

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ
PRÁCE**

**Laboratorní model elektromotoru s aktivními
magnetickými ložisky**

**Laboratory model of electric motor with active
magnetic bearings**

2019

Autor: Bc. Jaroslav Petráš

Vedoucí práce: doc. Ing. Martin Novák, Ph.D

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Petráš** Jméno: **Jaroslav** Osobní číslo: **420505**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Přístrojová a řídicí technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Laboratorní model elektromotoru s aktivními magnetickými ložisky

Název diplomové práce anglicky:

Laboratory model of electric motor with active magnetic bearings

Pokyny pro vypracování:

- 1) návrh celého laboratorního modelu po konstrukční stránce
- 2) rešerše získání materiálu pro stavbu statorové části motoru a jader cívek pro magnetické ložisko, otestování reálných vlastností
- 3) stavba laboratorního modelu pomocí 3D tisku
- 4) experimentální ověření funkčnosti

Seznam doporučené literatury:

HOFREITER, Milan. Základy automatického řízení: příklady. 4. přepracované vydání. V Praze: České vysoké učení technické v Praze, 2016. 123 stran. ISBN 978-80-01-05899-2.
UHLÍŘ, Ivan a kol. Elektrické stroje a pohony. Vyd. 2. přeprac. Praha: ČVUT, 2007. 137 s. ISBN 978-80-01-03730-0.
Goldman, Alex: Handbook of Modern Ferromagnetic Materials, Springer, 1999, ISBN 978-0-412-14661-9

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., odbor elektrotechniky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **26.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **12.06.2019**

Platnost zadání diplomové práce: _____



doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

26. dubna 2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s použitím literárních zdrojů a informací, které cituji a uvádím v seznamu použité literatury a zdrojů.

Datum: 11. června 2019

..... 

Podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D. za odborné vedení mé diplomové práce a za cenné rady, díky kterým jsem se vždy posunul o krok dále. Také bych chtěl poděkovat mému kolegovi Bc. Janu Kroftovi, se kterým jsme na tomto projektu pracovali a jehož prací byl návrh desek tištěných spojů a tvorba programu pro řízení aktivních magnetických ložisek. Mé díky dále patří Ing. Zdeňkovi Novákovi a Ing. Lubošovi Musálkovi, kteří mi zapůjčili veškeré potřebné zařízení a věnovali se mi během experimentu v podobě měření vlastností statorových plechů. Dále bych touto formou chtěl vyjádřit svoje poděkování firmě O.K. stavební v Červeném Kostelci, konkrétně Petru Hepnarovi, přes kterého probíhala komunikace s firmou ohledně pálení statorových plechů na CNC laseru. V neposlední řadě děkuji mému bývalému spolužákovi Ing. Jiřímu Kinkorovi, nyní začínajícímu podnikateli, který mi vyhověl s výrobou rotoru, tedy velmi složitým lisovaným hřídeli s magnetem uvnitř. Nakonec nesmím zapomenout na svou rodinu, která mi poskytla taktéž velmi cennou psychickou podporu.

Anotace

V teoretické části se práce zaměřuje na historii a popis aktivních a pasivních magnetických ložisek a bezkartáčových stejnosměrných motorů. Dále je v konstrukční části popsán vývoj modulové koncepce zařízení sestávající z takového motoru, který má na obou stranách jak radiální, tak axiální magnetická ložiska, jehož rotor se točí bez mechanického tření se vzduchovou mezerou. V následné experimentální části je provedeno měření BH křivky a vyhodnocení relativní permeability zakoupených feromagnetických plechů. Na konci je popsána celková realizace, která spočívala ve výrobě jednotlivých modulů metodou 3D tisku plastu, dále výrobě statoru BLDC motoru a elektromagnetů pro aktivní ložiska.

Klíčová slova

Aktivní magnetické ložisko, pasivní magnetické ložisko, bezkartáčový stejnosměrný motor, BH křivka, relativní permeabilita, optické senzory, 3D tisk

Abstract

In the theoretical part this thesis is focused on history and description of an active and passive magnetic bearing and brushless direct current motor. In the design part the development of modular conception of device is shown consisting of this electric motor with radial and axial bearing on each side. The rotor rotates without mechanical friction with an air gap. In an experimental part measurement of BH curve and relative permeability of ferromagnetic sheets metal were made. At the end all of the realization is described that is expressed through 3D printing plastic parts, production of BLDC motor's stator and electromagnets for active magnetic bearing.

Key words

Active magnetic bearing, passive magnetic bearing, brushless direct current motor, BH curve, relative permeability, optical sensors, 3D print

Obsah

1 Úvod	8
2 Teoretická část	9
2.1 BLDC motor	9
2.1.1 Vývoj BLDC motoru	9
2.1.2 Konstrukce BLDC motoru	10
2.1.3 Řízení BLDC motoru	12
2.1.4 Účinnost BLDC motoru	13
2.1.5 Použití BLDC motorů	14
2.2 Aktivní magnetická ložiska	15
2.2.1 Druhy aktivních magnetických ložisek	15
2.2.2 Vývoj aktivních magnetických ložisek	17
2.2.3 Princip řízení aktivních magnetických ložisek	17
2.3 Pasivní magnetická ložiska	19
2.4 Materiály vhodné pro výrobu statoru a jader elektromagnetů	19
3 Cíle práce	21
4 Konstrukční část	22
4.1 BLDC motor	22
4.1.1 Stator	22
4.1.2 Rotor	25
4.1.3 Plášť	26
4.1.4 Chlazení	27
4.1.5 Řízení	28
4.2 Radiální aktivní magnetické ložisko	30
4.2.1 Elektromagnety	30
4.2.2 Snímání polohy	32
4.2.3 Řízení	35
4.3 Axiální magnetické ložisko	36
4.4 Kompletní zařízení	37
5 Experimentální část	39
5.1 Měření B-H charakteristiky	39
5.2 Simulace magnetických toků statoru	45
6 Realizace	48
6.1 Montážní přípravek	48
6.2 BLDC motor	48
6.3 Axiální magnetické ložiska	52
6.4 Sensorové moduly	53
6.5 Radiální magnetické ložiska	56

6.6 Rotor	58
6.7 Kompletní zařízení	59
7 Závěr	61
Seznam použitých zkratek	63
Seznam použité literatury a zdrojů	64
Seznam použitého SW	68
Seznam tištěných příloh	69
Seznam digitálních příloh	69

1 Úvod

Aktivní magnetická ložiska jsou v dnešní době velkým trendem ve stále se rozvíjejícím technickém světě. Jedná se o bezkontaktní uložení hřídele se zanedbatelnými třecími ztrátami. Ty jsou pouze mezi rotující hřídelí a okolním prostředím, kterým je ve většině případů vzduch. Uložení zajišťuje proměnné magnetické pole vyvolané aktivně řízenými elektromagnety, tedy cívkami na feromagnetických jádrech speciálních tvarů.

U vysokootáčkových elektromotorů můžeme narazit právě na problém s vysokými třecími ztrátami a následným zahříváním ložisek, ať už kuličkových, válečkových nebo jiných. Z tohoto důvodu přichází na řadu tato relativně nová technologie bezkontaktního uložení pomocí aktivně řízených radiálních magnetických ložisek. Mezi další z celé řady výhod patří absence potřeby jakéhokoliv mazání rotujících částí. Díky tomu lze elektromotory s takovými ložisky použít i v aplikacích, kde by mazivo mohlo kontaminovat okolní látky ať už plynného nebo kapalného charakteru. Nacházíme tedy vhodné zařízení pro aplikace spojené s potravinářským, farmaceutickým, nebo jiným průmyslem, kde výrobní proces neumožňuje výskyt mazacích látek. Nesmíme však zapomenout na jejich hlavní obrovskou nevýhodu a to potřebu dodávky elektrické energie a speciálního výkonného hardwaru odolného proti rušení s velmi rychlým řídicím softwarem.

V této práci se podrobně podíváme na kompletní návrh vodou chlazeného bezkartáčového stejnosměrného elektromotoru opatřeného těmito aktivními radiálními magnetickými ložisky na obou stranách rotoru. Dozvíme se něco o řízení takovýchto motorů a pomocí modelářského ESC si vyrobíme malé řídicí zařízení. Dále budeme řešit otázku snímání polohy hřídele, kterou potřebujeme měřit co možná nejpřesněji právě kvůli správnému vyhodnocení akčních zásahů řídicího systému ložisek. Následně se zaměříme na stabilizaci rotoru v axiálním směru a eliminaci případných axiálních sil pomocí pasivních axiálních magnetických ložisek. Nakonec se podíváme na návrh a výrobu rotoru pro takovéto komplexní zařízení.

Na výrobu většinu komponentů tohoto komplexního zařízení byla použita metoda 3D tisku plastu, ve většině případů konkrétně biologicky nezávadného PLA. Pro feromagnetické části modelu bylo zapotřebí najít vhodný materiál, který byl následně v experimentální části měřen a vyhodnocovány jeho parametry, jako je hlavně jeho relativní permeabilita. Na základě takto naměřených hodnot byl nadimenzován stator motoru. Co se týče potřebné elektronických komponentů, tak si ukážeme úskalí při vlastní výrobě desek plošných spojů a naopak výhody zadání výroby těchto desek jedné z největších firem JLC PCB.

2 Teoretická část

V teoretické části se budeme zabývat vývojem, konstrukcí, řízením, účinností a použitím bezkomutátorového BLDC motoru, jehož následný návrh a stavba bude nedílnou součástí této práce. Dále se podíváme na druhy, vývoj a princip řízení aktivních magnetických ložisek, jejichž navržení a stavba jsou primárním tématem této práce. Nakonec si řekneme něco o ložiskách pasivních, tedy využívajících permanentní magnety. Tato fakta budou v konstrukční části taktéž využita, a to při návrhu a stavbě ložisek axiálních.

2.1 BLDC motor

Bezkartáčový stejnosměrný motor s permanentními magnety, jak by se dal přeložit anglický název brushless DC (tedy BLDC) motor, je v dnešní době velmi populární elektrický točivý stroj. Jeho popularita je dána především jeho dobrou charakteristikou točivého momentu k rychlosti, vysokou dynamickou reakcí, vysokou účinností a díky bezkomutátorové konstrukci dlouhou životností. Mimo to generuje oproti komutátorovému motoru mnohem menší rušení, které vzniká právě na kartáčích komutátoru. Abychom zde nepopisovali pouze jeho výhody, tak jeho největší nevýhodou je jeho řízení. Komutátorový motor stačí pouze připojit ke zdroji stejnosměrného napětí a komutátor se postará o střídání napájení jednotlivých vinutí a následnému vzniku točivého magnetického pole. Kdežto BLDC motor vyžaduje řízení pomocí mikroprocesoru. Ten pomocí PWM signálu spíná výkonové tranzistory, v důsledku tedy stejně jako komutátor jednotlivé fáze vinutí, čímž rovněž vzniká točivé magnetické pole. [10]

2.1.1 Vývoj BLDC motoru

V minulosti jsme byli zvyklí na stejnosměrné motory, které se v hojném množství užívaly v široké škále elektro zařízení jako je například ruční nářadí (vrtačka, bruska, aj.), elektrické modely aut, letadel, autodráhy a podobně. Tyto motory se vyznačovaly občasnou údržbou jedné z nejdůležitějších částí, a to takzvaného komutátoru, respektive jeho spotřebních částí, a to kartáčů neboli uhlíků. Právě přes ně je zajištěn přenos elektrických nábojů od přírodních vodičů na komutátor. Jako každá strojní součást, která se potýká s velkým třením, které zde musí být právě z důvodu nízkého elektrického odporu, jsou i tyto uhlíky značně opotřebovávány. Navíc v této části motoru vzniká vlivem třecích ztrát značné teplo, kterému musíme při návrhu zařízení s takovýmto motorem zajistit dostatečný odvod.

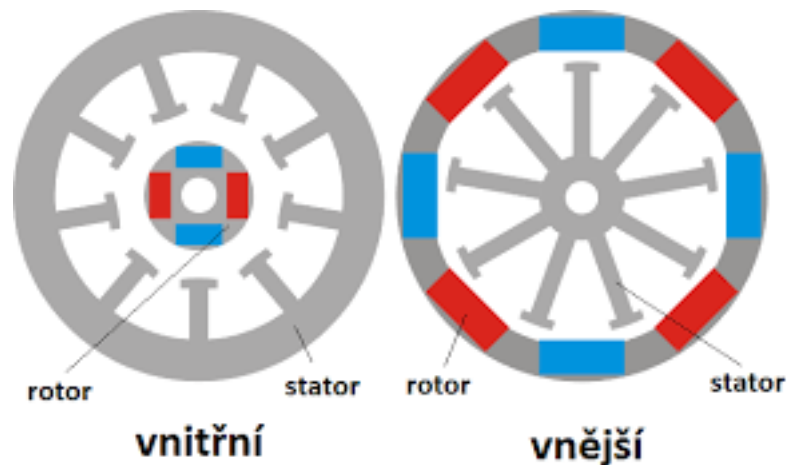
V dnešní době se stejnosměrné motory stále používají, avšak jejich vývoj jde neustále ku předu. Komutátor, tedy zařízení, které funguje jako mechanický přepínač kladného a záporného pólu stejnosměrného napětí přiváděného na vinutí motoru, se z důvodu nízké životnosti ze stejnosměrných motorů pomalu vytěsňuje. Čím dál tím více se totiž používají právě bezkartáčové motory, které mají troje statorová vinutí. Tyto elektromotory se nazývají zkratkou z anglického jazyka, a to BLDC, což znamená brushless DC, nebo výstižněji zkratkou ECM, což znamená electronically commutated motor. Vytěsněný komutátor je nahrazen takzvanou elektronickou komutací. Díky tomu se zbavujeme nežádoucích vlastností klasického komutátoru, kterými jsou vznik tepla a opotřebování součástí a tudíž jejich občasné výměny. K provozu takového motoru je však zapotřebí mít elektronickou jednotku, tedy mikroprocesor. Ten se stará o postupné napájení jednotlivých vinutí, čímž se mění elektromagnetická polarita a vzniká tak točivé magnetické pole obdobně, jako tomu je u komutátorového motoru.

2.1.2 Konstrukce BLDC motoru

U klasických stejnosměrných motorů byla zvykem následující konstrukce. Rotor byl tvořen vinutím, na které bylo přiváděno napětí přes již zmiňovaný komutátor a stator byl tvořen buďto permanentními magnety, nebo taktéž vinutím, takzvaným budícím. To mohlo být buzeno dvojnásobně. Prvním způsobem je takzvané sériové buzení, což znamená, že je zapojeno do série s vinutím rotoru. Druhou možností je buzení cizí, což znamená, že je napájeno jiným zdrojem napětí než vinutí rotoru. Co se týče konstrukce BLDC motoru, tak je to přesně naopak. Tedy tak, že stator je tvořen vinutím, není tedy potřeba mít rotačně oddělené metalické vedení. Rotor je u něho tvořen vždy permanentními magnety.

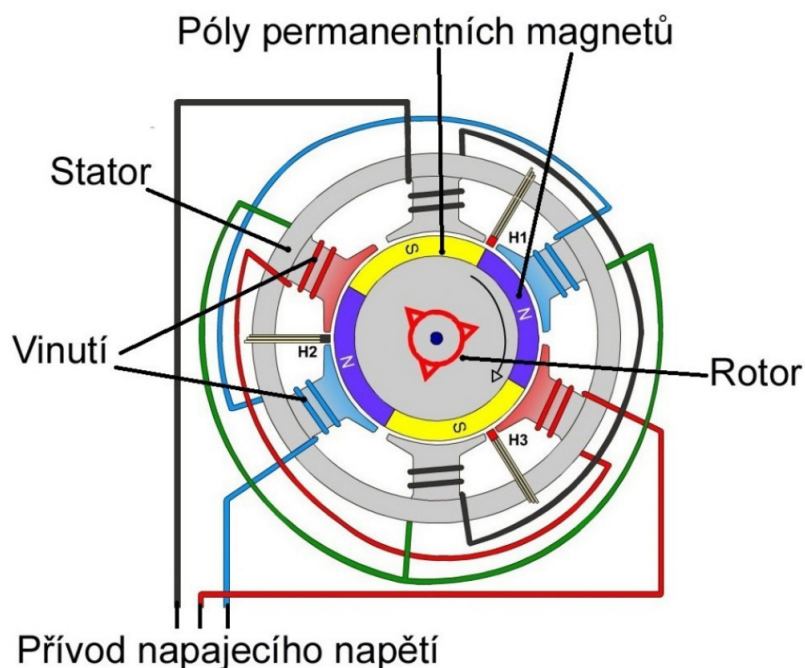
Rotor však u motorů tohoto typu nemusí být vždy vnitřní část tak, jak jsme zvyklí. Téměř v polovině případů, hlavně tedy u motorů modelářských, se setkáváme s konstrukcí, kdy rotor tvořen permanentními magnety je samotný obal motoru. Takovéto motory se nazývají anglickým slovem *outrunner* (motor s vnějším rotorem). Plášť tedy může být část, která se točí a uchycení motoru je poté řešeno speciální přírubou na jedné straně statoru, tedy části s vinutím. S takovými motory se setkáváme, jak již bylo zmíněno, především v modelářství, konkrétně u modelů letadel a v dnešní době velmi populárních kvadrokoptér. Druhá klasická varianta, kdy je rotující část uvnitř, se nazývá opět z angličtiny slovem *inrunner*. Na Obr. 1: Dvě základní konstrukce BLDC motorů můžeme vidět schematické znázornění obou dvou konstrukčních provedení. [11]

Stator BLDC motoru je tvořen feromagnetickým jádrem a vinutím z měděného drátu. To se skládá ze tří částí. Každá z těchto částí vinutí je na jedné straně mezi sebou spojena a



Obr. 1: Dvě základní konstrukce BLDC motorů [2]

na straně druhé je připojena k napájení. O to, kdy bude která část napájena, se stará právě mikroprocesor v závislosti na vstupních datech, kterými je nejčastěji požadovaná rychlost otáčení. Mikroprocesor posílá signály výkonové elektronice, v tomto případě šesti rychlým tranzistorům. Vinutí jsou navinuta na jednotlivých pólových nástavcích feromagnetického jádra. To může být buďto práškové, tedy vylišované z feritového prášku, nebo tvořené statorovými plechy. Zde platí, že tloušťka plechů závisí na frekvenci, se kterou se bude měnit magnetické pole ve vinutích. Na čím větší frekvenci zařízení navrhujeme, tím slabší plechy se použijí, a to z důvodu snížení ztrát. Na zapojení jednotlivých vinutí se podívejme na Obr. 2: Zapojení BLDC motoru.



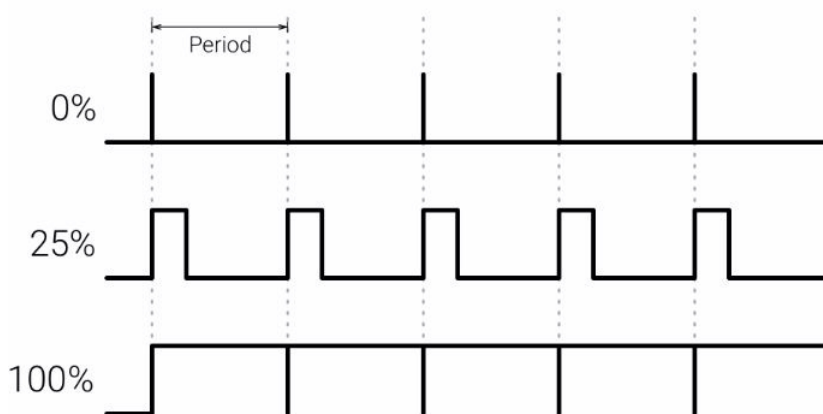
Obr. 2: Zapojení BLDC motoru [3]

2.1.3 Řízení BLDC motoru

Elektronická řídicí jednotka, kterou může být již zmiňované modelářské ESC zpracovává vstupní informace (například polohu ovládacího prvku), na základě kterých jsou spínány výkonové tranzistory, ty dále pouští stejnosměrné napětí do jednotlivých částí vinutí. Těchto tranzistorů bývá z pravidla šest. Jejich spínání je vždy po dvojicích tak, aby byla zajištěna správná sekvence spínání. Pokud by tato sekvence nebyla dodržena, nemohlo by vzniknout točivé magnetické pole a tudíž by se permanentní magnet, tedy rotor, nezačal v takovémto poli otáčet. Dražší zařízení mají i zpětnou vazbu v podobě snímání úhlového natočení rotoru vůči statoru. Ta může být řešena vícero způsoby. U levnějších motorů je snímání řešeno hallovou sondou, tedy snímáním magnetického pole vyvolaného permanentním magnetem rotoru. U této metody měření natočení však musíme zajistit externí napájení senzorů, které jsou u třífázového motoru potřeba tři, vůči sobě pootočený o 60 nebo 120°. U dražších je poloha měřena enkodérem, který může být buďto absolutní nebo inkrementální. Absolutní enkodér je takové zařízení, které nám poskytuje přesnou aktuální polohu rotoru. Můžeme si ho představit jako zdroj světla, fotocitlivý polovodič a disk s vícero řadami otvorů různých délek. Výhoda absolutního enkodéru je ta, že při výpadku napájení neztratí informaci o aktuální poloze na rozdíl od inkrementálního. To je tvořeno taktéž zdrojem světla, fotocitlivým polovodičem a taktéž diskem, který však obsahuje jednu řadu stejných otvorů. Zde se poloha určuje počtem změn stavu, kdy světlo projde skrze otvory a kdy ne. Místo enkodéru může být použit ještě takzvaný resolver, což je typ rotačního čidla, jehož výstupním signálem jsou dvě sinusovky vůči sobě posunuté o 90° dávající informaci o okamžité poloze rotoru. Resolver je specifický tím, že neobsahuje žádné polovodičové součástky a tudíž je značně odolný i například vůči účinkům záření. Poslední možností, o které zde bude zmíněno je bez senzorové snímání polohy. To se vyskytuje u BLDC motorů nižších výkonů. Jedná se o metodu snímání polohy na základě zpětné indukce. Dvě fáze jsou vždy napájeny pro samotný chod motoru a třetí, která je v tu chvíli jinak nevyužita, se zde použije na měření indukovaného napětí, které je závislé na poloze magnetu. Tato metoda však nelze použít, stejně jako měření inkrementálním enkodérem při nízkých až nulových otáčkách. [20]

Řídicí jednotka umožňuje regulaci otáček a to pomocí pulzně šířkové modulace (dále PWM), mimo to může ale i zahrnovat ochranu proti přepólování, přetížení nebo v kombinaci s teplotními čidly i ochranu proti přehřátí. Kromě ochrany může navíc obsahovat zvukovou indikaci. Pod ní si můžeme představit indikaci různých režimů, případně připravenosti k provozu. Tato indikace je v praxi realizována velmi jednoduchým způsobem, a to puštěním takové frekvence do vinutí motoru, která nezpůsobí jeho roztočení, avšak je slyšitelná pro lidské ucho. Tato frekvence se pohybuje u zdravého ucha od 20 Hz do 20 kHz. [19]

Pulzně šířková modulace je způsob, jak přenášet analogovou hodnotu pomocí diskrétního, dvouúrovňového signálu. Jako přenášená veličina může být použito více nosičů, jsou to napětí, proud a nebo světelný tok. Princip, jak pomocí této modulace řídit elektromotor je následovný. Přenášený signál může nabývat dvou úrovní (zapnuto a nebo vypnuto), hodnota je poté výsledkem poměru mezi časy, kdy je signál ve fázi zapnuto a kdy ve fázi vypnuto. Tomuto poměru se říká tzv. střída. Cyklu, během kterého dojde k přenosu právě jedné střídy se říká perioda. Protože se pro spínání jednotlivých vinutí v motoru používají výkonové tranzistory, které mají nejnižší ztráty v provozních stavech, a to když je úplně vypnutý a když je úplně zapnutý, je diskrétní pulzně šířková modulace vhodným řešením.



