

Konstrukce laboratorního modelu aktivního magnetického ložiska

Jaroslav Petráš*¹

¹ ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky, Technická 4, 160 00 Praha 6, Česká republika

² Doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Abstrakt

V tomto příspěvku bude probrána konstrukční stránka aktivního magnetického radiálního ložiska a všechny potřebné komponenty, které úzce souvisejí z fungováním takového zařízení. Klíčovými z těchto komponentů jsou akční členy, v tomto případě elektromagnety, které jsou zodpovědné za vytvoření magnetického pole, díky kterému je hřídel udržován v žádané poloze. Dalšími z těchto komponentů jsou senzory, v tomto případě senzory optické, které tuto polohu hřídele snímají s dostatečnou přesností ale i frekvencí. Pro tyto klíčové komponenty byly navrženy vlastní moduly, které zajišťují jejich přesnou polohu a jejich výroba byla zajištěna metodou 3D tisku z plastu PLA. V závěru bude nastíněna možnost užití v praxi a implementace do komplexnějších zařízení.

Klíčová slova: aktivní magnetické ložisko; konstrukce; elektromagnety; hystereze; optické senzory; laboratorní model

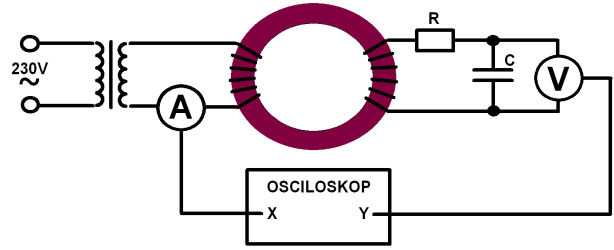
1. Aktivní magnetické ložisko

Aktivní magnetické ložisko je elektromagnetické zařízení, které je schopno udržet rotující hřídel v žádané poloze a to se zanedbatelnými třecími ztrátami. Další obrovskou výhodou je možnost použití v aplikacích, kde by zařízení mohlo přijít do styku s chemikáliemi, které by mohly rapidně snižovat životnost klasických ložisek. Kromě vhodnosti použití v chemickém průmyslu je magnetické ložisko ideální řešení do aplikací, kde by naopak mazivo z takovýchto ložisek mohlo kontaminovat své okolí, jako by tomu mohlo být v lékařství například při výrobě léků [1].

Náš laboratorní model prošel dlouhým vývojem, během kterého se měnila celková podoba jednotlivých funkčních prvků tak, aby zařízení fungovalo dle požadavků. Vzhledem k možnosti následné implementace tohoto modelu do komplexnějšího zařízení byla zvolena koncepce jednotlivých modulů. Ty by se následně mohly kombinovat a snadno instalovat ke komplexnějším zařízením. Prvním z nich byl navržen modul obsahující čtyři elektromagnety, tedy akční členy našeho modelu. Další modul obsahuje optické senzory snímající přesnou polohu procházejícího hřídele. Kromě senzorů obsahuje i potřebnou elektroniku pro jejich napájení a zesilování z nich získávaných signálů.

1.1. Elektromagnety

Jádro elektromagnetů není vytvořeno z plného materiálu, nýbrž z izolovaných tenkých plechů. To z toho důvodu, že v plném materiálu by takzvané vířivé proudy zeslabovaly budící magnetický tok a způsobovaly by zahřívání jádra. Tyto plechy byly pro pozdější návrhy podrobeny měření pro získání hodnot relativní permeability. Toto měření bylo provedeno na testovacím vzorku ve tvaru prstence, na kterém bylo navinuto dvoje vinutí. Testování probíhalo dle schématu viz obr. 1. Schéma měřícího obvodu při frekvenci 50 Hz [2].



Obr. 1. Schéma měřícího obvodu

Z naměřených hodnot proudu na primárním vinutí a napětí na vinutí sekundárním byla následně vypočtena magnetická indukce a intenzita magnetického pole. Magnetická indukce B [T] se vypočte dle následujícího vztahu [3].

