

AKTIVNÍ MAGNETICKÉ LOŽISKO ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta strojní

Ústav přístrojové a řídicí techniky

autor

PAVEL BLAŽEK

Prosinec 2020

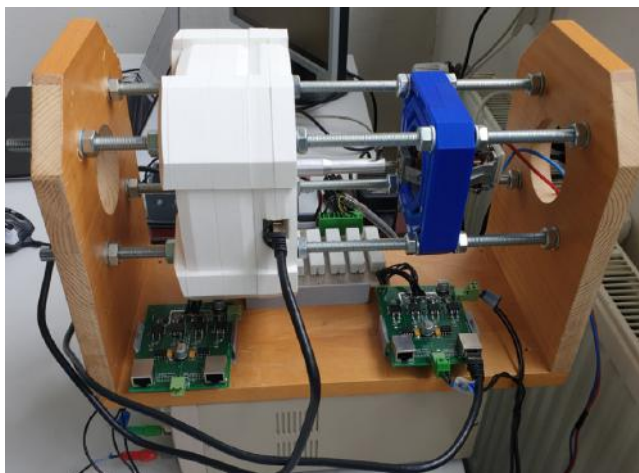
V Praze

1 Úvod

Tato zpráva je shrnutím výsledků práce v rámci studentské grantové soutěže s názvem *Vysokorychlostní elektrické stroje pro automobilové aplikace – řízení, výkonová elektronika*. Mým úkolem bylo pokračovat ve spolupráci s Ing. Janem Kroftou 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.

2 Původní prototyp

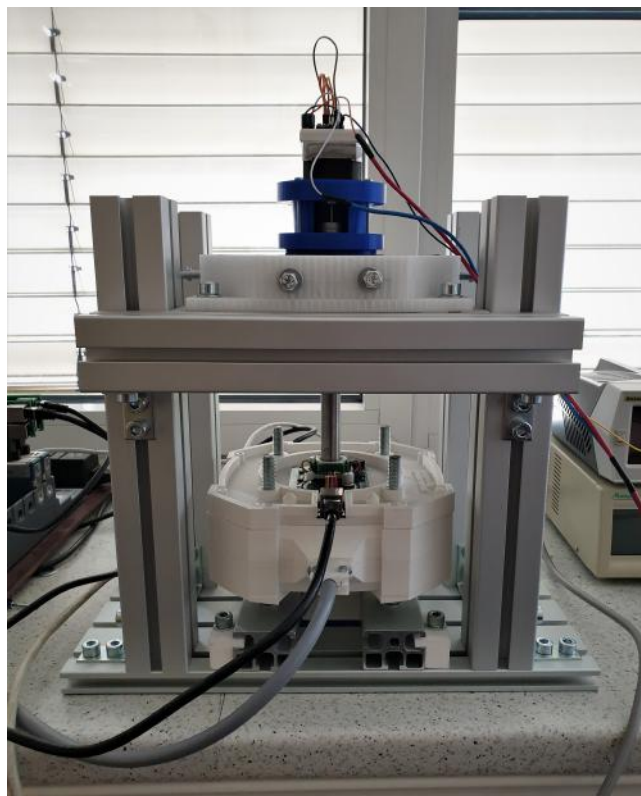
V počátku mého působení na projektu, byl školní prototyp radiálního aktivního magnetického ložiska ve stavu, kdy byla dokončena celková konstrukce ložiska, příslušná elektronika i program v LabVIEW FPGA. Regulace polohy hřídele však fungovala pouze pokud se hřídel netočil. Po roztočení došlo k destabilizaci systému. Na obrázku 1 je k vidění původní konstrukce.



Obrázek 1: Původní model - ložisko (bíle), kardánův kloub (modře)

V dřevěném rámu byly na společných závitových tyčích nasazeny ložisko i kardánův kloub, ve kterém byl uložen DC motor. Kloub umožňoval naklápění motoru s hřídelem. Hřídel byla nasazena na motoru bez použití spojky a veškeré navržené komponenty, tedy hlavní pouzdro ložiska a kardánův kloub, byly vytištěny na 3D tiskárně z plastu, což bylo jednou z příčin vzniku konstrukčních nepřesností.