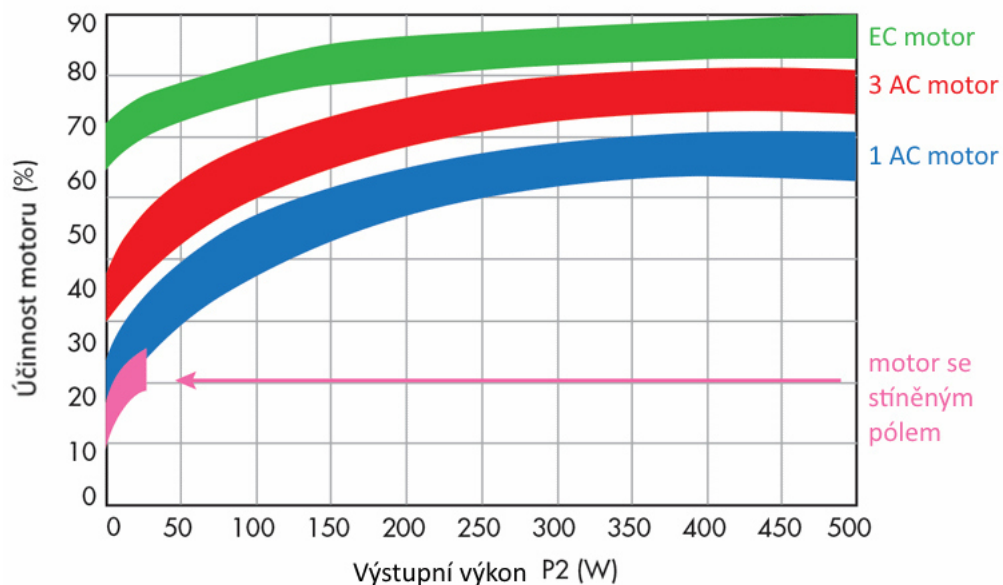
Obr. 3: Pulzně šířková modulace [4]

Setkat se však můžeme i s dalšími typy řízení BLDC motorů. Například řízení lichoběžníkové, zde však dochází ke zvlnění krouťícího momentu a následným vibracím a vyššímu hluku. Dalším typem řízení je sinusové, kdy jsou jednotlivá vinutí řízena spojitě, zde však ale dochází ke spínacím ztrátám na výkonových tranzistorech. Nedochozí již však ke zvlnění krouťícího momentu. Posledním typem řízení, který zde zmíníme je řízení vektorové (anglická zkratka FOC). To zajišťuje nejvyšší krouťící moment na jednotku příkonu. [21]

2.1.4 Účinnost BLDC motoru

Co se týče účinnosti těchto motorů, tak ve srovnání s kartáčovými (neboli komutátorovými) DC ale i klasickými AC motory je mnohem vyšší. Konkrétně se můžeme bavit o reálné účinnosti více než 90 procent. Podle zprávy z ministerstva energetiky z roku 2013 se

dokonce uvádí, že tyto motory představují nejefektivnější možnost modernizace aplikací, kde se elektromotory používají. [11] Účinnost velmi závisí nejen na konstrukci motoru, ale také na typu jeho řízení. Na srovnání účinnosti jednotlivých elektromotorů se můžeme podívat na Obr. 4: Srovnání účinností elektromotorů, kde je zelenou barvou znázorněn právě BLDC (neboli EC) motor.



Obr. 4: Srovnání účinností elektromotorů [12]

2.1.5 Použití BLDC motorů

BLDC motory mají celé spektrum využití. Velmi často se však užívají v aplikacích nebo zařízeních, kde je zdroj stejnosměrného napětí tvořen akumulátorem. Může se tedy jednat například o bateriové ruční nářadí, jako jsou například akumulátorové vrtačky, dále pohony mobilní techniky, mezi kterou můžeme zmínit například bateriové vysokozdvizné vozíky, dále se s těmito motory můžeme setkat ve všech možných modelech, hlavně rádiem řízených, konkrétně v dnešní době asi nejvíce populárních dronech. V neposlední řadě se tyto motory užívají v dopravních prostředcích, ať už například v automobilech nebo motocyklech. Akumulátorový zdroj však není podmínkou. Díky své vysoké účinnosti a velmi širokému spektru říditelnosti se často používají i v usměrněných obvodech v nejrůznějších strojích a přístrojích. Setkat se však můžeme i s vestavěnou elektronikou přímo v plášti BLDC motorů, které tak můžeme připojit přímo k rozvodné síti 230V, což nám otevírá další řadu možností použití.

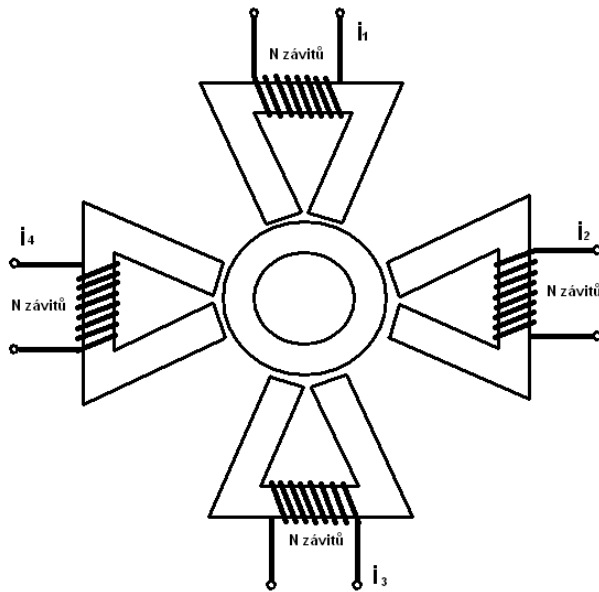
2.2 Aktivní magnetická ložiska

Aktivní magnetická ložiska jsou obecně zařízení, která jsou schopna za pomoci magnetického pole přitahovat a držet předmět, v tomto případě tedy hřídel, v požadované poloze. Hřídel se v této poloze nedotýká žádného pevného tělesa, tedy levituje ve vzduchu. Tento nápad využít magnetické pole k držení předmětu se však objevil již na začátku devatenáctého století. Samotná realizace se však kvůli pokroku ve vývoji řídicích systémů své slávy dočkala až v uplynulých dvaceti letech. Z konstrukčního hlediska se jedná o řadu elektromagnetů, tedy cívek namotaných na magnetických jádrech speciálních tvarů. Tyto elektromagnety jsou pomocí dostatečně velkého přiváděného proudu schopny přitahovat předmět, tedy hřídel, a držet jí v požadované poloze. Řídicí systém ložiska musí mít jasnou informaci o této poloze, což může být zajištěno bezkontaktními senzory, ať už optickými nebo jinými, nebo snímáním změny indukce v samotných cívkách. Dle této informace řídicí systém v reálném čase upravuje hodnoty proudu protékající do jednotlivých cívek, čímž je vyvolávána požadovaná přitažlivá síla v místě, kde jí je potřeba. Největší výhodou těchto aktivních magnetických ložisek je to, že hřídel rotující ve vzduchu má nulové valivé tření, čímž jsou eliminovány značné ztráty, které se za prvé vždy mění na teplo a za druhé kvůli nim dochází k opotřebení materiálů. [7]

2.2.1 Druhy aktivních magnetických ložisek

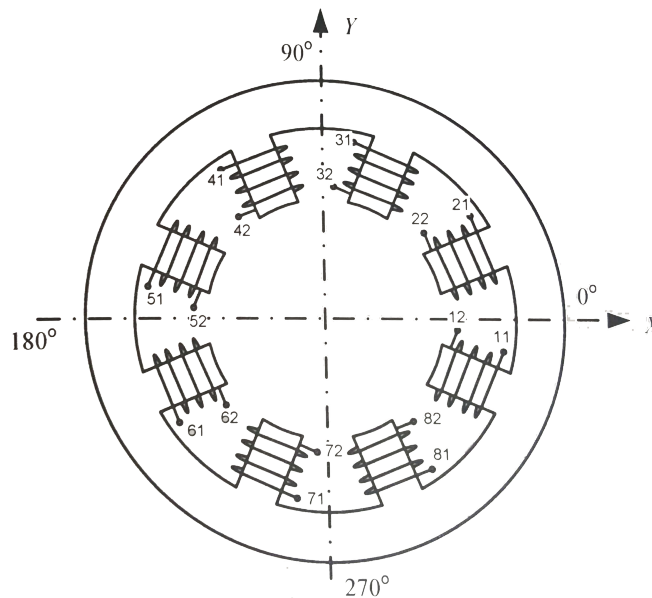
Nejčastějším magnetickým ložiskem užívaným v průmyslu je bezpochyby ložisko radiální. To se používá v aplikacích místo konvenčních radiálních kuličkových, válečkových, kluzných nebo jiných ložisek. Často, tak jak je to i v našem případě, se jedná o čtyři na sebe kolmé elektromagnety, kdy každý tvoří dva magnetické póly. Mezi nimi vzniká přitažlivá síla působící na hřídel z feromagnetického materiálu. Z pravidla je vzduchová mezera mezi hřídelem a póly elektromagnetů 0,5 až 2 mm. V našem případě je to 1 mm. Síla ložiska je dána počtem elektromagnetů, zvoleným materiálem použitým na jádra cívek, počtem jejich závitů a hlavně protékajícím proudem. To je proměnný faktor, díky kterému jsme schopni tuto sílu řídit. Schéma takového uspořádání můžeme vidět na Obr. 5: Elektromagnety s vlastními jádry.

Existuje však i jiná koncepce elektromagnetů a to taková, že je jádro společné a vinutí je namotáno na jednotlivých pólových dvojicích. Magnetický tok se při průchodu proudu cívkou uzavírá přes pólovou dvojici, nejkratší část společného jádra, vzduchovou mezeru a



Obr. 5: Elektromagnety s vlastními jádry

rotor. Tato koncepce je na výrobu ložiska mnohem přívětivější. Není zde potřeba řešit přesné uložení jednotlivých elektromagnetů vůči sobě. Navíc je celá konstrukce ložiska robustnější. Jedinou nevýhodou je snad pouze větší množství spotřebovaného feromagnetického materiálu při výrobě. Na schematické zobrazení této koncepce se společným jádrem se podívejme na Obr. 6: Elektromagnety se společným jádrem.



Obr. 6: Elektromagnety se společným jádrem [6]

Dalším typem aktivního magnetického ložiska je ložisko axiální. Pohyb hřídele v axiálním směru je u běžných aplikací bez magnetických ložisek většinou také zajištěno v dostatečné míře radiálním kuličkovým, případně druhým ložiskem axiálním, pokud je síla v tomto směru větší. U aplikací, kde jsou použita radiální ložiska magnetická, axiální sílu nic nekompensuje, a proto je potřeba použít i magnetické ložisko axiální. Z konstrukčního hlediska se jedná o kotouč z feromagnetického materiálu, který je z obou dvou stran přitahován prstencovými elektromagnety. Při použití tohoto ložiska opět potřebujeme řídicí elektroniku, která reguluje sílu elektromagnetů na základě zpětné vazby v podobě přesné polohy kotouče. Tuto polohu je možno opět snímat buďto pomocí senzorů nebo pomocí změny magnetické indukce.

Kromě ložisek radiálních a axiálních se můžeme v praxi setkat ještě s jedním druhem, který však dále nebude předmětem této práce. Jedná se o ložisko lineární. To využívá jak elektromagnetické tak elektrodynamické levitace. Své užití nachází převážně v dopravě, hlavně tedy kolejové, kde ho můžeme znát pod pojmem maglev. Kolejová vozidla díky nim mohou dosahovat mnohem vyšších rychlostí, protože místo valivého tření mezi kolejnicí a koly se pohybují na magnetickém polštáři. Kromě dopravy se tento typ ložisek užívá ještě u loží přesných měřících zařízení.

2.2.2 Vývoj aktivních magnetických ložisek

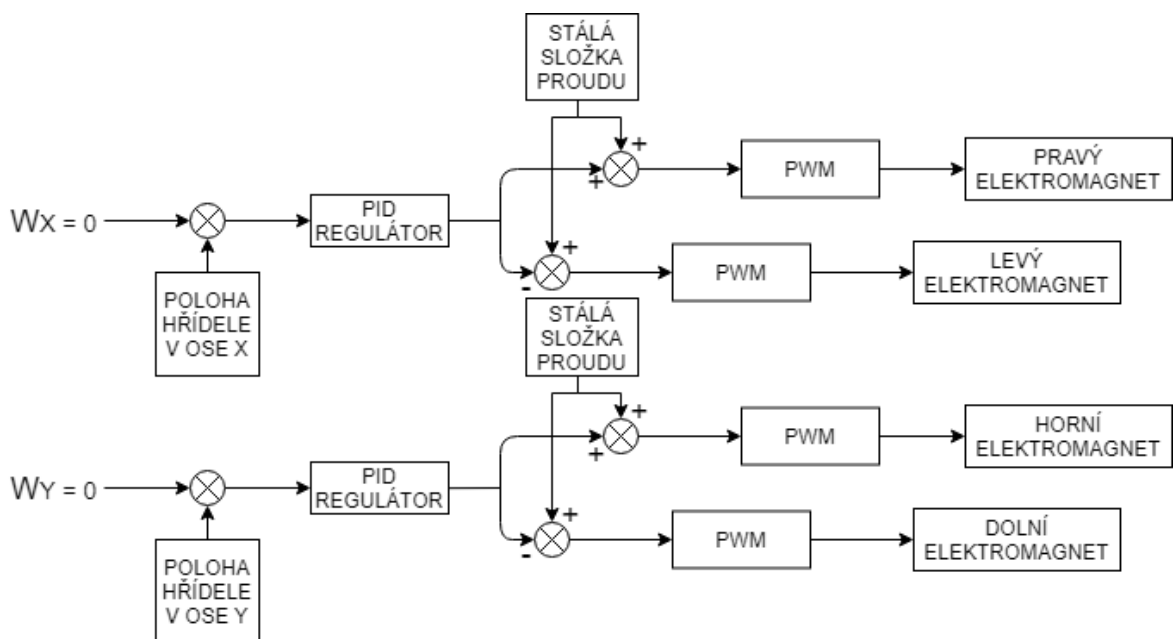
Nápad použití elektromagnetického pole pro udržování předmětu v požadované poloze není nic nového. Mnoho nadšenců se tímto tématem zabývalo už ve dvacátých letech minulého století. Avšak až pouhých pár desítek let zpátky se začala elektronika rozvíjet na tolik, že umožnila rozkvět aktivních magnetických ložisek. Ty totiž potřebují velmi rychlou a spolehlivou měřící, řídicí a výkonovou elektroniku. V dnešní době tento trend neupadá a neustále se pracuje na softwarové výbavě ložisek. Ta napomáhá dosáhnout takových výkonů, které byly ještě před pár lety naprosto nemyslitelné.

2.2.3 Princip řízení aktivních magnetických ložisek

Každé aktivně řízené magnetické ložisko potřebuje ke svému chodu výkonovou a řídicí elektroniku. Řídicí elektronika pracuje na základě přesné polohy hřídele, kterou v reálném čase snímá. To je možné realizovat celou řadou způsobů. Prvním způsobem je použití bezkontaktních senzorů například optických, tyto senzory pracují na principu dioda - fotodioda, kdy dioda konstantně svítí v pro člověka neviditelném pásmu a na fotodiodě měříme indukované napětí závislé na vzdálenosti odrazné plochy, tedy hřídele. Dalším

způsobem je například použití senzorů kapacitních nebo indukčních. U axiálních ložisek je snímání této polohy celkem jednoduché, stačí jeden senzor snímající vzdálenost kotouče rotujícího na hřídeli. U radiálních ložisek je toto snímání poněkud složitější z důvodu, že snímáný objekt, tedy hřídel, je kruhového průřezu. Pokud bychom snímali každou osu pouze jedním senzorem, znamenalo by to, že při posunu hřídele ve vodorovném směru se bude vlivem kruhovitosti hřídele měnit hodnota získávaná ze senzoru snímajícího pohyb ve vertikálním směru. Právě z tohoto důvodu je potřeba použít pro snímání každé osy dva snímače umístěné naproti sobě, jejichž měřené hodnoty tento fakt eliminují. Měření přesné polohy hřídele však lze měřit i jinak, a to bezsenzorově. Takové měření je poté založeno na využití Hallova jevu.

Řídicí systém zpracuje získané informace o přesné poloze hřídele, na jejichž základě posílá informace výkonové elektronice. Ta mění sílu jednotlivých elektromagnetů změnou protékajícího proudu. Řídicí systém pro tuto změnu užívá polovodičové můstky, přes které je schopen přesně nastavit přitažlivou sílu do směru, kam je třeba. Nejjednodušším způsobem jak dosáhnout funkčního regulačního obvodu je použití dvupolohové regulace. Ta funguje tak, že pouze porovnává aktuální hodnotu hřídele s žádanou a pokud je tato hodnota vyšší, vyšle se signál ke zvýšení síly jednoho magnetu a zeslabení druhého a naopak. Lepším a mnohem přesnějším způsobem řízení je však použití PID regulátoru. Díky němu lze sílu elektromagnetů měnit plynule, nikoliv skokově pouze při překročení žádané polohy. Na Obr. 7 můžeme vidět zjednodušený regulační obvod s PID regulátorem, pomocí kterého lze řídit aktivní magnetická ložiska.



Obr. 7: Regulační obvod řízení aktivního ložiska

2.3 Pasivní magnetická ložiska

Pasivní magnetická ložiska pracují na principu odpuzování permanentních magnetů. Umožňují tedy pohyb či rotaci hřídele bez fyzického kontaktu a tedy jakéhokoliv tření, pomineme-li však tření o prostředí, tedy o vzduch. Oproti ložiskům aktivním se zde nevyskytuje žádné měření polohy hřídele z toho důvodu, že nemáme možnost žádnými akčními zásahy ovlivňovat jeho funkci. Kromě elektroniky zajišťující měření polohy tato ložiska nepotřebují ani žádnou výkonovou elektroniku, která by se starala o aktivní členy. Díky tomu je toto ložisko velmi spolehlivé. Takováto ložiska mají velkou výhodu, a to že je není třeba nijak mazat a nevzniká při jejich používání teplo způsobené třecími ztrátami. To v důsledku vede jednak ke snížení hlučnosti zařízení, které takováto ložiska užívají a k celkovému snížení provozních nákladů spojené s nákupem a zajištěním aplikování maziv. Kromě výhod se zde však setkáme i s obrovskou nevýhodou, kterou je jejich špatná stabilita. Earnshawovo pravidlo totiž popisuje fakt, že soustava nabitých částic nemůže setrvat ve staticky rovnovážné poloze výhradně prostřednictvím elektrostatické interakce těchto částic. To znamená, že radiální ložiska jsou nestabilní v axiálním směru a naopak. Toto lze však vyřešit správně navrženou konstrukcí. Využití takovýchto ložisek může být v oblasti energetiky při výrobě elektrické energie, v potravinářském průmyslu právě z důvodu absence jedovatých maziv a další.

Dalším typem pasivních ložisek je odpuzování nikoliv magnetů, nýbrž magnetu a vysokoteplotního supravodiče HTS. Při ochlazení supravodivé části pod 77K (tedy -196,15°C) totiž dochází ke vzniku supravodivých vírů a vytvoření nehomogenního magnetického pole. Permanentní magnet tedy začne levitovat nad tímto supravodičem. Tento typ pasivního magnetického ložiska je však velmi náročný na dodávku chladiva, jako které se používá nejčastěji tekutý dusík. Jeho vývoj se datuje od roku 1986, kdy byly tyto vysokoteplotní supravodiče objeveny. [22]

2.4 Materiály vhodné pro výrobu statoru a jader elektromagnetů

Materiály používané obecně pro výrobu elektrických strojů a magnetických obvodů jsou materiály takzvaně magneticky měkké. Jsou to takové materiály, které po odeznění působení magnetického pole magnetické vlastnosti ztrácejí. Na druhé straně jsou i materiály magneticky tvrdé, kterým magnetické vlastnosti zůstávají, zůstávají takzvaně zmagnetované. Tyto materiály by však pro použití například jako jádra cívek byly naprosto nevhodné.

Magneticky měkké materiály mají koercivitu H_c menší než 800 A/m , ty nejlepší se dokonce blíží k hodnotě $0,1 \text{ A/m}$. Mezi další vlastnosti těchto materiálů patří úzká hysterezní smyčka, která má velmi strmou křivku prvotní magnetizace, dále velká počáteční a maximální relativní permeabilita μ_r , poté velká remanentní magnetická indukce B_r . Podstata těchto materiálů je jejich kvalitní krystalická struktura.

