni AML pred mechanickým poškodením pri veľkých poruchových stavoch, ktoré sa nedajú predvídať a nie je možné ich eliminovať. Presné opracovanie a vyváženie rotora taktiež potláča vplyv odstredivej sily. V názornom prípade sme rotor nevyvážili aby sme mohli skúmať vplyv tejto poruchovej veličiny na kvalitu riadenia.

Od samotného riadiaceho systému závisí spracovanie meranej polohy a generovanie akčného zásahu. Riadiaci systém pre takéto aplikácie musí byť rýchly a schopný spracovávať veľké množstvo signálov. Od kvality spracovania signálov a generovania akčného zásahu závisí pásmo priepustnosti riadenia, ktoré v konečnom dôsledku ovplyvňuje kvalitu riadenia polohy. V názornom prípade sme použili kombináciu systému dSpace 1103 a DSP STM32f407 ako je to popísané v kapitole 3. Riadiace systémy dokážu spracovávať signály s periódou vzorkovania 200 μ s.

Vhodným súborom opatrení potlačenia poruchových veličín je možné výrazne zlepšiť kvalitu riadenia. Pred nazmi úpravami sme na systéme AML sme previedli meranie na pôvodnej ložiskovej jednotke RML. Pôvodná ložisková jednotka, ktorá je znázornená na Obr. 5.1 mala hmotnosť rotora 1,8kg.



Obr. 5.1. Pôvodná ložisková jednotka RML [5]

Na danej ložiskovej jednotke sme previedli meranie zdvihu rotora do nominálnej polohy. Elektromagnety RML boli riadené meními v unipolárnom režime riadenia s napätím medziobvodu 38V. Aký zásah bol s týmito parametrami s veľmi slabou dynamikou. Ako riadiaci systém bola použitá karta MF624 od spoločnosti Humusoft. Ako sa ukázalo s touto kartou bolo problematické dosiahnuť nižšiu periódu vzorkovania ako je 1ms. Preto pri tejto perióde vzorkovania bolo realizované meranie. Poloha bola snímaná snímačom KD2300-2S pre os y a KD2300-3U1 pre os x s použitím aktívneho dolnopriepustného filtra druhého rádu s frekvenciou 7kHz. Parametre PID regulátora boli navrhnuté metódou rozmiestovania pólov pre celkovú hmotnosť 1,8kg. Riadené bolo plne funkčné pri pásme priepustnosti $f=15\text{Hz}$, posunu reálneho pólu $k=20$ pri konštantnom tlmení $\zeta=1$ a biasovom prúde $I_b=1,6\text{A}$.

Pre dané meranie bolo síce pásmo priepustnosti vyššie avšak dynamika zdvihu rotora je porovnateľná s terajším stavom. Presnosť polohovania na pôvodnej ložiskovej jednotke v statickom stave bola v rozmedzí ± 50 až $\pm 70\mu\text{m}$. Aký zásah mal v tomto prípade veľký rozkmit prúdu, cca 2A. Tento rozkmit spôsoboval, že ložisková jednotka mala spotrebu 65W a ložisková jednotka bola pomerne dosť hlučná.

Súborom vyššie popísaných konštrukčných úprav a úprav riadení sme dosiahli výrazné zlepšenie kvality riadenia a potlačenia poruchových veličín. Pre porovnanie sme dosiahli v priemere 40-krát lepšiu presnosť polohovania v statickom režime pri súčasnom 5,5 násobnom znížení spotreby systému.

Záver

Hlavným cieľom tejto časti práce bolo spracovanie a využitie najnovších výskumných a aplikatívnych riešení v problematike riadenia aktívneho magnetického ložiska. V dnešnej dobe sa magnetické ložiská používajú oraz častejšie a v rôznych aplikáciách. Ako pasívne magnetické ložiská sa oraz častejšie využívajú v malých aplikáciách ako sú napríklad ventilátory pre lepšie odhlučenie celého systému. Aktívne magnetické ložiská nachádzajú široké uplatnenie v aplikáciách kde nie je možné použiť bežné valivé ložiská. Sú to aplikácie kde nie je možné použiť mazivá pre prípadnú kontamináciu okolia, poprípade extrémne požiadavky. Pod extrémnymi požiadavkami sa rozumie, že zariadenie musí pracovať aj pri veľmi nízkej, alebo vysokej teplote, prípadne rotor zariadenia pracuje pri veľmi vysokých otáčkach. Aktívne magnetické ložiská sa využívajú aj v aplikáciách ako sú obrábacie stroje. V týchto aplikáciách sa využívajú preto, lebo zabezpečujú tlmenie vibrácií, ktoré vznikajú pri obrábaní kovov. Výhodou použitia magnetických ložísk je, že sú bez údržbové, tiché, nepotrebujú ďalšie prídavné zariadenia ako napríklad kladka pri tlakovom mazaní. Jednou nevýhodou aktívnych magnetických ložísk sú nemalé zriaďovacie náklady.

