

Pasivní magnetické ložisko

Příprava a test pro hybridní magnetické ložisko

Martin Procházka
Fakulta strojní
České vysoké učení technické v Praze
Praha, Česká republika
martin.prochazka@fs.cvut.cz

Abstrakt—V tomto projektu bylo řešeno pasivní magnetické ložisko, testovací přípravek pro ložisko a statické silové testy ložiska v rámci přípravy přeměny pasivního magnetického ložiska na hybridní magnetické ložisko (pasivní magnetické ložisko s aktivním tlumením kmitání).

Klíčová slova—pasivní magnetické ložisko, test magnetického ložiska, hybridní magnetické ložisko

I. ÚVOD

Magnetické ložisko je ložisko, kde rotující část je držena ve středu ložiska pomocí magnetického pole. Vnitřní a vnější kroužek ložiska (nebo vnější část a hřídel) se navzájem nedotýkají, je mezi nimi vzduchová mezera. [1]

Magnetická ložiska se dělí podle principu funkce na pasivní a aktivní. U pasivních magnetických ložisek je hřídel držena ve středu ložiska pomocí odpuzivých magnetických sil mezi vnitřním a vnějším kroužkem – permanentním magnetem. U aktivního magnetického ložiska se vystředění hřídele v ložisku děje pomocí přitažlivé magnetické síly mezi aktivně řízenými elektromagnety ve vnější části ložiska a feromagnetickou hřídelí. [1]

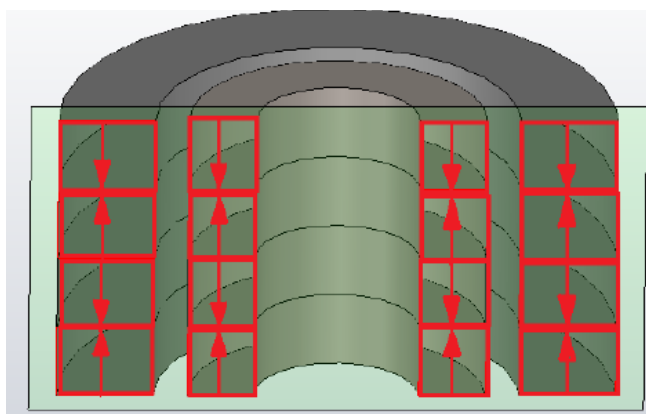
Tato ložiska mají několik výhod, převážně kvůli absenci tření [1]:

- Nemusejí se mazat
- Nedochozí zde k opotřebení a vzniku prachových částic a mají tedy vysokou životnost
- Mají zanedbatelný mechanický odpor, tudíž jsou zde zanedbatelné ztráty mechanické energie.
- Jsou vhodné pro velmi vysoké otáčky

Mají ale také své nevýhody [1] [2]:

- Nízká nosnost vzhledem k velikosti
- Omezená provozní teplota, pokud jsou použité permanentní magnety (např. některé neodymové magnety ztrácí své vlastnosti už při 80°C)
- Spotřeba elektrické energie u aktivních magnetických ložisek
- Relativně složité řízení aktivního magnetického ložiska
- Náchylnost ke kmitům a vibracím u pasivního ložiska

Je také možné tyto způsoby zkombinovat a vytvořit tzv. hybridní magnetické ložisko, což bude cílem tohoto projektu.



Obr. 1: Magnety v pasivním magnetickém ložisku [2]

Hybridní magnetické ložisko je pasivní magnetické ložisko doplněné o aktivní tlumení kmitů a vibrací. Oproti aktivnímu ložisku se předpokládá menší zástavbový prostor, jednodušší řízení a nižší spotřeba elektrické energie.

II. PASIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO

A. Důvod měření pasivního magnetického ložiska

Pro vytvoření hybridního magnetického ložiska bylo potřeba zkonstruovat nejdříve pasivní magnetické ložisko a na testovacím/měřicím přípravku je proměřit. Podle změřených dat následně proběhne vytvoření matematického modelu ložiska, návrh řízení a výběr a dimenzování hardwarových prvků aktivního tlumení (např. dimenzování tlumících elektromagnetů).