Čisté železo, které obsahuje maximálně 0,1 procenta uhlíku je velmi výborný magneticky měkký materiál. Má malou rezistivitu, což však způsobuje velké ztráty při použití ve střídavém magnetickém poli. Jeho využití se tedy nachází v aplikacích, kde se pracuje se stejnosměrným magnetickým polem. Dalším významným materiálem je opět železo, nikoliv však již čisté, ale takzvané karbonylové. To se totiž používá pro výrobu lisovaných jader. Zrnka tohoto materiálu jsou ve tvaru kuliček, které mají průměr v rozmezí půl až deset mikrometrů. Materiálem užívaným v aplikacích, kde se setkáme se střídavým magnetickým polem, je křemíková ocel. Ta je složena z maximálně 0,05 procenta uhlíku a 0,5 až 5 procent křemíku, který zvyšuje rezistivitu. Jedná se o nejdůležitější materiál pro aplikace se střídavým polem o frekvenci 50 Hz. Vyrábí se z něho válcované tenké plechy, ze kterých se následně vytváří jádra transformátorů, elektromagnetů a točivých strojů. Plechy jsou mezi sebou izolované, a to z toho důvodu, aby se zamezilo ztrátám vlivem vířivých proudů. Tloušťka těchto plechů se pohybuje nejčastěji od 0,3 do 0,5 milimetrů s ohledem na frekvenci obvodu. Čím vyšší frekvence, tím tenčí plechy. Pokud bychom však chtěli najít materiál pro ještě vyšší frekvence, nabízí se slitiny železa a niklu, tedy takzvaný permalloy. Ty mají oproti křemíkové oceli podstatně lepší vlastnosti, avšak jsou podstatně dražší. Z této slitiny se opět vyrábí tenké plechy, které jsou však mnohem tenčí. Rozmezí tlouštěk se zde pohybuje od 0,2 do 0,03 milimetru. [25]

Relativní permeabilita je bezrozměrná veličina značící se μ_r . Charakterizuje magnetické vlastnosti látek. Pomocí ní se látky dají rozdělit do tří skupin. První skupinou jsou látky takzvaně feromagnetické. Jsou to takové látky, jejich relativní permeabilita je mnohem vyšší než jedna. Patří mezi ně železo, kobalt, nikl, nebo například slitina ocel. Obecně jsou to všechno látky, které jsou přitahovány magnetem. Dalšími ze skupin jsou látky paramagnetické jejichž relativní permeabilita je mírně větší než 1. To znamená, že magnetické pole zesilují a k magnetu se přitahují mírně. Patří mezi ně například chrom, platina nebo hliník. Poslední skupinou jsou látky diamagnetické s relativní permeabilitou mírně menší než jedna. Magnetické pole tyto látky zeslabují od magnetu se odpuzují. Mezi ty můžeme zařadit například bismut, uhlík, měď či zlato. [24]

3 Cíle práce

Aktivně řízené magnetické ložisko vyvíjíme společně s kolegou v rámci studentské grantové soutěže. Do budoucna by takováto ložiska měla být součástí vysokootáčkového motoru, který se na ústavu taktéž vyvíjí. Cílem této diplomové práce je navázat na tento projekt a navrhnout a sestavit prototyp BLDC motoru, jehož rotor se bude otáčet uprostřed radiálních magnetických ložisek s téměř nulovými ztrátami a tím ověřit možnou aplikovatelnost našich vyvíjených aktivních magnetických ložisek na zmíněný vysokootáčkový motor.

- 1) Návrh celého laboratorního modelu po konstrukční stránce.
- 2) Rešerše získání materiálu pro stavbu statorové části motoru a jader cívek pro magnetické ložisko, otestování reálných vlastností.
- 3) Stavba laboratorního modelu pomocí 3D tisku.
- 4) Experimentální ověření funkčnosti.

4 Konstrukční část

V této části diplomové práce se budeme zabývat kompletním návrhem vlastního BLDC motoru. Budeme tedy řešit vlastnosti, možnosti sehnání a zpracování materiálu potřebného na výrobu statorového jádra. Dále samotný návrh tvaru tohoto jádra a v neposlední řadě návrh pláště motoru s integrovaným systémem vodního chlazení. Dále budeme řešit návrh konstrukce aktivního magnetického ložiska, tedy vlastností a typ materiálu pro výrobu elektromagnetů, dále tvar a design jednotlivých modulů. Prvním a nejdůležitějším modulem bude modul s elektromagnety kompenzující radiální síly a udržování tak hřídele v požadované poloze. Druhým modulem, po elektronické stránce nejsložitějším, bude modul s optickými senzory pro přesné snímání polohy hřídele. Třetím modulem bude takový, který bude kompenzovat axiální síly působící v ose hřídele pomocí odpuzivých sil permanentních magnetů. Výsledkem praktické části bude vodou chlazený BLDC motor s aktivními magnetickými ložisky na obou stranách točící se s absolutně nulovými třecími ztrátami.

4.1 BLDC motor

Každý BLDC motor, neboli bezkartáčový stejnosměrný motor obsahuje plášť, který bývá kovový, avšak zde bude vyroben z plastu. Dále obsahuje stator, tedy vlastní vinutí na feromagnetickém jádře a nakonec rotor, který je u tohoto typu motoru tvořen permanentním magnetem. V následujících podkapitolách se postupně podíváme na návrh všech těchto částí.

4.1.1 Stator

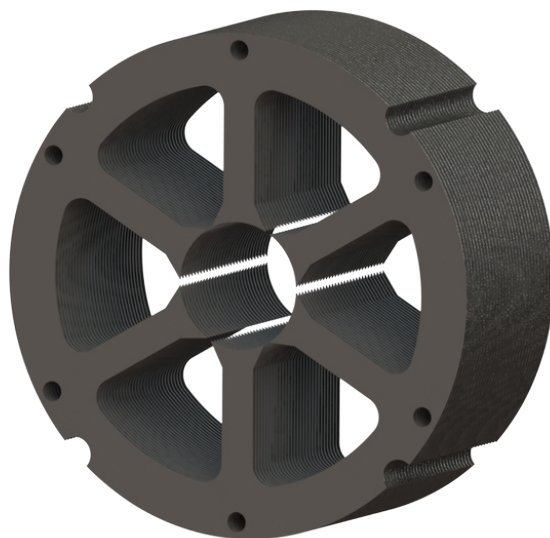
Stator je u tohoto typu motoru tvořen jádrem z feromagnetického materiálu a trojího měděného vinutí. Materiálů použitelných na stavbu jádra může být vícero. Může se jednat o statorové plechy ze slitiny železa a křemíku, nebo o feritové jádro vyrobené práškovou metodou. Z důvodu vzniku vířivých proudů však nelze jádro vyrobit z plného materiálu. Pro stavbu prototypového jádra jsem zvažoval hned několik variant. V úvahu připadalo nechat si jádro vyrobit na zakázku u nějaké ze specializovaných firem, dále najít vhodný materiál na inzertních portálech, který by se nechal dále zpracovat, nebo případně použít statorové jádro z nějakého již vyřazeného motoru. Provedl jsem tedy rešerši firem, které nabízejí výrobu jader. Mezi takové firmy se například řadí firma Elpro - Energo, která se zabývá hlavně

výrobou celých transformátorů, ale i jader ze za studena válcovaných plechů, které dosahují magnetické indukce až 1,7 Tesla. Další firmou je například německá Grau - stanzwerk, která nabízí celou řadu elektrotechnických plechů včetně jejich řezání laserem.

Celou řadu firem jsem kontaktoval, avšak zřejmě z důvodu pro ně nezajímavé zakázky se ozvala pouze jedna. Ze zkušeností vedoucího práce jsme však věděli, že zakázková výroba jednoho kusu takového jádra zpravidla trvá velmi dlouho, řádově půl roku. Druhá možnost, která připadala v úvahu, a to použití statorových plechů z již vyřazeného motoru byla taktéž zavržena z důvodu nesehnání odpovídajícího motoru. Během této fáze řešení materiálu pro výrobu statoru jsem narazil na inzerát na portálu eBay.de, kde prodejce inzeroval 17 kusů elektrolechů o rozměrech 1000 x 400 mm s tloušťkou 0,35 mm za velmi příznivou cenu. Tyto plechy byly nakonec zakoupeny. Následně bylo tedy zapotřebí najít firmu, která z těchto plechů vyřeže nebo vypálí na laseru požadované tvary jak pro stator motoru tak ale i pro jádra elektromagnetů radiálního ložiska. Z logistických důvodů, kdy by bylo pracné plechy dopravovat někam daleko, byla zvolena firma O.K. stavební s.r.o sídlící v Červeném Kostelci na Náchodsku. Ta od roku 2016 disponuje novým CNC laserovým střediskem pro dělení plechů. Maximální formát tabule, kterou jsou schopni zpracovat je 3000 x 1500 mm, což je pro náš účel dostačující. Minimální tloušťka plechu, kterou však běžně pálí je 0,5 milimetru, avšak po telefonické domluvě bylo dohodnuto, že zkusí i tento slabší plech. [23]

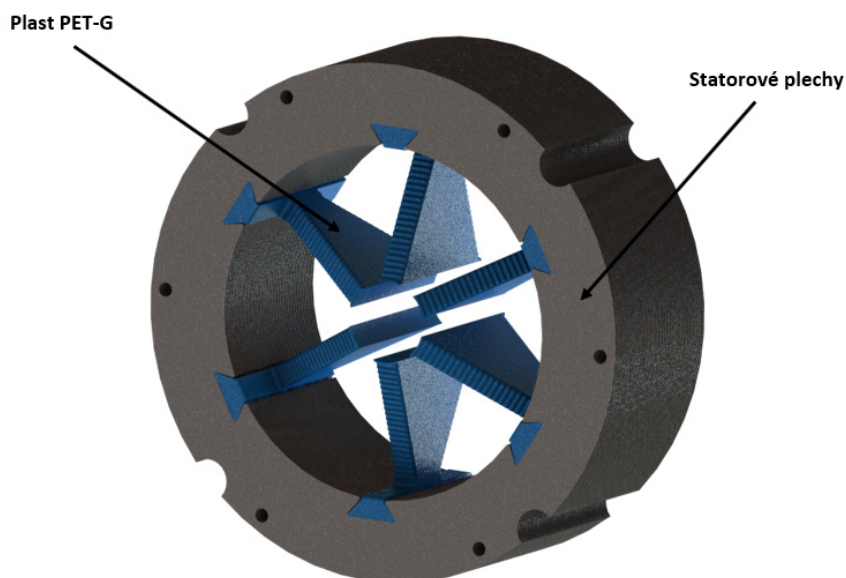
Jádro bylo nejprve navrženo tak, že bude obsahovat šest pólových nástavců, na kterých budou jednotlivá vinutí. Magnetický tok se bude uzavírat v prstenci okolo těchto pólových nástavců. Jednotlivé plechy k sobě budou staženy šesti závitovými tyčemi o velikosti M3, čímž bude zajištěno rovnoměrné stažení po celém obvodu. Jeho rozměry vychází z předchozího již funkčního prototypu doc.Ing. Martina Nováka Ph.D. Na tento návrh se podívejme na Obr. 8.

Jenže z pozdějšího zjištění samotné síly permanentního magnetu v rotorové části motoru musel být návrh značně přetvořen. To z toho důvodu, že tento magnet je tak silný, že by byl k pólovým nástavcům přitahován tak velkou silou, kterou by radiální magnetická ložiska nebyla schopna překonat. Bylo proto navrženo následující řešení. Ze statorových plechů bude tvořen pouze prstenc okolo pólových nástavců, přes který se bude uzavírat magnetický tok. Samotné pólové nástavce budou z magneticky nevodivého materiálu. V tomto případě byly zvoleny nástavce plastové vytvořené pomocí 3D tisku. Použit bude plast PET-G, a to z toho důvodu, že bude v přímém kontaktu s vinutím, které se bude značně zahřívat. Tento plast totiž vydrží větší teplotu než PLA, které bude použito na ostatní funkční díly. I tak se ale bohužel bavíme o teplotě jen cca 80°C, namísto nějakých 60°C u PLA. Použitím plastových pólových nástavců se však připravíme o výhody použití statorových plechů, hlavně jejich magnetické indukce. Na druhou stranu, budou-li pólové nástavce odděleny od zbylého prstence, bude s



Obr. 8: Původní návrh statoru (bez vinutí)

nimi mnohonásobně lepší manipulace při navíjení měděného vinutí. Co se týče spojení mezi plastovými nástavci a kovovým jádrem, tak bude zajištěno pomocí rybinové drážky. Nástavce budou tištěny s přesahem a po navinutí drátu do těchto drážek zalisovány. Motor s plastovými pólovými nástavci bude mít malý moment, avšak v tomto případě nebylo cílem mít motor s velkým momentem, nýbrž funkční jednotku pro otestování aktivních magnetických ložisek. Na výsledný návrh statoru se podívejme na Obr. 9.



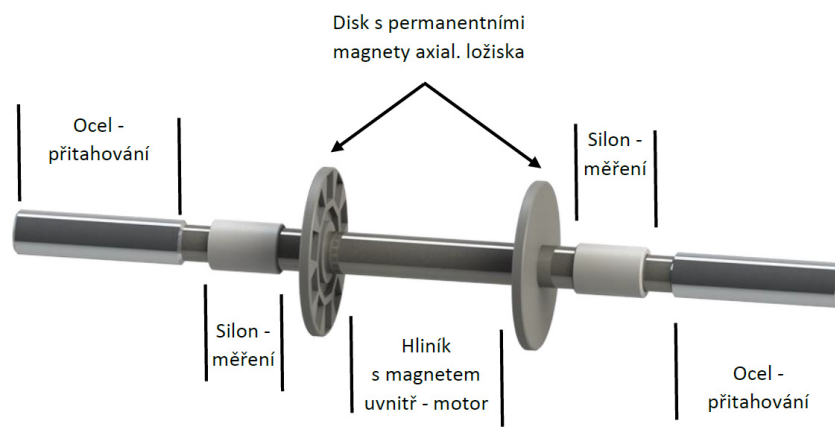
Obr. 9: Výsledný návrh statoru (bez vinutí)

4.1.2 Rotor

Rotor je u BLDC motorů tvořen permanentními magnety. Většinou se používají silné neodymové magnety obdélníkového tvaru, které jsou umístěny po obvodu rotoru. Zde však platí, že čím je větší průměr rotoru, tím je obvodový tvar tvořen magnety kruhovitější. V mém případě hřídel bude mít velmi malý průměr (konkrétně 15 milimetrů) a takto umístěné magnety by nevytvořily kruh, nýbrž jakýsi mnohoúhelník. Z tohoto důvodu nebude rotor laboratorního modelu obsahovat magnety tohoto tvaru. Magnet zde bude pouze jeden, a to diametrálně polarizovaný válcového tvaru. Tento magnet byl zvolen na základě předchozích zkušeností vedoucího, který již obdobný motor navrhoval a takovýto magnet jsme tudíž měli k dispozici. Parametry tohoto magnetu jsou následující: [24]

Materiál	Rozměr	Rem. magnetizace	Max. teplota	Hmotnost	Cena
NdFeB	13,3 x 50 mm	1.25 T	100° C	53 g	252 Kč

Tento magnet bude uvnitř hřídele, která bude vyrobena z hliníku, a to z důvodu nízké váhy. To však není jediný důvod použití tohoto nemagnetického materiálu. Pokud bychom magnet vložili do ocelové hřídele, odstínili bychom jeho magnetické pole, což je nežádoucí. V místě, kde bude hřídel procházet modulem senzorů na něm budou nalisovány silonové kroužky pro zajištění dobrého odrazu světla do optického senzoru. Navíc tak můžeme lépe zaručit stálý povrch této odrazové plochy, na rozdíl od hliníku, který oxiduje a oceli, která koroduje. Na koncích, kde bude hřídel procházet modulem s elektromagnety, budou zalisovány ocelová zakončení z důvodu, že hliník není feromagnetický a nešel by tedy elektromagnety přitahovat. Tyto konce budou mít přesný rozměr pro případné nasunutí konvenčních ložisek pro případné testování. Kromě těchto částí bude hřídel navíc obsahovat dva plastové prstence s neodymovými magnety, které budou uvnitř modulů axiálních ložisek pro zajištění axiální síly. Z konstrukčního hlediska bude tedy hřídel tvořena deseti díly. Návrh celého tohoto hřídele můžeme vidět na následujícím obrázku. V příloze číslo 1 poté můžeme vidět výrobní výkres, dle kterého jsem nechal hřídel vyrobiť a na Obr. 10 se podíváme na výsledný 3D model.

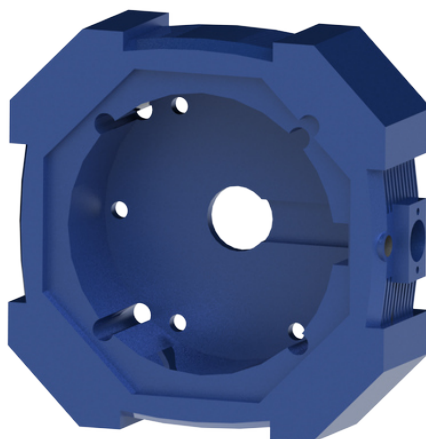


Obr. 10: Návrh rotoru

4.1.3 Plášť

Plášť BLDC motorů bývají zhotoveny z různých kovových materiálů, u malých motorů se nejčastěji setkáme s použitím hliníku. Ten velmi dobře odvádí teplo, které uvnitř motoru vzniká vlivem ztrát ať už v ložiscích, nebo při zahřívání jádra vlivem bludných proudů. Právě z důvodu dostatečného odvodu tepla bylo zapotřebí se zamyslet nad velikostí ztrát a schopnosti pláště toto teplo bezpečně odvézt do okolí. Jenže zde může nastávat další problém, okolí motoru totiž budou tvořit další moduly, kterými jsou pasivní axiální ložiska, senzory polohy a aktivní magnetická ložiska, která však zahřívát nechceme. V úvahu připadá na vnější stranu pláště umístit žebrování, které zvýší odvod tepla do okolí. Elektronika, která bude součástí ložisek musí být před tímto vlivem ale ochráněna dostatečně, a proto přichází na řadu úvaha vodního chlazení. Vodní chlazení je zřejmě nejúčinnější možnost, jak motor chladit a zabránit tak, přestupu tepla k elektronickým součástem, kterým se s teplotou mění elektrické vlastnosti, které bychom tak nemohli správně určit pro pozdější řízení.

Plášť motoru bude tedy obsahovat spirálové vedení pro chladicí kapalinu, která bude teplo odvádět do externě uloženého chladiče. Pro ideální přenos tepla z místa, kde se bude generovat ke chladicí kapalině by bylo ideální zvolit jako materiál pláště hliník, nebo jeho slitinu. Pro účel prototypu je však dostačující plášť vyrobit z plastu. Je jasné, že na rozdíl od hliníku nebude plastový plášť dostačující pro potřebný odvod tepla, ale tento návrh má ukázat princip tohoto chlazení. Konkrétně byl zvolen plast PLA a metoda 3D tisku stejná jako u pólových nástavců, tedy FDM. To znamená metoda, kdy se takzvaný filament, tedy struna plastu navinutá na cívce, přetaví na výsledný objekt. Model celého pláště můžeme vidět na Obr. 11: Plášť motoru.



Obr. 11: Plášť motoru se spirálovou dutinou uvnitř

4.1.4 Chlazení

Ve statorové části každého elektrického motoru dochází nejen vlivem vířivých proudů k tepelným ztrátám. Vzniklé teplo je tedy zapotřebí v dostatečném množství z motoru odvádět ať už pasivní nebo aktivní cestou. Pasivní chlazení bývá na motorech řešeno velmi často a to pomocí chladících žeber na vnější straně pláště. Tato žebra zvyšují vnější plochu, tedy styčnou plochu s okolím motoru, díky čemuž zajišťují větší přestup tepla. Takováto žebra můžeme na mém návrhu tvaru pláště vidět ze všech čtyřech stran. Aktivní chlazení může být řešeno vícero způsoby. Prvním způsobem, nad kterým jsem se zamýšlel bylo aktivní chlazení zajištěné pomocí ventilátoru. Praxe by vypadala tak, že by vnější plášť byl tvořen dvojitou stěnou, kterou by protékal proud vzduchu hnaný ventilátorem z čela celého zařízení. Nejen kvůli tvarové složitosti jsem se však přiklonil k aktivnímu chlazení zajištěnému pomocí protékající chladící kapaliny pláštěm. Toto řešení vyžaduje sice jednodušší tvar pláště, avšak potřebuje ke své funkci více externího zařízení. Kromě hadiček je zapotřebí ještě chladič, ve kterém se bude ohřívaná kapalina opět chladit na udržitelnou teplotu. Dalším potřebným zařízením, které je k tomuto typu chlazení potřeba je zařízení zajišťující cirkulaci kapaliny. Zde jsem řešil z mého pohledu zajímavou myšlenku. Je zde možnost vzít nějaké již hotové čerpadlo, například akvarijní, k čemuž ve výsledku i dojde. Avšak ona myšlenka spočívá v možnosti návrhu jednoho nového modulu, který by byl součástí celého zařízení. Jednalo by se o čerpadlo poháněné přímo BLDC motorem,

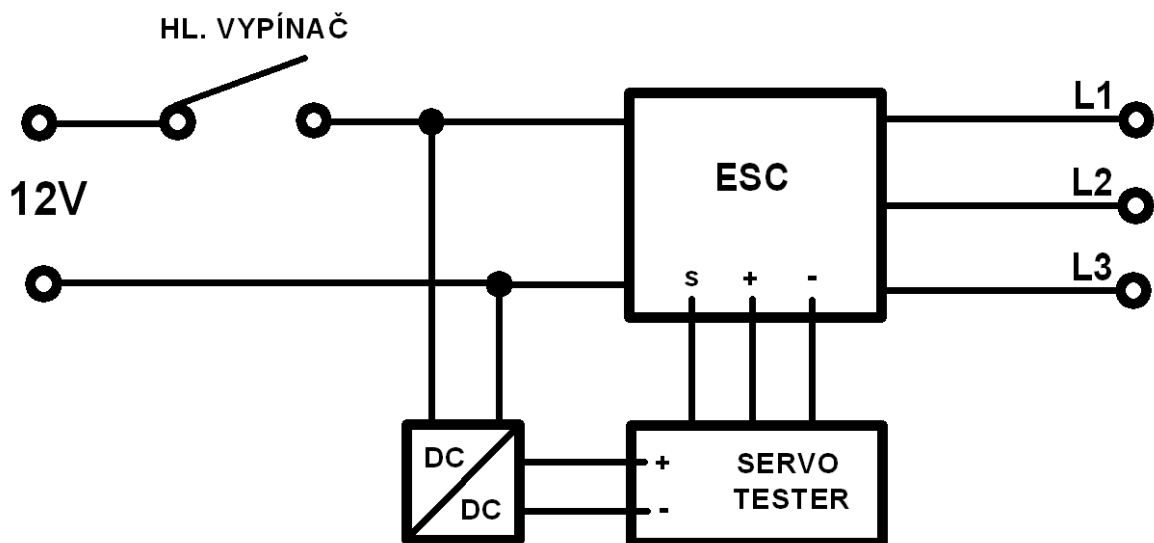
kdy by lopatky oběžného kola byly unášeny v oddělené komoře pomocí permanentních magnetů. Mezi rotorem BLDC motoru a oběžným kolem s lopatky by fungovalo něco jako magnetická spojka. V oddělené komoře by oběžné kolo bylo z toho důvodu, aby odpor vody nebrzdil samotný motor. K nějakému brzdění by přeci jen docházelo, avšak pouze přes magnetické pole. Pokus by tedy došlo k zastavení oběžného kola, nevedlo by to k zastavení celého zařízení. Takovéto celé kompaktní řešení by bylo velmi zajímavé, avšak mnohem složitější a ruku v ruce s tím i méně spolehlivé než použití externího čerpadla. Toto externí čerpadlo s nastavitelným průtokem 50 až 400 litrů za hodinu a výtlakem 0,6 metru můžeme vidět na Obr. 12: Akvarijní čerpadlo Micra.