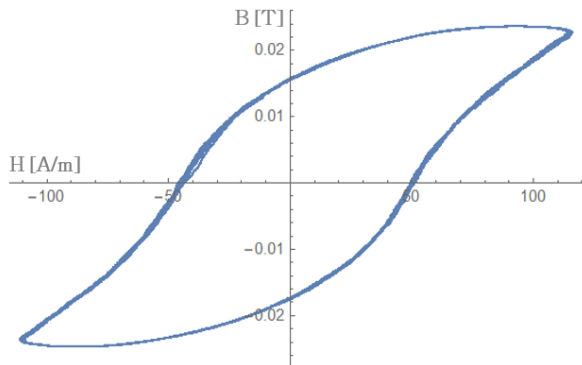
$$B = \frac{RC}{N_2 S} - u \quad (1)$$

Kde hodnoty odporu a kapacity integrátoru byly následující: $R = 50k\Omega$ a $C = 20nF$. Počet závitů na sekundárním vinutí byl $N_2 = 24$ a průřez jádra $S = 22mm^2$. Hodnoty napětí u byly získány z osciloskopu. Intenzita magnetického pole H [A/m] se vypočítá následovně [3].

$$H = \frac{IN_1}{2\pi r} \quad (2)$$

Kde počet závitů na primárním vinutí byl $N_1 = 24$ a střední obvod měřeného prstence $r = 47mm$. Hodnoty proudu I byly získány opět z osciloskopu. Z vypočtených hodnot magnetické indukce a intenzity magnetického pole lze sestavit hysterezní smyčku. Ta nám udává jaký vliv má působení vnějšího magnetického pole na magnetické schopnosti materiálu, který se v tomto poli nachází. [4] Hysterezní smyčka viz obr. 2.

*Kontakt na autora: jaroslav.petrash@fs.cvut.cz



Obr. 2. Hysterezní smyčka

Hodnoty magnetické indukce vycházejí velmi nízké. To je však způsobeno měřením při malých hodnotách proudů. Při vyšších se testovací jádro, které bylo příliš malé, začalo magneticky přesycovat. Důležitým parametrem je však relativní permeabilita μ_r , která vychází z následujících vzorců [5].

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3)$$

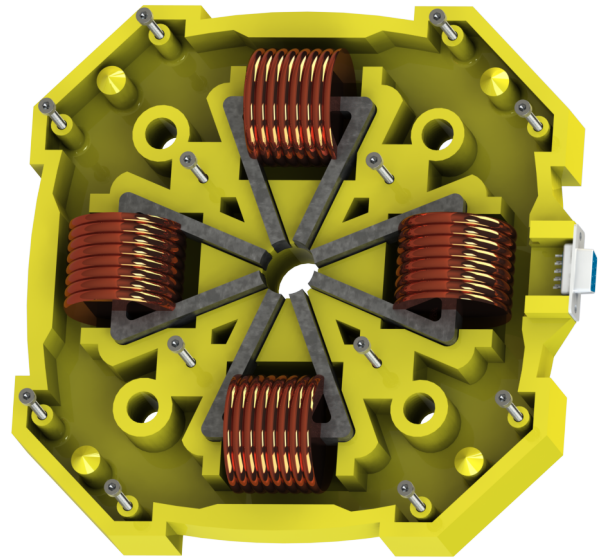
$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (4)$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \quad (5)$$

Kde μ_0 je permeabilita vakua. Výsledné μ_r vychází okolo 25 tisíc. Protože se feromagnetické látky vyznačují relativní permeabilitou mnohem větší než jedna, budou použité plechy s takovouto relativní permeabilitou pro tuto aplikaci ideální.

Náš laboratorní model obsahuje celkem čtyři elektromagnety vůči sobě otočené o 90 stupňů. Každý z nich se skládá z vinutí z měděného drátu o průřezu 2mm^2 , které je navinuto na jádru z těchto feromagnetických plechů laserem vyřezaných do trojúhelníkového tvaru se dvěma pólovými nástavci viz obr. 3. Magnetický obvod se dále uzavírá přes feromagnetický kroužek nalisovaný na hřídeli.

Aby byla zajištěna přesná poloha jednotlivých elektromagnetů, byl pro ně navržen speciální plastový modul. Vodiče od jednotlivých cívek jsou napojeny do společného konektoru, díky kterému je zajištěna snadná manipulace se zařízením a rychlé připojení napájecího kabelu. Na tento návrh se můžeme podívat na obr. 3. Modul s elektromagnety.

