

LEVITATION ELECTROMAGNET

M. Patočka*, P. Huták*

Summary: *The paper deals with the engineer design of the levitation magnet for transport systems and magnetic bearings. The optimal solution for the minimum whole volume of the iron and cooper is showed.*

The optimisation has been based on the thought that all the linear dimensions of the magnet have been expressed as multiples of the longitude modul. It allows to compare the technical-utility features of the different dimension magnets with different modules. The optimal regulation structure for the position regulation has been designed on the base of the electromagnet's mathematical model described in this proceeding. This regulation structure has been successfully optimised and simulated in MATLAB – SIMULINK.

The problem is solved as a part of the project CEZ: J22/98: 26 22 000 10 and project GA43D013.

1. Úvod

Magnetická levitace nachází uplatnění při konstrukci magnetických vysokootáčkových ložisek (např. uložení vakuové vývěvy) a především v železniční dopravě při konstrukci rychlovlaků. Při využití v dopravě můžeme očekávat následující výhody:

- Nulové mechanické opotřebení kolejnic.
- Možnost povrchové antikorozi úpravy kolejnic (např. nátěr).
- Rovnoměrné rozložení zatížení na velkou plochu - velmi malý místní mechanický tlak na kolejiště.
- Ke zvýšení životnosti celého kolejiště může výraznou měrou přispět i kybernetika a mechatronika : vhodným nastavením regulátoru mezery lze soupravu cíleně elektronicky odpružit.
- Lze očekávat mírnou energetickou úsporu, pokud ovšem hysterezní a vířivé ztráty v kolejnici a příkon cívky elektromagnetu budou v součtu menší než odstraněná valivá tření.
- Podstatné zvýšení bezpečnosti provozu (analýza údajně ukázala, že prvotní příčinou nedávné tragédie v Německu byla prasklá obruč jednoho z kol).

Ekonomický a obecně ekologický přínos lze tedy spatřovat především v prodloužení životnosti dopravní komunikace při současném zvýšení rychlosti, nikoli v přímé úspoře energie. Otázka bezpečnosti úzce souvisí s vyřešením nouzového dojetí a dobrzdění na pomocném podvozku při výpadku napájení elektromagnetů.

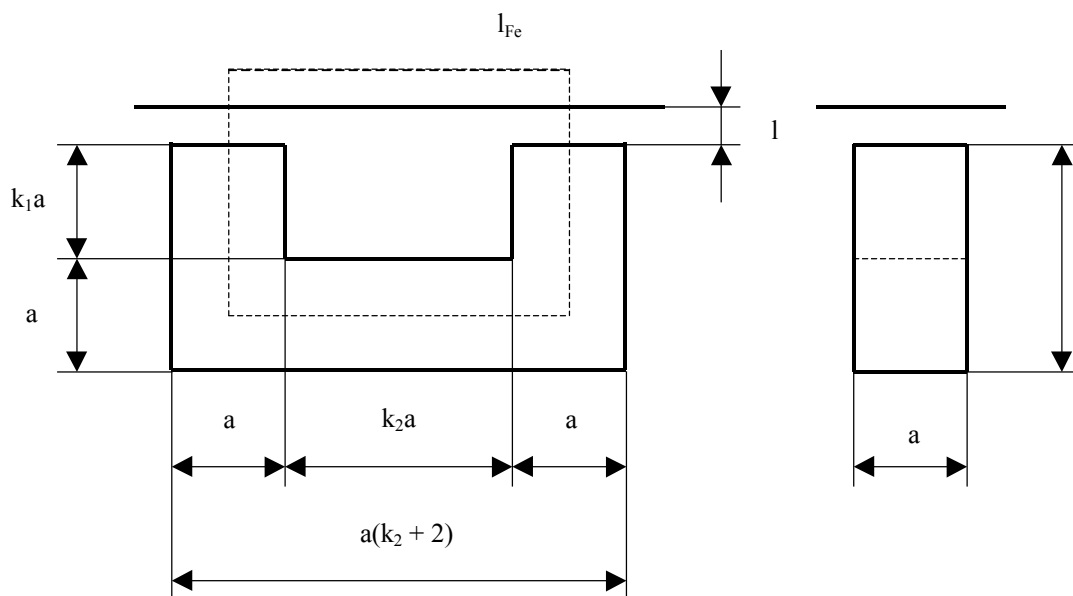
*) VUT FEKT Brno, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky (UVEE), Technická 8, 602 00 Brno
Doc. Dr. Ing. Miroslav Patočka, E-mail: patocka@uvee.fee.vutbr.cz, Tel: +42(05)4114 2690
Ing. Petr Huták, Ph.D. E-mail: hutak@uvee.fee.vutbr.cz, Tel: +42(05)4114 2437

