

Diplomová práce



České  
vysoké  
učení technické  
v Praze

**F3**

Fakulta elektrotechnická  
Katedra měření

## Navíječka specifických jader pro fluxgate senzory

**Bc. Martin Šrámek**

Vedoucí: Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.  
Leden 2022





## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Šrámek** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **466108**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávací katedra/ústav: **Katedra měření**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**  
Studijní obor: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Navíječka specifických jader pro fluxgate senzory**

Název diplomové práce anglicky:

**Winding machine for specific fluxgate sensor cores**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznamte se s konstrukcí navíječek pro uzavřené toroidní vzorky, zvolte vhodný systém a přepracujte ho pro potřeby navíjení "race-track" jader.
- 2) Zkonstruujte prototyp zařízení včetně řídicí jednotky a potřebného sensorového vybavení (snímání otáček zásobníku, případně poloha navíjecí hlavy).
- 3) Otestujte vzniklý prototyp a vyhodnoťte vliv případných nedokonalostí strojového navíjení oproti ručnímu na výsledné parametry fluxgate senzoru (šum, případně průnik excitačního signálu).

Seznam doporučené literatury:

P. Ripka (ed.): Magnetic Sensors and Magnetometers, Artech, Boston, ISBN 1-58053-057-5, 2001.  
Ahmet Bindal, Electronics for Embedded Systems, Springer International Publishing, Switzerland 2017  
Michal Janošek, A precise gradiometer suitable for space applications, Doctoral thesis, Prague, August 2014

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D., 13138**

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

Datum zadání diplomové práce: **13.09.2021**

Termín odevzdání diplomové práce: **04.01.2022**

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce zimního semestru 2022/2023**

Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.  
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
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.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta



## Poděkování

Děkuji Ing. Vojtěchu Petruchovi, Ph.D. za trpělivost při vedení mé diplomové práce, Ing. Zdeňku Hazdrovi za rady, obrábění a všeobecnou ochotu, laboratoři MAGLAB za přátelské prostředí a zejména mámě za lásku, péči a pochopení během mého studia.

## Prohlášení

I declare that the presented work was developed independently and that I have listed all sources of the information used within it in accordance with the methodical instructions for observing the ethical principles in the preparation of university theses.

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských prací.

V Praze dne 04. ledna 2022

.....  
Martin Šrámek

## Abstrakt

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout zařízení schopné strojově navíjet cívky s tzv. racetrack jádrem, které slouží jako budicí vinutí fluxgate senzorů magnetického pole. V práci je popsán vývoj konstrukce, její programové vybavení a na závěr vlastnosti navinutých jader a jejich srovnání s jádru navíjenými ručně.

**Klíčová slova:** Fluxgate, Racetrack, Navíjení cívek, Navíječka

**Vedoucí:** Ing. Vojtěch Petrucha, Ph.D.

## Abstract

The aim of this diploma thesis was to design a device capable of machine winding coils with a so-called racetrack core, which serves as an excitation winding of fluxgate magnetic field sensors. This thesis describes the development of the construction, its software and finally the properties of wound cores and their comparison with cores wound manually.