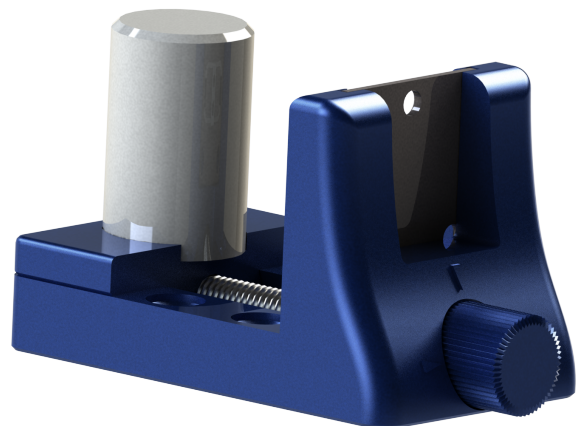


Obr. 3. Modul s elektromagnety

1.2. Senzory polohy

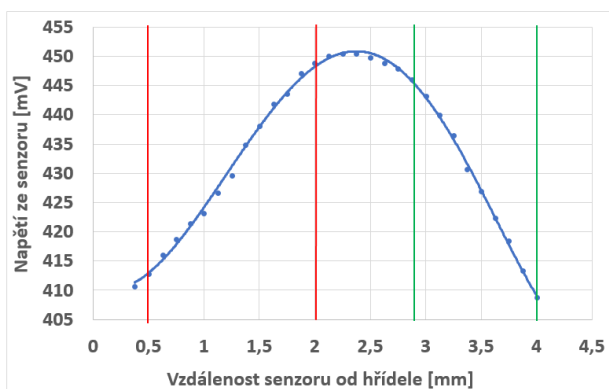
Snímání polohy lze zajistit celou řadou nejrůznějších senzorů. Podmínkou pro snímání polohy hřídele v aktivním magnetickém ložisku je jednak přesnost ale také rychlost snímání. Nabízejí se tedy senzory indukční nebo optické. V našem případě byly zvoleny právě optické, konkrétně SMD senzory HSDL-9100 o rozměrech $7 \times 3 \times 3$ milimetrů. Dle datasheetu mají tyto senzory dvě relativně lineární pracovní oblasti. První z nich je v oblasti od nuly do pěti milimetrů od měřeného objektu, kdy se s rostoucí vzdáleností zvyšuje napětí získávané ze senzoru. Druhá z oblastí je poté od pěti do deseti milimetrů, kdy se naopak s rostoucí vzdáleností napětí získané ze senzoru snižuje.

Hřídel našeho modelu je vyroben z hliníku, který by mohl světlo ze senzorů odrážet do nežádoucích směrů. Z tohoto důvodu je v místě měření na hřídeli nasazen silonový kroužek, který je oproti hliníku matný. Abychom však znali přesnou charakteristiku zvolených senzorů, bylo proto navrženo testovací zařízení, které můžeme vidět na obr. 4. Zařízení na měření charakteristiky senzorů.



Obr. 4. Zařízení na měření charakteristiky senzorů

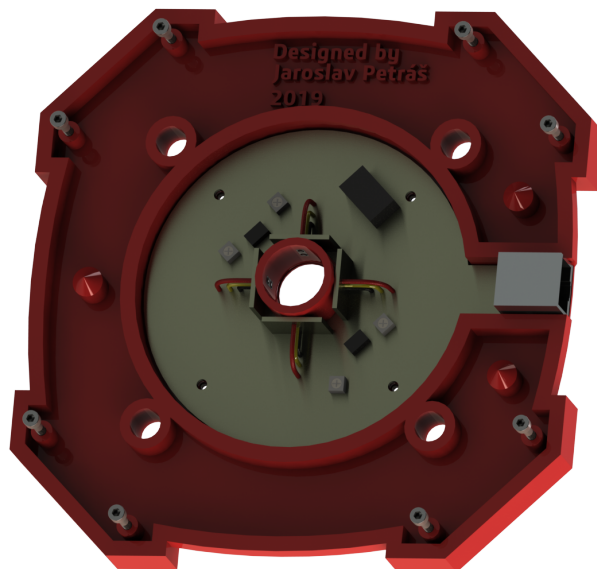
Zařízení umožňuje pevné uchycení senzoru a následným otáčením koncové části šroubu zajišťuje rovnoměrný pohyb silonového válečku směrem k nebo od senzoru. Přesným voltmetrem lze měřit hodnoty napětí, které prochází přes fotodiodu senzoru a pohybuje se v řádech milivoltů. Z takto naměřených dat pomocí našeho zařízení byla zjištěna značná neshoda s datasheetem, který výrobce přikládá k sensorům. Přijatelné lineární oblasti použití jsou pro naši aplikaci od 0,5 milimetru do 2, kde získávané napětí roste s rostoucí vzdáleností. Druhá z oblastí je od 2,8 do 4 milimetrů, kde napětí ze senzoru s rostoucí vzdáleností klesá. Naměřená data z optických senzorů včetně vyznačených relativně lineárních oblastí jsou zobrazena na obr. 5.



