



Národní konference s mezinárodní účastí
INŽENÝRSKÁ MECHANIKA 2002

13. – 16. 5. 2002, Svratka, Česká republika

MAGNETICKÁ LOŽISKA

Miroslav Patočka, Petr Huták *)

Abstrakt:

Článek se zabývá návrhem struktury řízení elektromagnetů pro magnetickou levitaci a zvláště magnetů pro magnetická ložiska. Na základě vlastností matematického modelu elektromagnetu popsaného v navazujícím článku tohoto sborníku byla navržena optimální regulační struktura pro polohové zpětnovazební řízení. Tato regulační struktura byla úspěšně optimalizována a výpočtově modelována v prostředí Matlab - Simulink. Získané poznatky lze využít k navrhování vhodné regulační struktury a k syntéze regulátorů pro polohovou regulaci levitačního elektromagnetu.

Klíčová slova:

elektromagnet, levitace, magnetická ložiska, regulace, matematický model, simulace, MATLAB-SIMULINK

1. Úvod

Použití levitačních elektromagnetů např. pro elektrickou trakci je známo. Levitační elektromagnety však nachází uplatnění i pro magnetická ložiska, kde se regulačně udržuje hřídel „zavěšený“ v prostoru.

Výhody magnetických ložisek :

- Minimální ztráty třením v porovnání s klasickými typy ložisek (valivými i kluznými), což umožňuje vysoké otáčky rotoru (až 120 000 ot/min).
- Odpadá nutnost mazání ložiska, z toho vyplývá aplikace v prostředích, kde je použití mazacího tuku nemožné, nebo nepřijatelné, např. ve vakuové technice.
- Možnost využití ve ztížených klimatických podmínkách. Výrobci uvádějí rozmezí teplot od -185°C do +480°C.
- Vysoká spolehlivost zařízení dovolující použití v letecké technice.
- Vyšší stabilita při vysokých otáčkách, při přechodu přes kritické otáčky a možnost kompenzace nevyvážky rotoru.

*) VUT FEI Brno, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky (UVEE), Technická 8, 602 00 Brno
Dr. Ing. Miroslav Patočka, E-mail: patocka@feec.vutbr.cz, Tel: +42(05)4114 2690
Ing. Petr Huták, Ph.D., E-mail: hutak@feec.vutbr.cz, Tel: +42(05)4114 2437

Nevýhody magnetických ložisek :

- Vysoká cena zařízení.
- Vysoká složitost.
- Velký objem a hmotnost.
- Nutnost zálohování a ochrana proti výpadkům elektrického proudu (při absenci záložních zdrojů nebo záchytných prostředků hrozí destrukce ložisek).

V současnosti vyrábí magnetická ložiska (radiální i axiální) několik světových výrobců. Mezi největší patří firmy Revolve, Calnetix, Magnetic Moments, RMP-Mecos, ZKF atd. Vývoj těchto ložisek však není zdaleka u konce a proto se uvedeným problémem zabývá mnoho výzkumných a vývojových organizací.

2. Návrh regulace elektromagnetu

2.1. Určení přenosu elektromagnetu

Pro návrh regulace elektromagnetu je nutné znát operátorový přenos modelu elektromagnetu. Pro tyto účely je nutno model **linearizovat** v okolí zamýšleného pracovního bodu.

Linearizace a řešení stavových rovnic bylo realizováno v prostředí Matlab - Simulink s využitím modelů elektromagnetu, které jsou popsány v souvisejícím článku tohoto sborníku. Pozor: tam je uveden model s *linearizovaným* mg. obvodem a model s *nelineárním* mg. obvodem. Oba modely jsou principiálně **nelineární** a proto je nutno oba modely **linearizovat** v daném pracovním bodě. Pomocí příkazů **trim** a **linmod** byly vypočteny přenosové matice v požadovaném pracovním bodě.

