

RIADENIE MAGNETICKÉHO LOŽISKA

Martin Gažo, Milan Žalman, Martin Foltin

Abstrakt: Článok sa zaoberá riadením magneticky levitácie feromagnetických telies ako prvý krok na potvrdenie funkčnosti riadiacich algoritmov a testovanie zariadení vonkajšie rozhrania hardvéru. Vybudovali sme linearizovaný model magnetickej levitácie v prostredí Matlab Simulink, kde sme testovali regulátory polohy PD a PID, ktoré boli navrhnuté pomocou syntézy rozmiestňovania pólov. Neskôr sme vykonali rôzne pokusy na reálnej sústave a porovnali simuláciu a skutočný model.

Kľúčové slová: levitácia, magnetické ložisko, riadenie, diamagnetické teleso, permanentný magnet

1 ÚVOD

Myšlienka potlačenia gravitácie a tým vznášanie čiže levitácia predmetov a ľudí sprevádza ľudstvo od nepamäti. Dlhá bola táto myšlienka iba námetom na sci-fi poviedky, skúmaním vlastností elektromagnetického poľa sa však prišlo na to, že levitácia je možná a to dokonca niekoľkými spôsobmi. Hovoríme o magnetickej levitácii, v anglickej literatúre sa tento jav nazýva *maglev*. Levitačný systém je také zariadenie ktoré umožňuje stabilne umiestniť teleso v priestore bez toho aby sa dotýkalo zeme. Tento prístup nám ponúka nový spôsob riešenia klasických problémov so zavesením rotora. Zabezpečuje polohu rotora bez dotyku, opotrebenia, nutnosti mazania a pritom umožňuje riadenie dynamických dejov v motore. Vo všeobecnosti *aktívne magnetické ložiská* (v skratke *AMB*), je typický mechatronický produkt a definuje mechatroniku. V krátkosti si povieme niečo o histórii *AMB*. Prvé aplikácie princípu elektromagnetickej suspenzie boli realizované na základe experimentálnej fyziky. Využitie tohto princípu bolo navrhované pre vlaky s vysokou rýchlosťou datované od roku 1937. Sú rôzne spôsoby zostavenia magnetického bezkontaktného pruženia a *AMB* je práve jeden z nich. Magnetická levitácia je založená na rôznych fyzikálnych princípoch. Uvediem niektoré z nich.

Levitácia s permanentným magnetom. Dva magnety ktoré využívajú odpudivú silu rovnakých pólov permanentných magnetov. Tento spôsob ale nespĺňa podmienku pretože potrebuje vodiace ložisko aby sme zaručili stabilitu rotora.

Levitácia s použitím diamagnetika. Vložíme do nehomogénneho magnetického pola diamagnetické teleso, ktoré bude z pola vypudzované zatiaľ čo feromagnetické teleso je do pola priťahované. Ak sa pozrieme na správanie diamagnetického telesa: ak hmotnosť telesa a vypudzovanie (levitácia) magnetické sily sú v rovnováhe potom je teleso v stabilnej polohe. Látky, ktoré sa nachádzajú v prírode napríklad uhlík sú slabé diamagnetické (t.j. permeabilita je o niečo menšia ako jedna) levitačná sila je veľmi slabá. Väčšia levitačná sila bude pôsobiť na supravodič. Ten sa chová ako ideálne diamagnetikum t.j. permeabilita sa blíži k nule. Ak je zdrojom nehomogénneho magnetického pola permanentného magnetu, pôsobí medzi ním a supravodičom odpudivá sila. Ak uložíme permanentný magnet nad supravodič jedná sa o Meissnerov jav. Meissnerov jav je potlačenie magnetického poľa vo vnútri supravodiča na nulovú hodnotu je iného charakteru, ako by vyplývalo zo stavu nulového odporu. Nulový odporový stav naznačuje, že ak by sme sa snažili magnetizovať supravodič, indukované prúdové slučky by boli generované takým spôsobom, že by presne kompenzovali priložené (vonkajšie) magnetické pole (*Lenzov zákon*). Ak je však materiál vložený do magnetického poľa a až potom je prevedený do supravodivého stavu, možno očakávať, že magnetické pole zostane vo vnútri materiálu nezmenené.