B. Pasivní magnetické ložisko - popis

Pro tento projekt bylo vybráno provedení magnetického ložiska s osmi neodymovými axiálně polarizovanými prstencovými magnety. Magnety jsou po čtyřech ve vnějším i vnitřním ložiskovém kroužku a jsou otočeny póly proti sobě, čímž tvoří tzv. Halbachovo uspořádání (obr. 1), pomocí kterého lze zesílit magnetické pole v místě kde potřebujeme (viz zdroj [2]). V praxi se toto projeví vyšší nosností ložiska, ale také vyšší citlivostí ložiska na axiální posunutí ložiskových kroužků. Zástavbové rozměry ložiska jsou vnitřní průměr $r=10$ mm, vnější průměr $R=40$ mm a hloubka $h=24$ mm. [2]

III. TESTOVACÍ PŘÍPRAVEK

A. Požadavky

Na testovací přípravek byly kladeny tyto požadavky:

- Vytvoření ložiskového domečku tak, aby se magnety nemuseli lepit a ložisko bylo rozebíratelné. Použité magnety jsou velice křehké a při sestavování, či měřicích pokusech se může stát, že bude potřeba vyměnit poškozený magnet.
- Upevnění testovací hřídele zajišťující nastavitelnou vzájemnou axiální polohu ložiskových kroužků a zároveň umožňující jejich vzájemný volný radiální pohyb.
- Volný zástavbový prostor pro následné připojení vysokootáčkového motoru.
- Variabilní sestavení pro budoucí aplikaci různých prvků aktivního tlumení vibrací.

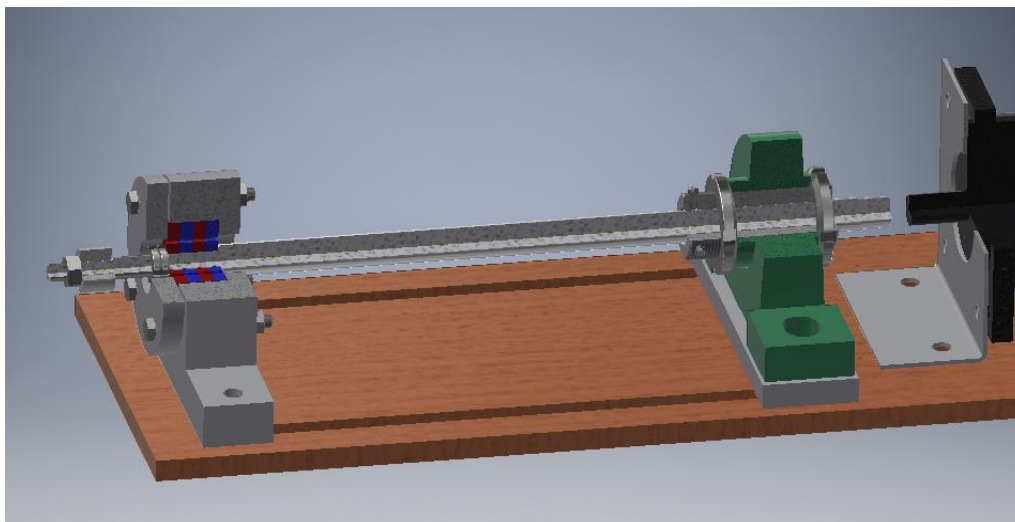
B. Realizace

Provedení přípravku bylo realizováno na základě výše zmíněných bodů. Domeček ložiska je sešroubován z plastových dílů vytištěných na 3D tiskárně. Magnety vnitřního kroužku ložiska jsou navlečeny přímo na hřídeli a zajištěny z jedné strany osazením a z druhé strany dvěma KM maticemi. Závit pro KM matice je delší z důvodu snadnější montáže odpuzujících se magnetů. Hřídel je na druhém konci zajištěna v naklápěcím valivém ložisku s vložkou umožňující přesné axiální nastavení hřídele pomocí dvou KM matic.