**Keywords:** Fluxgate, Racetrack, Coil Winding, Winder

**Title translation:** Winding machine for specific fluxgate sensor cores

## Obsah

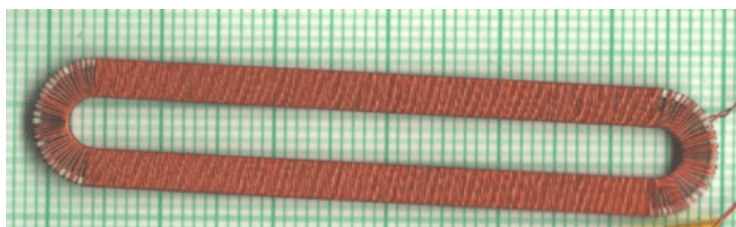
<b>1 Úvod a motivace</b>	<b>1</b>	5.1.2 Driver 8015A	48
<b>2 Historie</b>	<b>3</b>	5.1.3 Koncové spínače	49
2.1 Strojové navíjení toroidních cívek	3	5.1.4 LCD, enkodér a tlačítka	49
2.2 Fluxgate senzory	5	5.1.5 LDC	50
<b>3 Teorie a State of the art</b>	<b>7</b>	5.1.6 Napájení	50
3.1 Komerčně dostupné produkty	7	5.1.7 Návrh plošného spoje	51
3.2 Racetrack jádro	8	5.2 Firmware	52
3.3 Princip navíjení drátu	9	5.2.1 Kalibrace navíječky	53
3.4 Zásobník	11	5.2.2 Plnění zásobníku	53
3.4.1 Zásobník se řemenem	11	5.2.3 Navíjení jádra	54
3.4.2 Zásobník s jezdcem (shuttle)	12	5.2.4 Manuální ovládání navíječky	55
3.4.3 Otevírání zásobníku	13	<b>6 Testování měření</b>	<b>57</b>
3.4.4 Shrnutí	13	6.1 Snímání otoček zásobníku	57
<b>4 Mechanická konstrukce</b>	<b>15</b>	6.1.1 Snímání otoček motoru	57
4.1 Vývoj navíječky	15	6.1.2 Přímé snímání zásobníku	58
4.1.1 Navíjecí hlava z plexiskla	16	6.2 Vlastnosti strojově navinutých budicích cívek fluxgate	67
4.1.2 Navíjecí hlava vytištěná na 3D tiskárně	16	6.2.1 Vady vinutí	67
4.1.3 Navíjecí hlava z frézovaného hliníku	20	6.2.2 Měření parametrů cívek fluxgate	69
4.2 Navíjecí hlava	22	6.2.3 Opakovatelnost navíjení	73
4.2.1 Zadní deska	23	<b>7 Závěr</b>	<b>75</b>
4.2.2 Vnitřní kola a středová vložka	25	7.1 Future work	75
4.2.3 Řemenice a řemen	28	<b>A Literatura</b>	<b>77</b>
4.2.4 Napínání řemenu	31		
4.2.5 Rozevírání zásobníku	33		
4.2.6 Přítlačné rameno	34		
4.2.7 Otočná platforma	37		
4.3 Lineární posuv	40		
4.3.1 Lineární vedení	40		
4.3.2 Kleština	42		
4.4 Řídicí elektronika	44		
4.4.1 Box s elektronikou a ovládacím panelem	44		
4.4.2 Koncové spínače	45		
4.4.3 Pouzdro na LDC	45		
<b>5 Řídicí elektronika a firmware</b>	<b>47</b>		
5.1 Řídicí elektronika	47		
5.1.1 Driver A4988	48		



# Kapitola 1

## Úvod a motivace

Cílem této diplomové práce je návrh a konstrukce navíječky pro navíjení specifických jader, která budou využita ke konstrukci fluxgate senzorů. Fluxgate senzory patří do kategorie nekryogenních senzorů magnetického pole. V našem případě využíváme tzv. racetrack<sup>1</sup> konfiguraci budicího vinutí (viz obr. 1.1), pro kterou je typický nízký šum a dobrá teplotní stabilita offsetu. Tyto senzory mají využití zejména při geofyzikálním průzkumu, monitorování zemského magnetického pole a obecně vědeckých účelech. Slouží k hledání drahých kovů při těžebním průzkumu. Důsledkem geologického vývoje je značná pravděpodobnost, že blízko magnetických prvků (Fe, Co, Ni) se nachází i další drahé kovy jako například zlato.



**Obrázek 1.1:** Budicí vinutí fluxgate senzoru ve tvaru racetrack.

Doposud byla budicí vinutí navíjena ručně, což je manuálně náročné a zdlouhavé. Z důvodu zvýšené poptávky po senzorech tohoto druhu a absenci komerčně dostupných produktů bylo rozhodnuto o vývoji vlastního zařízení, které by bylo unikátní jak ve svém účelu, tak i konstrukci, neboť navíjení dlouhého, tenkého jádra s úzkou štěrbinou je výzvou. Bylo vyzkoušeno mnoho přístupů k navíjení těchto jader, jak bude rozvedeno na následujících řádcích, avšak finální použitá metoda spočívá v navíjení jádra nadvakrát, každou polovinu zvlášť. Poloviny jsou v oblé části jádra vodivě spojeny do série a tvoří jedno vinutí. Bude popsána jak mechanická konstrukce navíječky, tak její programové vybavení. Na závěr budou ověřeny vlastnosti navinutých jader a opakovatelnost samotného navíjení.