V rámci práce je riešený komplexný návrh a realizácia fyzikálneho modelu pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami. V rámci návrhu celého systému sa detailne navrhovali samostatné celky. Pri realizácii mechanického prevedenia radiálneho magnetického ložiska sme navrhli systém mechanického dopadu, ktorý zabezpečí minimalizáciu zrážok na mechanickom zariadení pri vzniku nepredvídateľných fatálnych porúch. Tento systém ako sme zistili dokáže zabezpečiť bezproblémový chod stroja pri výpadku riadenia polohy rotora pri rýchlosti 300 rad/s. Pre zabezpečenie kvalitného a rýchleho zásahu sme navrhli riadenie prúdu na fyzickej vrstve meniacom. Riadenie zabezpečuje dostatočnú dynamiku regulácie pri súčasnom znížení spotreby energie. V rámci snímania polohy je navrhnutý súbor opatrení, ktoré zabezpečujú získanie kvalitnej informácie o polohe rotora. Na fyzikálnom modeli boli použité snímače na báze vírivých prúdov, ktoré potláčajú možné poruchy vplyvom znečistenia a zmeny prostredia. Signál z týchto snímačov je ďalej spracovávaný v analógovej a diskretnej forme prostredníctvom filtrov. Riadenie pre celý fyzikálny model zabezpečujú dva riadiace systémy. Riadenie radiálnych magnetických ložísk spolu s pohonnou jednotkou (asynchrónnym motorom) zabezpečuje systém dSpace1103. Pre riadenie axiálneho magnetického ložiska bolo nutné pridať druhý riadiaci systém tvorený DSP STM32F407. Na týchto riadiacich systémoch bolo navrhnuté komplexné riadenie polohy a rýchlosti pre systém pohonu s aktívnymi magnetickými ložiskami. Na systéme dSpace 1103 sme realizovali adaptívne riadenie polohy rotora.

Tento komplexný návrh zabezpečuje vzájomné prepojenie jednotlivých častí, ktoré na seba nadväzujú. Všetky opatrenia zabezpečujú či potlačenie väčšiny poruchových veličín. Výsledkom celého návrhu je, že sme získali riadenie, ktoré je 40-násobne lepšie oproti pôvodne navrhnutému riadeniu, pričom súčasným 5,5-násobným znížením spotreby energie.

Splnenie cie ov dizerta nej práce

1. Návrh a realizácia fyzikálneho modelu pohonu s aktívnymi magnetickými loiskami so 6. stup ami vo nosti,

Výsledky analýzy sú vyuíité pri návrhu pohonu s aktívnymi magnetickými loiskami so 6. stup ami vo nosti. Návrh a realizácia systému pozostávala z viacero samostatných celkov. Prvým samostatným celkom je návrh a realizácia mechanické prevedenia RML. Navrhli sme systém tlmenia dopadu loiska, ktorý minimalizuje mechanické poškodenie systému pri nepredvídate ných fatálnych poruchách systému. Navrhli sme a realizovali kompletný fyzikálny model axiálneho magnetického loiska. V rámci druhého celku sme navrhli a realizovali návrh filtrov pre kvalitné spracovanie signálov o polohe rotora pomocou softvéru FilterPro . Tretím celkom bol návrh a realizácia vhodného mení a pre aktívne magnetické loiská. V rámci tohto celku sme navrhli efektívne riadenie prúdu na fyzickej vrstve mení a, ktoré zabezpe uje vyhovujúcu dynamiku a presnos riadenia pri sú asnom znííení spotreby energie. Systém bol doplnený o pohonnú jednotku tvorenú asynchrónnym motorom riadeným frekven ným mení om.