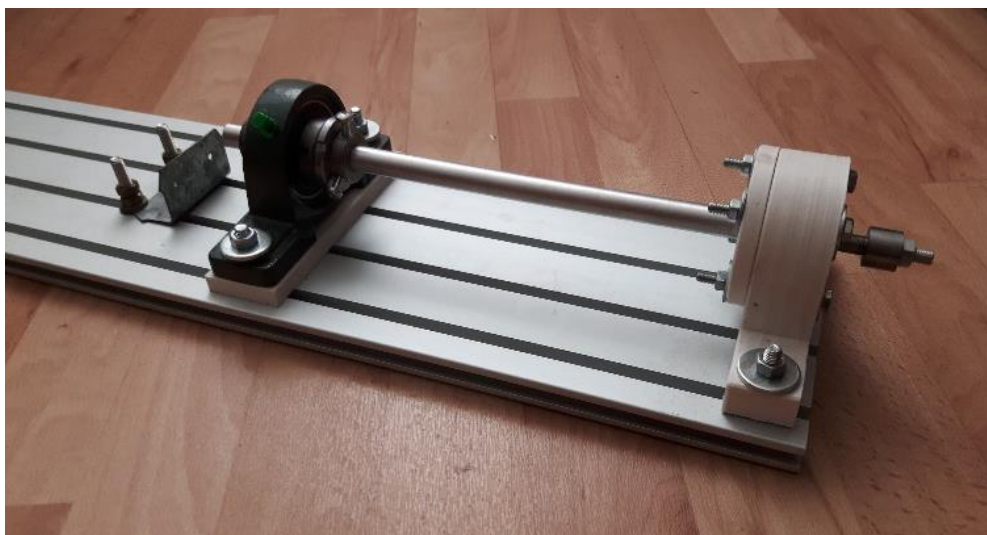
Hřídel má konec na straně valivého ložiska upraven pro připojení pružné spojky a vysokootáčkového motoru. Na konci bližším magnetickému ložisku je připevněn feromagnetický váleček, který bude přitahován magnety aktivního tlumení (samotná hřídel je z hliníkové slitiny).

Na obr. 2 je předběžný návrh přípravku s viditelnými ložiskovými magnety (modře a červeně). Na obr. 3 je už realizace přípravku s bílým domečkem magnetického ložiska a zeleným valivým ložiskem.

V průběhu měření byl přípravek dle potřeby doplněn dorazy pro měření polohy hřídele, případně držákem pro úchylkoměr.