Obr. 12: Akvarijní čerpadlo Micra

4.1.5 Řízení

Co se týče řízení samotného BLDC motoru, tak bude zajištěno pomocí takzvaného ESC (electronic speed control), tedy elektronického regulátoru otáček. Jedná se o zařízení, které pomocí PWM signálu spíná v potřebných intervalech výkonové tranzistory, čímž pouští napětí do vinutí a tvoří tak rotující magnetické pole uvnitř motoru. I přesto, že řídíme v podstatě třífázový motor, jeho napájení je ze zdroje stejnosměrného napětí. Toto zařízení se v největší míře používá v modelářské sféře právě pro řízení otáček motorů (letadel, aut, lodí, ...) na základě signálového vstupu z přijímače. V tomto případě však bude vstupní signál do tohoto kontroléru zajištěn pomocí takzvaného servo testeru. Ten poskytuje stejný výstupní signál pro ESC jako již zmíněný přijímač v modelech a výchylku na něm lze měnit pomocí potenciometru. Jeho napájecí napětí však není 12V jako je tomu u kontroléru, proto bylo potřeba použít stabilizátor pevného napětí, který pro něho zajistí potřebné konstantní napětí 6V. Celá tato elektronika potřebná k ovládní navrhovaného BLDC motoru je zapojena podle následujícího elektrického schématu.



Obr. 13: Elektrické schéma zapojení řízení motoru

Pro pohodlné ovládání a mechanickou ochranu této řídicí elektroniky byla navržena plastová krabička. Ta uvnitř obsahuje veškeré zmíněné elektrické komponenty. Pro uživatele je na horní straně umístěn hlavní vypínač a otočné kolečko potenciometru. Na zadní straně jsou umístěny panelové zdířky pro připojení stejnosměrného napětí 12V a vystupující tři žilový kabel pro připojení jednotlivých fází BLDC motoru. Tato krabička byla vzhledem k potřebné velikosti a tvaru opět vyrobena pomocí 3D tisku. Jak ve výsledku vypadá se můžeme podívat na Obr. 14: Krabička ovládání BLDC motoru.



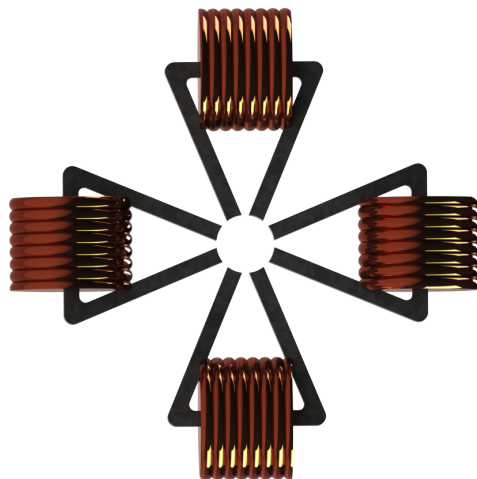
Obr. 14: Krabička ovládání BLDC motoru

4.2 Radiální aktivní magnetické ložisko

Při návrhu modulu radiálního magnetického ložiska pro tento laboratorní model bylo výchozím bodem zařízení vyvíjené v rámci studentské grantové soutěže. Toto zařízení bylo navrženo na čtyři elektromagnety, vždy dva na jednu osu.

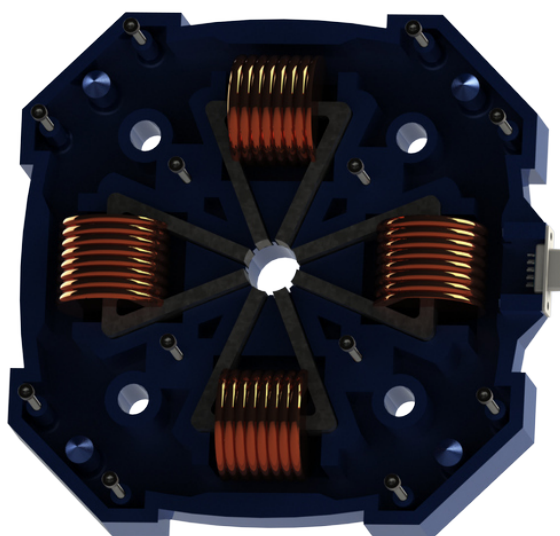
4.2.1 Elektromagnety

Elektromagnety používané v tomto ložisku jsou tvořeny jednotlivými jádry s měděným vinutím. Jádro z tenkých feromagnetických plechů má trojúhelníkový tvar, kdy jeden jeho vrchol je otevřen. Tím vzniknou dva póly elektromagnetu, které směřují do středu hřídele rotoru. Ze čtyř elektromagnetů nám vznikne osm rovnoměrně rozmístěných pólů, vůči sobě pootočených o 45° , které by měly být schopny zajistit přitažlivou sílu do všech směrů. Magnetický tok se tak uzavírá přes feromagnetickou část rotoru, v našem případě přes válcové zakončení vyrobené z oceli. Na konkrétní uspořádání elektromagnetů se můžeme podívat na Obr. 15.



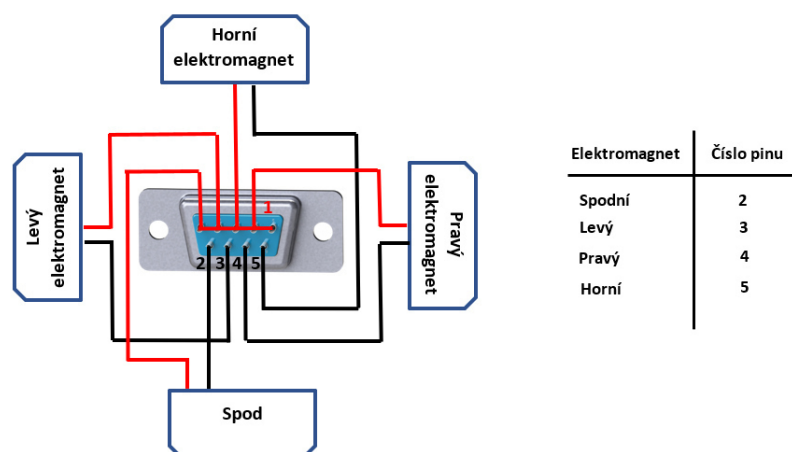
Obr. 15: Pozice elektromagnetů

Tato pozice jednotlivých elektromagnetů byla třeba pevně zajistit. Proto bylo následně zapotřebí navrhnout tělo modulu. Ten je opět navržen pro výrobu metodou 3D tiskem z plastu. Jeho vnitřní konstrukce umožňuje přesné uložení elektromagnetů v žádané pozici a vedení kabelů od jednotlivých cívek ke konektoru. Ten byl kvůli svým rozměrům a dostupnosti zvolen D-SUB 9, tedy konektor s devíti piny od firmy Canon.



Obr. 16: Tělo modulu s elektromagnety

V tomto případě je však zapotřebí vodičů pouze osm. Bylo tedy zvoleno zapojení, kdy je kladné přívodní napětí ke každé cívce realizováno přes jeden vlastní pin a zbylých pět je propojeno. Nulové napětí, takzvaná zem, je tedy vedena těmito propojenými piny společně. Pro názornost zapojení jednotlivých cívek se můžeme podívat na Obr. 17.



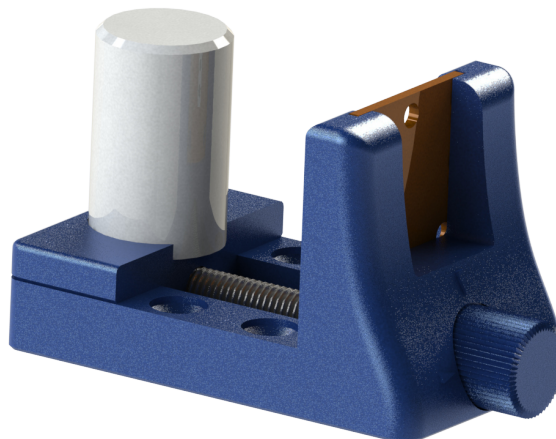
Obr. 17: Zapojení jednotlivých cívek

Kabel, kterým se moduly s elektromagnety připojí k výkonové elektronice musel být vybrán s následujícími kritérii. Hlavním z nich byl dostatečný průřez vodičů a to z toho důvodu, že elektromagnety protéká relativně vysoký proud. Konkrétně se se špičkovými proudy dostáváme na hodnotu okolo šesti ampér. Z tohoto důvodu byl zvolen průřez $0,75 \text{ mm}^2$. Počet žil je dán počtem elektromagnetů, kdy každý elektromagnet zabere 2

vodiče. Kabel musí být tedy osmi žilový. Dalším kritériem, které bylo při výběru kabelu v úvahu bylo rušení. Jelikož budeme řídit proud do jednotlivých cívek s vysokou frekvencí nezávisle na sobě a tudíž nechceme, aby se nám do okolních vodičů ostatních cívek a hlavně měřících obvodů indukovalo rušivé napětí. Byl tedy zvolen kabel s osmi měděnými vodiči s konstrukcí jádra typu licna, které jsou jednotlivě v ochranné bužírce. Okolo nich je poté opletení z pocínovaných měděných drátů a na povrchu opět ochranná bužírka. Cena za jeden metr takového kabelu činí 77 korun.

4.2.2 Snímání polohy

Snímání polohy bylo při návrhu věnováno snad nejvíce času. Potřebujeme totiž měřit polohu hřídele v xy směru. Hřídel je však kulatá a k jejímu přesnému měření tedy nestačí senzory dva, na každou osu jeden. Při vychýlení hřídele ve vodorovném směru bychom vlivem kruhovitěho průřezu hřídele totiž získali špatnou informaci od senzoru snímajícího vertikální směr a to takovou, že se hřídel oddálil, což není pravda. Jediným možným řešením tohoto problému je použití senzorů čtyř, a to dvou na každou osu. Ty nám tuto chybu eliminují, protože opravdové vychýlení od dané osy nastává pouze tehdy, když senzory v jedné ose naměří rozdílné hodnoty.



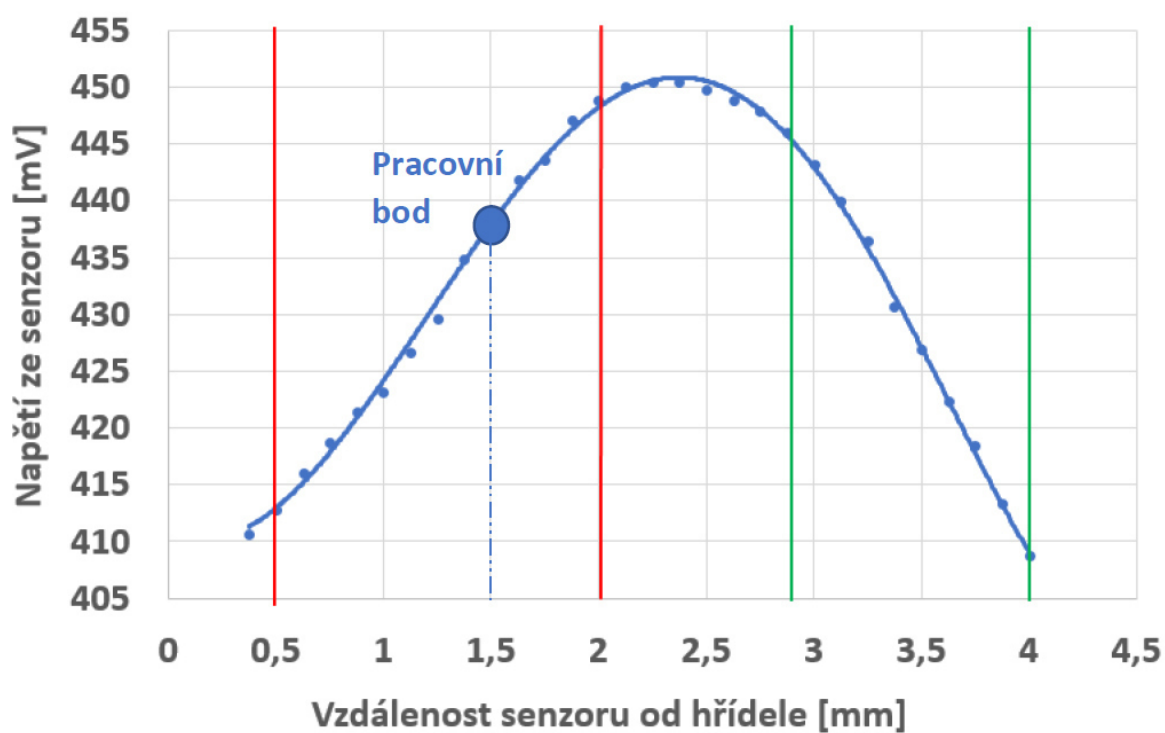
Obr. 18: Zařízení na měření charakteristiky senzorů

Typ senzorů, který zde připadá v úvahu je senzor optický. Byl tedy zvolen konkrétní typ HSDL-9100, což je SMD součástka o rozměrech 7x3x3 mm obsahující led diodu a

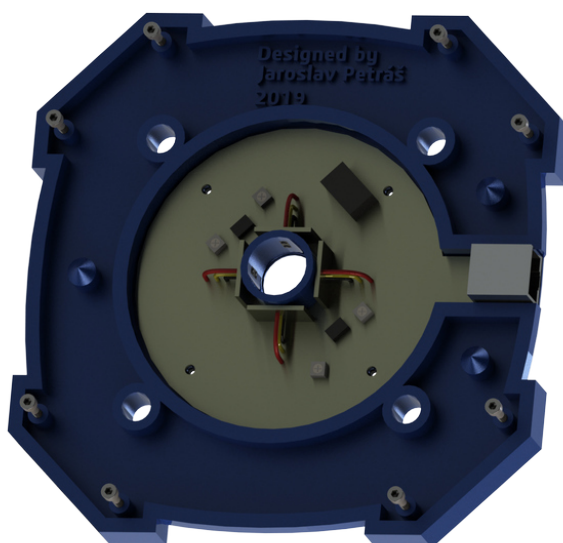
foto diodu. Dle datasheetu je tento senzor možné používat ve dvou relativně lineárních oblastech, a to ve vzdálenosti od měřeného objektu od nuly do pěti milimetrů, kdy s rostoucí vzdáleností roste i napětí na foto diodě. Druhou z těchto možností je od pěti do deseti milimetrů, kdy naopak s rostoucí vzdáleností napětí klesá. Snímaná hřídel je soustružena z hliníku, což by mohlo způsobovat odlesky od okolních senzorů. Z tohoto důvodu se bylo potřeba zamyslet i nad ideálním materiálem použitým v místě snímání polohy. Jako tento materiál byl zvolen silon, který je matný a v potřebném místě se nalisuje na hliníkovou hřídel.

Z hodnot z datasheetu je sice zřejmé v jakých vzdálenostech senzory musí být, nicméně reálná data při použití senzorů se snímaným objektem ze silonu bylo třeba ověřit. Pro tento účel bylo navrženo a následně vyrobeno jednoúčelové zařízení, které zajišťovalo uchycení senzoru na pevné části a silonového válečku na části posuvné. Šroubem s jemným stoupáním lze poté silonový váleček přibližovat nebo oddalovat od senzoru a zaznamenávat výstupní data. Toto zařízení bylo opět vyrobeno z plastu PLA na 3D tiskárně a jak vypadá můžeme vidět na Obr. 18.

Z naměřených hodnot byla získána charakteristika, která ne úplně odpovídala datům z datasheetu. Zjistili jsme, že jsou opravdu dvě přípustné pracovní oblasti, ve kterých je závislost napětí na vzdálenosti relativně lineární. Tyto vzdálenosti se však značně lišily. První z možných, tedy ta oblast, kdy s rostoucí vzdáleností roste indukované napětí není od nuly do pěti milimetrů, avšak pouze od půl milimetru do dvou. Druhá oblast kdy s rostoucí vzdáleností indukované napětí klesá je poté od cca dva celá osmi milimetrů do čtyř. Kvůli eliminaci dopadu nežádoucího světla na foto diody senzorů byla zvolena první pracovní oblast, tedy mezi půl a dvěma milimetry. Jak tato charakteristika vyšla můžeme vidět níže na Obr. 19.



Obr. 19: Charakteristika senzoru (pracovní oblast vyznačena červenou barvou)

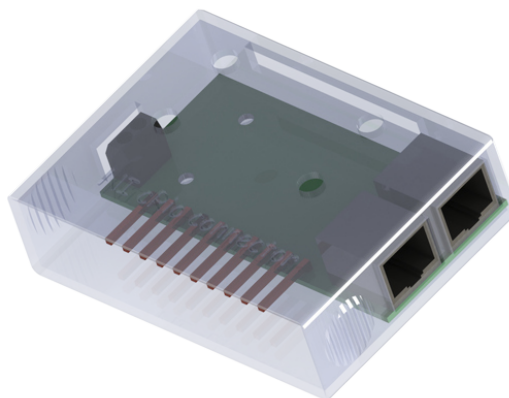


Obr. 20: Modul s optickými senzory

4.2.3 Řízení

Aktivní magnetické ložisko je zapotřebí řídit, a to velmi rychle. K tomuto účelu byl vybrán FPGA kontrolér od firmy National Instruments CompactRio. Toto zařízení se rozšiřuje o jednotlivé karty, které mohou být buďto digitální nebo analogové a stejně tak vstupní nebo výstupní. Pro řízení tohoto laboratorního modelu radiálního ložiska je zapotřebí dvou těchto karet. První z nich je karta s analogovými vstupy. Ta je použita pro čtení diferenciálně zapojených optických sensorů z obou radiálních ložisek. Druhou z použitých karet je karta digitálních výstupů. Pomocí té jsou zase naopak řízeny tranzistory spínající jednotlivé elektromagnety. Program pro FPGA kontrolér je tvořen v takzvaně blokovém programovacím jazyce LabView vyvíjeným taktéž firmou National Instruments. Základem programu jsou PID regulátory zajišťující držení hřídele pomocí vzniklého magnetického pole v požadované poloze. Tématem řízení se však zabývá kolega Bc. Jan Krofta v rámci jeho diplomové práce.

Vstupní a výstupní karty, přes které CompactRio komunikuje s další elektronikou jsou vybaveny svorkovnicí pro přichycení jednotlivých vodičů. Pro náš účel, kdy ke kartě připojujeme vodiče z dvou sensorových modulů a dvou výkonových desek pro elektromagnety, je takováto svorkovnice z důvodu připojování velmi nepraktická. Snadno by totiž mohlo dojít k přehození vodičů nebo by mohl vzniknout špatný kontakt a zařízení by přestalo fungovat. Navrhli jsme si tedy vlastní modul, který se skládá z desky tištěných spojů a plastového obalu. Ten se napevno připojí ke svorkovnici a jednotlivé kabely od sensorových modulů a modulů elektromagnetů se již připojují přes vlastní konektory. Sensory přes ethernetový konektor RJ-45 a výkonové desky elektromagnetů přes D-SUB 9. Jak tento modul vypadá se podívejme na Obr. 21.



Obr. 21: Modul mezi vstupní a výstupní kartou a zařízením

4.3 Axiální magnetické ložisko

Oproti uložení v klasických ložiscích jsou u radiálních magnetických ložisek velkou nevýhodou nezajištěné axiální síly působících na hřídel. Ty je potřeba eliminovat a zajistit tak pohyb hřídele v axiálním směru. Toho lze docílit vícero způsoby. Zařízení, které by bylo s hřídelem v přímém kontaktu by způsobovalo nežádoucí třecí ztráty. Přicházejí proto v úvahu dvě možnosti. První možností je použití aktivního axiálního magnetického ložiska. Tato možnost je asi tím nejlepším řešením. Jedná se o feromagnetický kotouč nasazený na hřídeli, kdy je po obou jeho stranách umístěn prstenec s jedním nebo dvěma vinutími. Ty zajišťují vznik magnetického pole, tedy přitažlivé síly, kterou je kotouč udržován v požadované pozici. Pro tento typ ložiska je však opět potřeba elektrická energie, senzory polohy hřídele, výkonová a řídicí elektronika. Pro tento laboratorní model by však takovéto ložisko bylo zbytečné.

Druhou možností eliminace axiální síly je magnetické ložisko pasivní. To ke svému provozu nevyžaduje elektrickou energii, senzory, ani žádnou elektroniku. Lze jej realizovat pomocí permanentních magnetů, které se navzájem odpuzují. V tomto případě jsou tato axiální ložiska použita dvě, a to z toho důvodu, že každé z nich zajišťuje axiální sílu v jednom směru. Neodymové permanentní magnety jsou umístěny ve stěně navrženého ložiskového modulu, uvnitř kterého rotuje, společně s hřídelí, plastový kotouč. Ten je osazen druhou řadou permanentních magnetů, se kterými se navzájem odpuzují. Použité permanentní magnety od firmy Unimagnet mají rozměr 10x10x2 milimetrů, jsou poniklované a jejich sílu výrobce udává cca 1,8 kilogramu. Větší magnetická síla nebyla uvažována z důvodu, že by mohlo docházet k vyvolání netlumeného kmitání v axiálním směru. Se slabšími magnety tento efekt nebude tak zásadní.

Modul axiálního ložiska byl navržen na vsazení deseti neodymových magnetů do kruhového tvaru tak, aby mezi nimi byly co možná nejmenší mezery. Stejně tak plastové kotouče, jejichž magnety od těch v modulu budou vzdáleny od 2 do 4 milimetrů, dle axiálního zatížení. Tento axiální modul je zobrazen na Obr. 22.