Obr. 5. Naměřená data z optických senzorů

Pro náš laboratorní model byla zvolena první z naměřených pracovních oblastí, tedy 0,5 až 2 milimetry hřídele od senzoru. Následně bylo možno navrhnout druhý z modulů, tedy modul obsahující optické senzory a k nim potřebnou elektroniku. Co se týče počtu potřebných senzorů, tak byly zvoleny čtyři. Je to z toho důvodu, že hřídel má průřez kruhového tvaru. Tudíž posune-li se hřídel řekněme v ose "x", nenaměří změnu polohy pouze senzor snímající polohu v ose "x", ale i senzor snímající polohu v ose "y". Právě kvůli tomuto faktu je výhodné použít senzory čtyři, vždy dva na jednu osu, čímž se tento fakt eliminuje. Navíc při diferenciálním zapojení senzorů do řídicího automatu se hodnoty ze senzorů v jedné ose od sebe odečítají a zůstává jen rozdíl mezi nimi, tedy odchylka od středové polohy. S touto hodnotou lze poté velmi jednoduše pracovat v následujícím řízení.

Optické senzory je zapotřebí upevnit do přesné polohy stejně tak jako elektromagnety, což je opět zajištěno návrhem speciálního plastového modulu. Ten obsahuje desku plošného spoje, na které jsou umístěny veškeré potřebné komponenty zajišťující napájení jednotlivých senzorů správnou napětovou úrovní, dále komponenty zesilující jejich výstupní signál a v neposlední řadě trimry na jemné doladění zesílení každého senzoru. Připojení tohoto modulu je zajištěno pomocí konektoru, kde je pro tento účel zvolen konektor RJ-45, který se používá pro připojení počítačů k etherнету. Aby se zde minimalizovalo rušení vznikající od silnoproudé elektroniky v modulu elektromagnetů, je kruhová deska tištěného spoje ze zadní strany tvořena mědí, která je připojená k zemnicí napětové úrovni. Na obr. 6. je celý tento modul zobrazen.

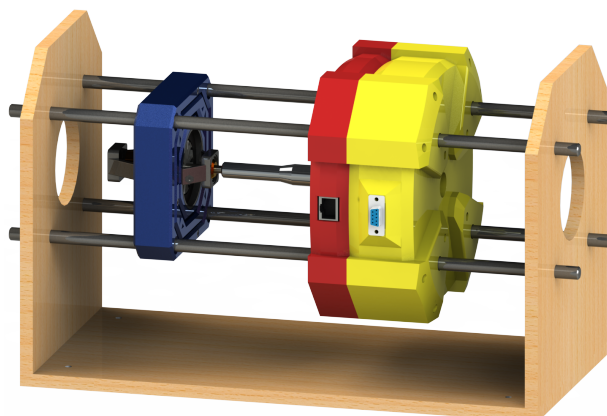


Obr. 6. Modul s optickými senzory

2. Kompletní laboratorní model

Aby bylo možné předvést funkci zařízení, bylo potřeba pro ložisko navrhnout speciální stojan, ve kterém bude pevně uchyceno a to souose s volně uloženým motorem a hřídelí, která ložiskem prochází. Souosost je zde zajištěna pomocí vodorovně uchycených závitových tyčí M10, na kterých jsou nasunuty jednotlivé moduly ložiska společně s motorem. Ten se může hýbat ve dvou osách, čímž simulujeme volnost hřídele v reálném zařízení. Na celkový laboratorní model se podívejme na obr. 7.