Ak sa nezmení aplikované magnetické pole, potom nebude generované napätie (*Faradayov zákon*) na vybudenie tieniacich prúdov dokonca aj v prípade perfektného (ideálneho) vodiča. Jedno z teoretických vysvetlení Meissnerovho javu vychádza z *Londonovej rovnice*. Tá ukazuje, že magnetické pole klesá exponenciálne smerom do vnútra supravodiča do vzdialenosti 20 – 40 nm. Pokles magnetického poľa je popísaný parametrom Londonovská hĺbka vniknutia.

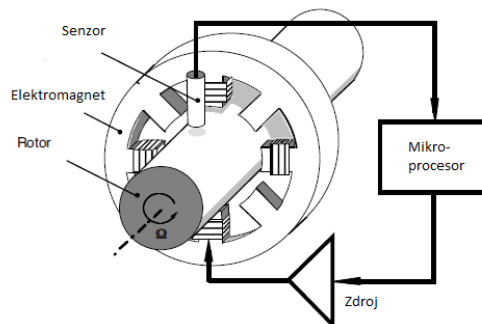
Ak je vodič v statickom magnetickom poli, toto pole preniká do celého jeho objemu. Po ochladení pod kritickú teplotu sa stane perfektným diamagnetikom a očakávame, že magnetické pole vo vnútri vodiča sa nezmení.

Praktické aplikácie: *Maglev* je skratka z magnetická levitácia [4], je to najmodernejší, najrýchlejší druh koľajovej dopravy s najdrahšou traťou, i keď najlacnejšou prevádzkou. Vlak sa pohybuje na vankúši

magnetického poľa, ktoré je vytvárané sústavou supravodivých magnetov, zabudovaných v trati i vo vlaku. Tento vlak má namiesto kolies špeciálny systém magnetov, vrátane lineárnych motorov a pohybuje sa asi 1,2 cm nad koľajnicami. *Magnetické ložiská SKF* a vysokootáčkové motory s permanentnými magnetami prinášajú technický pokrok do konštrukcie vzduchových a chladiacich kompresorov a zvyšujú účinnosť z 75 % na 85 %.

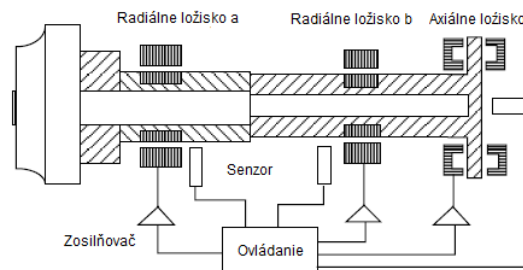
2 MAGNETICKÉ LOŽISKÁ

Vytváranie bezkontaktných magnetických síl v poli aktívnym riadením dynamiky elektromagnetu je aktuálne najpoužívanejším princípom. Obr.1 nám vysvetľujú hlavné komponenty a poukazujú na hlavné funkcie ložiska. Senzor meria posun resp. vychýlenie rotora z jeho pôvodnej polohy. Signál zo senzora je spracovávaný v mikroprocesore, ktorý riadi prúdový zosilňovač, ktorý prostredníctvom regulácie prúdu vytvára magnetické pole v magnetoch čoho výsledkom je, že sa rotor vznáša. Stabilitu systému zabezpečuje Princíp riadenia spätnej väzby je zodpovedné za stabilitu vznášajúceho sa rotora a taktiež za tuhosť a tlmenie systému. Tuhosť a tlmenie sa značne mení v rámci fyzikálnych zákonov a môžeme ju prispôbiť našim technickým požiadavkám. Počas prevádzky sa môže meniť.