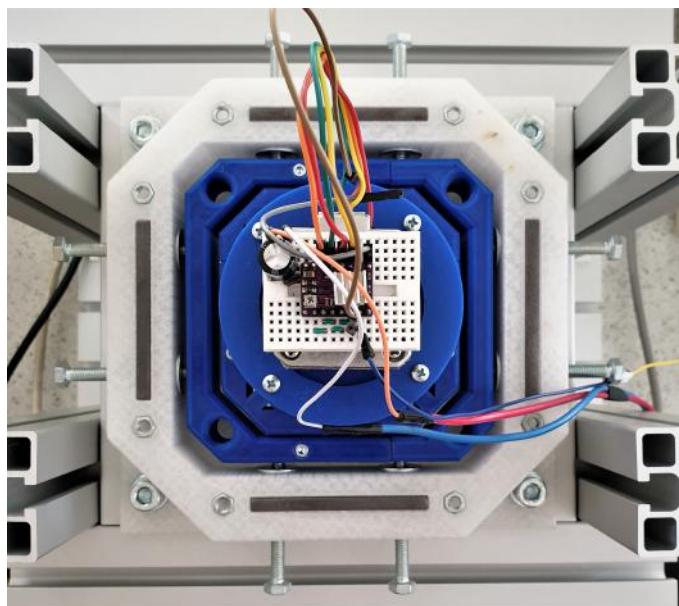
3 Konstrukční úpravy



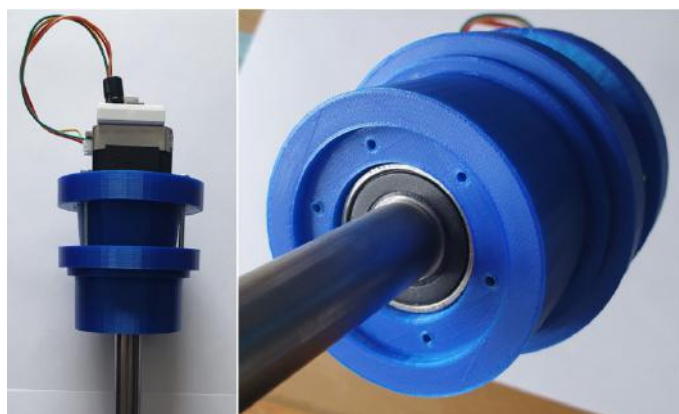
Obrázek 2: Nová sestava

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 obrázek 4. 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. Později se však ukázalo, že konstrukce nového závěsu má problémy s váhou a s nevhodně umístěným těžištěm.



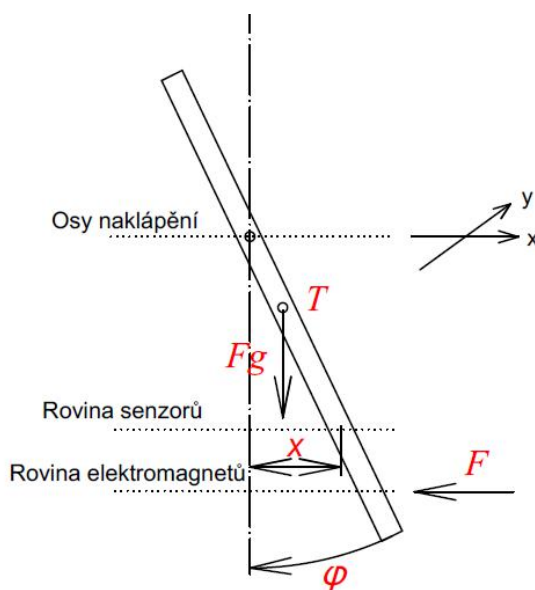
Obrázek 3: Centrovací hlava



Obrázek 4: Nový závěs a uložení hřídele

4 Matematické modelování

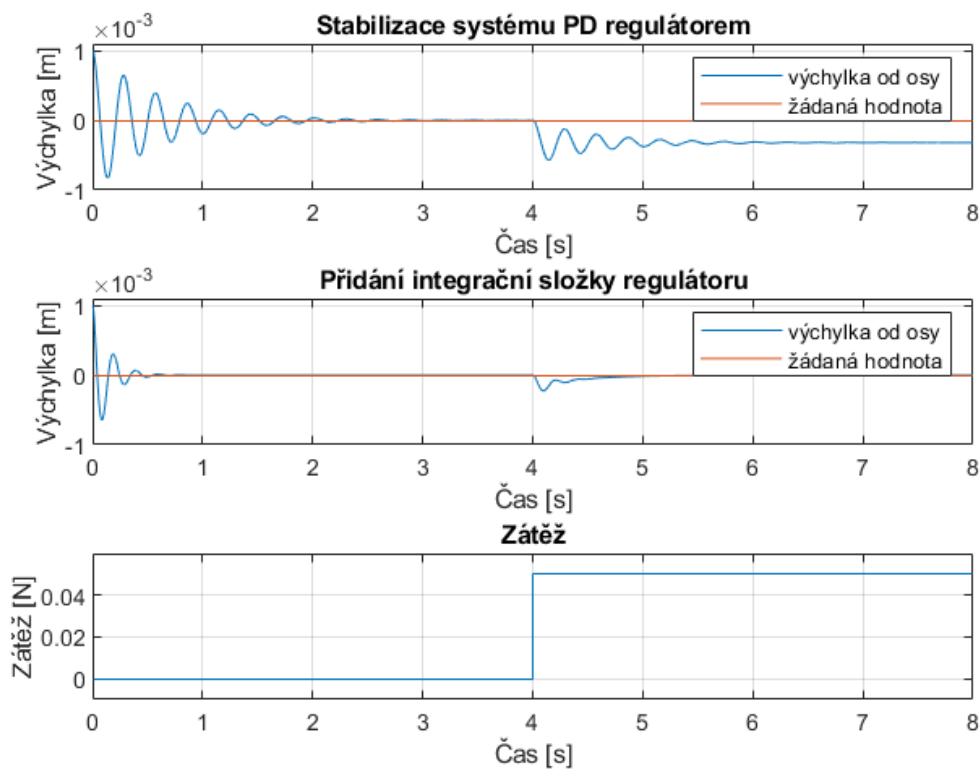
Novou konstrukci bylo potřeba matematicky namodelovat pro návrh nového řízení. Na obrázku 5 je schéma nového systému, který je velice zjednodušený. V rovině, ve které leží osy naklápění, je již zmíněný kardanův kloub. Těžiště se podle výpočtů nachází 21 mm od této roviny. Rovina senzorů je pak vzdálena 140 mm a elektromagnety 180 mm od osy naklápění. Hmotnost v těžišti je 800 g. Model byl vytvořen pouze pro jednu osu, protože druhá osa je teoreticky stejná.