2. Optimalizace tvaru elektromagnetu

Geometrický náčrtek rozměrů elektromagnetu je uveden na *Obr. 1*.

Předpokládejme dostatečně výhodný čtvercový (nikoli obdélníkový) průřez železa o ploše

$$S_{Fe} = a^2 \quad (1)$$



Obr. 1 Rozměrový náčrtek jádra elektromagnetu.

Kde charakteristický rozměr a budeme nazývat délkovým *modulem* elektromagnetu. Hledejme obdélníkový tvar okna pro uložení vinutí. Délky stran okna necht' jsou obecně násobky modulu:

$$S_{OKNA} = k_1 k_2 a^2 \quad (2)$$

Pak lze metodou variace určit, že při požadavku na minimální celkový objem ($V_{Fe} + V_{Cu}$) elektromagnetu musí mít konstanty k_1, k_2 velikosti

$$k_1 = \frac{1}{a} \sqrt{\frac{S_{OKNA}}{2 \left(1 + \frac{2 S_{OKNA}}{S_{Fe}} \right)}} \quad k_2 = \frac{1}{a} \sqrt{2 S_{OKNA} \left(1 + \frac{2 S_{OKNA}}{S_{Fe}} \right)} \quad (3 \text{ a, b})$$

Odtud vychází poměr obou čísel

$$\frac{k_2}{k_1} = 2 \left(1 + \frac{2 S_{OKNA}}{S_{Fe}} \right) \quad (4)$$

Požadavek (4) je velmi těžko realizovatelný. Obvykle vychází, zvláště pro větší vzduchovou mezeru l (více než 5 mm), větší plocha okna oproti průřezu železa. Pak bude okno ve směru podél koleje příliš dlouhé a velmi úzké (nízké). Např. při rovnosti obou ploch vychází $k_2/k_1 = 6 : 1$, což je nevhodné z hlediska rozptylu mg. siločar, ale i z důvodů konstrukčních : z hlediska minimálních ztrát hysteretických a vířivých má být magnet uložen napříč, nikoli podélně ve směru pohybu.

Musíme tedy slevit z požadavků na minimalizaci hmotnosti. Metodou variace lze podobně určit, že minimálního objemu samotného železa dosáhneme při poměru stran obdélníkového okna

$$\frac{k_2}{k_1} = 2 \quad (5)$$

Pozor, variace na minimální samotný objem mědi vede na nekonečně dlouhé okno o nulové výšce, což nemá technický smysl. Rovnici (5) lze proto považovat za rozumný kompromis mezi hmotností a realizovatelností magnetu, aniž je nutno ji striktně dodržet. Je to však dobré výchozí vodítko pro inženýrský návrh.

3. Návrh magnetického obvodu

Výpočet plochy okna vychází z celkového magnetického napětí podél mg. siločáry, při zanedbání rozptylu na okraji vzduchových mezer

$$NI = H_0 2l + H_{Fe} l_{Fe} = \frac{B}{\mu_0} \left(2l + \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}} \right) \approx \frac{2Bl}{\mu_0} \quad (6)$$

Z hlediska statického je lhostejno, jakým způsobem realizujeme potřebný součin NI . S ohledem na dynamiku regulace je však dobré nezvyšovat extrémně indukčnost vinutí - viz dynamické kritérium (12) - a nesnažit se o veliký počet závitů malého průřezu, ale spíše naopak.