2. Návrh a realizácia vhodného radiaceho systému pohonu na vývojovom systéme dSpace 1103,

Navrhli sme a realizovali radiaci systém pohonu na vývojovom systéme dSpace 1103, ktorý zabezpe uje polohové riadenie systému AML v 5. osiach a riadenie rýchlosti rotora pohonu v osi z. Pre systém pohonu s AML systém dSpace 1103 zabezpe uje polohové riadenie v osiach x_1 , y_1 , x_2 , y_2 a riadenie rýchlosti v osi z. Pre nedostatok moónosti pripojenia periférií bolo nutné okrem systému dSpace 1103 doplni o alzí samostatný radiaci systém tvorený DSP STM32F407, ktorý zabezpe oval polohové riadenie pre axiálne magnetické loisko (os z).

3. Návrh robustných algoritmov riadenia aktívneho magnetického loiska - AML s 5.timi stup ami vo nosti,

Navrhli sme a realizovali polohové systémy RML1 v osi x_1 a y_1 , RML2 v osi x_2 a y_2 a AXML v osi z. Navrhnuté PID regulátory metódou rozmiest ovania pólov spl ujú poíadované kritéria kvality. Následne sme navrhli a realizovali adaptívne PID regulátory loísk RML1 a RML2, ktoré zvyzujú kvalitu regulácie polohy v celom rozsahu polohy rotora aj pri pôsobení poruchy. Pod a dosiahnutých výsledkov nami navrhnuté adaptívne riadenie ove a lepšie potlá a vplyv poruchy od nevyváíenosti rotora. V závere kapitoly je navrhnutá a realizovaná metóda identifikácie hmotnosti rotora na reálnom systéme pohonu s AML. Dosiahnuté experimentálne výsledky potvrdzujú vhodnos pouíitej metódy.

4. Návrh a aplikácia vhodných metód a opatrení pre potlačenie poruchových veličín,

Piata kapitola pojednáva o návrhu a aplikácii vhodných úprav a metód pre potlačenie vplyvu poruchových veličín, ktoré ovplyvňujú regulačný proces polohy. Kapitola predstavuje opis súboru potrebných opatrení, ktoré zabezpečia kvalitatívne lepšie riadenie pri súčasnom znížení nákladov na prevádzku zariadenia. Jednotlivé opatrenia sú popísané v predchádzajúcich kapitolách. Výsledkom navrhnutých a realizovaných opatrení pre potlačenie poruchových veličín je 40-násobné zlepšenie presnosti polohovania v statickom režime pri súčasnom 5,5-násobnom znížení spotreby energie.

Zoznam publikácií autora

1. Bakalárska práca: Riadiaci systém pre krokový motor. Bratislava: STU, 2010. 53s.
2. Diplomová práca: Testovanie parametrov krokového motora. Bratislava: STU 2012. 65s.

AFD1 JAR UŽKA Martin: Modeling and Controlling Principle of Radial Electromagnetic Bearings. ELITECH q 13: 15th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 5.5.2013. Bratislava: STU v Bratislave, 2013, ISBN 978-80-227-3947-4.

Publikácie indexované v databázach SCOPUS a IEEE:

AFD2 MUDRÁKOVÁ, Tatiana - ŽALMAN, Milan - JAR UŽKA, Martin - MUDRÁK, Maroz. LMPM position control with 4D Bi-harmonic master slave generator. In *ELEKTRO 2014 [elektronický zdroj] : 10th International Conference. Rajecké Teplice, Slovakia, May 19-20, 2014*. Žilina : University of Žilina, 2014, CD-ROM, s. 197-201. ISBN 978-1-4799-3721-9.

AFC1 JAR UŽKA, Martin - ŽALMAN, Milan - MUDRÁKOVÁ, Tatiana - VARGA, Pavol. Modelling and effective controlling of radial electromagnetic bearings. In *Proceedings of the 15th International Carpathian Control Conference [elektronický zdroj] : ICC 2014; Velké Karlovice, Czech Republic, May 28-30, 2014*. [s.l.] : IEEE- Czechoslovakia Section of IEEE, 2014, CD ROM, s. 201-206. ISBN 978-1-4799-3527-7.