Obr.1 Funkčný princíp aktívneho elektromagnetického ložiska, suspenzia rotora vo zvislom smere [7]

Pravdaže skutočný rotor potrebuje niekoľko navzájom prepojených magnetov spolu s multifunkčným ovládaním znázornených na Obr.2.



Obr. 2 Schéma suspenzie rotora v jednej rovine [7]

Snímanie polohy levitujúceho predmetu je možné realizovať niekoľkými spôsobmi. V zásade sa dajú rozdeliť na optické a magnetické snímanie polohy. Pri optickom snímaní je možné použiť optický snímač s veľkou fotocitlivou plochou, napríklad fotorezistor, ktorý je umiestnený za levitujúcim predmetom, pričom zdroj svetla je umiestnený z jeho prednej strany. Pri vhodnej voľbe veľkosti levitujúceho predmetu a veľkosti snímača je možné zo zmeny odporu fotorezistora, ktorý je závislý od veľkosti osvietenej plochy vyhodnotiť polohu predmetu. Odpor je potom pomocou merania konštantným prúdom možné previesť na napätie a signál použiť v spätnej väzbe.

Sofistikovanejšie optické snímanie je možné dosiahnuť použitím lineárneho alebo plošného CCD snímača, pri ktorom je možné dosiahnuť ďaleko vyššiu presnosť a pri plošnom snímači aj snímanie polohy v dvoch osiach. Alternatívou je priamo použitie CCD kamery, avšak pri tej je potrebné zabezpečiť, aby mala dostatočný počet snímkov za sekundu, pretože pri riadení potrebujeme pomerne nízke periódy vzorkovania. Magnetické snímanie je založené na použití indukčných snímačov, ktoré pracujú na princípe rozladovania rezonančného obvodu snímača.



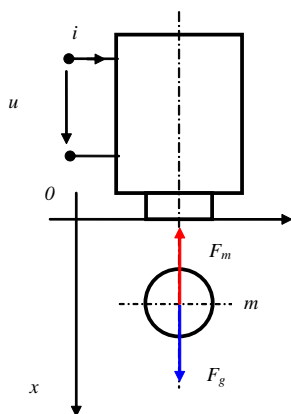
Obr. 3 Magnetické ložisko SKF pre konštrukciu vzduchových a chladiacich kompresorov [7]

Magnetické ložiská SKF a vysokootáčkové motory s permanentnými magnetmi prinášajú technický pokrok do konštrukcie vzduchových a chladiacich kompresorov a zvyšujú účinnosť z 75 % na 85 %. Magnetické ložiská SKF sú súčasťou nových riešení s priamym pohonom s premenlivými otáčkami, ktoré umožňujú nahradiť skrutkové kompresory odstredivými turbostrojmi v systémoch so vzduchovými a chladiacimi kompresormi a prispievajú k zvýšeniu typickej účinnosti. Táto technická zmena znižuje prevádzkové náklady v takých oblastiach, ako napr. vzduchotechnika, priemyselné chladenie a v naftovom a plynárenskom priemysle. Na uvedených úsporách sa podieľajú nasledujúce prednosti:

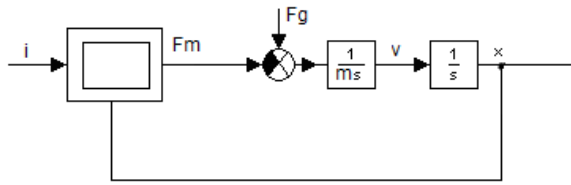
- nižšia spotreba energie
- vyššia spoľahlivosť
- nedochádza k opotrebovaniu častí ložiska, a tým je dosiahnutá dlhšia prevádzková trvanlivosť
- v podstate žiadne nároky na domazávanie
- menšia zastavaná plocha.