S uvažováním činitele plnění k_{PL} vodiče o proudové hustotě σ musí být plocha právě zaplněného okna

$$S_{OKNA} = \frac{2Bl}{\mu_0 \sigma k_{PL}} \quad (7)$$

Průřez železa je dán požadovanou mechanickou silou F . Síla vzniká v obou mezerách současně, proto

$$F = 2 \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu_0} S_{Fe} \qquad S_{Fe} = \frac{F \mu_0}{B^2} \qquad (8 \text{ a, b})$$

Rovnicemi (6), (7) a (8b), v součinnosti s předchozím optimalizačním doporučením, je inženýrský návrh elektromagnetu v hlavních rysech dokončen. Na první pohled je zřejmý kladný vliv vyšší mg. indukce B na velikost a hmotnost magnetu. Syčení je však shora omezeno vířivými a hysterezními ztrátami v materiálu kolejnice (v materiálu kolejnice nejde o problém tepelný, spíše se jedná o nežádoucí doprovodný elektrodynamický brzdny efekt vířivých proudů, který působí proti směru pohybu).

U případného supravodivého vinutí je nutno dosadit do (7) proudovou hustotu σ , která je s rezervou menší než činí tzv. kritická proudová hustota σ_{krit} supravodiče (u niobu přibližně 50 A/mm²).

4. Užité vlastnosti elektromagnetu

Kvantifikační kritéria se mohou týkat parametrů statických i dynamických. Z užitečných vlastností a kritérií, pomocí nichž je možno vzájemně srovnávat různé magnety, lze jmenovat především následující:

- Elektrický odpor vinutí R_{Cu} .
- Indukčnost vinutí L (při jmenovité mezeře l).
- Časová konstanta vinutí τ (dynamické kritérium).
- Maximální možná strmost změny proudu $(di/dt)_{max}$ (důležité dynamické kritérium).
- Ztrátový výkon ve vinutí P_{Cu} .
- Měrná síla F/P_{Cu} vztažená na ztrátový výkon ve vinutí [N/W].
- Měrná síla F/l_p vztažená na zástavnou půdorysnou délku železného jádra magnetu [N/m].
- Měrná síla F/S_p vztažená na zástavnou půdorysnou plochu železného jádra magnetu [N/m²] (průměrný mechanický tlak vztažený na celý půdorys magnetu).

S využitím shora uvedených geometrických rozměrů, lze dojít k následujícím výsledkům:

$$R_{Cu} = \frac{2(k_1+1) N^2 \rho_{Cu} \sigma \mu_0 a}{Bl} \qquad (9)$$

$$L = N^2 \mu_0 \frac{S_{Fe}}{2l + \frac{l_{Fe}}{\mu_{rFe}}} \approx N^2 \mu_0 \frac{S_{Fe}}{2l} \qquad (10)$$

$$\tau = \frac{L}{R_{Cu}} = \frac{Ba}{4(k_1+1) \rho_{Cu} \sigma} \qquad (11)$$

$$\left(\frac{di}{dt}\right)_{\max} = \frac{U_{\text{měničče max}}}{L} \quad (12)$$

$$P_{Cu} = \rho_{Cu} \sigma^2 V_{\text{vinutí}} k_{PL} = R_{Cu} I^2 \quad (13)$$

$$\frac{F}{P_{Cu}} = \frac{Ba}{8(k_1+1)\rho_{Cu}\sigma l} = \frac{\tau}{2l} \quad (14)$$

$$\frac{F}{l_p} = \frac{B^2 a}{\mu_0 (k_2 + 2)} \quad (15)$$

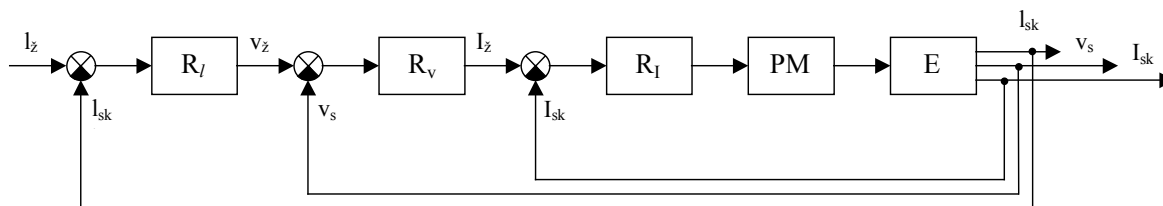
$$\frac{F}{S_p} = \frac{B^2}{\mu_0 (k_2 + 2)} \quad (16)$$