Použitá 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] Syuan-Yi Chen, Intelligent Sliding-Mode Control for Five-DOF Active Magnetic Bearing Control System, Department of Electrical Engineering National Central University, Chung Li 320, Taiwan, PhD dissertation
- [4] žalman, M. Ak né leny. Bratislava: STU, 2003. 207s. ISBN 80-227-1835-1.
- [5] Kanský, M. 2012. Diplomová práca: Návrh systému riadenia radiálneho magnetického ložiska. Bratislava: FEI STU, 2012. 100s.
- [6] <http://www.magneticbearings.org/>
- [7] Victor Iannello, Pokroky v magnetických ložiskách, URL: <www.synchrony.com>
- [8] Tim Harris, Magnetická ložiska SKF . Od inovace k osvědčeným řešením , Elektro .4/2005
- [9] Rolf Isermann: Mechatronics systems: fundamentals, Springer, 2005
- [10] N. C. Tsai, C. H. Kuo, and R. M. Lee, Regulation on radial position deviation for vertical AMB systems,+*Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 21, pp. 2777-2793, 2007.
- [11] S. Sivrioglu, Adaptive backstepping for switching control active magnetic bearing system with vibrating base,+*IET Control Theory Appl.*, vol. 1, no. 4, pp. 1054-1059, 2007.
- [12] K. Y. Chen, P. C. Tung, M. T. Tsai, and Y. H. Fan, A self-tuning fuzzy PID-type controller design for unbalance compensation in an active magnetic bearing,+Elsevier Science, *Expert Systems With Applications*, vol. 36, pp. 8560. 8570, 2009.
- [13] Deva ka, J.: Porovnanie snímačov posunu, ATP journal 6/2011, str. 51
- [14] KAMAN Precision products
URL: <http://www.kamansensors.com/html_pages/Legacy_Products.html>
- [15] Myounggyu D. Noh and Eric H. Maslen, Self-Sensing Magnetic Bearings Using Parameter Estimation, IEEE TRANS. ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 46, NO. 1, FEBRUARY 1997
- [16] Alexandre Schammas, Raoul Herzog, Philipp Bühler, and Hannes Bleuler: New Results for Self-Sensing Active Magnetic Bearings Using Modulation Approach, IEEE TRANS. ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, VOL. 13, NO. 4, JULY 2005
- [17] < <http://www.hofstragroup.com/product/kaman-kd2310-eddy-current-displacement-measuring-sensor/>>

- [18] Jar uzka M.: Modeling and Controlling Principle of Radial Electromagnetic Bearings. ELITECH q13: 15th Conference of Doctoral Students. Bratislava, Slovak Republic, 5.5.2013. Bratislava: STU v Bratislave, 2013, ISBN 978-80-227-3947-4.
- [19] Schweitzer, Gerhard, Nordman, Rainer; Touch-down Bearings, Springer, 2009, ISBN 978-3-642-00497-1_13,17 str.
- [20] Aeschlimann Beat, Control Aspects Of High Precision Active Magnetic Bearings, Department of Microtechnique EPFL, Lausanne, PhD dissertation 2002
- [21] FilterPro Users guide [online] 2011. [cit 2015-3-4] Dostupné na internete: URL:<<http://www.ti.com/lit/an/sbfa001c/sbfa001c.pdf>>
- [22] Technical Data Guide Emerson [online] 2011. [cit 2012-5-5] Dostupné na internete: URL: <<https://www.inverterdrive.com/file/Commander-SK-Technical-Manual-Data>>
- [23] Datasheet MF624 [online] 2014. [cit 2012-5-5] Dostupné na internete: URL: < <http://www2.humusoft.cz/www/datacq/manuals/mf624um.pdf>>
- [24] <http://www.ceanet.com.au/Portals/0/documents/products/dSPACE/dspace_2008_ds1103_en_pi777.pdf>
- [25] <http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2009/dscntrl/Tutorial.pdf>
- [26] Datasheet STM32F407 [online] 2014. [cit 2012-6-7] Dostupné na internete: URL:<<http://www.st.com/web/en/resource/technical/document/datasheet/DM00037051.pdf>>
- [27] User manual STM32F4-Discovery [online] 2014. [cit 2012-6-7] Dostupné na internete: URL: <http://www.st.com/st-web-ui/static/active/cn_resource/technical/document/user_manual/DM00039084.pdf>
- [28] Žalman M., prednášky Servosystémy, dostupné na: <http://servo.urpi.fei.stuba.sk/index.php?option=com_content&task=view&id=14&Itemid=26>
- [29] Dominick T. Montie, "Performance Limitations and Self-Sensing Magnetic Bearings", Faculty of the School of Engineering and Applied Science University of Virginia, Virginia 2003, PhD dissertation
- [30] M. Jar uzka, M. Žalman, T. Mudráková, P. Varga, Modelling and effective controlling of radial electromagnetic bearings. In *Proceedings of the 15th International Carpathian Control Conference [elektronický zdroj] : ICC 2014; Velké Karlovice, Czech Republic, May 28-30, 2014*. [s.l.] : IEEE- Czechoslovakia Section of IEEE, 2014, CD ROM, s. 201-206. ISBN 978-1-4799-3527-7.
- [31] B. Tomczuk, D. Wajnert, J. Zimon, "Modeling of control system for active magnetic bearing", Proceedings of Electrotechnical Institute, Issue 252, pp. 119-131, 2011