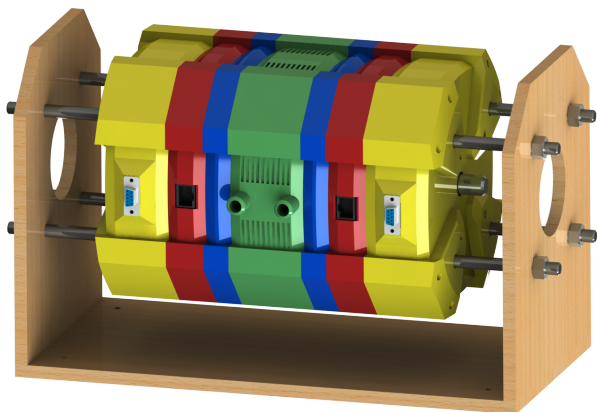
Modrá část je pohyblivé uložení stejnosměrného zkušebního motoru. Červená část je modul s optickými senzory a k nim potřebnou elektronikou. Na jejím boku je konektor RJ-45, pomocí kterého se senzory připojují k řídicímu automatu. Poslední žlutá část je modul se samotnými elektromagnety, na jejímž boku je devítipinový konektor CAN 9, kde čtyři dvojice pinů využívají elektromagnety a poslední pin je určen pro stínění.



Obr. 7. Laboratorní model

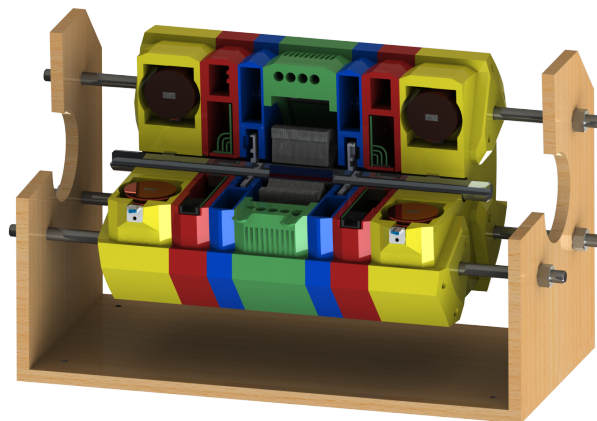
3. Další vývoj

Tímto laboratorním modelem však vývoj nekončí. Pracuje se již na koncepci komplexnějšího zařízení, které by mělo spojit toto aktivní radiální magnetické ložisko s vodou chlazeným BLDC motorem a pasivními axiálními ložisky s permanentními magnety. Toto zařízení by se již mělo být schopno točit bez jakéhokoliv mechanického kontaktu, tedy se zanedbatelnými třecími ztrátami. Návrh tohoto komplexního zařízení je zobrazen na obr. 8. Modré části zde představují moduly s axiálními ložisky, které jsou pasivní, tedy bez možnosti řízení. Jsou tvořeny neodymovými permanentními magnety. Zelená část představuje vodou chlazený BLDC motor, který bude celému zařízení dodávat točivý moment.



Obr. 8. Koncepce komplexního zařízení

Jak jednotlivé komponenty vypadají v řezu a co všechno obsahují je vidět na následujícím obr. 9. Vzduchová mezera mezi hřídelem a vnitřní částí modulů se pohybuje od 1 do 2 milimetrů. V místě elektromagnetů má hřídel vzduchovou mezera nejmenší a to právě 1mm. Největší vzduchová mezera je mezi hřídelem a statoru motoru, která činí právě 2mm. To z toho důvodu, že dosedne-li hřídel na doraz spodních elektromagnetů, stále zůstane bezpečná mezera od pólových nástavců statoru motoru, aby nedocházelo k jejich opotřebování.



Obr. 9. Koncepce komplexního zařízení v řezu

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu projektu Doc. Ing. Martinovi Novákovi Ph.D. za odborné vedení a cenné rady během konstrukčních návrhů. Dále bych chtěl poděkovat mému kolegovi Bc. Janu Kroftovi, který na projektu pracuje se mnou. Jeho prací bylo navržení desek plošných spojů použitých k ovládání cívek a získávání signálů ze senzorů. Dále bych chtěl poděkovat své rodině, která musela tolerovat hodiny hluku, kdy jsem tiskl potřebné díly na 3D tiskárně.

Seznam zkratek

BLDC	Brushless DC motor
PLA	Polylactic acid
SMD	Surface Mount Device

Literatura

1. *Magnetická ložiska* [online] [cit. 2019-03-26]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/magneticka-loziska.html>.
2. *Vířivé proudy* [online] [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/elektromagneticka-indukce/virive-foucaultovy-proudy>.
3. FIALA Vrožina, Hercik. *Elektrotechnická měření I*.
4. *Magnetická křivka* [online] [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/459>.
5. *Relativní permeabilita* [online] [cit. 2019-03-25]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/353/07.html>.