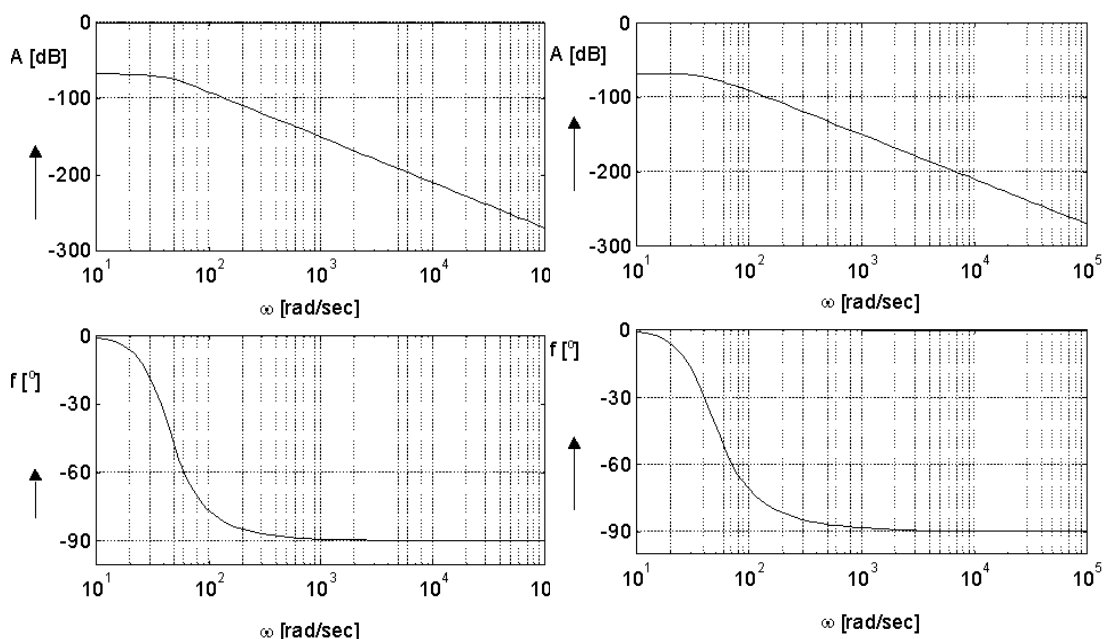
Pro matematický model levitačního elektromagnetu s *linearizovaným* magnetickým obvodem má přenos tvar

$$F_{LMM1}(p) = \frac{-1,421 \cdot 10^{-14} p^2 - 6,821 \cdot 10^{-13} p - 30,88}{p^3 + 17,5 p^2 + 10,43 p - 6,524 \cdot 10^4} \quad (1)$$

Pro matematický model levitačního elektromagnetu s *nelineárním* magnetickým obvodem má přenos tvar

$$F_{NLMM1}(p) = \frac{-3,553 \cdot 10^{-14} p^2 - 1,478 \cdot 10^{-12} p - 30,98}{p^3 + 27,32 p^2 + 7,958 \cdot 10^{-13} p - 6,563 \cdot 10^4} \quad (2)$$

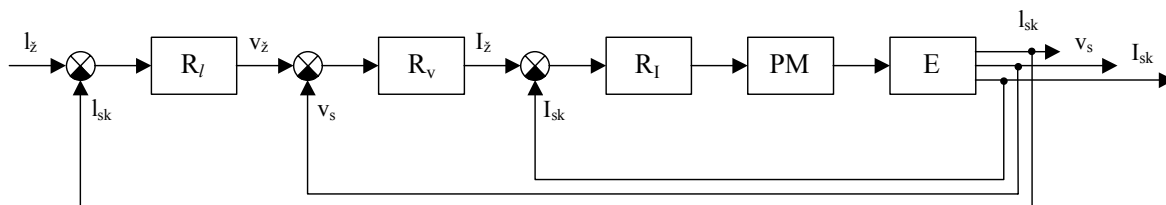
Logaritmické frekvenční a fázové charakteristiky modelů magnetu s *linearizovaným* mg. obvodem a s *nelineárním* mg. obvodem jsou uvedeny na Obr.1.