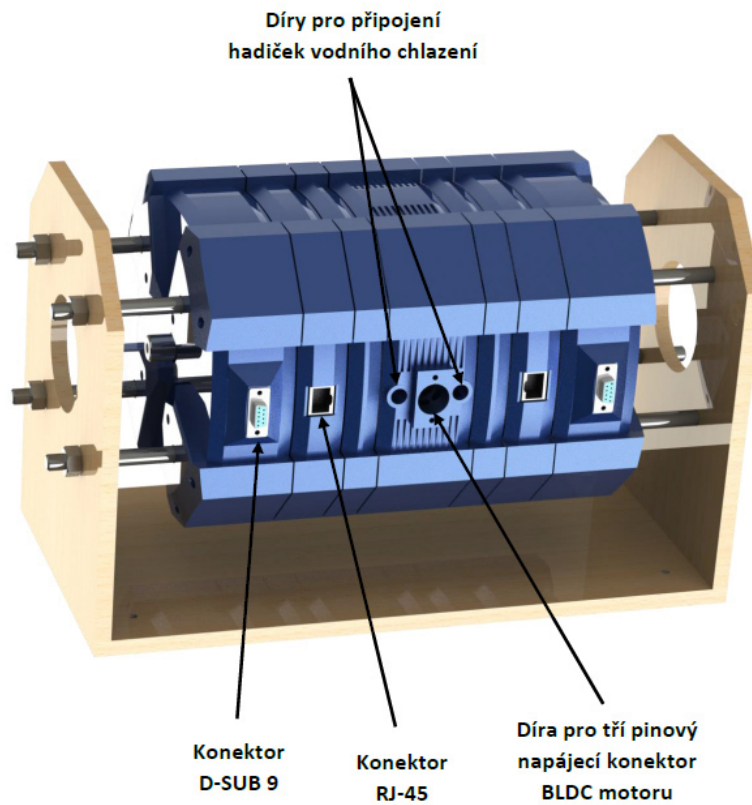


Obr. 22: Axiální modul

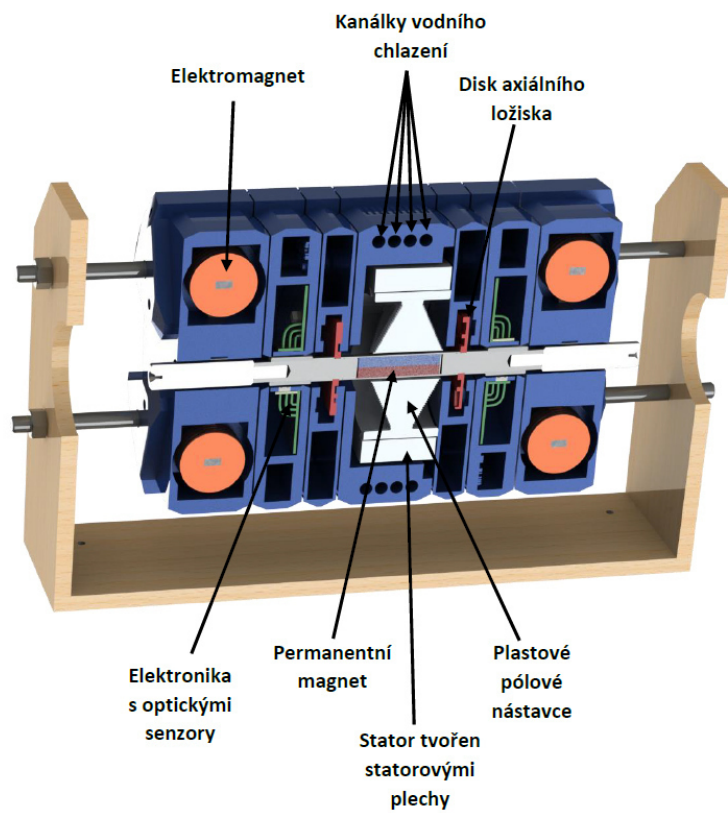
4.4 Kompletní zařízení

Myšlenka modulové koncepce tohoto zařízení spočívá v následujícím. Každý modul umí pracovat sám nezávisle na ostatních. Zde však není myšleno to, že by například modul s elektromagnety k fungování nepotřeboval modul se senzory, ale že v něm lze například testovat sílu jednotlivých elektromagnetů. Lze tedy každou část tohoto zařízení testovat a následně i zlepšovat zvlášť bez nutnosti změn na jiném modulu. Opět uvedu příklad, bude-li potřeba otestovat jiný typ senzorů, vyrobí se nový pouze modul s těmito senzory, který se zamění za modul starý kus za kus a zařízení je opět připraveno ke své funkci.

Souosost veškerých modulů bude zajištěna pomocí čtyř závitových tyčí velikosti M10, na kterých budou tyto moduly nasazeny a po bocích pevně staženy pomocí matic. Celé toto zařízení bude připevněno v montážním přípravku, který je navržen pro výrobu ze dřeva. Uprostřed se nachází modul s BLDC motorem, jehož plášť zahrnuje kanálky pro průtok chladicí kapaliny. Z boku můžeme vidět místo pro připevnění tří pinového konektoru pro napájení vinutí a po jeho stranách přípoje pro hadice vodního chlazení. Směrem ke kraji se na obou stranách nacházejí moduly pasivních axiálních magnetických ložisek. To jsou moduly obsahující neodymové magnety. Více ke krajům jsou poté moduly s optickými senzory a měřící elektronikou. Na nich můžeme vidět umístěné osmi pinové konektory RJ-45, které můžeme znát jako klasické konektory na ethernet. Na úplných koncích celého zařízení se nacházejí moduly aktivních radiálních magnetických ložisek s elektromagnety. Na nich se nachází devíti pinové konektory D-SUB 9 pro napájení jednotlivých elektromagnetů. Na tento model celého sestaveného zařízení se podívejme na Obr. 23 a v řezu na Obr. 24.



Obr. 23: Model kompletního zařízení



Obr. 24: Model kompletního zařízení v řezu

5 Experimentální část

V této části se zaměříme na měření a následné vyhodnocení magnetických vlastností feromagnetického materiálu, který byl pro stavbu laboratorního modelu zvolen. Jedná se o vysoce magneticky vodivé plechy o tloušťce 0,35 mm. Potřebnými údaji, které bylo potřeba o tomto materiálu zjistit, byla B-H charakteristika. Jedná se o závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole, tedy hysterezní smyčku. Na základě těchto vlastností byl dále stanoven vyhovující tvar statorového jádra.

5.1 Měření B-H charakteristiky

První ze stěžejních fyzikálních veličin pro určení magnetických vlastností materiálu je magnetická indukce. Je to vektorová veličina, která vyjadřuje silové působení magnetického pole na vodič s proudem a její doporučená fyzikální značka je písmeno B. V homogenním magnetickém poli je konstantní. Jednotkou je tesla, značí se písmenem T. Pro představu velikosti této jednotky například mají jádra elektromagnetů hodnotu magnetické indukce řádově v okolo jedné tesla. Základní vztah pro výpočet magnetické indukce obsahuje maximální magnetickou sílu F působící na elektrický náboj Q, která připadá jednotkové hodnotě $Q \cdot v$, kde v je rychlost.

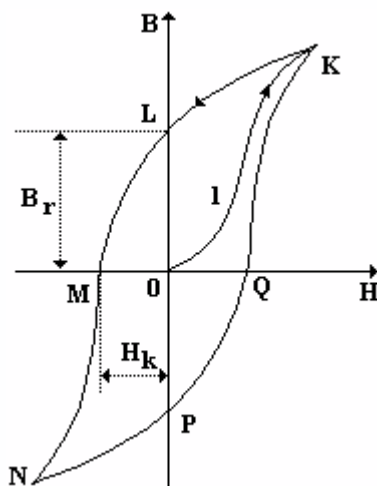
$$B = \frac{F_{max}}{Q \cdot v} \quad (1)$$

Další z hlavních veličin je intenzita magnetického pole. Opět se jedná o vektorovou veličinu, která popisuje silové účinky magnetického pole. Její doporučené značení je písmenem H a jednotkou je A/m, tedy Ampér na jeden metr. Její vztah k magnetické indukci je popsán následující rovnicí, kde μ_0 je permeabilita vakua a M je magnetizace charakterizující účinky vázaných magnetických proudů.

$$H = \frac{B}{\mu_0} - M \quad (2)$$

Takzvaná B-H křivka je průběh spojující tyto dvě fyzikální veličiny. Bavíme se o ní u feromagnetických materiálů, u kterých nám ukazuje velikost magnetické indukce v

závislosti na vstupním proudu. Osa "x" zobrazuje intenzitu magnetického pole H a osa "y" magnetickou indukci B . Výsledný průběh má tvar hysterezní smyčky, viz Obr. 25.



Obr. 25: Hysterezní smyčka [26]

Pro měření vlastností plechů bylo potřeba vytvořit testovací vzorek. Ten je tvaru prstence složeného z dostatečného množství plechů. Tyto prstence byly z důvodu kusové výroby vyráběny ručně. Plechy jsou však velmi tenké a tvrdé a první pokusy o vysekání prstenců pomocí kruhových děrovačů nedopadly dle očekávání. Plech se pouze tvářel, nikoliv vysekával. Tyto neúspěšné pokusy jsou zobrazeny na Obr. 26.

Následný postup, který spočíval ve vrtání vnitřního průměru a stříhání průměru vnějšího byl již úspěšnější. Takto nahrubo vytvořené prstence byly následně staženy k sobě a na soustruhu doobrobena na výsledný kruhový tvar. Po této dokončovací operaci byly plechy z obou stran nalakovány, opět k sobě staženy a nechány zaschnout a spojit se. Na takto vyrobený testovací prstenec se následně namotala dvě vinutí, primární a sekundární. Použitý lakovaný měděný drát má průměr 1 mm. Na primární i sekundární vinutí bylo navinuto stejné množství závitů a to 24. Výsledný testovací prstenec je zobrazen na Obr. 27.

S hotovým testovacím vzorkem přišlo na řadu sestavit testovací soustavu. Nejdříve byla sestavena z následujících komponentů. Zdroj stejnosměrného napětí, střídač, myRio,



Obr. 26: Pokus o vysekání prstenců

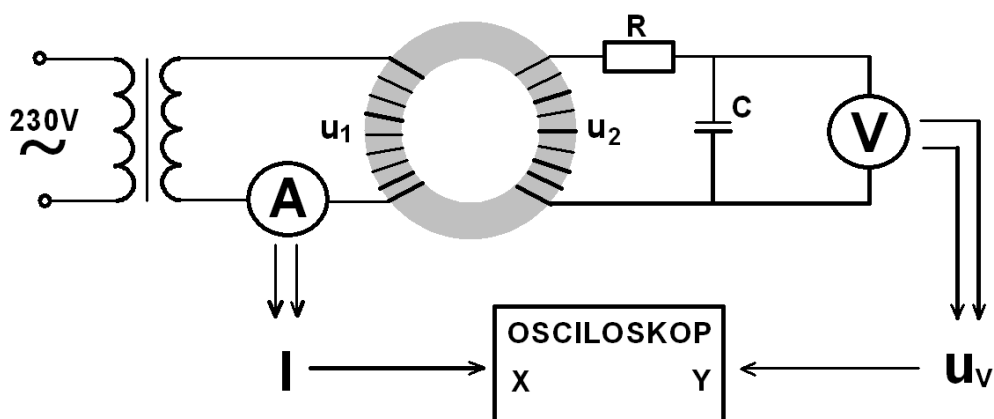
testovací vzorek, integrátor a osciloskop. Střídač zajišťoval rozstředění stejnosměrného napětí z toho důvodu, že magnetická indukce se tvoří jen při změně elektrického toku. To, jakou frekvenci bude střídač vytvářet bylo řízeno právě zařízením s FPGA polem programovaným v LabView. Proud na primárním vnutí byl měřen klešťovou sondou a výstupní napětí na integrátoru sondou klasickou, obě pomocí digitálního osciloskopu.

S pomocí této soustavy jsem nebyl schopen naměřit potřebná data a druhou možností, jak tento experiment provést bylo sestavit měřící soustavu novou. Ne však již se stejnosměrným zdrojem napětí a střídačem, nýbrž takovou, která bude připojená ke střídavé síti s frekvencí 50Hz. Nová měřící soustava se tedy skládala z regulovaného transformátoru, který uměl nastavit výstupní napětí 0 až 230V, dále z transformátoru, který měl na výstupu malé napětí, ale uměl poskytnout větší proud, až 15A. Dále z měřeného prstence, integrátoru a osciloskopu. Pomocí něho byl opět měřen proud na primárním vinutí, avšak tentokrát pomocí hallové sondy a napětí na sekundárním vinutím klasicky na integrátoru. Na toto schéma se podívejme na Obr. 28.

Na této měřící soustavě již byla získána data, která byla zaznamenána na flashdisk a následně importována do počítače. Tato data měla následující tvar. Deset tisíc hodnot z kanálu 1, kde byl měřen proud a stejné množství hodnot z kanálu 2, kde bylo měřeno napětí. Všechny hodnoty byly uloženy v milivoltech, které bylo třeba správně převést na



Obr. 27: Testovací prstenec



Obr. 28: Elektro schéma měřící soustavy

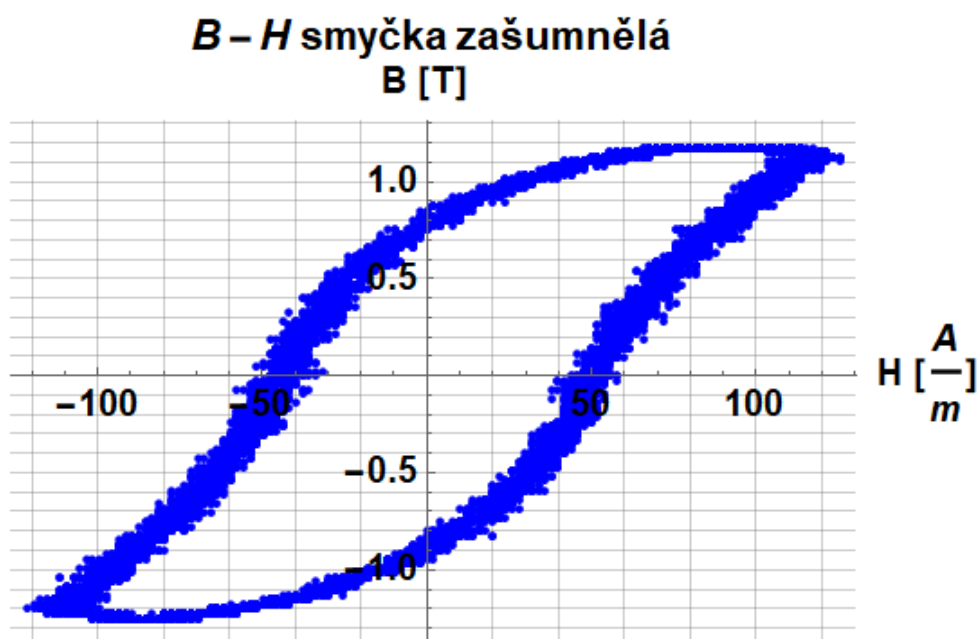
odpovídající jednotky. Napětí stačilo převést z milivoltů na volty, avšak proud bylo třeba přepočítat přes konstantu hallovy sondy a počtu procházejících závitů vodiče. Pro získání hodnot magnetické indukce B a intenzity magnetického toku H z naměřených hodnot bylo zapotřebí použít následující vzorce.

$$B = \frac{R \cdot C}{N_2 \cdot S} \cdot u \quad (3)$$

Kde R je hodnota rezistoru v integrátoru, která byla $R=50 \text{ k}\Omega$, C je hodnota kondenzátoru v integrátoru, která byla $C=20 \text{ nF}$, N_2 je počet závitů sekundárního vinutí, kterých bylo 24 a S průřez jádra, který byl 22 mm^2 . Hodnota napětí u byla právě hodnotou získanou z osciloskopu.

$$B = \frac{I \cdot N_1}{2 \cdot \Pi \cdot r} \quad (4)$$

Kde proud I je opět hodnota z osciloskopu, N_1 je počet závitů na primárním vinutí, tedy opět 24 a $2\pi r$, což je střední obvod kruhu testovacího prstence. Z vypočtených hodnot byla získána B-H křivka, která byla velmi zašumělá viz Obr. 29.

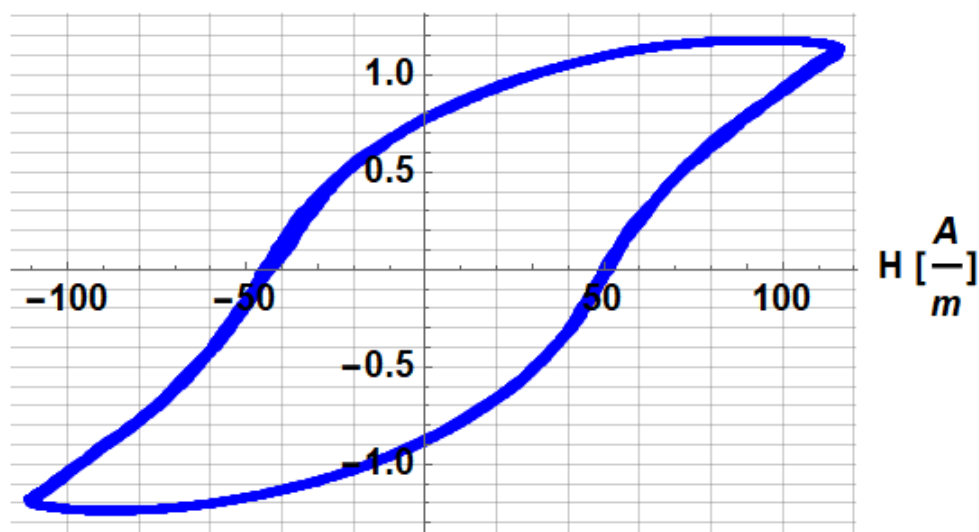


Obr. 29: B-H křivka zašumělá

Provedením zprůměrování, kdy byly vytvořeny průměrné hodnoty z každých 200 vzorků, byla získána přehlednější hystereze. Zde můžeme vidět, že její tvar je opravdu takový, jaký jsme od ní očekávali. Hodnota magnetické indukce vychází okolo hodnoty $1,2$ T. Ty magneticky nejlepší statorové plechy, obsahující materiály železo-křemík, dosahují hodnot magnetické indukce maximálně $1,5$ T. Na základě toho lze říci, že koupené plechy pro tento účel budou dostatečně vyhovovat. Na tuto výslednou hysterezi se podíváme na Obr. 30.

B-H křivka však není to poslední co nás u transformátorových plechů zajímá. Pro další návrhy, myšleno pro simulace magnetických toků pomocí počítačových softwarů je zapotřebí znát ještě jejich relativní permeabilitu. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která je u většiny látek okolo hodnoty 1 . Tato hodnota říká o materiálu, jak reaguje na magnetické pole. Má-li materiál tuto hodnotu o něco větší než jedna, tak se jedná o látku takzvaně paramagnetickou. Paramagnetické látky jsou magnetickým polem přitahovány, avšak nedokáží udržet magnetismus bez přítomnosti vnějšího pole. Mezi tyto látky patří

B – H smyčka filtrovaná



Obr. 30: B-H křivka vyfiltrovaná

například baryum, vápník, mangan a další. Má-li však materiál relativní permeabilitu mnohonásobně větší než jedna, jedná se o látky feromagnetické. V těchto látkách vznikají takzvané domény, neboli Weissovy domény. Jsou to jednotlivé oblasti materiálu, ve kterých jsou v magnetickém poli magnetické dipóly orientovány stejně. Mimo toto pole jsou dipóly orientované různě a výsledný magnetický moment látky je nulový. Tyto látky magnetické pole zesilují. Jedná se například o železo, nikl nebo kobalt. Látky mohou mít relativní permeabilitu i menší než jedna. Poté se jedná o látky diamagnetické. Ty jsou z magnetického pole vypuzovány. Nejlepšími diamagnetickými látkami jsou supravodiče. Ty mohou působení magnetického pole zcela zamezit. Další látky vykazující tyto vlastnosti jsou například uhlík, bismut, měď nebo zlato.

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5)$$

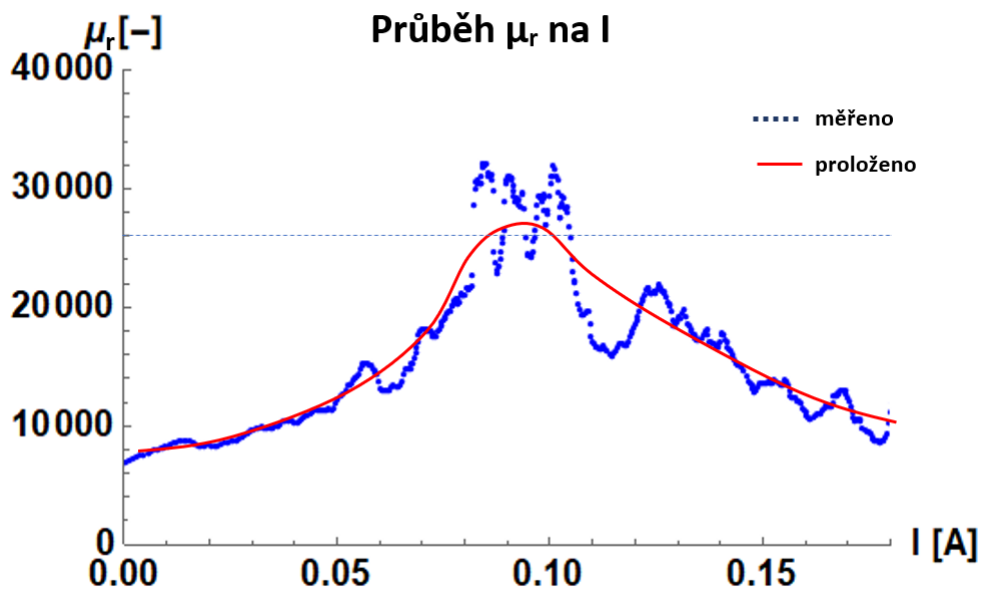
kde μ je permeabilita konkrétního materiálu a μ_0 permeabilita vakua. Permeabilita materiálu μ se spočítá dle následujícího vztahu.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (6)$$

Kde B je magnetická indukce [T] a H intenzita magnetického pole [A/m]. Permeabilita vakua je poté dána vztahem:

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

Pro účel dalšího návrhu je důležitá právě relativní permeabilita, což je poměr mezi B a H. Dle datasheetu, který byl k testovaným transformátorovým plechům k dispozici bylo patrné, že relativní permeabilita při 50Hz by měla být 25 000. Jelikož byly plechy kupovány z Německa od neznámého prodejce, nebylo možné se touto hodnotou řídit bez toho, aniž by byla ověřena experimentem. Průběh relativní permeability na proudu je vidět na obrázku. Všimněme si, že se k této hodnotě při experimentu opravdu blížíme, tudíž lze s touto hodnotou dále spolehlivě pracovat.



Obr. 31: Průběh μ_r na proudu

5.2 Simulace magnetických toků statoru

Tvar jader elektromagnetů je jako téměř jediná věc dán již od předchozích studentů a použit v prvním laboratorním modelu magnetického ložiska. Ten tedy zůstane stejný i pro druhé ložisko.

Co se však týče tvaru statoru pro nový BLDC motor, tak rozměry vycházel z předchozího prototypu od doc. Ing. Martina Nováka Ph.D, který však měl lisované jádro z feritového prášku. Pro tento účel byly použity statorové plechy a tak bylo zapotřebí znát právě jejich relativní permeabilitu. Matematické simulace byly prováděny nejprve ve volně přístupném simulačním programu Agros 2D.

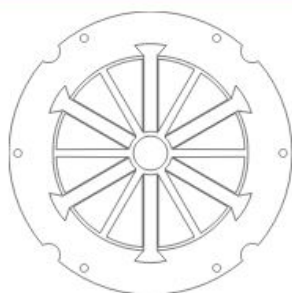
V tomto programu najdeme funkci na import 2D náčrtu součásti ve formátu DXF, avšak tato funkce mi z nějakého důvodu nefungovala ani při exportu z CADu SolidWorks ani po přeuložení v programu Autocad. Nicméně kromě importu zde lze simulovaný objekt nakreslit, a to ve zjednodušeném tvaru, se kterým poté software dokáže pracovat. Následně je potřeba každé nakreslené uzavřené oblasti přiřadit materiál a jemu jeho základní parametry. Těmi nejdůležitějšími jsou právě relativní permeabilita, u permanentních magnetů je to magnetická indukce v jednotkách tesla. Na Obr. 32 můžeme vidět zjednodušený tvar řezu navrhovaného BLDC motoru včetně feromagnetických plechů, pólových nástavců, měděného vinutí a permanentního magnetu. Bohužel problém s importováním DXF souboru nebyl jediný, se kterým jsem se v tomto programu potýkal.