Obr. 2: Návrh testovacího přípravku

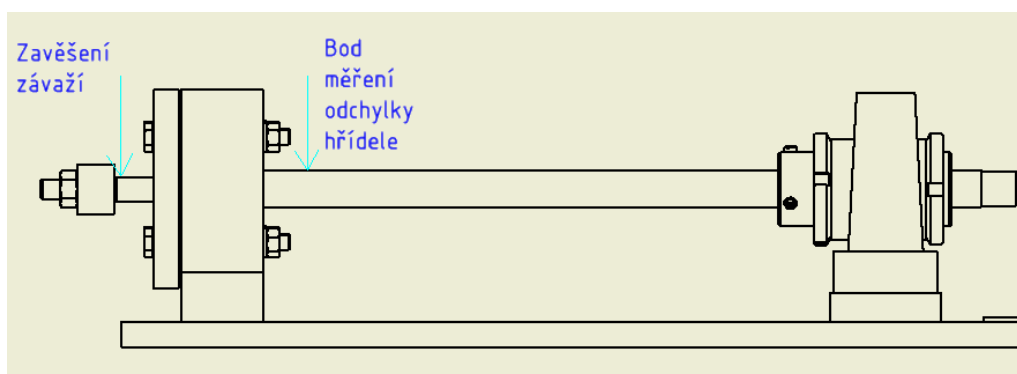


Obr. 3: Realizace testovacího přípravku

IV. STATICKÉ MĚŘENÍ SILOVÉ CHARAKTERISTIKY LOŽISKA

A. Statické radiální měření

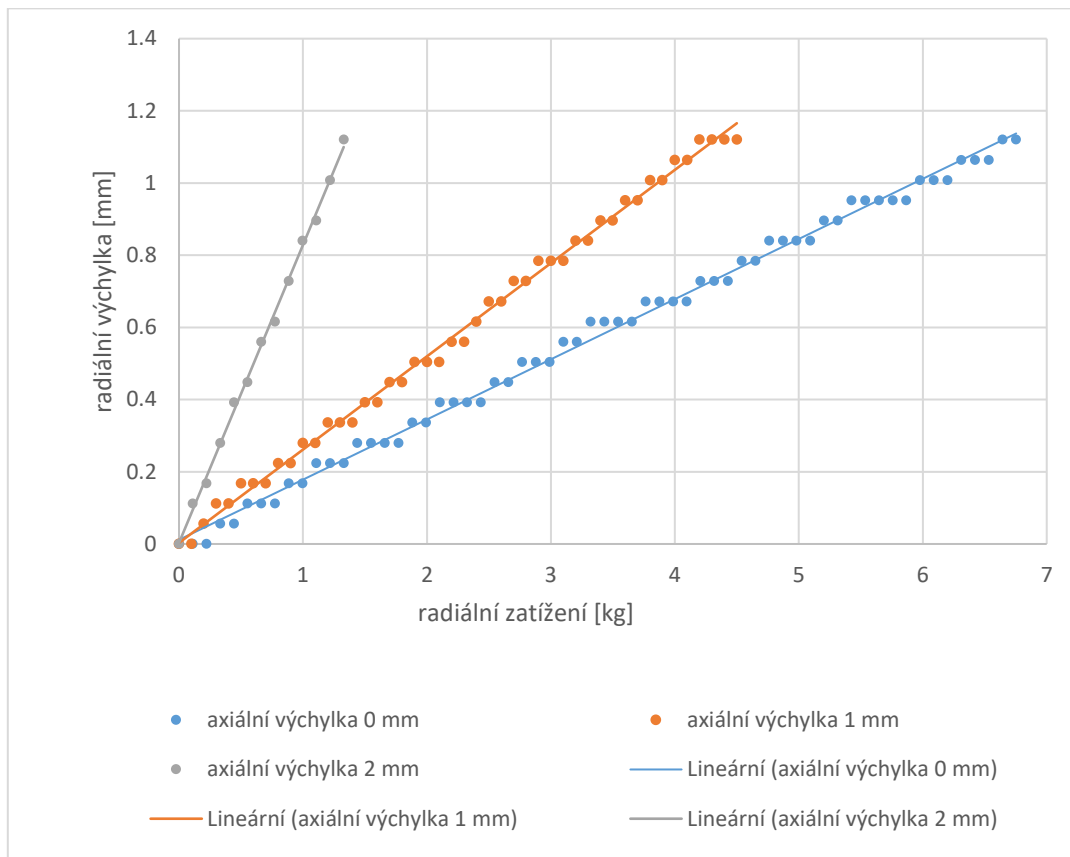
Nejdůležitějším měřením pro následnou realizaci hybridního ložiska je změření průběhu radiální výchylky hřídele v závislosti na jejím zatížení. V průběhu měření bylo na konec hřídele u magnetického ložiska zavěšováno závaží po 100 gramech a při tom byla měřena radiální výchylka hřídele (obr. 4). Jelikož není možné závaží ani měření umístit do středu ložiska, byly naměřené hodnoty i hmotnost závaží přepočítána do místa středu ložiska.