Obr.1 Logaritmická frekvenční a fázová charakteristika modelu magnetu s *linearizovaným* mg. obvodem (vlevo) a s *nelineárním* mg. obvodem (vpravo).

2.2. Vlastní návrh regulace elektromagnetu

Z určených přenosů, fázových charakteristik a frekvenčních charakteristik jak lineárního, tak nelineárního modelu vyplývá, že se jedná o statickou soustavu třetího řádu. Soustava třetího řádu je *velmi obtížně* regulovatelná. Z toho důvodu byla zvolena regulační struktura dle Obr. 2.



R_l = regulátor polohy PM = stejnosměrný pulsní měnič
 R_v = regulátor rychlosti E = elektromagnet
 R_I = regulátor proudu

Obr.2 Blokové schéma regulační struktury.

Regulační struktura kaskádního typu na Obr.2 je tvořena polohovou smyčkou s podřízenou rychlostní smyčkou a dále s podřízenou proudovou smyčkou. Blokové schéma též obsahuje stejnosměrný pulsní měnič a řízený elektromagnet.

Přenos stejnosměrného pulsního měniče

$$F_{PM}(p) = \frac{K_{PM}}{\tau_{PM}p + 1} = \frac{30}{0,0001p + 1} \quad (3)$$

Přenos čidla proudu

$$F_{\dot{c}_I}(p) = \frac{K_{\dot{c}_I}}{\tau_{\dot{c}_I}p + 1} = \frac{0,25}{0,00003p + 1} \quad (4)$$

Přenos čidla polohy

$$F_{\dot{c}_I}(p) = \frac{K_{\dot{c}_I}}{\tau_{\dot{c}_I}p + 1} = \frac{1000}{0,00001p + 1} \quad (5)$$

Při návrhu kaskádních regulátorů se postupuje obdobně jako u kaskádní polohové regulace stejnosměrného motoru, tj. podřazené smyčky se pro syntézu regulátorů nahrazují statickým členem druhého řádu. Pro jednotlivé regulátory pak obdržíme jejich přenosové funkce:

Přenos regulátoru proudu

$$F_{r_I}(p) = 16,26 + \frac{1}{0,00351p} \quad (6)$$

Přenos regulátoru rychlosti

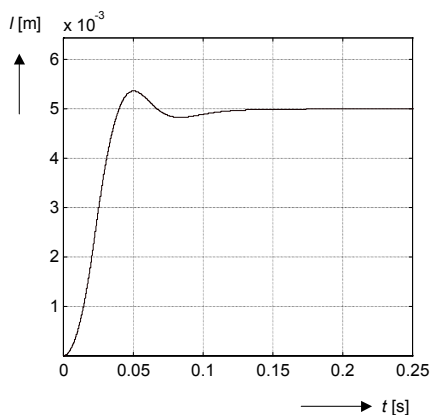
$$F_{r_I}(p) = 0,24 + \frac{1}{0,00833p} \quad (7)$$

Přenos regulátoru polohy

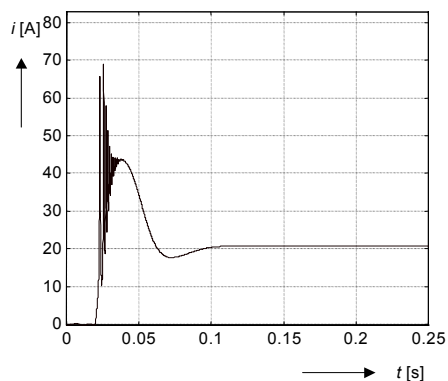
$$F_{r_I}(p) = 234,74 + \frac{1}{0,000037p} \quad (8)$$

2.3. Ověření funkce a dynamických vlastností na matematickém modelu elektrotechnické soustavy

Na matematickém modelu byl např. simulován pohyb elektromagnetu z krajních „dorazů“ do pracovní polohy $l = 0.005 \text{ m}$. Výsledky jsou uvedeny na Obr.3,4.