---

<sup>1</sup>Racetrack, neboli závodní okruh, se skládá z dvou půlkulatých a ze dvou rovných částí.



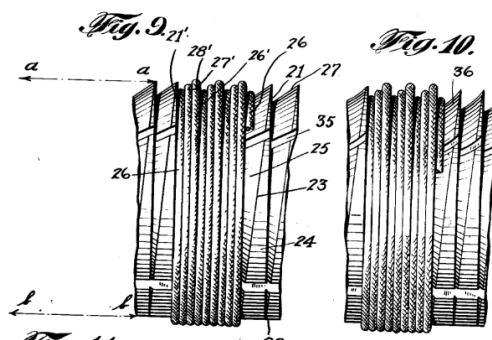


## Kapitola 2

### Historie

#### 2.1 Strojové navíjení toroidních cívek

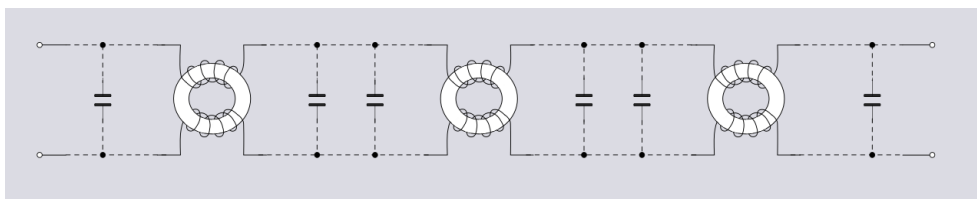
První zmínka o navíjení toroidních cívek pochází z patentu z roku 1925 od Franka Autyho [1], který se věnoval výrobě vzduchových toroidních cívek pro telekomunikační zařízení. Principem bylo navinutí drátu na dřevěný přípravek (viz obr. 2.1), následné sejmutí navinutých závitů, jejich stočení do tvaru torusu a zajištění lepidlem.



Obrázek 2.1: Autyho dřevěný přípravek na navíjení závitů pro toroidní cívky.

S rozvojem elektroniky rostla potřeba velkovýroby všech druhů cívek. Automatické navíjení solenoidových cívek bylo vcelku přímočaré, avšak navíjení toroidních cívek bylo oříškem.

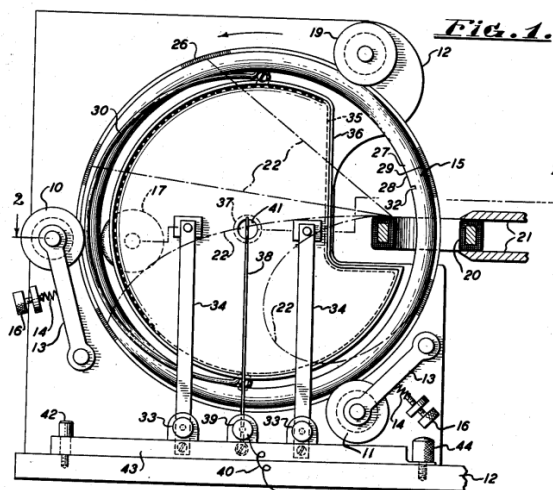
Metoda navíjení, kterou používáme my, pochází z roku 1954. V patentu číslo US2672297 [2] se mluví o rozvoji elektroniky a telefonních linek na velké vzdálenosti, které vyžadovaly zařazení tlumivek (viz obr. 2.2) do vedení kvůli zvýšení impedance vedení a odstranění šumů.



Obrázek 2.2: Schéma dálkového vedení balancovaného pomocí toroidních tlumivek. Kondenzátory naznačují parazitní kapacitu vedení.

