

Aktivní magnetické ložisko

Bc. Pavel Blažek

České vysoké učení technické

Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky

Praha, Česká republika

Pavel.Blazek@fs.cvut.cz

Abstrakt – V článku je záznam pokračování vývoje školního demonstrátoru aktivního magnetického ložiska. V úvodních kapitolách je popsána funkce takového zařízení a seznámení s postupem práce na školním prototypu. Další částí textu jsou věnovány popisu konstrukčních úprav celkové sestavy, vytvoření zjednodušeného matematického modelu odpovídající nové sestavě a návrh řízení. Součástí jsou i dosažené výsledky simulací v podobě grafů a fotografie konstrukčních úprav.

Klíčová slova – aktivní magnetické ložisko, systém, stabilizace, stavové řízení, PID regulace

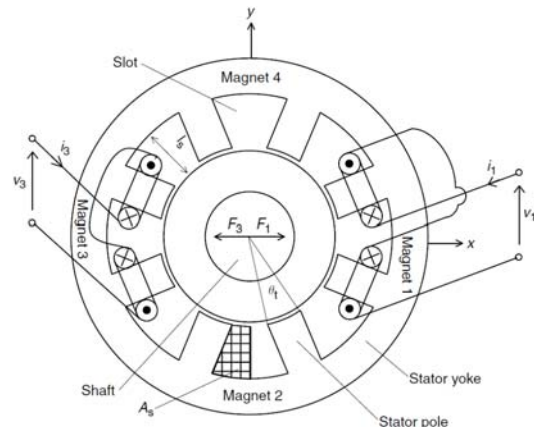
I. ÚVOD

Na tomto tématu pracuji v rámci studentské grantové soutěže s názvem *Vysokorychlostní elektrické stroje pro automobilové aplikace – řízení, výkonová elektronika*. Mým úkolem je pokračovat na vývoji demonstrátoru aktivního magnetického ložiska, na kterém by se dalo ukázat, jak takový systém funguje, a který by mohl do budoucna sloužit pro testování různých řídicích algoritmů.

II. AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO

Aktivní magnetické ložisko je takový typ ložiska, které umožňuje uložení rotujícího hřídele bez přítomnosti pasivních odporů. Rychlost rotace hřídele je tedy teoreticky neomezená, pokud vynecháme vliv odstředivé síly na hmotu hřídele. Možnost dosahovat vysokých otáček bez použití maziva přináší řadu výhod, čímž tato technologie nachází uplatnění v řadě aplikací, například ve sterilních nebo potravinářských procesech nebo právě v aplikacích, kde potřebujeme realizovat vysoké otáčky.

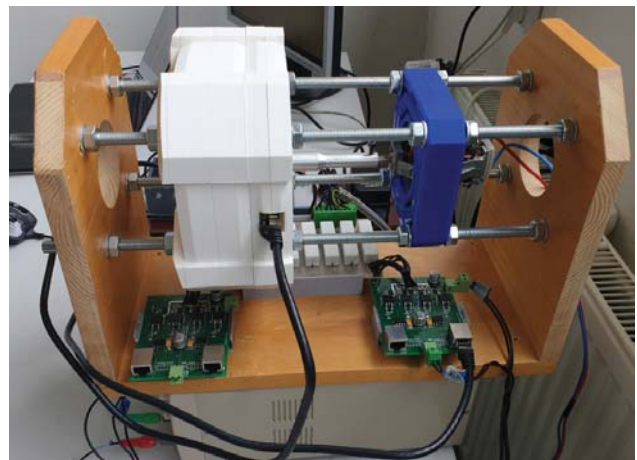
Magnetické ložisko se skládá ze statoru, které obsahuje elektromagnety. Magnetickými silami je rotující hřídel centrován do osy magnetického ložiska, čímž je zachována konstantní vzduchová mezera mezi hřídelem a ložiskem. Slovo *aktivní* znamená, že magnetické síly jsou regulovány řídicím systémem. Na obr. 1. je průřez radiálním magnetickým ložiskem. Stator je rozdělen do osmi částí. Každé dvě části patří k jednomu elektromagnetu. V ose x a y jsou tedy vždy dva elektromagnety působící proti sobě. Senzory měří aktuální polohu hřídele v obou osách a řídicí systém reguluje proud v elektromagnetech tak, aby byl hřídel neustále v ose ložiska. Při vychýlení ze své referenční polohy dojde k akčnímu zásahu a jeho zpětnému návratu do osy ložiska. [1]



Obr. 1. Řez ložiskem [1]