Obr. 4: Schéma radiálního měření

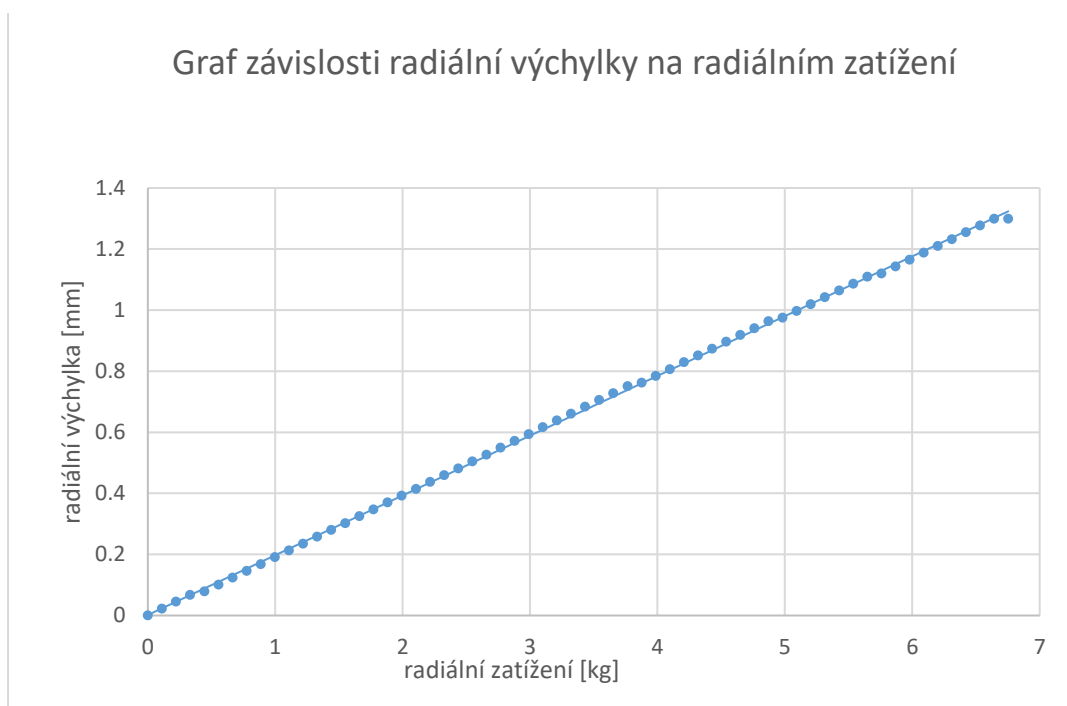
Měření proběhlo třikrát, pokaždé pro jiné axiální nastavení hřídele. Poprvé pro přesné nastavení ložiskových kroužků proti sobě a následně s axiální výchylkou 1 a 2 mm. Měření bylo provedeno od nulové zátěže až do zatížení, kdy se vnitřní a vnější ložiskové kroužky vzájemně dotýkaly.

Z grafu (obr. 5), kde jsou taktěž zobrazeny porovnávací přímky pro zhodnocení linearity, vyplývá, že průběh výchylky je přibližně lineární a že axiální výchylka má značný vliv na nosnost ložiska.



Obr. 5: Graf závislosti radiální výchylky hřídele na radiálním zatížení

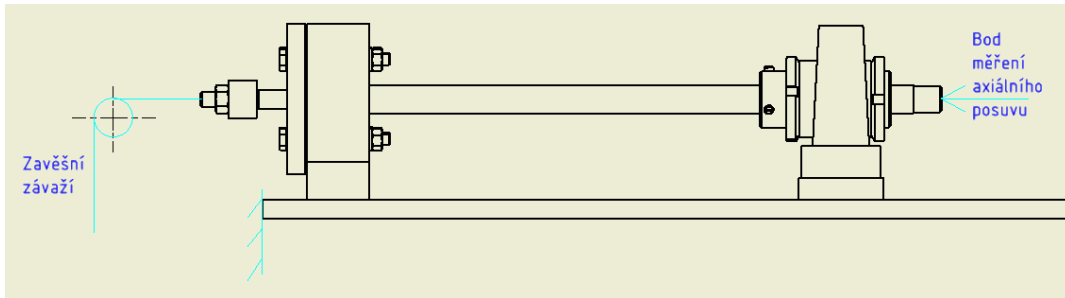
Vzhledem k nepříliš podrobnému průběhu závislosti na obr. 5 bylo provedeno ještě jedno přesnější měření bez axiální výchylky, které lineární závislost jasně potvrdilo (obr. 6).