3 MAGNETICKÁ LEVITÁCIA

V podstate sa jedná o využitie magnetického poľa alebo magnetickej sily. Pochopenie princípov magnetickej levitácie môže viesť k určitému inovatívnemu riešeniu problémov. Magnetická levitácia je užitočná v rôznych aplikáciách. Stačí levitujúci objekt a už vieme navrhnúť niekoľko vecí ako sú dopravné systémy, magneticky vlaky, sťahovanie kovových predmetov v oceliarskom priemysle pomocou takzvaných magnetických vložiek. Možné vojenské aplikácie, napríklad takzvaný železničný kanón, ktorý používa magnetické pole, aby sa zasadila projektilmi. Hlavnou časťou modelu je oceľová guľička vznášajúca sa v magnetickom poli cievky (obr. 4.). Štruktúru modelu a jeho parametre získame na základe rovnováhy síl. Pohybová rovnica je založená na rovnováhe všetkých síl pôsobiacich na guľičku, t.j. gravitačná sila F_g , elektromagnetická sila F_m , sila zrýchlenia F_d , hmotnosť guľôčky m , vzdialenosť x a gravitačná konštanta g (1).



Obr. 4 Magnetický ložiskový systém [7]



$$F_d = F_g - F_m = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

$$F_g = m \cdot g \quad (2)$$

$$F_m = f\left(\frac{i}{x}\right)^2 \quad (3)$$

Obr. 5 Bloková schéma nelineárneho obvodu

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

$$F_g - F_m = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (4) \quad F_g = F_{g0} \quad (5)$$

$$F_m = F_{m0} + \Delta F_m \quad (6) \quad -\Delta F_m = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (7)$$

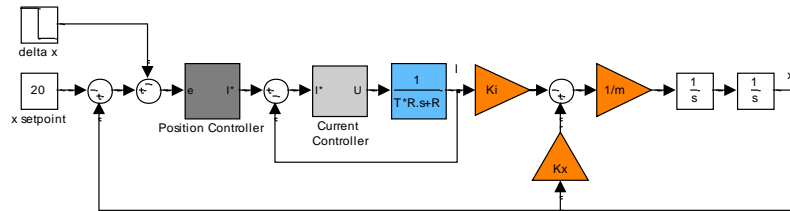
$$F_{g0} = F_{m0} \quad (8) \quad F_{g0} - \Delta F_m - F_{m0} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (9)$$

$$-\Delta F_m = m \frac{d^2\Delta x}{dt^2} \quad (10) \quad \Delta F_m = \frac{\partial f}{\partial i} \Delta i + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x = K_I \Delta i - K_X \Delta x \quad (11)$$

Po linearizácii sme získali schému ktorou môžeme začať navrhovať regulátory pomocou metódy pole-placment.

4 SIMULAČNÉ EXPERIMENTY

Pre overenie teoretických poznatkov a ako prípravu pre pokúsi na reálnej sústave sme zhotovili magnetickú levitáciu v programe Matlab/Simulink. V modeli je zahrnutý magnetický obvod regulátor polohy guľičky a snímanie polohy je zhotovený ideálnym snímačom. Simulačná schéma je znázornená na Obr. 6.



Obr. 6 Polohový systém magnetického závesu

Systém je nelineárny tak samonastavujúci regulátor by u nás nemal uplatnenie. Pre návrh regulátorov sme použili metódu pole-placment. Regulátory boli navrhnuté tak, aby sa šírka pásma čo najviac priblížila k reálnej sústave, ktorá bola približne 150-200Hz.

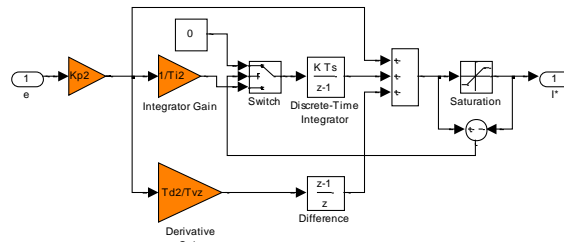
Výpočet prenosovej funkcie PID regulátora polohy:

$$x = \frac{1}{ms^2} (K_X x - R(s) \frac{1}{TRs + R} K_I e) \quad (12) \quad G_R(s) = \frac{x}{x^*} = \frac{\frac{R(s) \cdot K_I}{TRs + R}}{ms^2 - K_X + \frac{R(s) K_I}{TRs + R}} \quad (13)$$

$$G_R(s) = \frac{K_P K_I + T_D K_I s}{mTRs^3 + mRs^2 + (K_I T_D + K_X RT)s + (K_I K_P - K_X R)} \quad (14)$$