III. KONSTRUKCE ŠKOLNÍHO PROTOTYPU

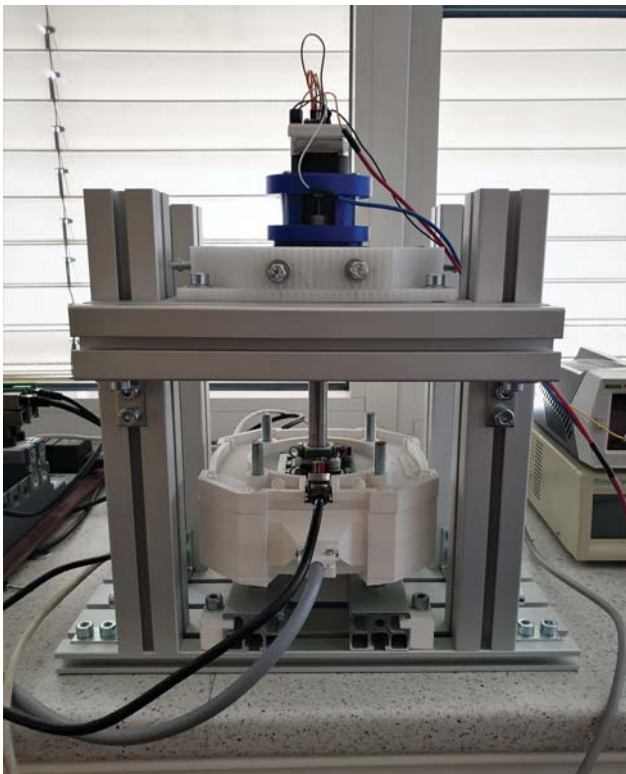
V počátku mého působení na projektu, byl školní prototyp radiálního aktivního magnetického ložiska ve stavu, kdy byla dokončena celková konstrukce ložiska, příslušná elektronika i funkční program v LabVIEW FPGA. Regulace polohy hřídele však fungovala pouze pokud se hřídel netočil. Po roztočení došlo k destabilizaci systému. Na obr. 2. je k vidění původní konstrukce.



Obr. 2. Původní model - ložisko (bíle), kardanův kloub (modře) [2].

V dřevěném rámu jsou na společných závitových tyčích nasazeny ložisko i kardanův kloub, v němž je uložen DC motor. Kloub umožňuje naklápění motoru s hřídelem. Hřídel je nasezen na motoru bez použití spojky a veškeré navržené komponenty, tedy hlavní pouzdro ložiska a kardanův kloub, jsou vytištěny na 3D tiskárně z plastu, což je jednou z příčin vzniku konstrukčních nepřesností.

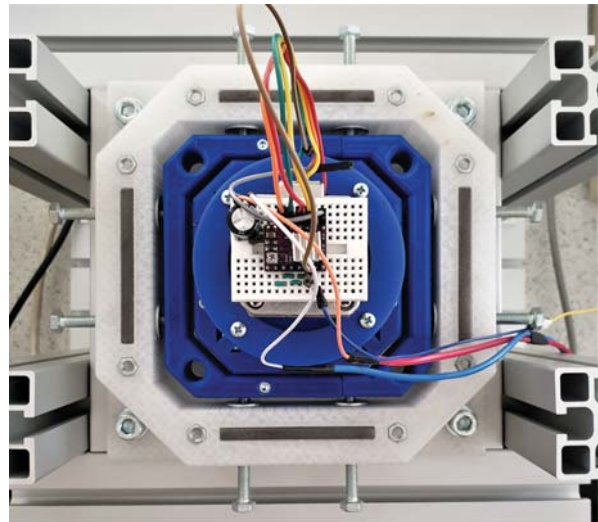
IV. KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY



Obr. 3. Nová sestava

Abychom byli schopni řídit aplikaci, ve které pracujeme se vzduchovou mezerou mezi ložiskem a hřídelem 1.5 mm, bylo zapotřebí zajistit určitou mechanickou přesnost konstrukce. Navrhl jsem tedy novou konstrukci. Celou sestavu jsem uspořádal do vertikální polohy, přičemž hřídel směřuje směrem dolů, podobně jako u kyvadla. Takové uspořádání umožňuje získat rovnoběžnost hřídele s osou ložiska. Samotné magnetické ložisko a kardanův kloub jsem zachoval. Dřevěný rám jsem nahradil konstrukcí z hliníkových profilů, které výrazně přispěly ke zvýšení tuhosti konstrukce a přidal jsem centrovací hlavu, pomocí níž lze jemně posouvat kardanův kloub s motorem vůči magnetickému ložisku tak, aby bylo možné srovnat jejich osy. V původní konstrukci byla osa motoru pevně svázána s osou ložiska pomocí společných závitových tyčí. Mírné vyosení tak mohlo způsobovat další problémy s řízením. Hlava obsahuje osm šroubů, které slouží pro jemný posuv kardanu. Další úpravou bylo vyrobení nové delší hřídele z hlazené ocele. Na jednom konci je nalisováno kuličkové ložisko, které je uloženo uvnitř plastového domku viz obr. 5.. Hřídel pohání krokový