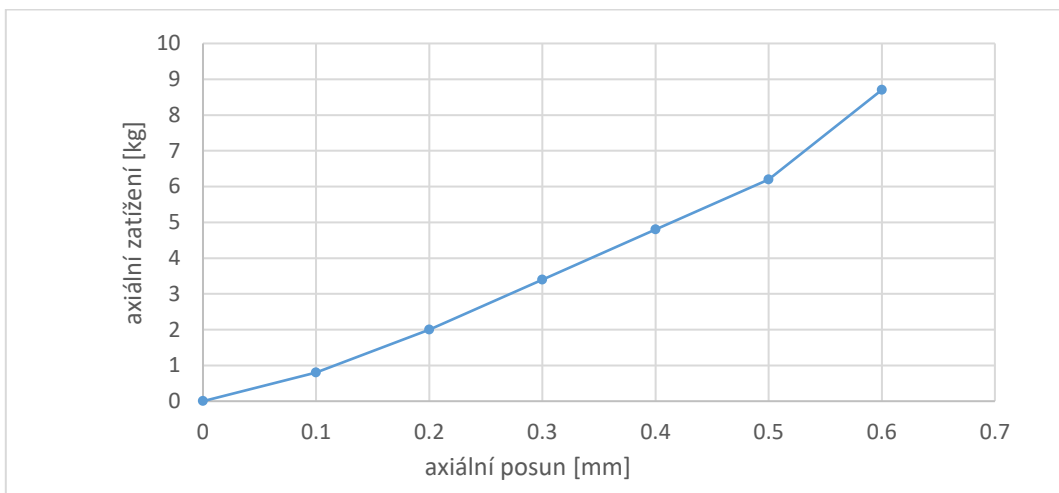
Obr. 6: Graf závislosti radiální výchylky na radiálním zatížení

B. Axiální měření

Vzhledem k relativně velikým axiálním silám v ložisku při axiální výchylce ložiskových kroužků bylo shledáno jako vhodné změřit i průběh síly v závislosti na této výchylce (obr. 7). Změřené výsledky mohou být potřebné při sestavování a úpravách ložiska a při dimenzování axiálního zajištění hřídele, zvláště pokud nejsme schopni zaručit přesnou axiální pozici ložiskových kroužků. Výsledný graf je na obr. 8. Kvůli mechanickým omezením dodatečného měřícího přípravku nebylo možno změřit sílu při větší axiální odchylce jak 0,6 mm, i přesto je zde však potvrzena nutnost přesného nastavení ložiskových kroužků, pokud nechceme příliš axiálně zatěžovat pomocné ložisko.



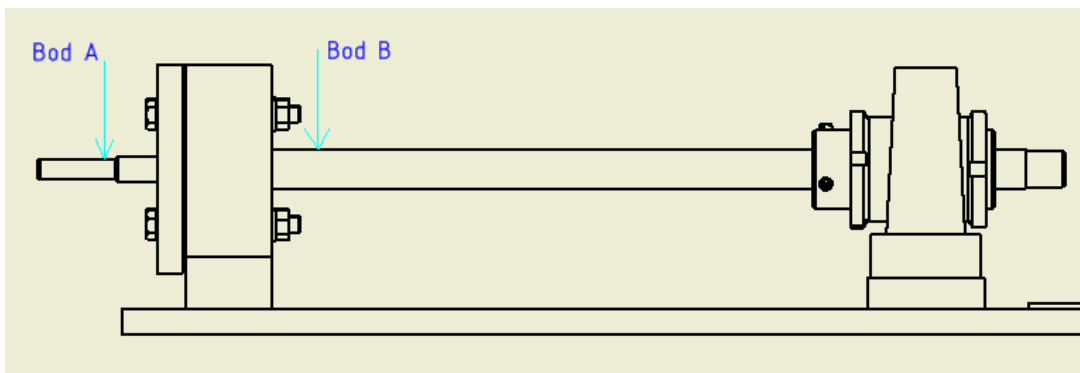
Obr. 7: Schéma axiálního měření



Obr. 8: Graf závislosti axiálního zatížení na axiálním posuvu

C. Radiální měření při rotaci

U ložiska bylo otestováno také chování při rotaci. Nejprve bylo zjištěno obvodové házení v místě A (0,01 mm) i v místě B (0,2 mm) (obr. 9).