Obrázek 5: Schéma - nový model

Jako simulační nástroj jsem používal prostředí MATLAB a Simulink. Po vyjádření přenosu nového systému jsem provedl řadu simulací stabilizace ložiska za pomoci PD regulátoru a jeho řízení PID regulátorem (respektive dvěma decentralizovanými regulátory pro dvě osy).

V grafu na obrázku 6 je zobrazeno chování stabilizovaného 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.

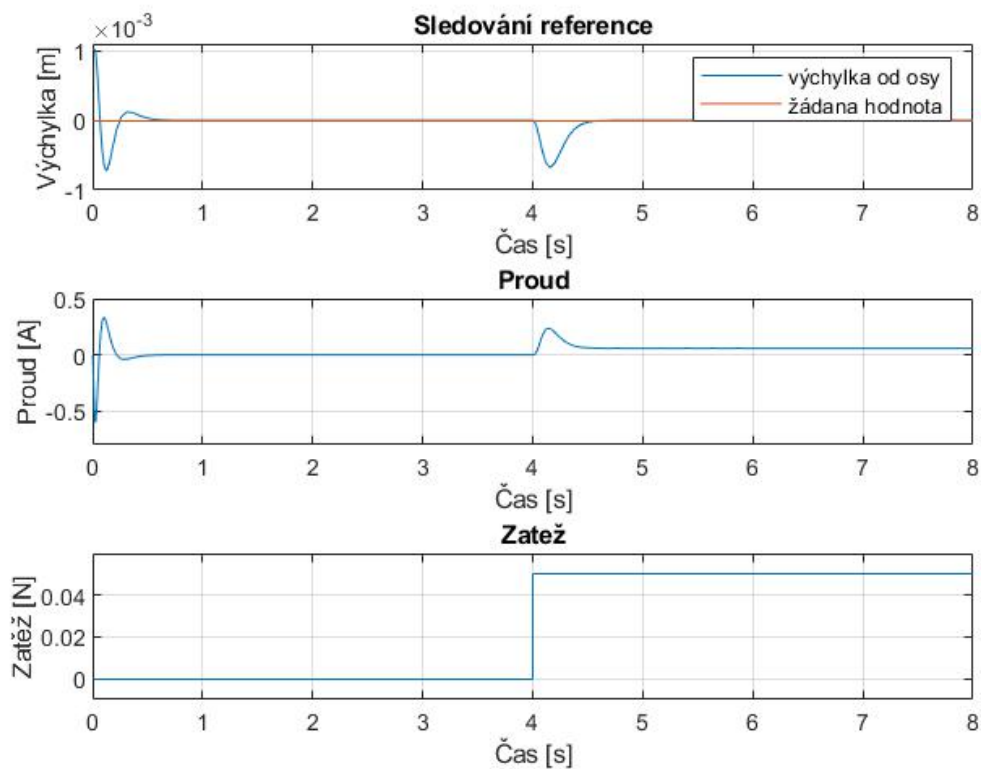


Obrázek 6: Stabilizace systému.

5 Stavové řízení

Dalším typem řízení, na které jsem se zaměřil byla stavová regulace. Ta umožňuje pracovat se zpětnou vazbou od všech stavových veličin. V mém případě pracuji se třemi stavy - polohou (aktuální výchylkou), rychlostí a proudem protékajícím elektromagnety. Abych mohl použít stavový regulátor, musel jsem měřit všechny stavové veličiny. V mém případě jsem mohl měřit jen aktuální výchylku a velikost proudu. Rychlost by se měřila obtížně, proto jsem použil pozorovatele stavu, který slouží k odhadování stavu. 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.