motor, který nahradil původní DC motor. Ten nám umožnil i velice pomalé otáčení hřídele s možností snadného řízení otáček. Motor je s hřídelem spojen zubovou spojkou, která je uvnitř plastového domku.



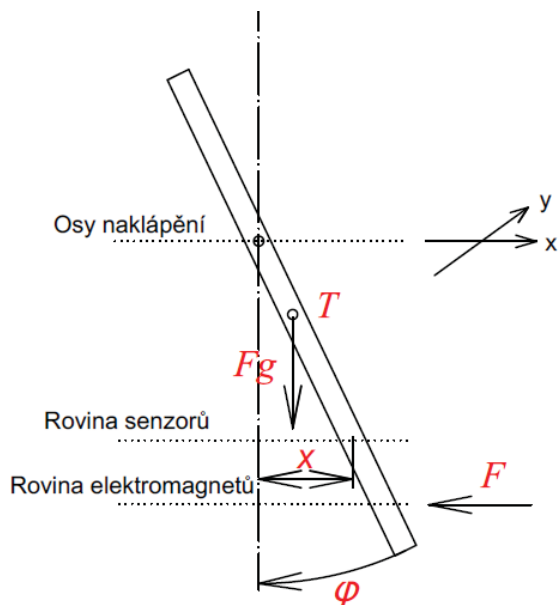
Obr. 4. Centrovací hlava



Obr. 5. Detail na uložení hřídele

V. MATEMATICKÝ MODEL

Aktivní magnetické ložisko je nestabilní systém. Na obr. 6. je schéma nového systému, který je velice zjednodušený. V rovině, ve které leží osy naklápění, je již zmíněný kardanův kloub. Těžiště se podle výpočtů nachází 21 mm od této roviny. Rovina senzorů je pak vzdálena 140 mm a elektromagnety 180 mm od osy naklápění. Hmotnost v těžišti je 800 g. Odvození síly F zde neuvádím z důvodu náročnosti. Čerpal jsem z odborné literatury [1] a při výpočtu přenosu už pracuji s výslednými vztahy. Nový matematický model jsem realizoval v prostředí MATLAB a



Obr. 6. Schéma - nový model

Simulink. Samotný systém jehož vstupem je proud je druhého řádu. Model je vytvořen pouze pro jednu osu, protože druhá osa je teoreticky stejná.

Síla elektromagnetů F působící na hřídel v jedné ose má tvar

$$F = k_x x + k_i i, \quad (1)$$

kde x je výchylka v ose x a i je proud v cívce. Konstanty k_i a k_x pak mají tvar

$$k_i = 2L_o \left(\frac{I_b}{g} \right) \cos \left(\frac{\pi}{8} \right), k_x = 2L_o \left(\frac{I_b}{g} \right)^2 \cos \left(\frac{\pi}{8} \right), \quad (2)$$

kde g je tíhové zrychlení, I_b je stálá složka proudu a indukčnost L_o je

$$L_o = \frac{N^2 \mu S}{2g}, \quad (3)$$

kde N je počet závitů cívky, μ je permeabilita vakua a S je průřez kotvy [1].

Přenos systému se vyjádří jako

$$G(s) = \frac{X(s)}{I(s)} = \frac{l_s l_f k_i}{I_x s^2 - (l_s l_f k_x + F_g l_t)}, \quad (4)$$

kde I_x je moment setrvačnosti závěsu, který jsem spočítal v programu SolidWorks, l_s je vzdálenost senzorů od osy naklápění, l_f je vzdálenost elektromagnetů od osy naklápění a F_g je tíhová síla. Výchylky hřídele jsou tak malé, že jsem si mohl dovolit využít zjednodušení $\varphi \approx x/l_s$.