Obr. 9: Schéma měření při rotaci

Dále byla měřena radiální výchylka v závislosti na zatížení při rotaci při dvou různých rychlostech. Z následující tabulky vyplývá, že tyto hodnoty se neliší v rámci nejistoty od hodnot při statickém měření. Při měření nebyla zjištěna změna velikosti

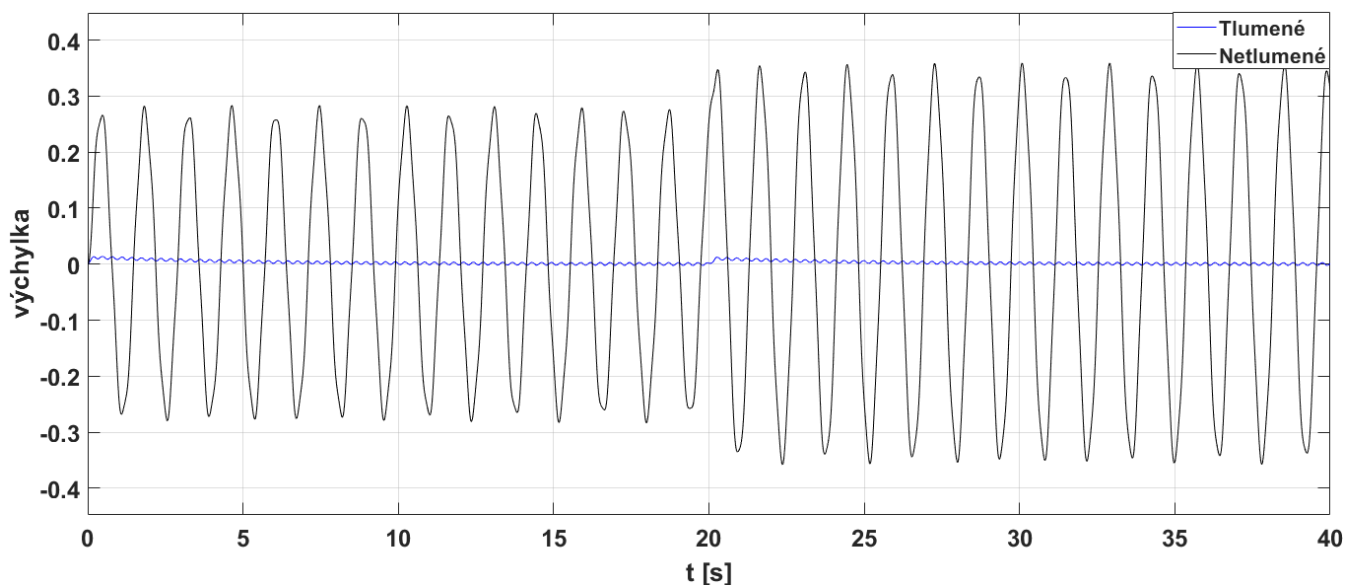
házení hřídele. Měření je potřeba provést ještě se silnějším a rychlejším laboratorním motorem (zde byl použit slabý „hobby“ motor a motor ze stavebnice MERKUR).