Obr. 3 Průběh velikosti vzduchové mezery během nastavování prac. polohy



Obr.4 Průběh proudu během nastavování prac. polohy

3. Regulace magnetického ložiska

Pro návrh regulace bylo uvažováno radiální magnetické ložisko uspořádané podle *Obr.5* s těmito parametry:

Síla elektromagnetu

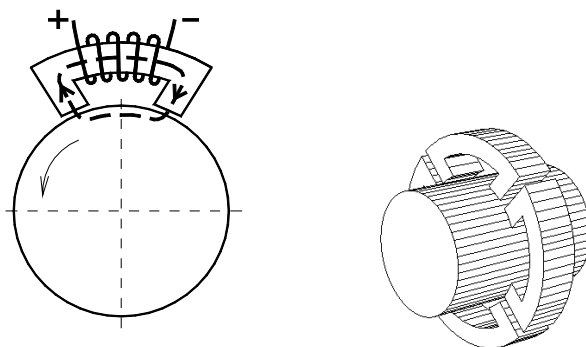
$$F = 125 \text{ N}$$

Tloušťka vzduchové mezery

$$l = 0,2 \text{ mm}$$

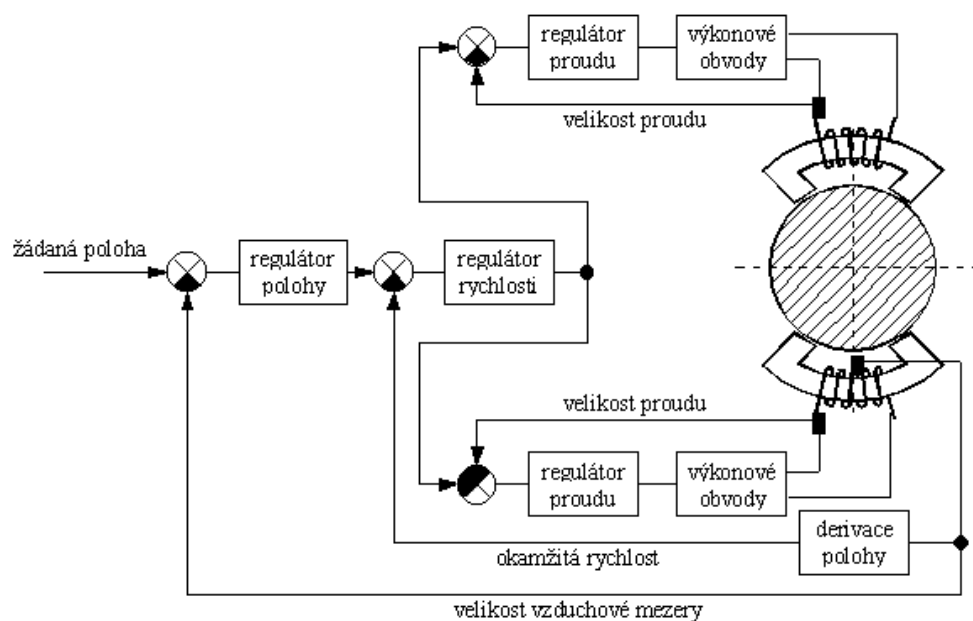
Magnetická indukce

$$B = 1,3 \text{ T}$$



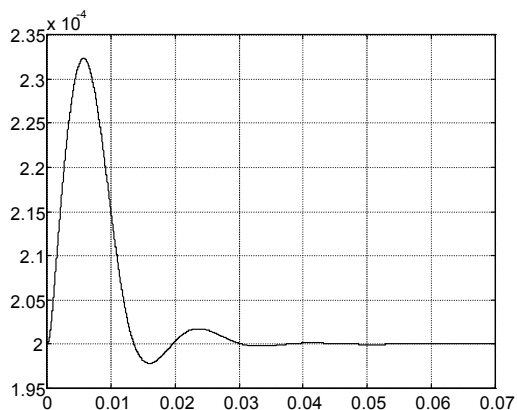
Obr.5 Konstrukční uspořádání radiálního magnetického ložiska