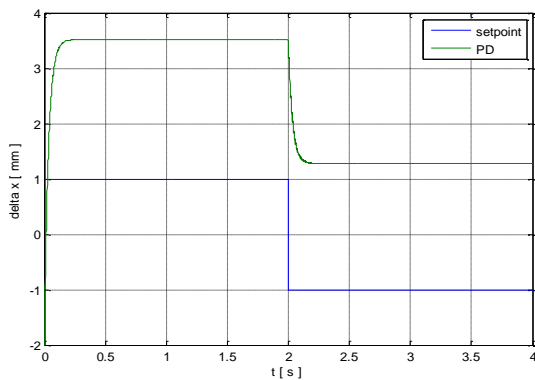
Želaný polynóm:

$$(s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)(s + k\omega_0) = s^3 + (2\xi\omega_0 + k\omega_0)s^2 + (2\xi k\omega_0^2 + \omega_0^2)s + k\omega_0^3 \quad (15)$$

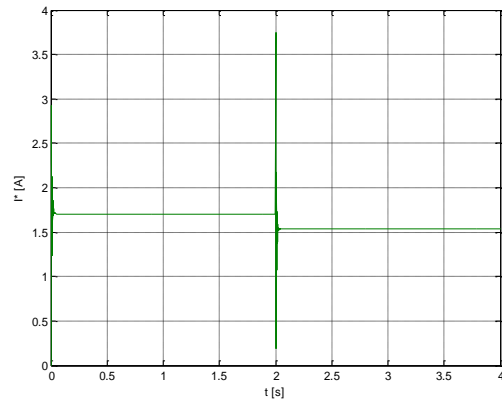


Obr. 7 Schéma PID/PD regulátora polohy

Najprv sme použili metódu rozmiestňovania pólov na návrh PD regulátora prúdu. Základná poloha bola 20 mm od Cievka s posunom 1 mm okolo stredovej polohy. Výsledkom bolo veľké statické chyba. Ďalej sme experimentovali s rôznymi nastavenie regulátora nastavenia šírky pásma (W), tlmenie (KSI) a zosilnenia (k), až pokiaľ sme nezabezpečili požadovanú kvalitu regulácie.

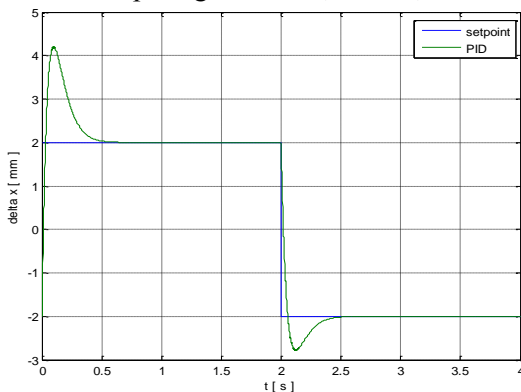


Obr.8 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PD regulátorom polohy (ksi=1, w=15, k=80)

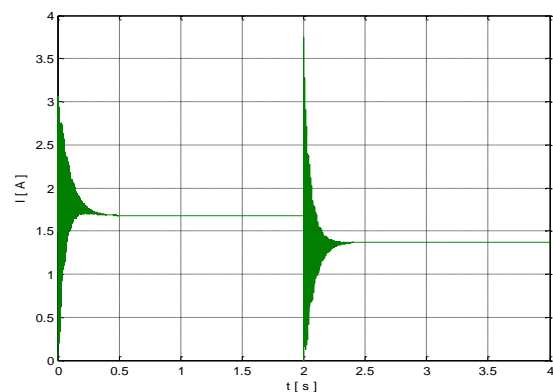


Obr. 9 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PD regulátorom polohy (ksi=1, w=15, k=80)

Keď sme použili štruktúru regulátora PID tak sa nám podarilo eliminovať statickú chybu, ale nám vzniklo pomerne veľké prerogulovanie (Obr. 10).