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

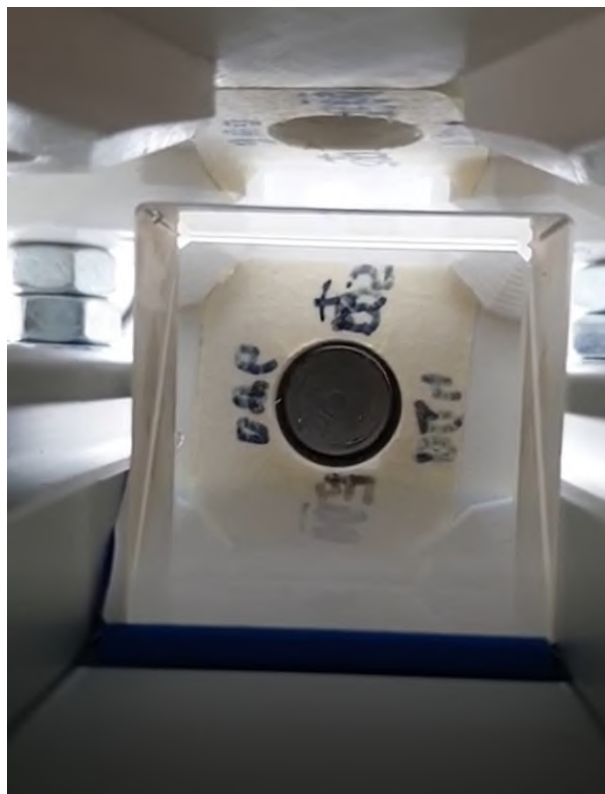


Obrázek 7: Stavová regulace.

6 Realizace v LabVIEW

Při ožívování nového systému jsem využíval program v LabVIEW, který napsal Ing. Jan Krofta. Spolu s ním jsme hledali cesty, jak navrhnout a implementovat řízení, které by dokázalo řídit levitaci rotující hřídele v horizontální poloze. Abychom mohli sledovat chování hřídele při testování programů, nainstalovali jsme pod ložisko optický hranol viz obrázek 8. Dosáhli jsme stabilizace hřídele v magnetickém poli PD regulátorem ve vertikální poloze a to i za rotace. Magnetická levitace je silně nestabilní systém, takže dosažení stabilizace jsem považoval za velice důležitý krok. Nepřesnosti v konstrukci se však projeví na házení hřídele, které bylo nezanedbatelné a se zvyšováním otáček se jeho amplituda zvětšovala. Po přidání integrační složky se systém destabilizoval.

Dalším problémem byla implementace samotného regulátoru. Pracovali jsme s už předimplementovaným regulátorem, kterému chyběl filtr derivační složky a obecně jsme o něm věděli velice málo. Zabýval jsem se tedy návrhem



Obrázek 8: Pozorování chování hřídele optickým hranolem.

nového PID regulátoru se dvěma stupni volnosti a s filtrem derivační složky. Regulátor jsem naprogramoval a vyzkoušel ho na regulační smyčce vymodelovaného systému 1. řádu přímo v LabVIEW. Regulátor fungoval a tak jsem ho vyzkoušel připojit do našeho původního programu. Po zásahu do původního programu se však objevil nový problém, kdy přestalo fungovat generování PWM signálu a my byli donuceni stavět nový program, založený na jiné strategii. Navrhli jsme nový způsob generování PWM signálu, který jsme úspěšně vyzkoušeli, avšak zprovoznit řízení jako celek se nám už nepodařilo.

7 Závěr

Prototyp aktivního magnetického ložiska se nám podařilo stabilizovat ve vertikální poloze. Během roku, kdy jsme na projektu pracovali nám práci zkomplikovala pandemie, kvůli které byla po většinu času uzavřena škola. Měli jsme tak prostor tvořit simulace a navrhovat program v LabVIEW, ale veškeré nápady jsme nemohli přímo realizovat a především vyzkoušet. V mezičase

během léta, kdy pandemie povolila a my mohli na několik týdnů do školy, jsme prováděli zejména konstrukční úpravy, které byly nezbytně nutné. Samotná konstrukce však má stále řadu chyb. Hlavním mínusem je nízko položené těžiště nového závěsu. Ze simulací plynulo, že můžeme použít hmotnější hřídel, avšak realita se zdála být jiná. I malá změna polohy těžiště v řádu milimetrů v tomto případě mění výrazně dynamiku ložiska. V horizontální poloze tak bylo obtížné přitáhnout magnetickou silou hřídel vzhůru. Kvůli pandemii však tento problém zůstal nevyřešen.