Tabulka měření radiálních výchylek ložiska při rotaci			
	rychlost 800 ot/s	rychlost 50 ot/s	statická výchylka [mm] ±0,01
zatížení [kg] ±0,01	průměrná výchylka [mm] ±0,02	průměrná výchylka [mm] ±0,02	
0	0	0	0
0,5	0,09	0,1	0,09
1	0,19	0,2	0,19
1,5	0,29	0,31	0,29
2	0,38	0,41	0,39
2,5	0,47	0,52	0,49
3	0,58	0,62	0,59
3,5	0,7	---	0,68
4	0,79	---	0,78

V. MOŽNOST TLUMENÍ VIBRACÍ S VYUŽITÍM DERIVAČNÍ SLOŽKY PID REGULÁTORU

Vzhledem k lineárnímu průběhu radiální výchylky při radiálně působící síle byla zvažována možnost tlumení vibrací pouze pomocí derivační složky PID regulátoru, což by umožňovalo relativně jednoduchou implementaci. Celý systém (pasivní ložisko + aktivní tlumení) by představoval PD regulátor, kde derivační složku by zajišťovali elektromagnety aktivního tlumení a proporcionální složku by vzhledem k změřenému lineárnímu průběhu zajišťovalo pasivní magnetické ložisko. Předpokládá se ovšem, že nevadí trvalá regulační odchylka v případě působení statické síly (např. gravitační síla).

Vzhledem k podobnosti s lineární pružinou bylo tlumení vibrací otestováno na jednoduchém modelu lineární pružiny. Z výsledných grafů bylo zjištěno, že silový pulz toto tlumení dokáže rychle ztlumit bez jakýchkoli zbytkových kmitů, ale při testu kmitání hřídele při periodické harmonické působící síle (simulace neváhy na hřídeli) je v grafu vidět značné ztlumení kmitů, ale nelze je tímto způsobem zcela odstranit. V grafu na obr. 10 je zobrazeno chování hřídele při kombinaci dvou pulzů (v 0. a 20. sekundě) a periodické harmonické síly. Při dalším testování bude třeba také vzít v úvahu možné nelinearity senzorů a elektromagnetů aktivního tlumení, které bude třeba kompenzovat.



Obr. 10: Graf reakce hřídele na silové pulzy (0 a 20 s) a periodickou sílu

VI. DEMONSTRAČNÍ POMŮCKA

Pro demonstraci chování magnetického ložiska a chování hřídele ve dvou magnetických ložiskách byla v rámci projektu také sestavena jednoduchá demonstrační pomůcka. Na pomůcce (obr. 11) je použito šest neodymových magnetů, které tvoří dvě

jednoduchá pasivní magnetická ložiska. Hřídelka je v axiálním směru zavěšena na vlákně, což zajišťuje axiální ukotvení a zároveň téměř neomezený radiální pohyb.



Obr. 11: Demonstrační pomůcka

VII. ZÁVĚR

V průběhu práce na projektu byly stanoveny požadavky na testovací přípravek s pasivním magnetickým ložiskem, podle kterých byl přípravek s ložiskem následně zkonstruován. Na ložisku proběhlo statické měření silových vlastností, které budou následně využity při návrhu aktivního tlumení. Předběžně byla zvážena možnost tlumení vibrací pomocí D složky PID regulátoru.

Pro vytvoření hybridního ložiska bude třeba splnit ještě tyto cíle:

- Výběr a dimenzování senzorů a aktivních prvků – elektromagnetů.
- Vytvoření matematického modelu včetně modelu aktivních prvků a senzorů.
- Výběr způsobu řízení aktivního tlumení.
- Vlastní realizace a test celého hybridního magnetického ložiska.

VIII. ZDROJE

- [1] ŠAMÁNEK, O. Magnetická Ložiska. VUT v Brně, FSI. Copyright © [cit. 18.09.2020]. Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=531
- [2] MYSTKOWSKI Arkadiusz, AMBROZIAK Leszek, INVESTIGATION OF PASSIVE MAGNETIC BEARING WITH HALBACH-ARRAY, Bialystok University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering Wiejska 45 C, 15-351 Bialystok.
- [3] Bezpečnostní typy - Unimagnet.cz. Neodymové magnety - Unimagnet.cz [online]. Copyright © 2020 UNIMAGNET [cit. 21.09.2020]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/bezpecnost/>