- [32] A. Tonoli, A. Bonfitto, M. Silvagni, L. D. Suarez, "*Rotors on Active Magnetic Bearings: Modeling and Control Techniques*", Mechanics Department, Mechatronics Laboratory-Politecnico di Torino, Italy, INTECH 2012, URL:<<http://dx.doi.org/10.5772/51298>>
- [33] J. Ritonja, B. Polaj0ej, D. Dolinar, B. Gr ar, P. Cafuta, "*Active Magnetic Bearing Control*", Proceeding of the 29th Cinese Control Conference, July 29-31, 2010 Beijing, China, pp. 5604-5609, 2010
- [34] R. P. Jastrzebski, A. Smirnov, A. Mystkowski, O. Pyrhonen, "*Cascaded Position-Flux Controller for AMB System Operating at Zero Bias*", *Energies* 2014, 7, pp. 3561-3575; doi:10.3390/en7063561
- [35] D. Kozanecka, Z. Kozanecki, T. Lech, "*Experimental Identification of Dynamic Parameters for Active Magnetic Bearings*", *Journal of theoretical and applied mechanics* 46, 1, pp. 41-50, Warsaw 2008
- [36] J. R. Brauer, "*Magnetic Actors and Sensors*", John Wiley & Sons, Inc., ISBN: 978-0-471-73169-6, New Jersey, 2006
- [37] T. Nenning, M. Hofer, M. Hutterer, M. Sschrodl, "*Setup with two Self-Sensing Magnetic Bearings using Differential 3-Active Inform*", ISMB14, 14th International Symposium on Magnetic Bearings, Linz, Austria, August 11-14, 2014
- [38] Brian C. D. Wilson, "Control Design for Low-Loss Active Magnetic Bearings: Theory and Implementation", School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology 2004, PhD dissertation
- [39] J. Mí ek, J. Jurí ek, ¥um v systémoch spracovania signálov. Žilina: EDIS-UNIZA, 2010. 222s. ISBN 978-80-554-0171-3.
- [40] Z. Changsheng, M. Zhiwei, "*A PWM Based Switching Power Amplifier for Active Magnetic Bearings*", ICEMS 2005, Electrical Machines ad Systems 2005, pp. 1563-1568, Nanjing, 2005, ISBN 7-5062-7407-8
- [41] A.C. Niemann, G. van Schoor, C. P. du Rand, "*A self-Sensing Active Magnetic Bearing Based on a Direct Current Measurement Approach*", *Sensors* 2013, 13, 12149-12165; doi:10.3390/s130912149,
- [42] S. Banerjee, T. K. S. Kumar, J. Pal and D. Prasad %Controller design for large-gap control of electromagnetically levitated system by using an optimization technique+ *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 408-415, May, 2008
- [43] A. Schulz: "*A Hot-Swap Controller Amplifier Module for Active Magnetic Bearings with Supreme Reliability - Electronic Circuitry and Error Detection Strategies*", SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion
- [44] Seok-Myeong Jang, Un-Ho Lee, Jang-Young Choi, and Jung-Pyo Hong, %Design and analysis of thrust active magnetic bearing,+*Journal of Applied Physics*, Vol. 103, pp. 07F122 - 07F122-3, April 2008.