V reálné aplikaci však není řízen proud v cívkách ale napětí. Jedná se o RL obvod, kde musíme brát v úvahu přechodové jevy ze vztahu

$$I(s) = \frac{U(s)}{sL + R}, \quad (5)$$

kde R je odpor vodiče a L je indukčnost cívky [2]. Tím vneseme do systému další dynamiku a přenos výsledného systému je

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{l_s l_f k_i}{I_x L s^3 + I_x R s^2 - L(l_s l_f k_x + F_g l_t) s - R(l_s l_f k_x + F_g l_t)}. \quad (6)$$

VI. STABILIZACE SYSTÉMU

Stabilizace takového systému je možné dosáhnout použitím PD regulátoru. Po vyjádření charakteristického polynomu uzavřeného regulačního obvodu

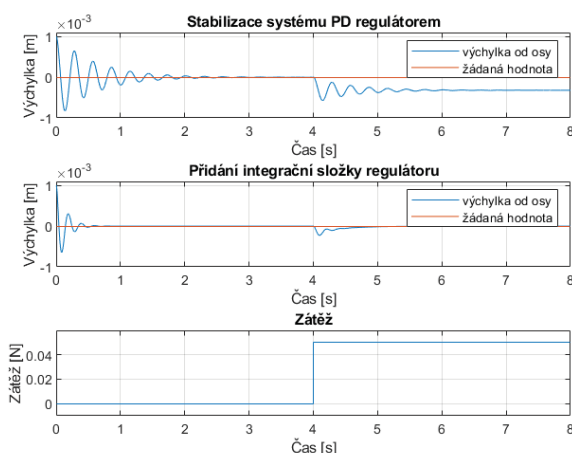
$$Ls^3 + Rs^2 + (-ML + Nr_d)s - MR + Nr_p = 0, \quad (7)$$

kde

$$M = \frac{l_s l_f k_x + F_g l_t}{I_x}, N = \frac{l_s l_f k_i}{I_x} \quad (8)$$

je patrné, že lze pomocí parametrů regulátoru ovlivnit některé členy charakteristického polynomu. Aby platila Stodolova podmínka stability musí být splněno, že všechny koeficienty charakteristického polynomu existují a mají stejné znaménko. Musí platit, že

$$r_p \geq \frac{(l_s l_f k_x + F_g l_t)R}{l_s l_f k_i}, r_d \geq \frac{(l_s l_f k_x + F_g l_t)L}{l_s l_f k_i}$$



Obr. 7. Stabilizace systému.

Výpočet jsem ověřil v prostředí MATLAB a Simulink. V grafu na obr. 7. je zobrazeno chování systému s nastavenou nenulovou počáteční podmínkou (s vychýlením 1 mm od

osy). V čase 4 sekundy začne působit konstantní zatížení 0,05 N kolmo na hřídel. Je vidět, že systém je stabilní, ale při silovém působení na hřídel dojde ke vzniku trvalé regulační odchylky. Ta je odstraněna přidáním integrační složky regulátoru. Regulační pochod je poté výrazně rychlejší a nezanechává trvalou regulační odchylku.

VII. STAVOVÉ ŘÍZENÍ

Další možností jak řídit takový systém by mohla být stavová regulace. Ta umožňuje pracovat se zpětnou vazbou od všech stavových veličin. V mém případě pracuji se třemi stavy - polohou (aktuální výchylkou x), rychlostí \dot{x} a proudem i . Matice stavového popisu mají tvar

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ M & 0 & N \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}, C = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Abych mohl použít stavový regulátor, musím měřit všechny stavové veličiny. V mém případě mohu měřit aktuální výchylku a velikost proudu, což je patrné z matice C. Rychlost by se měřila obtížně, proto jsem použil pozorovatele stavu, který slouží k odhadování stavu. Dynamika odhadu je popsána vztahem

$$\dot{\hat{x}}(t) = \mathbf{A}\hat{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{L}(y(t) - \hat{y}(t)), \quad (10)$$

kde veličiny se stříškou jsou odhadované, y je vektor výstupu (poloha a proud) a vektor L modifikuje dynamické vlastnosti, se kterými se budou eliminovat odchylky odhadu.

Pro řízení jsem navrhl rozšířený stavový regulátor pro možnost systém řídit a ne ho pouze stabilizovat. Zavedl jsem nový stav pro vnesení astatismu do soustavy

$$\dot{I}(t) = x(t) - w(t), \quad (11)$$

kde w je žádaná hodnota a x je výchylka hřídele. Rozšířený stavový regulátor má tvar

$$u(t) = -\mathbf{K}_p \hat{x}(t) - k_i I(t) \quad (12)$$

a celková zpětná vazba je $\mathbf{K} = (\mathbf{K}_p \quad k_i)$. Rozšířený stavový popis se vyjádří jako