Stator simulace kresleno v agrosu



Souřadnicový systém: Kartézský
Typ sítě: Triangle - trojúhelníky

Geometrie



Uzly: 118
Hrany: 124
Značky oblastí: 27
Materiály: 10
Hranice: 1

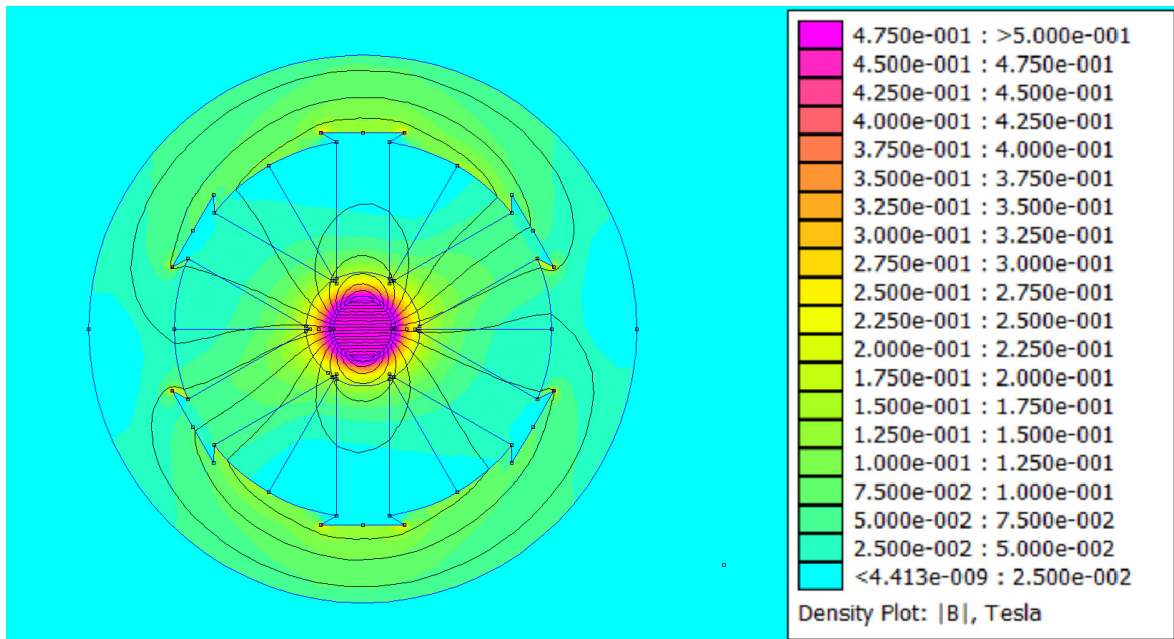
Magnetické pole

Analýza: Ustálený stav
Řešič: Lineární
Lineární řešič: MUMPS- přímý
Adaptivita: Vypnuto

Obr. 32: Tvar statoru v programu Agros2D

Dalším volně dostupným programem, který se rovněž specializuje na matematické simulace magnetických toků je program Femm. Tento program je oproti Agros2D velmi strohý, což už bylo zřejmé z velikosti tohoto souboru, který činil pouhých 7,5 megabajtů. V tomto programu jsem se však již dostal k tíženým simulačním výsledkům s velmi zjednodušeným tvarem motoru. Tuto simulaci můžeme vidět na Obr. 33.

Pomocí takto odsimulovaných dat můžeme vidět magnetický tok ve statoru skládající se z prstence z měřených plechů, přes který se bude uzavírat magnetický tok, a jednotlivých plastových pólových nástavců, na kterých bude namotáno vinutí. Důvod proč byly netradičně zvoleny plastové pólové nástavce místo toho, aby byly součástí statorového prstence, je



Obr. 33: Simulace magnetických toků BLDC motorem

následovný. Rotor je tvořen permanentním magnetem o relativně velké magnetické síle. Navržená vzduchová mezera mezi rotorem a statorom je 2 milimetry. Kdyby pólové nástavce byly z feromagnetického materiálu, tak jak je to u klasických BLDC motorů běžné, tak by se rotor přitahoval ke statoru obrovskou silou. Tuto sílu bychom museli neustále překonávat našimi radiálními magnetickými ložisky. Experimentálně bylo ověřeno, že síla permanentního magnetu je tak velká, že by ji magnetická ložiska ani nepřekonala. Právě z tohoto důvodu budou pólové nástavce vyrobeny z plastu, ke kterému se rotor nebude nijak přitahovat. Nevýhodou je, že se tímto řešením připravíme o značný kroutící moment motoru, avšak našim cílem není vytvořit motor s velkým momentem. V magnetických ložiskách by motor měl dosahovat vysokých otáček, kterými lze nízký kroutící moment nahradit.

6 Realizace

6.1 Montážní přípravek

Výsledný laboratorní model bylo zapotřebí pevně uchytit a zajistit přesnou polohu jednotlivých modulů vůči sobě. Právě pro tento účel byl navržen montážní přípravek, který zajistí souosé uložení všech modulů. Tento přípravek byl vyroben ze dřeva o tloušťce 20 mm dle přiložených výkresů. Veškeré moduly v něm jsou nasunuty na čtyřech závitových tyčích o rozměru M10. Tyto závitové tyče umožní silné stažení celého zařízení pomocí matic.

6.2 BLDC motor

Stator byl navržen netradičně ze dvou materiálů. Feromagnetický prsteneček ze statorových plechů a šest pólových nástavců z plastu, na kterých je vinutí vždy o 80 závitů. Použitý měděný drát má průměr 1,35 milimetru. Feromagnetický prsteneček je tvořen 111 plechy o tloušťce 0,35 milimetrů, což díky dostatečnému stažení šesti závitovými tyčemi velikosti M3 ve výsledku tvoří jádro široké 46 milimetrů. Šířka jádra byla volena na základě konvence: délka rotoru mínus dvakrát vzduchová mezera, která v tomto případě činí dva milimetry. Laserem vypálené plechy musely projít kontrolou, která spočívala v očištění otřepů vzniklých během pálení. Ty by totiž zapříčinily nedostatečné doléhání jednotlivých plechů na sebe. Z tohoto tedy plyne jeden důležitý poznatek, a to že je vždy lepší nechat vypálit více kusů, než je pro realizaci potřeba, což bylo v tomto případě také provedeno. Jádro statoru BLDC motoru z feromagnetických plechů můžeme vidět na Obr. ??.

Pólové nástavce, které jak již bylo zmíněno v experimentální části, byly tištěny z plastu z důvodu, že plast není feromagnetický a tudíž se k němu nebude přitahovat silný neodýmový magnet použitý v rotoru motoru. K plechovému jádru jsou připevněny pouze lisovaným spojem do rybinové drážky. Tato koncepce měla jednu obrovskou výhodu. Tou bylo samotné navíjení měděného drátu na tyto nástavce. Nejprve jsem tedy na nástavce namotal vinutí a až poté jsem je lisoval do statoru. To mi velmi zjednodušilo práci, protože jsem nemusel provlékat drát mezi jednotlivými nástavci. Z důvodu, že plastový pólový nástavec se chová jako vzduchová mezera, mohl jsem si dovolit upravit jeho tvar tak, aby při navíjení drátu jednotlivá vinutí nepřesahovala šířku jádra. Díky tomu jsem schopen umístit

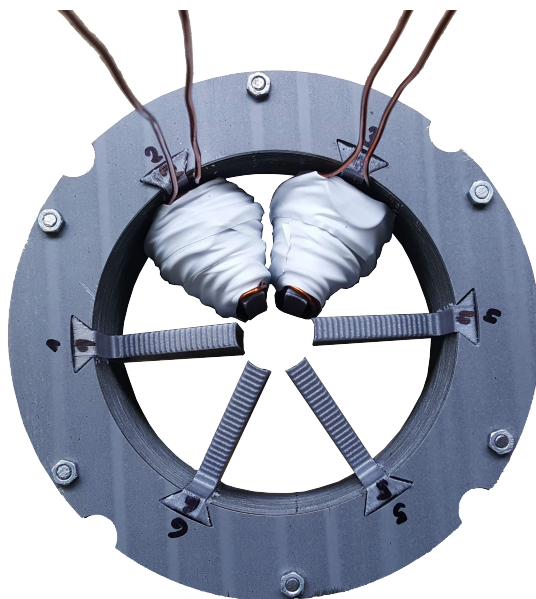


Obr. 34: Jádro statoru z feromagnetických plechů

motor do co možná nejmenšího pláště.

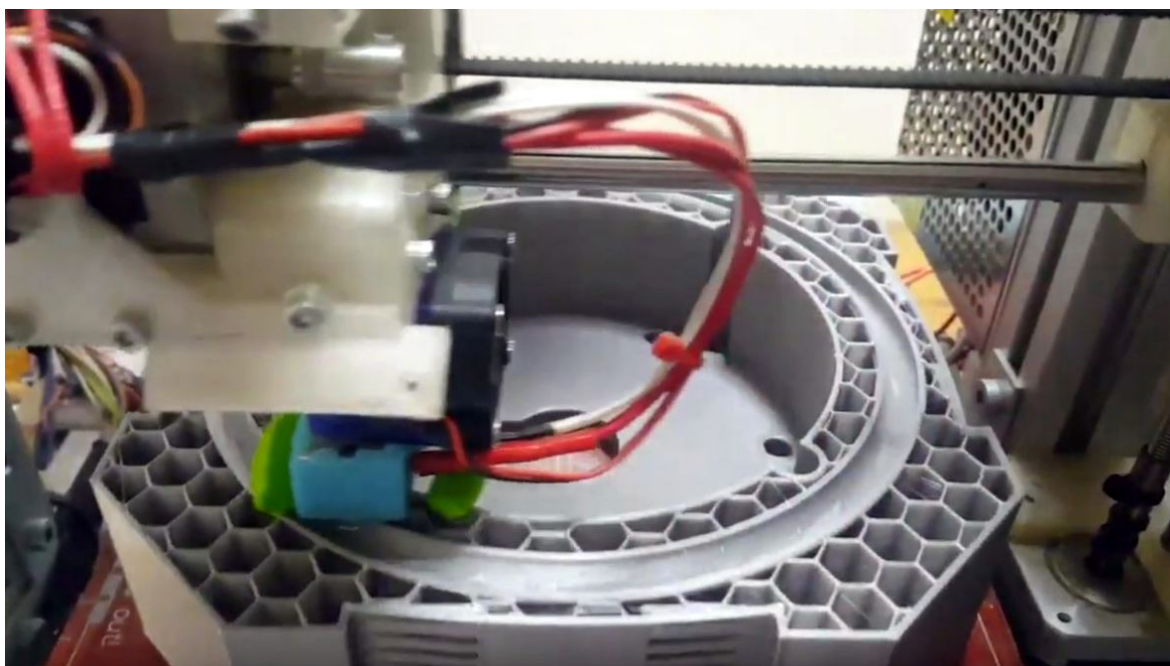
Plášť tohoto motoru je tedy tištěn z plastu PLA. Jeho konstrukce má uvnitř dutinu ve tvaru spirály pro proudění chladicího média včetně přípojek pro přívodní hadičky. Chladicí médium by mělo zajistit dostatečný odvod tepla, které se přeneso z jádra statoru, kde vzniká vlivem vířivých proudů, do pláště, odkud je odváděno mimo celé zařízení. Kromě toho obsahuje plášť tři pinový konektor pro snadné připojení napájecího a řídicího zařízení. Co se týče samotného tisku, tak obnášel cca 18 hodin a z důvodu nepravidelného tepelného smrštění výtisku musel být plášť tisknut dvakrát, aby měl požadované rozměry, konkrétně rozteče montážních otvorů. Na průběh tohoto tisku se můžeme podívat na Obr. 36.

Následně po zhotovení motoru bylo zhotoveno malé kompaktní řídicí zařízení, které obsahuje modelářské ESC, tedy electronic speed controller, který je napájen stejnosměrným napětím 12 V a jehož výstupem jsou tři vodiče pro postupné napájení trojího vinutí BLDC motoru. Mimo to bychom v tomto řídicím zařízení dále našli servo tester, který je primárně určen na testování modelářských serv, avšak ta jsou řízena stejným signálem jako tyto kontroléry. Jelikož však serva pracují s nižším napětím, musel jsem před tento servo tester předřadit ještě DC-DC měnič, který ze vstupního 12 voltového napětí dělá pouze

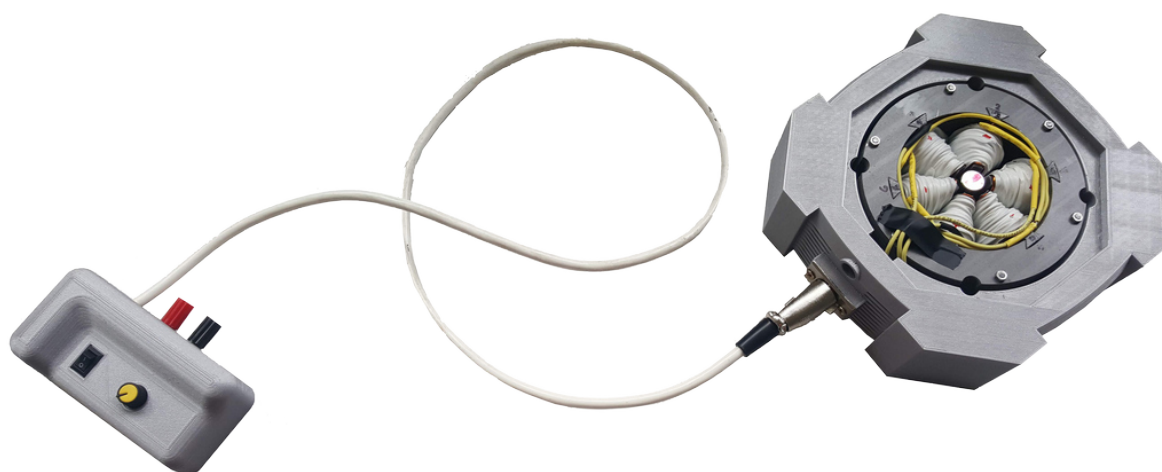


Obr. 35: Jádro statoru s pólovými nástavci

stabilních 6 voltů. Tělo tohoto zařízení bylo navrženo s ohledem na ergonomii při ovládnání a zhotoveno opět za pomoci 3D tiskárny. Toto zařízení sice pracovalo dle předpokladů (ověřeno s malým modelářským BLDC motorem), avšak s navrženým motorem nepracovalo tak, jak by mělo. Magnet se uvnitř pólových nástavců nedokázal roztočit, pouze se otáčel tam a zpět s vysokou frekvencí. Motor s tímto řídicím zařízením můžeme vidět na Obr. 37. To bylo velkým zklamáním a samotná funkce motoru musela být ověřena pomocí jiného zařízení. Naštěstí jsem se dostal ke střídači poněkud větších rozměrů, který nebyl napájen z 12 voltového zdroje, nýbrž ze sítě 230 voltů. Jeho součástí byl tedy usměrňovač, snížovací transformátor a výkonné tranzistory, jejichž sekvenci spínání byla zajištěna vývojovým mikro kontrolérem Arduino. Konkrétně se jednalo o Arduino Mega 2560, tedy vývojovou desku, která obsahuje procesor ATmega 2560. Má 53 digitálních vstupně-výstupních pinů, ze kterých jsem použil pouze 7. Šest pinů bylo použito jako logické výstupy pro spínání výkonových tranzistorů a zbylý pro tzv. hlavní vypínač. Na tomto zařízení jsem ověřil funkčnost zkonstruovaného motoru včetně jeho správného zapojení. Dále jsem ověřil správnost sekvence spínání jednotlivých tranzistorů, tedy jednotlivých pólových dvojic, což je potřeba k roztočení magnetu, tedy rotoru.



Obr. 36: Tisk pláště motoru



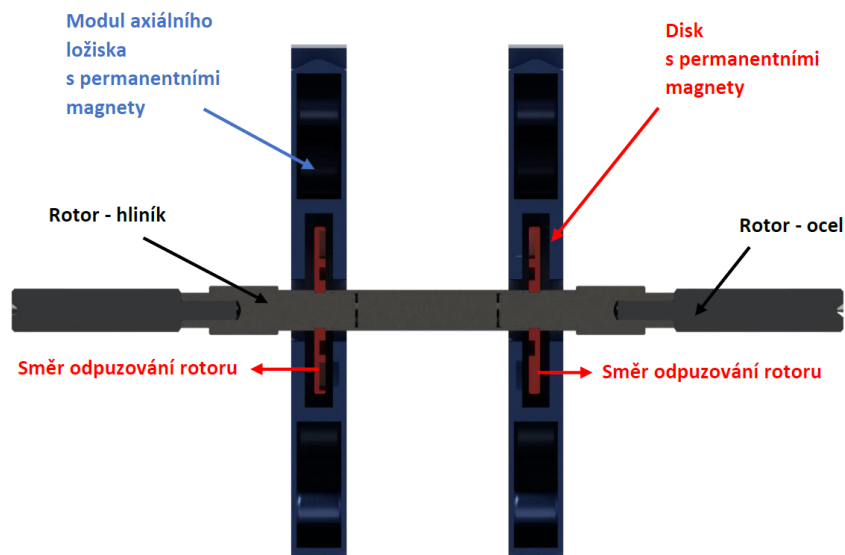
Obr. 37: BLDC motor s řídicím zařízením

6.3 Axiální magnetické ložiska

Na každé straně zhotoveného BLDC motoru se nacházejí moduly pasivních axiálních ložisek tvořené permanentními neodymovými magnety. Každé ložisko působí magnetickou silou na prstenec, který je také osazený magnety a je uchycený na rotoru. Působící síla každého z těchto ložisek je vůči sobě opačná. Jedno tedy tlačí prstenec, potažmo celý rotor v axiálním směru na jednu stranu a druhé na stranu druhou. Tímto je rotor udržován v požadované axiální poloze. Pro tento účel byly vybrány neodymové magnety o rozměrech 10x10x2 milimetry. Výběr těchto magnetů proběhl na základě dostupnosti ve specializovaném obchodu Unimagnet. Materiál, ze kterého jsou tyto magnety vyrobeny je NdFeB, přičemž jejich povrch je poniklovaný. Co se týče magnetické síly, tak výrobce udává, že lze docílit přitažlivé síly 1,8 kg. [24]

Magnety:

Materiál	Rozměr	Mag. síla	Max. teplota	Hmotnost	Cena
NdFeB	10x10x2 mm	1.8 kg	80° C	1.5 g	5 Kč



Obr. 38: Axiální ložiska v řezu

Každý ložiskový modul i každý prstenec obsahuje těchto magnetů celkem 10. Ty jsou poskládány do co možná nejmenšího kruhu. Co se týče síly použitých magnetů, tak se

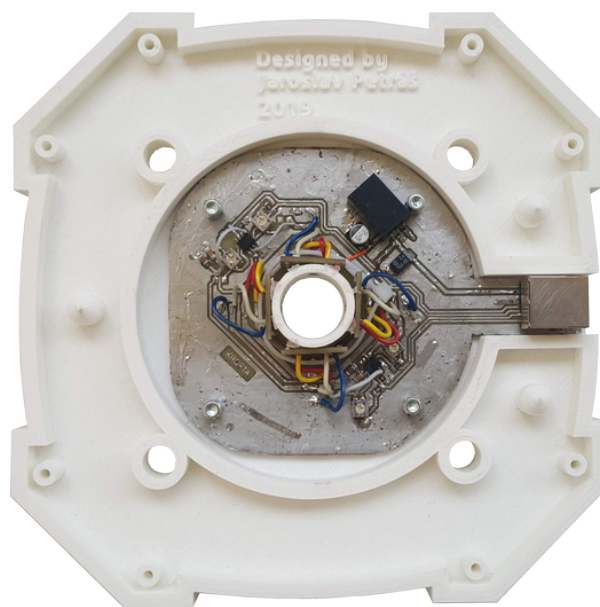
ukázalo, že není až tak velká, jak se při práci s nimi během montáže zdálo. Budeme-li motor provozovat v běžné vodorovné pozici, ložiska rotor v požadované poloze v rámci možností udrží. To znamená, že rotor nemůžeme zatěžovat axiální silou například od šikmého ozubení, nebo od tahu vrtule. Kdybychom však ale chtěli motor provozovat v poloze jiné než vodorovné, ložiska nebudou mít dostatečnou sílu rotor zvednout a ten bude ležet prstencem na modulu ložiska. Toto zjištění pro náš účel nepřináší žádné úskalí, ale pouze konstatování, co by bylo třeba změnit pro provoz v jiné poloze, než na kterou bylo zařízení navrženo.



Obr. 39: Modul axiálního ložiska s permanentními magnety

6.4 Senzorové moduly

Dále od axiálních ložisek jsou senzorové moduly. Ty obsahují vždy čtyři optické senzory a desku tištěných spojů, na které je měřicí elektronika. Návrh této desky byl dílčí úkol mého kolegy. Z mé strany měl však zadány rozměry, do kterých se musel s touto deskou vejít. Po návrhu jsme tuto desku vyrobili metodou osvětlení fotorezistivní vrstvy a následného leptání z tzv. cuprextitu. Součástí výroby byly dva kusy, které jsme následně osadili elektrokomponenty. Z důvodu použití optických senzorů typu SMD jsme museli vyrobit destičky i pro každý z těchto senzorů. Ty byly s hlavní deskou spojeny pomocí tenkých vodičů. Co se týče připojení tohoto modulu k řídicímu zařízení, v našem případě Compact Riu od National Instruments, tak bylo zajištěno pomocí konektorů RJ-45 a ethernetového kabelu.



Obr. 40: Modul s optickými senzory - první verze desky plošných spojů

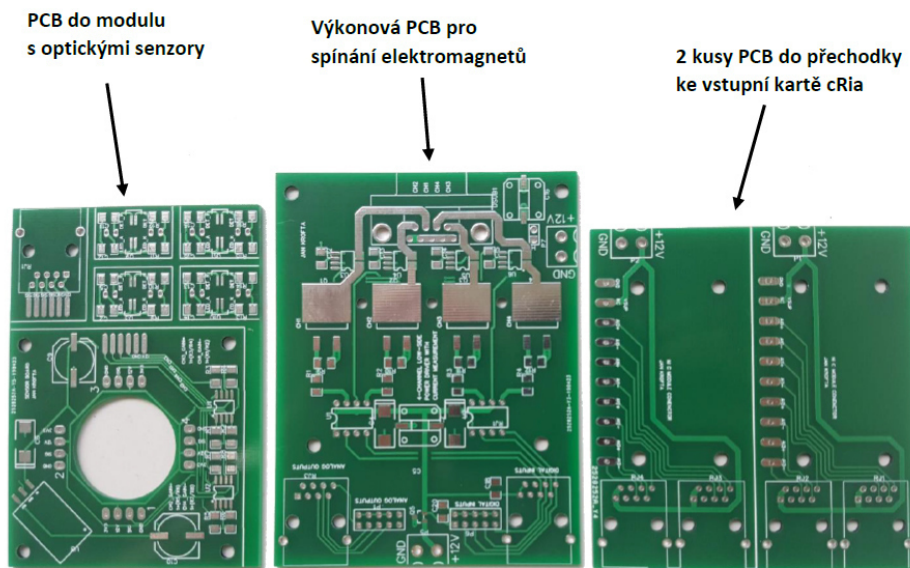
Protože však vstupní karta do Compact Ria má pro připojení svorkovnici na jednotlivé vodiče, bylo potřeba ethernetový kabel uříznout a jednotlivé vodiče připevnit do svorkovnice. To však přinášelo následující úskalí. Při přenášení zařízení a tedy při rozpojování a zapojování bylo potřeba neustále sledovat schéma zapojení, aby nedošlo ke špatnému zapojení, což by mohlo jednak vést k nesprávné funkci, ale v horším případě také ke spálení elektro komponent. Dalším zjištěným problémem se ukázal fakt, že zařízení často přestávalo fungovat, což bylo způsobeno uvolněným vodičem ve svorkovnici. Z těchto důvodů bylo potřeba vyvodit nějaké řešení. Tím bylo vytvořit si vlastní řekněme přechodku, která bude napevno připojena ke vstupní kartě Compact Ria a na druhé straně bude mít ethernetový konektor, takže se sensorový modul se vstupní kartou propojí obyčejným ethernetovým kabelem bez použití šroubováku a bez možnosti špatného zapojení. Tato přechodka vyžadovala opět leptání desky tištěných spojů a následné osazení potřebnými komponenty. Aby tato přechodka nepůsobila amatérským dojmem, byl pro ní opět díky možnosti 3D tisku vytvořen i plastový kryt.