Schéma regulace magnetického ložiska je na *Obr.6*. Regulátor polohy a rychlosti je společný pro oba elektromagnety. Výstup regulátoru rychlosti, tj. žádanou hodnotu proudu je třeba pro jeden z elektromagnetů invertovat. Výkonové obvody, což jsou stejnosměrné tranzistorové pulsní měniče, jsou dvoukvadrantové s reverzací napětí. To znamená, že v ustáleném stavu je v činnosti vždy jen jeden elektromagnet. Návrh regulátorů je obdobný jako v předchozí kapitole.

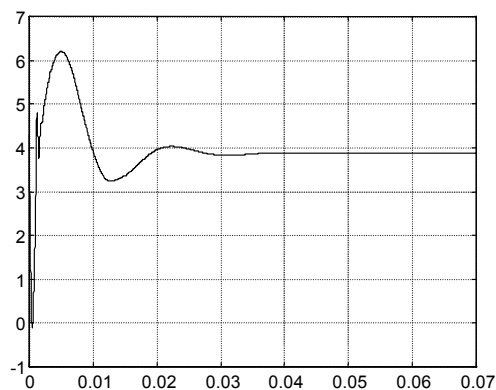


Obr.6 Blokové schéma regulace magnetického ložiska

Na Obr. 7 jsou některé výsledky simulací. Je simulován začátek působení magnetického ložiska a to svislého páru, kde se uplatňuje vliv gravitace. Na Obr. 7a je znázorněna



Obr. 7a Poloha rotoru



Obr. 7b Proud elektromagnetu

velikost vzduchové mezery ložiska. Je vidět že hřídel se nastaví do pracovní polohy poměrně rychle a s malým překmitem. Obr. 7b ukazuje proud horního elektromagnetu který vlivem gravitace není v ustáleném stavu nulový (nese hřídel).

4. Závěr

V článku je popsán možný postup při návrhu regulace jak levitačního elektromagnetu, tak i magnetického ložiska. Při simulaci regulované soustavy byly použity matematické modely elektromagnetu s *linearizovaným* i *nelineárním* magnetickým obvodem, uvedené na jiném místě tohoto sborníku. Při prováděných testech se potvrdila jednak správnost modelů elektromagnetů a jednak vhodnost zvolené regulační struktury. Elektromagnety vždy v poměrně krátkých časových intervalech (levitační asi 0,2s, ložisko 0,03s) dokázaly vrátit magnet do jeho jmenovité polohy a to i při vlivu rušivých sil.

Při simulaci se ukázalo, že získání informace o rychlosti derivací signálu z čidla polohy není v praxi vhodné (odstup signál - šum). Nabízí se však možnost získávat informaci o rychlosti z matematického modelu elektromagnetu (estimátor).

Problematika byla řešena za podpory grantové agentury GAČR, v rámci projektu 102/01/1291 *Diagnostika elektromagnetických vlastností elektrických strojů pomocí vibračních a akustických polí*.

literatura

- [1] Čěrovský, Z., Pavelka, J. : Nosnost magnetického ložiska, Sborník SYMEP '98 Ostrava, 23.-25.6.1998.
- [2] Knoll, H. : Power Convertors for MAGLEV-Systems. Proc. 37th Conf. MOTORCON, September 1982.
- [3] Kreysa, K. : Navrhování regulací I., VUT v Brně, 1976.
- [4] Miroslav Patočka, Karel Kreysa, Petr Huták. : Matematický model levitačního elektromagnetu. Sborník konference EPVE' 99, Brno, 21. - 22. září 1999.