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{I}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{x}(t) \\ I(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{B} \\ 0 \end{pmatrix} u(t) + \begin{pmatrix} \mathbf{0} \\ -1 \end{pmatrix} w(t). \quad (13)$$

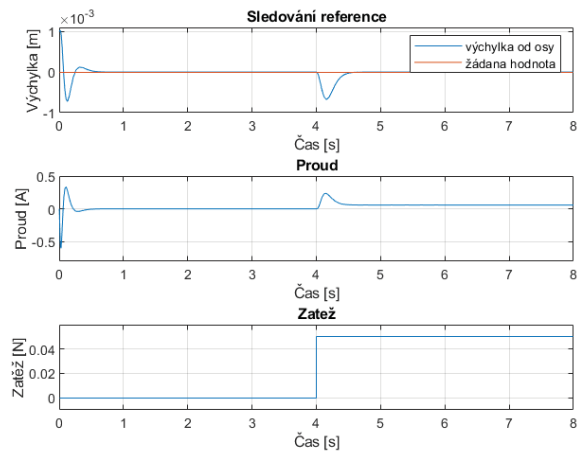
Pozorovatele stavu a stavový regulátor navrhuji odděleně. K výpočtu parametrů stavového regulátoru a pozorovatele se využívá v programu MATLAB příkaz *acker* popřípadě *place*, který však neumožňuje definovat vícenásobný kořen [3]. Příkaz se zapisuje jako $\mathbf{K} = \text{acker}(\mathbf{A}_{\text{hat}}, \mathbf{B}_{\text{hat}}, p)$, kde se matice nové dynamiky zapíšou jako $\mathbf{A}_{\text{hat}} = [\mathbf{A} \text{ zeros}(3,1); -[1 \ 0 \ 0] \ 0]$; $\mathbf{B}_{\text{hat}} = [\mathbf{B}; 0]$; a

pro pozorovatele stavu se příkaz zapíše jako $\mathbf{L} = (\text{place}(\mathbf{A}', \mathbf{C}', p_{\text{poz}}))'$.

Pro můj systém jsem zvolil čtyřnásobný stabilní pól $p = -20$ (1 1 1 1). Póly pozorovatele stavu se volí 2 - 6 x pomalejší [3]. Zvolil jsem $P_{\text{poz}} = -60$ (1 1.2 1.3 1). Z výpočtů vychází

$$\mathbf{K}_p = (54.7 \quad 2.2 \quad -2.6 \quad -118), k_i = -118,04 \quad (14)$$

$$\mathbf{L} = \begin{pmatrix} 150 & 0 \\ 6140 & 2.5 \\ 0 & -1400 \end{pmatrix}. \quad (15)$$



Obr. 8. Stavová regulace.

Na obr. 8. je znázorněn průběh výchylky od osy a proud. Navržené stavové řízení má lepší odezvu než v případě použití PID regulátoru.

VIII. ZÁVĚR

Rotující hřídel se podařilo stabilizovat ve vertikální poloze s použitím dvou PD regulátorů, ale s jinými parametry než vychází z výpočtů. Po přidání integrační složky se systém destabilizuje, a protože model neodpovídá realitě je obtížné správně nastavit parametry regulátoru. S PD regulátorem je takový systém schopen rotovat v ose s mírnou deviací, způsobenou nevyvážením hřídele. Po vychýlení se hřídel vrací zpět do osy, kompenzovat silové působení bez trvalé regulační odchylky však není možné bez integrační složky. Dalším postupem je tedy pokus o zpřesnění matematického modelu a zdokonalení implementace řízení v prostředí LabVIEW FPGA.

REFERENCES

- [1] Akira Chiba. Magnetic bearings and bearingless drives. English. Oxford: Newnes, 2005. isbn: 9780750657273;0750657278;
- [2] Jan Krofta. Řízení aktivního radiálního magnetického ložiska. Praha, 2019. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.
- [3] Tomáš Vyhliďal. Řízení systémů a procesů. Téma 9: Aplikace stavové regulace s pozorovatelem stavu [přednáška]. Praha, 2020. České vysoké učení technické v Praze.



Selected article from

Tento dokument byl publikován ve sborníku

**Nové metody a postupy v oblasti přístrojové
techniky, automatického řízení a informatiky 2020
New Methods and Practices in the Instrumentation,
Automatic Control and Informatics 2020
14. 9. – 16. 9. 2020, Zámek Lobeč**

ISBN 978-80-01-06776-5

Web page of the original document:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2020.pdf>

Obsah čísla/individual articles:

<http://iat.fs.cvut.cz/nmp/2020/>

Ústav přístrojové a řídicí techniky, FS ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6