Všimněme si v (11) a (14), jak časová konstanta vinutí i měrná síla vztažená na ztrátový výkon rostou lineárně se zvětšujícím se délkovým modulem a . Je tedy vidět, že větší magnety jsou výhodnější z energetického hlediska, menší magnety vykazují zase naopak lepší vlastnosti dynamické. Není tedy zcela lhostejné, zda je vlaková souprava osazena velkým počtem malých magnetů nebo naopak malým počtem magnetů robustních. Obě kritéria jdou proti sobě a řešení je tedy výsledkem kompromisu. Je zajímavé, že časová konstanta (11) nezávisí na počtu závitů. Dynamické kritérium (12) však souvisí s kvadrátem závitů velmi výrazně, proto je velmi důležité.

Některé číselné hodnoty dosažitelné v praxi u výrobců magnetických ložisek jsou uvedeny ve [2].

5. Regulační struktura levitačního elektromagnetu

Z přenosů určených v dřívějších pracích, fázových charakteristik a frekvenčních charakteristik jak lineárního, tak nelineárního modelu magnetu vyplývá že naše soustava je statická nelineární soustava třetího řádu. Nelineární soustava třetího řádu je jen velmi obtížně regulovatelná. Proto byla zvolena kaskádní regulační struktura, která je uvedena na *Obr. 2*. Je tvořena polohovou smyčkou s podřízenou rychlostní smyčkou a s podřízenou proudovou smyčkou. Blokové schéma dále obsahuje stejnosměrný pulsní měnič a námi řízený elektromagnet.



R_l = regulátor polohy PM = stejnosměrný pulsní měnič

R_v = regulátor rychlosti E = elektromagnet

R_I = regulátor proudu

Obr.2 Blokové schéma soustavy s regulátory

6. Praktická realizace vzorku levitačního elektromagnetu

Pro ověření vlastností levitačního elektromagnetu a vyzkoušení navržené regulační struktury byl navržen a postaven elektromagnet s těmito parametry:

Průřez železného jha:	$S_{Fe} = 3 \text{ cm} \times 3,5 \text{ cm}$
Jmenovitá mezera:	$l_n = 5 \text{ mm}$
Maximální mezera:	$l_{max} = 10 \text{ mm}$
Jmenovitý proud:	$I_n = 13 \text{ A}$
Maximální proud:	$I_{max} = 60 \text{ A}$ (proudové omezení)
Jmenovitá síla:	$F_n = 280 \text{ N}$
Maximální síla:	$F_{max} = \text{asi } 500 \text{ N}$

7. Závěr

V příspěvku jsou uvedeny některé poznatky týkající se návrhu a vlastností levitačních elektromagnetů. Problematika byla modifikována především pro aplikace v dopravě, ale většinu poznatků lze uplatnit i při konstrukci magnetických ložisek. Byla navržena vhodná kaskádní regulační struktura zabezpečující polohovou regulaci, která zabezpečí optimální průběh přechodových jevů. Pomocí odvozených vztahů byla navržena a postaven elektromagnet s výše uvedenými parametry na kterém byla zároveň ověřena navržená regulační struktura.

Literatura

- [1] Knöll H. : Power-Convertors for MAGLEV-Systems. Proc. of 37th conf. MOTORCON, Sept.1982.
- [2] Čeřovský Z., Pavelka J. : Nosnost magnetického ložiska. Sborník SYMEP'98, Ostrava, 23 - 25. června 1998, str.56 - 60.