Po sléze jsme však objevili čínskou firmu JLC PCB, která se výrobou desek tištěných spojů zabývá ve velkém. Za pět kusů dvouvrstvé desky (pouze jednu nevyrábějí) o rozměrech do 100 x 100 mm chtějí pouhé 2 dolary, tedy nějakých 46,- korun. Garantují, že desky budou vyrobeny do 24 hodin od objednání a odeslání potřebných souborů. Kdyby



Obr. 41: Přechodka ke vstupní kartě Compact Ria - první verze

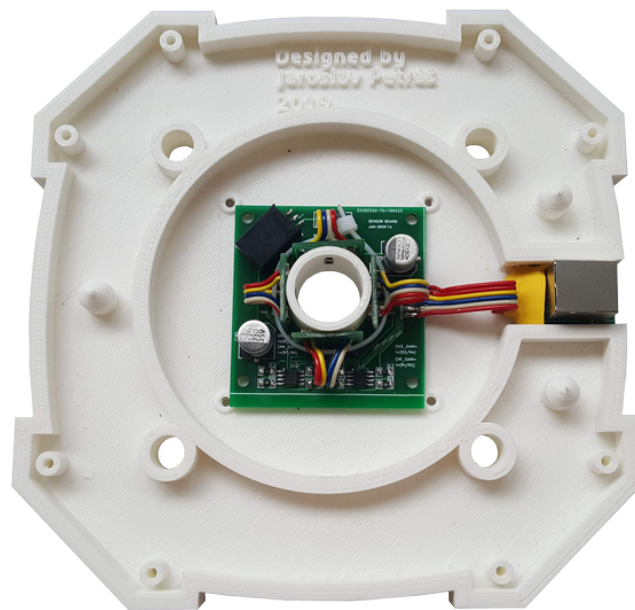
však bylo třeba, umí vyrobit rozměry větší, ale i desky s větším počtem vrstev (4 nebo 6). Za větší počet vrstev se však již platí několikanásobně vyšší částky. Pro náš účel stačí desky dvouvrstvé a díky velmi příznivé ceně jsme si nechali vyrobit nové desky s měřicí elektronikou do sensorových modulů, nové desky do naší přechodky a i desky s výkonovou elektronikou pro ovládání radiálních ložisek, potažmo elektromagnetů.



Obr. 42: Desky plošných spojů z firmy JLC PCB

S těmito, profesionálně vyrobenými deskami plošných spojů se pracovalo o poznání lépe. Díky nepájivé masce a již předem pocínovaným ploškám se elektro součástky letovaly snadněji a mohli jsme si být jisti kvalitními spoji. U předchozích desek totiž často docházelo k dysfunkci právě z důvodu takzvaných studených spojů, ve kterých vznikal obrovský přechodový odpor. Navíc zde byla možnost nechat vyrobit potisk bílou barvou. To jsme

taktéž využili a na zelenou masku jsme nechali potisknout jednak půdorysy orientovaných součástek a za druhé označení rezistor, kondenzátor, díky čemuž nebylo potřeba během pájení neustále sledovat schéma, čímž se i minimalizovalo riziko zapomenutí naletování nějaké komponenty. Z důvodu omezených rozměrů za již zmiňovanou cenu dvou dolarů, musel být tvar měřicí desky do sensorových modulů poněkud změněn. Dbali jsme však na to, abychom nemuseli znovu tisknout plastové tělo modulů. Modul s těmito novými deskami můžeme vidět na Obr. 43.



Obr. 43: Modul s optickými senzory - druhá verze desky plošných spojů

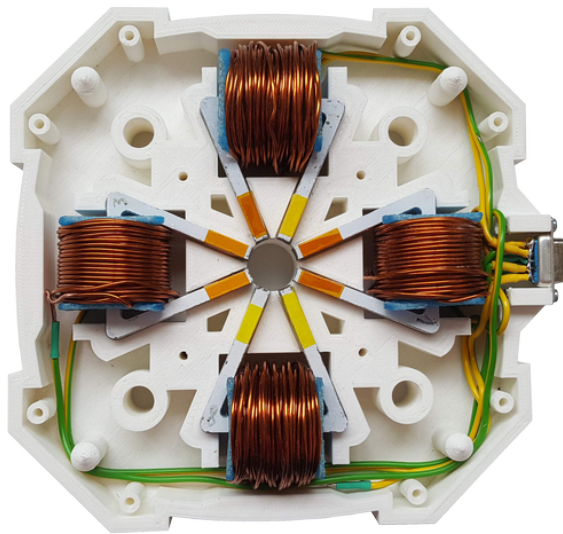
6.5 Radiální magnetické ložiska

Úplně na kraji celého zařízení jsou moduly s elektromagnety. Ty obsahují vždy čtyři elektromagnety vůči sobě pootočený o 90°. Čtyři z nich, tedy aktivní členy prvního ložiska, byly použity z předchozího projektu. Další čtyři elektromagnety pro druhé ložisko byly vyrobeny pomocí vypálených jader z testovaných plechů a navinuty drátem stejného průřezu se stejným počtem závitů. Z důvodu snadnějšího navíjení měděného drátu a z důvodu, aby se tento drát nezkratoval v místě styku s ostrými hranami jádra, byly vytištěny jakési plastové mezikusy. Ty však z důvodu přímého kontaktu s měděným drátem, u kterého se předpokládá značné zahřívání, byly tištěny nikoliv z plastu PLA ale z plastu PET-G, který

je odolný vůči vyšším teplotám.

Po navinutí elektromagnetů byla pomocí RLC metru změřena jejich indukčnost. Ta se však značně lišila i přes to, že bylo použito stejné jádro, průřez drátu i počet závitů. Umístil jsem proto elektromagnety do modulu tak, aby dvě nejsilnější byly na svislé ose, kde vlivem gravitačních sil bude potřeba větší síla elektromagnetu, a zbylé dvě na ose vodorovné.

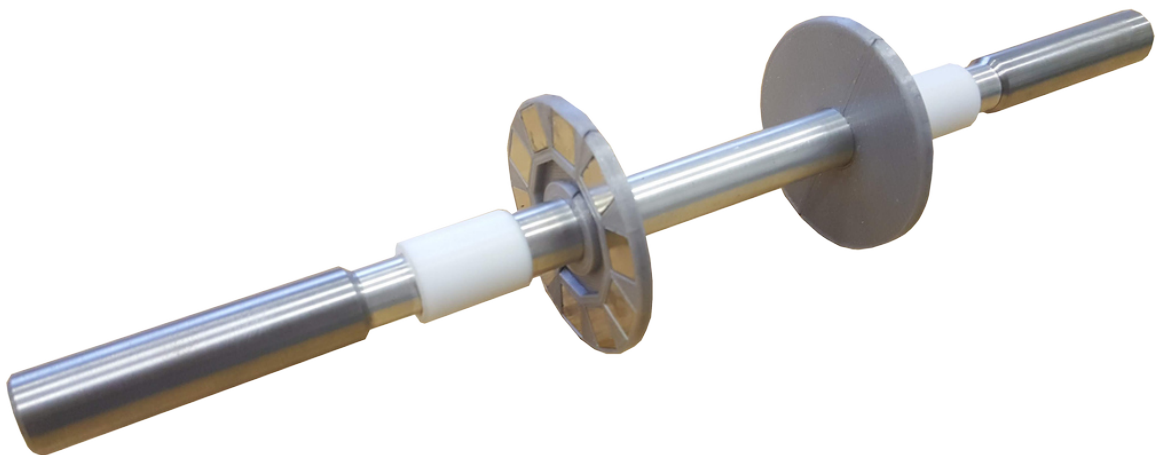
Plášť těchto modulů byl tištěn z plastu PLA, což celkem zabralo cca 40 hodin čistého času. Moduly jsou však navrženy tak, že svým tvarem drží elektromagnety v přesné poloze, se kterou bylo počítáno pro následné řízení. Vzduchová mezera mezi elektromagnety a rotorem tvoří pouhý půl milimetru. Díky tomu je magnetické ložisko dostatečně silné, aby rotor dokázalo zvednout z dolní polohy, ve které je při vypnutém stavu. Konektor, který zde byl použit, je devíti pinový D-SUB. Čtyři piny konektoru jsou připojeny na jednotlivé cívky elektromagnetů. Zbýlých pět pinů je mezi sebou propojeno a připojeno na zbylé konce všech cívek. Pro připojení těchto modulů byl použit kroucený osmi žilový kabel se stíněním, na který byl naletován rovněž D-SUB konektor.



Obr. 44: Modul s elektromagnety

6.6 Rotor

Poslední součástí, která byla potřeba vyrobit byl rotor. Tedy taková součást, která bude levitovat uprostřed radiálních magnetických ložisek, bude obsahovat silonové válečky v místě, kde bude procházet moduly s optickými senzory, dále bude osazena plastovými prstenci s neodymovými magnety pro zajištění axiální síly a nakonec bude mít uprostřed válcový magnet s dvěma póly, který bude unášen točivým magnetickým polem BLDC motoru. Z konstrukčních důvodů, jakými byly informace o šířce jednotlivých modulů, kde budou nakonec umístěné a podobně byl návrh rotoru tou poslední konstrukční částí. Jeho výrobu zajistil bývalý spolužák Ing. Jiří Kinkor, jehož živností je výroba jednoduše zařízení. Výkres, podle kterého výroba probíhala můžeme vidět v příloze 2. I tady ale neproběhlo vše tak, jak bychom si přáli. První z válcových magnetů, který měl být lisován dovnitř hliníkové hřídele bohužel praskl. Na tomto základě musely být provedeny drobné technologické změny a zalisování druhého magnetu již proběhlo v pořádku.

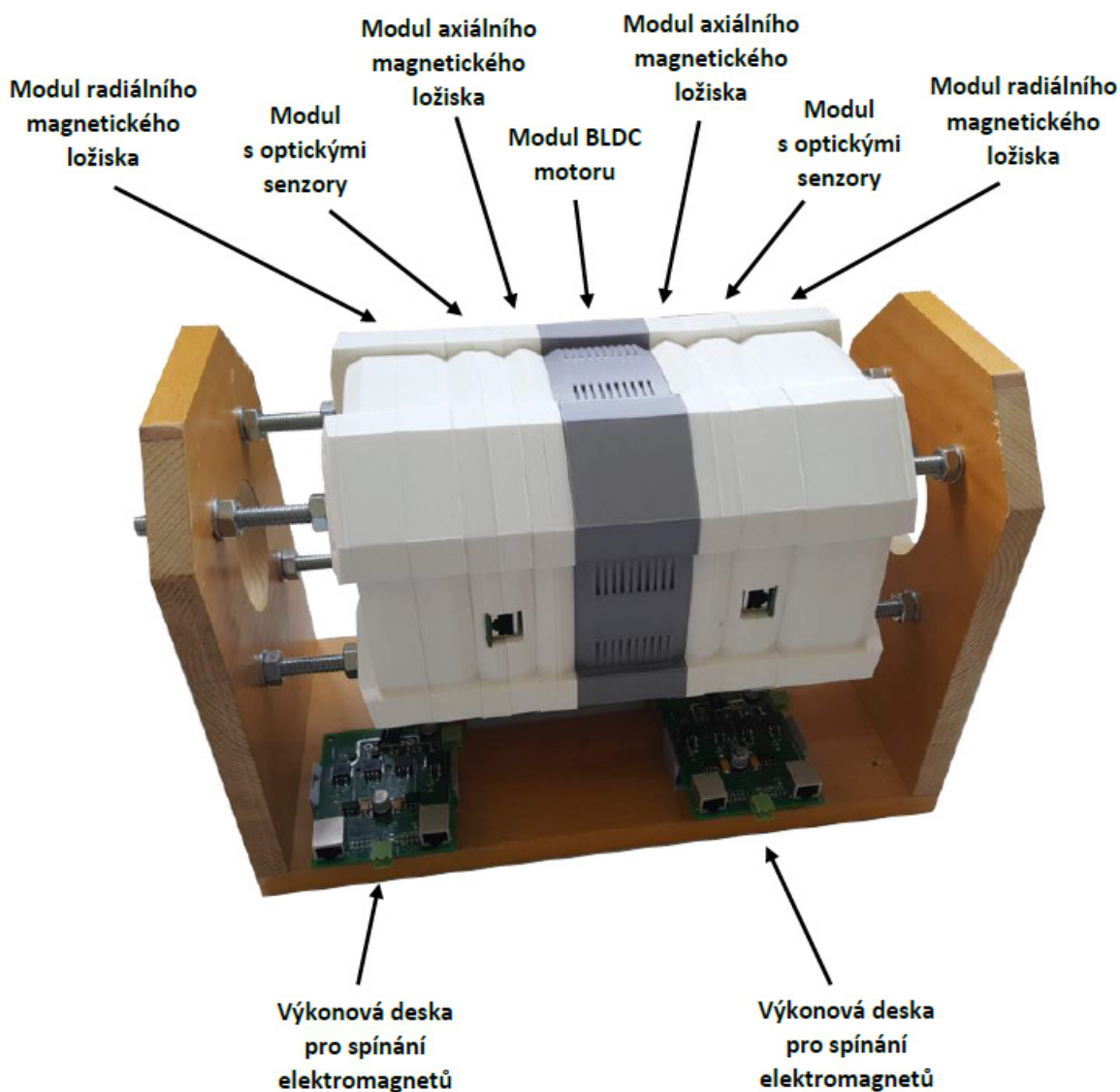


Obr. 45: Rotor

Konce rotoru jsou vyrobeny z oceli, to z toho důvodu, že hliník, ze kterého je kvůli nízké váze vyroben zbytek rotoru, není feromagnetický. Nebyl by tedy přitahován elektromagnety v radiálních ložiscích. Tyto konce jsou však vyrobeny delší, než by bylo pro náš účel potřeba a to z toho důvodu, že se uvažoval fakt, kdy by bylo potřeba BLDC motor testovat v klasických ložiscích. Tyto konce jsou vyrobeny s průměrem 16 milimetrů a tolerancí odpovídající nasunutím konvenčních ložisek.

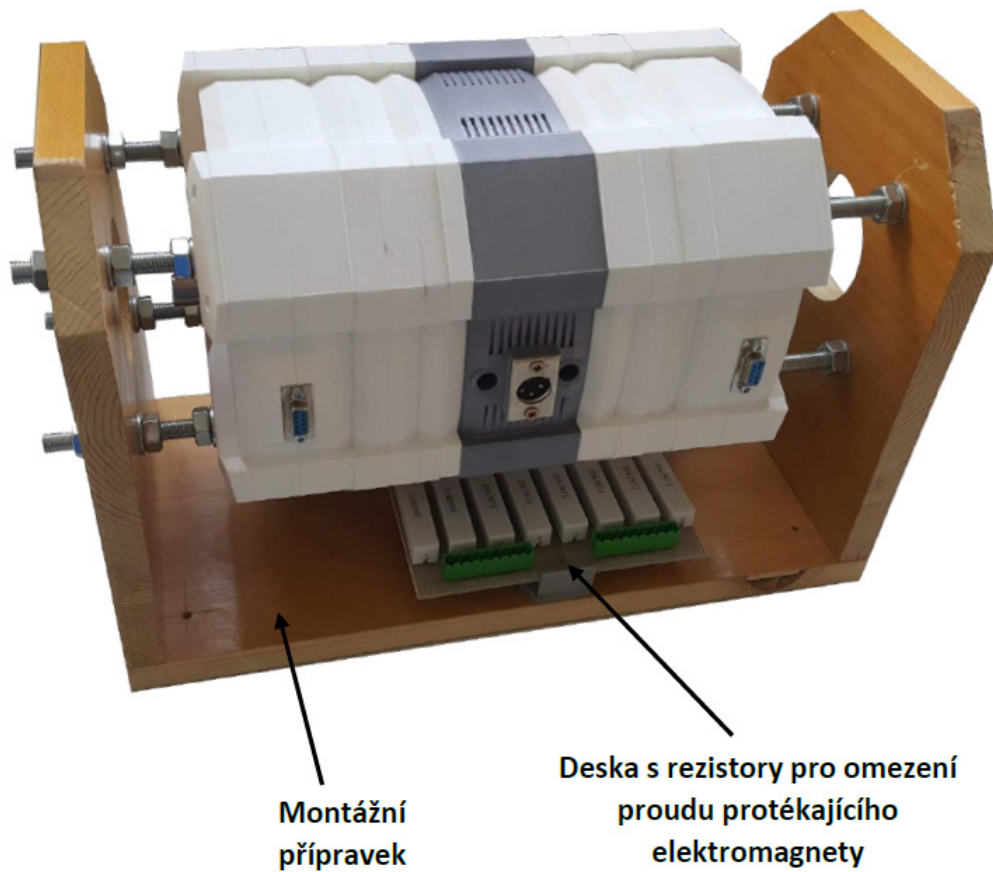
6.7 Kompletní zařízení

Všechny moduly jsou vybaveny vlastními konektory, díky kterým je s laboratorním modelem snadná manipulace. Připojení k řídicí a výkonové elektronice tedy zabere pouhých pár sekund, navíc z důvodu rozdílných konektorů nemůže dojít k záměně nebo otočení jednotlivých kabelů. Navrhovaný BLDC motor je na Obr. 46 vidět šedivou barvou, jedná se totiž o plast PET-G, který oproti plastu PLA, ze kterého jsou tištěny zbylé moduly, odolá většímu tepelnému zatížení. Z této strany pohledu na zařízení můžeme vidět konektory RJ-45 pro připojení modulů s optickými senzory.



Obr. 46: Výsledný laboratorní model

Laboratorní model z druhé strany, ze které je vidět tři pinový konektor pro připojení napájení BLDC motoru a dutinky pro připojení hadiček jeho vodního chlazení. Dále jsou z této strany vidět konektory D-SUB 9 pro připojení elektromagnetů v modulech radiálních aktivních magnetických ložisek. Viz Obr. 47.



Obr. 47: Výsledný laboratorní model z druhé strany

7 Závěr

V rámci této diplomové práce jsem prostudoval potřebnou literaturu ohledně bezkartáčových elektromotorů, aktivně řízených magnetických ložisek, pasivních magnetických ložisek, které tvoří permanentní magnety a plno dalšího. Na základě těchto informací jsem v konstrukční části navrhl kompletní zařízení, které kombinuje vodou chlazený bezkartáčový elektromotor, optické senzory pro snímání přesné polohy hřídele, dále axiální magnetická ložiska a na konec aktivní magnetická ložiska radiální.

Pro celé toto zařízení jsem zvolil modulovou koncepci. Každé výše zmíněné zařízení je jeden modul, které na sebe navazují. Jejich vzájemná montáž je realizována pomocí čtyř závitových tyčí M10, díky kterým je zajištěna radiální souosost. Tyto moduly a jejich počet by v praxi mohly být v omezené míře kombinovatelné zákazníkem dle konkrétních požadavků.

Následně jsem provedl rešerši o možnostech, kde by bylo možné získat feromagnetické plechy na výrobu statoru elektromotoru a jader pro elektromagnety do aktivního radiálního ložiska. Těmito možnostmi byla výroba jádra v některé z firem, které se tímto odvětvím zabývají. Další možností bylo použití plechů z nějakého již nepotřebného zařízení, které však kvůli speciálním tvarovým požadavkům nepřípadalo v úvahu. Vzhledem k ceně byla zvolena třetí možnost, a to koupě takovýchto plechů z inzerčního portálu. Plechy byly zakoupeny od prodejce z Německa, který inzeroval 17 kusů statorových plechů na eBay.com za rozumnou cenu. První přepravní služba však po měsíci plechy vrátila odesílateli s tím, že se jí nepodařilo najít adresáta. Plechy byly navíc poškozené. Druhá zásilková služba byla již solidnější a plechy dopravila do dvou týdnů.

Na testovacím vzorku vyrobeném ze zakoupených plechů byl proveden experiment pro zjištění konkrétních magnetických vlastností. Hlavními z nich byla jejich B-H křivka a relativní permeabilita, která činí 25 000. Z těchto plechů se následně nechalo vyrobit statorové jádro pro BLDC motor a jádra pro elektromagnety radiálních aktivních magnetických ložisek. Tvar statoru vycházel z předchozího prototypu doc. Ing. Martina Nováka Ph.D, který již BLDC motor podobných rozměrů stavěl. Tvar elektromagnetů byl rovněž dán, a to ověřeným předchozím prototypem magnetického ložiska, na kterém jsme pracovali již v rámci projektu. Metoda výroby statoru a jader pro elektromagnety byla laserové pálení, které zajistila firma O.K. stavební v Červeném Kostelci. Dodací lhůta zde byla dva týdny.

Zvláštností na tomto statoru je, že má plastové pólové nástavce. Je to z toho důvodu, že rotor, ve kterém je silný neodymový magnet, není uložen v konvenčních ložiskách,

nýbrž v ložiskách magnetických. Pokud by pólové nástavce byly z feromagnetického materiálu, magnet by se k nim přitahoval takovou silou, kterou by tato magnetická ložiska nedokázala překonat. Na plastových pólových nástavcích je navinuto 80 závitů měděného drátu o průměru 1,35 milimetru. Následně byl tento motor vsazen do plastového pláště, s připraveným vodním chlazením, vytištěného na 3D tiskárně z plastu PET-G a otestován v praxi pomocí laboratorního střídače. Sekvence spínání výkonových tranzistorů tohoto střídače byla zajištěna pomocí mikrokontroleru Arduino. Motor byl napájen napětím 5 voltů, když se magnet začal otáčet. Proudový odběr dosahoval hodnoty 5,3 ampér.

Metodou výroby 3D tiskem byly vyrobeny veškeré moduly, ze kterých je celý laboratorní model složen. Zde však byl použit plast PLA, který nemá tak dobrou tepelnou odolnost.

Těmito moduly jsou dva kusy modulu axiálního ložiska sestávajícího z permanentních neodymových magnetů. Dále dva moduly se čtyřmi optickými senzory pro přesné snímání polohy hřídele. Posledními, krajními moduly jsou samoté radiální aktivní magnetická ložiska sestávající vždy ze čtyř elektromagnetů, tedy aktuátorů, které mají za úkol udržovat hřídel v požadované poloze. Toto radiální ložisko bylo v praxi ověřeno pouze samostatně, kde pracovalo velmi stabilně s nominální vzduchovou mezerou půl milimetru.