Obr. 10 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PID regulátorom polohy. (ksi=1, w=15, k=80)



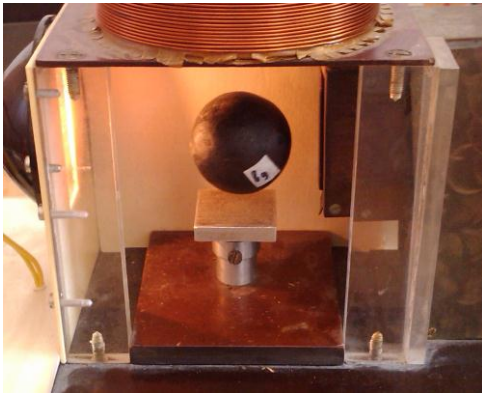
Obr. 11 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PID regulátorom polohy (ksi=1, w=15, k=80)

5 REÁLNY EXPERIMENT

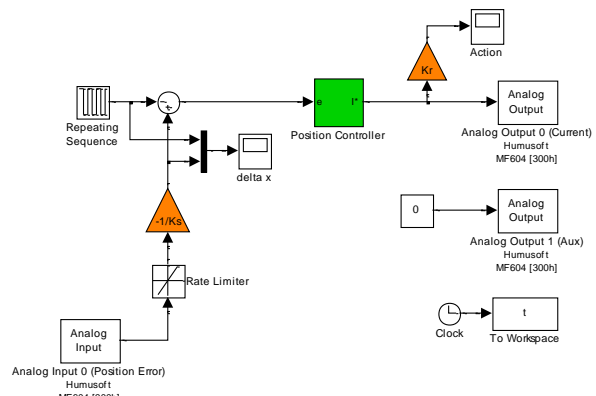
Simulačné výsledky sme verifikovali na reálnom zariadení Obr.12. Súčasťou modelu je už navrhnutý a vytvorený regulátor prúdu. Tento regulátor sme identifikovali a jeho parametre sme využili v simulácii. Výchylka telesa bola meraná pomocou optického snímača polohy, ktorý zaznamenával výchylku telesa od rovnovážnej polohy. Samotný regulátor žiadanej polohy telesa bol realizovaný prostredníctvom vstupno-výstupnej karty Humusoft MF604 a riadiaceho programu vytvoreného v prostredí Matlab/Simulink v PC. Vstupom do riadiaceho algoritmu bola filtrovaná odchýlka polohy telesa od zvolenej rovnovážnej polohy a želaná hodnota polohy telesa. Výstupom regulátora bola žiadaná hodnota prúdu pre prúdový regulátor, ktorý bol umiestnený v riadiacej časti cievky. Samotný regulátor bol realizovaný ako PD resp. PID regulátor s anti wind-up efektom. Na riadenie v reálnom čase využili sme Real Time Toolbox.

Pre PID regulátor sme menili želanú hodnotu polohy skokovo v rozsahu ± 5 mm. Pre PD regulátor v rozsahu ± 2 mm. Parametre sústavy ako aj parametre vnútorného regulátor prúdu boli neznáme a preto sme museli danú sústavu identifikovať. Nameraná prechodová charakteristika regulačného obvodu prúdu je na Obr.16, zosilnenie $K_r = 0.43V/A$. Schéma prepojenia s reálnou sústavou je na obrázku

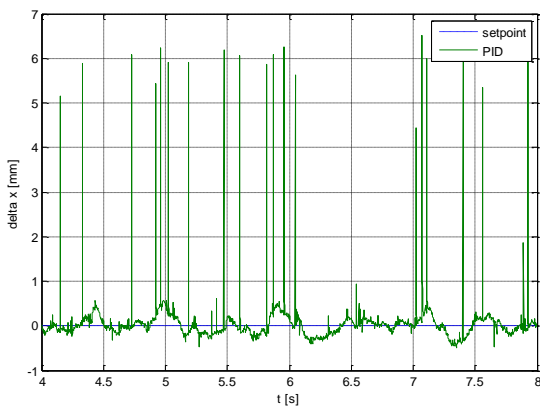
Najvýraznejší rozdiel medzi reálnym meraním a simuláciou je extrémnom zašumení prúdového signálu. Je to spôsobené príliš veľkou derivačnou zložkou v regulátore. Testovali sme oba navrhnuté regulátory a výsledky boli veľmi podobné simulačným.



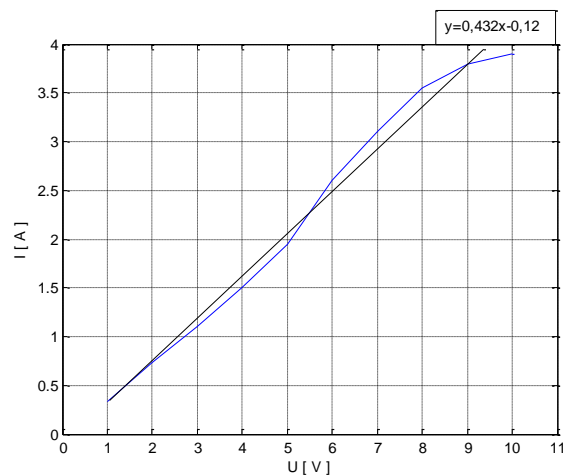
Obr. 12 Magnetický levitácie (magnetický záves)



Obr. 13 Prepojenie sústavy magnetického závesu s regulátorom polohy

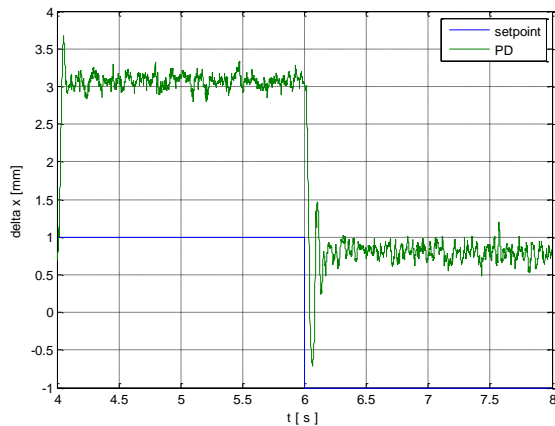


Obr. 14 Porucha signál na spätnej väzbe

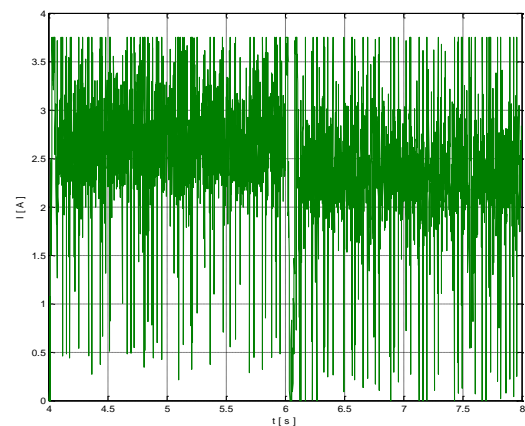


Obr. 15 Vstupno-výstupná charakteristika sústavy s regulátorom prúdu

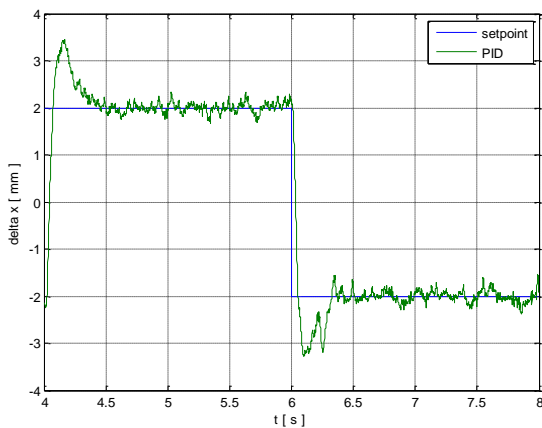
Najvýraznejší rozdiel medzi reálnym meraním a simuláciou je extrémnom zašumení prúdového signálu. Je to spôsobené príliš veľkou derivačnou zložkou v regulátore. Testovali sme oba navrhnuté regulátory a výsledky boli veľmi podobné simulačným.