Seznam použitých zkratek

BLDC	Brushless DC (bezkartáčový stejnosměrný motor)
EC	Electrically commutated (elektronicky komutovaný)
PWM	Pulse width modulation (pulzně šířková modulace)
FOC	Field oriented control (vektorové řízení)
HTS	High temp. superconductors (vysokoteplotní supravodiče)
PLA	Polylactid acid (kukuřičný bioplast)
PET-G	Polyetyléntereftalát - glykol
FDM	Fused deposition modeling (metoda 3D tisku z filamentu)
ESC	Electronic speed control (elektronický regulátor otáček)
FPGA	Field programmable gate array (program. hradlové pole)
DC	Direct current (stejnoseměrný proud)
AC	Alternating current (střídavý proud)
PCB	Printed circuit board (deska plošných spojů)
SMD	Surface mount device (součástka pro povrchovou montáž)

Seznam použité literatury a zdrojů

- [1] [Online] High-speed electrical machine with radial magnetic flux and stator core made of amorphous magnetic material [cit. 6.11.2018] Dostupé z: <http://www.jpier.org/PIERC/pierc86/06.18052405.pdf>
- [2] [Online] Obr. 1: Dvě základní konstrukce BLDC motoru. [cit. 5.6.2019] Dostupné z: <https://www.analog.com/en/technical-articles/brushless-dc-motors-introduction-for-next-generation-missile-actuation-systems-outline.html>
- [3] [Online] Obr. 2: Zapojení BLDC motoru. [cit. 9.11.2018] Dostupné z: <https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/104568/RUZ0029-FMMI-B3923-3911R034-2014.pdf>
- [4] [Online] Obr. 3: Pulzně šířková modulace. [cit. 9.11.2018] Dostupné z: <https://developer.android.com/things/sdk/pio/pwm>
- [5] FIALA, VROŽINA, HERCIK. *Elektrotechnická měření I*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1989. č.j. 30877/80-221.
- [6] SCHWEITZER, MASLEN. *Magnetics Bearings - Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. New York: Springer Dordrecht Heidelberg London, ISBN 978-3-642-00496-41
- [7] [Online] Magnetická ložiska. [cit. 9.11.2018] Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/magneticka-loziska.html>.
- [8] [Online] Magnetické ložisko SGS. [cit. 9.11.2018] Dostupné z: <http://control.fs.cvut.cz/sites/default/files/SGS2015-NM/Magnetické-ložisko-26-8.pdf>
- [9] [Online] Speciální ložiska. [cit. 11.1.2019] Dostupné z: <http://www.ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/502/polasek.pdf/>
- [10] [Online] Brushless DC motor. [cit. 25.2.2019] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu-10016>
- [11] [Online] Brushless DC motor. [cit. 25.2.2019] Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/novinka/jaky-je-rozdil-mezi-ac-dc-a-ec-motory>
- [12] [Online] Obr. 4: Srovnání účinností elektromotorů. [cit. 28.2.2019] Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/files/gallery/ucinnost-motoru.gif>
- [13] [Online] Magnetická indukce. [cit. 14.3.2019] Dostupné z: <http://www.fyzika007.cz/elektrina-a-magnetismus/stacionarni-magnetické-pole/magnetická-indukce>

- [14] [Online] Permeabilita materiálů. [cit. 16.3.2019] Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz/CoursewarePortlets2/DownloadDokumentu?id=60094>
- [15] [Online] Permanentní magnety. [cit. 16.3.2019] Dostupné z: <http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni-magnety.pdf>
- [16] [Online] Čínský výrobce desek plošných spojů JLCPCB. [cit. 20.4.2019] Dostupné z: <https://jlcpcb.com/>
- [17] [Online] Arduino Mega 2560. [cit. 30.5.2019] Dostupné z: <http://www.czechduino.cz/?18,arduino-mega-2560>
- [18] [Online] Resolver. [cit. 30.5.2019] Dostupné z: <http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Snimace/Resolvery.html>
- [19] [Online] Práh slyšitelnosti lidského ucha. [cit. 30.5.2019] Dostupné z: <http://vojtahanak.cz/files/kmity/zvuk-ucho.html>
- [20] [Online] Měření natočení rotoru BLDC motoru. [cit. 5.6.2019] Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/www-base/zav-prace-soubor-verejne.php?file-id=83062>
- [21] [Online] Řízení BLDC motoru. [cit. 5.6.2019] Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artikuly/artikul/article/zvysovani-ucinnosti-motoru-pomoci-algoritmu/>
- [22] [Online] Supravodiče v pasivních magnetických ložiskách. [cit. 5.6.2019] Dostupné z: <https://www.cez.cz/ede/content/file/vzdelavani/soutez/sidlo.pdf>
- [23] [Online] O.K. stavební s.r.o. [cit. 6.6.2019] Dostupné z: <https://www.okstavebni.cz/cz/sluzby/paleni-a-rezani-laserem>
- [24] [Online] Online prodejce magnetů Unimagnet. [cit. 6.6.2019] Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz>
- [25] [Online] Magneticky měkké materiály. [cit. 6.6.2019] Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12378624/>
- [26] [Online] Hysterezní smyčka. [cit. 8.6.2019] Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/296-magneticka-hystereze>

Seznam obrázků

Seznam obrázků

Obrázek 1	Dvě základní konstrukce BLDC motorů [2]	11
Obrázek 2	Zapojení BLDC motoru [3]	11
Obrázek 3	Pulzně šířková modulace [4]	13
Obrázek 4	Srovnání účinností elektromotorů [12]	14
Obrázek 5	Elektromagnety s vlastními jádry	16
Obrázek 6	Elektromagnety se společným jádrem [6]	16
Obrázek 7	Regulační obvod řízení aktivního ložiska	18
Obrázek 8	Původní návrh statoru (bez vinutí)	24
Obrázek 9	Výsledný návrh statoru (bez vinutí)	24
Obrázek 10	Návrh rotoru	26
Obrázek 11	Plášť motoru se spirálovou dutinou uvnitř	27
Obrázek 12	Akvarijní čerpadlo Micra	28
Obrázek 13	Elektrické schéma zapojení řízení motoru	29
Obrázek 14	Krabička ovládání BLDC motoru	29
Obrázek 15	Pozice elektromagnetů	30
Obrázek 16	Tělo modulu s elektromagnety	31
Obrázek 17	Zapojení jednotlivých cívek	31
Obrázek 18	Zařízení na měření charakteristiky senzorů	32
Obrázek 19	Charakteristika senzoru (pracovní oblast vyznačena červenou barvou)	34
Obrázek 20	Modul s optickými senzory	34
Obrázek 21	Modul mezi vstupní a výstupní kartou a zařízením	35
Obrázek 22	Axiální modul	37
Obrázek 23	Model kompletního zařízení	38
Obrázek 24	Model kompletního zařízení v řezu	38
Obrázek 25	Hysterezní smyčka [26]	40
Obrázek 26	Pokus o vysekání prstenců	41
Obrázek 27	Testovací prstenec	42
Obrázek 28	Elektro schéma měřicí soustavy	42
Obrázek 29	B-H křivka zašumělá	43
Obrázek 30	B-H křivka vyfiltrovaná	44
Obrázek 31	Průběh μ_r na proudu	45
Obrázek 32	Tvar statoru v programu Agros2D	46
Obrázek 33	Simulace magnetických toků BLDC motorem	47
Obrázek 34	Jádro statoru z feromagnetických plechů	49
Obrázek 35	Jádro statoru s pólovými nástavci	50

Obrázek 36	Tisk pláště motoru	51
Obrázek 37	BLDC motor s řídicím zařízením	51
Obrázek 38	Axiální ložiska v řezu	52
Obrázek 39	Modul axiálního ložiska s permanentními magnety	53
Obrázek 40	Modul s optickými senzory - první verze desky plošných spojů	54
Obrázek 41	Přechodka ke vstupní kartě Compact Ria - první verze	55
Obrázek 42	Desky plošných spojů z firmy JLC PCB	55
Obrázek 43	Modul s optickými senzory - druhá verze desky plošných spojů	56
Obrázek 44	Modul s elektromagnety	57
Obrázek 45	Rotor	58
Obrázek 46	Výsledný laboratorní model	59
Obrázek 47	Výsledný laboratorní model z druhé strany	60

Seznam použitého SW

- Overleaf
- SolidWorks
- Simplify
- Microsoft excel
- Wolfram mathematica
- EasyEDA
- www.draw.io
- Agros2D
- Femm
- Adobe Photoshop

Seznam tištěných příloh

Příloha 1: Výkres rotoru

Příloha 2: Výkres boční desky montážního přípravku

Příloha 3: Výkres spodní desky montážního přípravku

Seznam digitálních příloh

Příloha 1: Výkres rotoru

Příloha 2: Výkres boční desky montážního přípravku

Příloha 3: Výkres spodní desky montážního přípravku

Příloha 4: DXF výkres jádra elektromagnetu pro laserové pálení

Příloha 5: DXF výkres statorového plechu pro laserové pálení

Příloha 6: Veškeré potřebné modely pro 3D tisk ve formátu STL

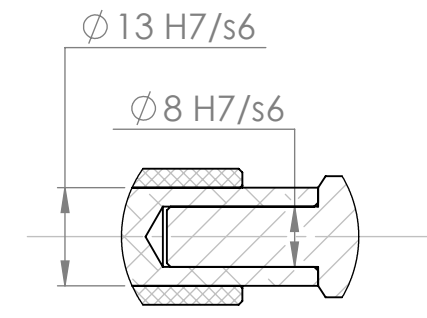
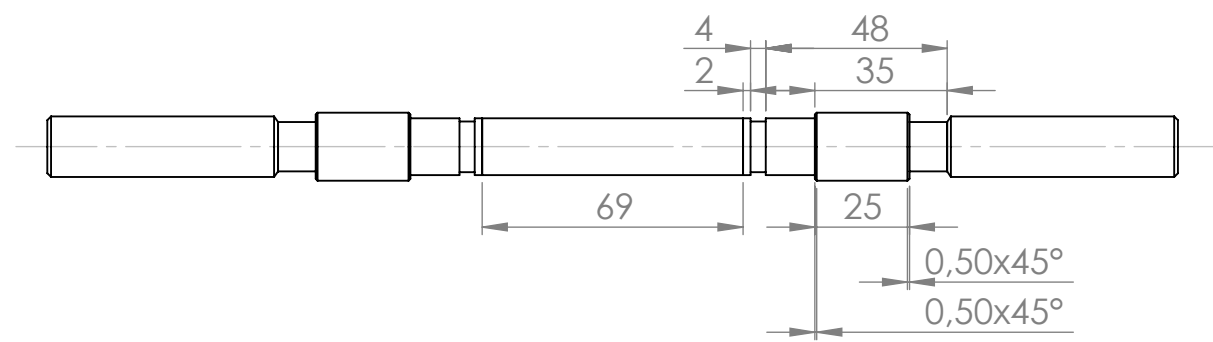
Příloha 7: Veškeré potřebné modely Solidworks

Příloha 8: Program v Arduino IDE pro řízení střídače BLDC motoru

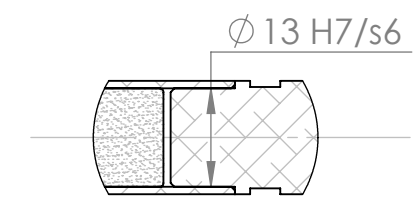
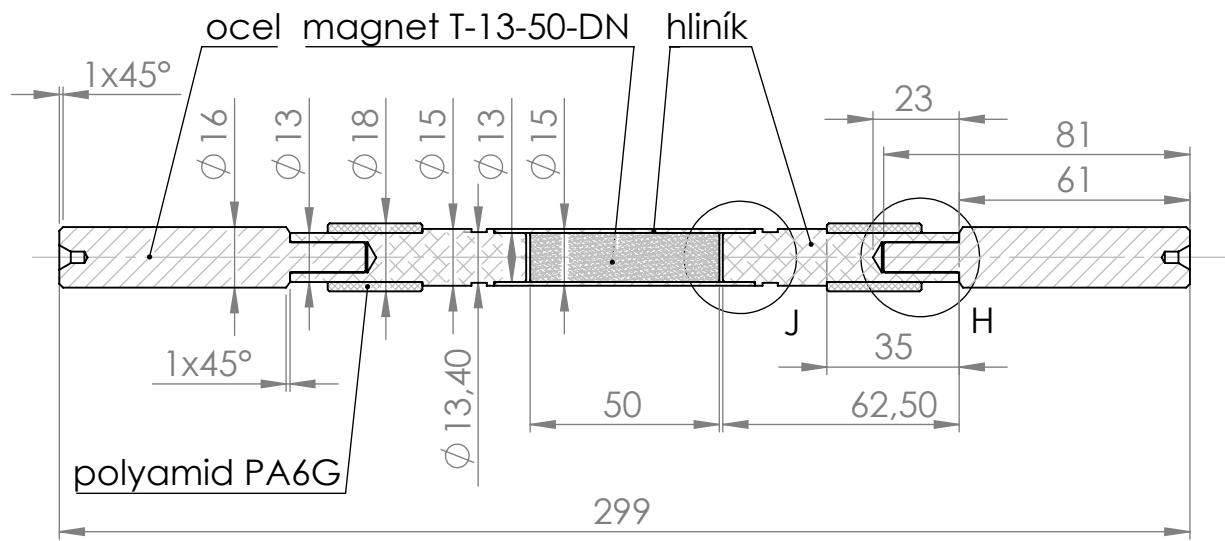
Příloha 9: Fotografie z průběhu stavby laboratorního modelu

6 5 4 3 2 1

D



C



B

A

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DRSNOST: TOLERANCE: LINEÁRNÍ: mK ÚHLOVÁ:			OPRACOVÁNÍ:			ODSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA	
NAVRHL	JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV: Rotor pro laboratorní model BLDC motoru s aktivními magnetickými ložisky					
PŘEZKOŮSEL	Bc. Jaroslav Petráš		25.4.2019			Č. VÝKRESU 0001					
SCHVÁLIL											
VÝROBA	Ing. Jiří Kinkor		23.5.2019			MĚŘITKO: 1:2					
Z. JAKOSTI						MATERIÁL: ocel EN S235 hliník EN 573-3 AW 6063 polyamid PA6G		LIST 1 Z 1 LISTŮ			
						HMOTNOST:		A4			

6 5 4 3 2 1

D

C

B

A

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

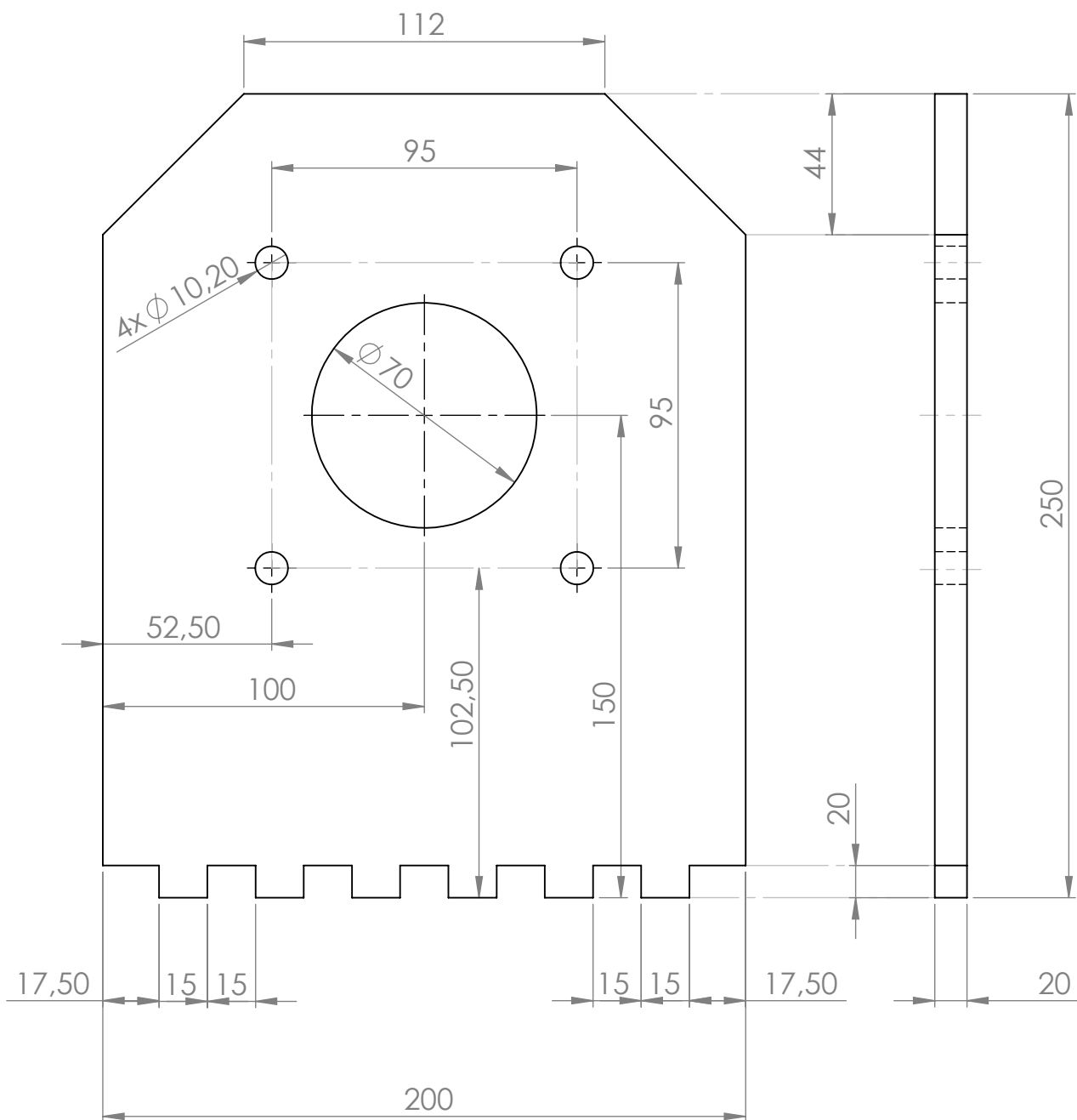
C

B

B

A

A



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTŘE HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DRSNOST:									
TOLERANCE:									
LINEÁRNÍ:									
ÚHLOVÁ:									
	JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV:			
NAVRHL	Bc. Jaroslav Petráš		18.3.2019			Boční deska montážního přípravku			
PŘEZKOUSEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI					MATERIÁL:	Dřevo		Č. VÝKRESU	A4
								0002	
					HMOTNOST:			MĚŘÍTKO 1:2	LIST 1 Z 1 LISTŮ

4

3

2

1

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

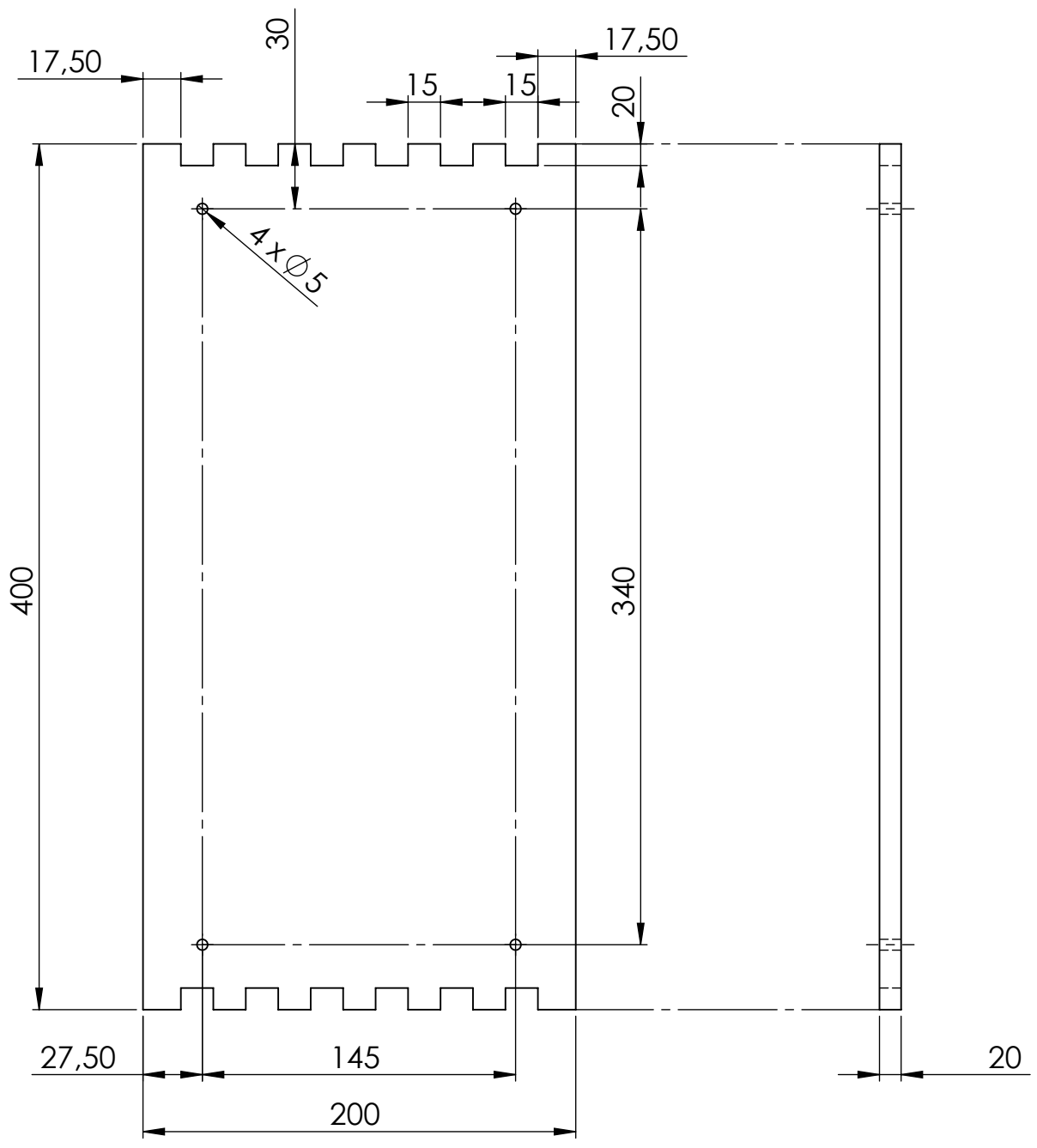
C

B

B

A

A



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DRSNOST:									
TOLERANCE:									
LINEÁRNÍ:									
ÚHLOVÁ:									
	JMÉNO	PODPIS	DATUM			NÁZEV:			
NAVRHL	Bc. Jaroslav Petráš		18.3.2019			Spodní deska montážního přípravku			
PŘEZKOUSĚL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU			A4
				Dřevo		0003			
				HMOTNOST:		MĚŘÍTKO: 1:3		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

4

3

2

1