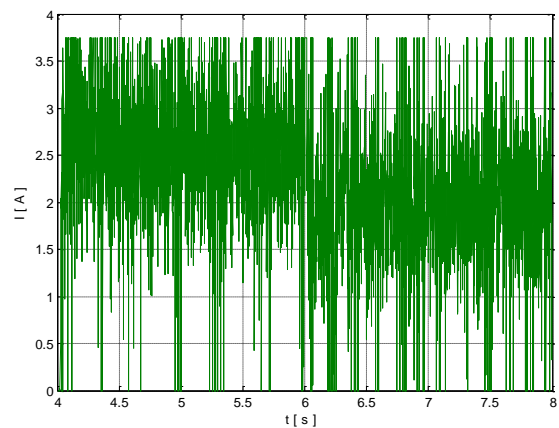
Obr. 16 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PD regulátorom polohy ($k_{si}=1$, $w_0=15$ rad/s, $k=80$)



Obr. 17 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PD regulátorom polohy- akčný zásah ($k_{si}=1$, $w=15$, $k=80$)



Obr. 18 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PID regulátorom polohy ($k_{si}=1$, $w=15$, $k=80$)



Obr. 19 Skoková zmena polohy okolo centrálnej pozície s PID regulátorom polohy- akčný zásah ($k_{si}=1$, $w=15$, $k=80$)

6 VYHODNOTENIE

Podarilo sa nám úspešne navrhnuť a otestovať PD a PID regulátor, jednak pri simulácii ako aj na reálnom zariadení. Výsledky preukázali, že sa nám podarilo linearizovať model korektne a navrhnutý model je dostatočne presný okolo centrálnej pozície. Kvôli kompenzácii statickej chyby, PID regulátor dosahoval lepšie výsledky pre našu aplikáciu.

Dosiahnuté výsledky otvárajú cestu k ďalším experimentom a možnostiam odstránenia niektorých nedostatkov, ktoré je nutné vyriešiť. Ako sme zistili je nevyhnutné použiť senzor polohy s väčšou presnosťou. V ďalšom kroku je nutné upraviť reálnu sústavu, prípadne vytvoriť sústavu s dvoma osami magnetickej levitácie, čo sa približuje k nášmu cieľu, ktorým je komplexné riadenie magnetického ložiska.

POĎAKOVANIE

Tento projekt bol spracovaný s podporou projektu KEGA 032STU-4-2011.

[1] Tim Harris, Magnetické ložiská SKF, SKF Revolve, Calgary, Canada

[2] Hannes Bleuler, Matthew Cole, Patrick Keogh, Rene Larssonneur, Eric Maslen, Rainer Nordmann, Yohji Okada, Gerhard Schweitzer, Alfons Traxler, "Magnetic Bearings, Theory, Design, and Application to Rotating Machinery", 2009

[3] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_levitation

[4] M. Boršč, P. Siviček, Š. Mankovický, Servomechanizmy a automatizované polohy, FEI STU, Bratislava, 1972

[5] Hoshi H., Asama J., Shinshi T., Takatani S., Ohuchi K., Nakamura M., Mizuno T., Arai H., Shimokohbe A., Takatani S., "Disposable magnetically levitated centrifugal blood pump: design and in vitro performance", Artificial Organs 2005

[6] Daniel Mayer, article "Magnetická levitácia a jej využitie", Elektrotechnická fakulta ZČU v Plzni, Elektro január 2003