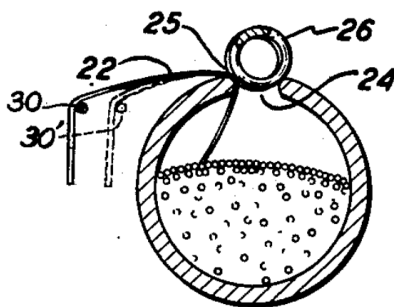
Tato velká poptávka po toroidních cívkách si žádala alespoň částečnou automatizaci jejich výroby. Patent [2] navazuje na již existující konstrukci navíječky, která je popsána v podkapitole 3.4.2, kdy je jádrem prostrčen zásobník s drátem, který se otáčí a vedle zásobníku se otáčí kolo s jezdcem, které ukládá drát ze zásobníku na jádro. Zásobník se pohybuje nezávisle na jezdcí a plynule napíná a odvíjí drát, aby byl správně utažený na jádře. Patent předesílá, že při vyšších

rychlostech navíjení musí zásobník velmi rychle kompenzovat napětí drátu, což zahrnuje prudká zrychlení a zpomalení velké hmoty tvořené zásobníkem s drátem, která mohou vést k přetrhávání drátu.



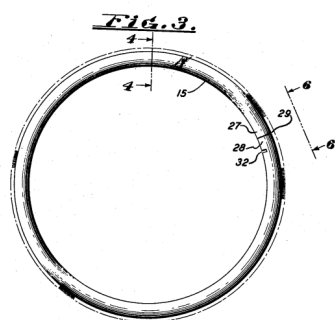
**Obrázek 2.3:** Nákres Hardyho navíjecí hlavy se zásobníkem hnaným řemenem.

Pro rychlejší navíjení proto přišel Donald C. Harder se zlepšením v podobě odstranění jezdce a jeho nahrazení řemenem (viz obr. 2.4). Princip této metody bude důkladněji popsán v podkapitole 3.4.1.

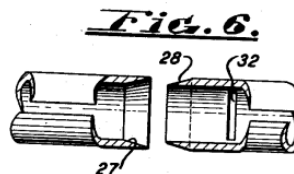


**Obrázek 2.4:** Řez zásobníkem s uloženým drátem, který se vyvléká pod řemenem (26) ven. Z patentu US2672297 [2] z roku 1954.

Toto vylepšení umožnilo zjednodušení celého navíjecího zásobníku, jeho miniaturizaci, takže bylo možné vyrábět drobnější toroidní cívky, a zejména urychlení celého navíjecího procesu.



(a) : Rozevíratelný předpružený zásobník.



(b) : Detail zábrusu na rozevřeném zásobníku.

Obrázek 2.5:

Toto řešení je využíváno dodnes. Jedná se oblíbený způsob navíjení drobných toroidních jader. Navíjecí hlava (viz obr. 2.3) je zakomponována do navíjecího stroje, který má páku pro usnadnění rozevření zásobníku, přípravky na uložení drátu na zásobník, pohon s nastavitelnými otáčkami, přípravek na držení toroidního jádra a zařízení na počítání závitů.

I my při konstrukci naší vlastní navíječky toroidních racetrack jader budeme vycházet z principů uvedených v Harderově patentu.

## 2.2 Fluxgate senzory

V polovině 20. Století byla potvrzena teorie deskové tektoniky, právě díky využití fluxgate senzorů. V jejich vývoji došlo k jejich největšímu rozmachu v období 2. Světové války, kdyby byly ve velkém nasazeny spojenci za účelem hledání německých ponorek.

V roce 1936 vědci H. Aschenbrenner a G. Goubau vyvinuli první magnetometr typu fluxgate, který byl velmi přesný a citlivý i na malé změny magnetického pole. Ve válečném období byl senzor miniaturizován tak, aby mohl být tažen za lodí nebo nesen v nízko letícím letadle, na jehož palubě technik podle drobných změn magnetického pole detekoval ponorku. Po válce byl stejný druh senzoru využit k mapování magnetického profilu mořského dna. Byly nalezeny magnetické linie, které potvrdily hypotézu, že ze zemského jádra vyvěrá magma. Magnetické částice, v magmatu obsažené, se zorientují podle magnetického pole a následně s magmatem ztuhnou [3].

Fluxgate senzor se řadí mezi indukční senzory magnetického pole. Skládá se z vnitřní budicí cívky (jejíž výroba je předmětem této práce) a z vnější snímací cívky. Pracuje na základě modulace permeability magnetického jádra proudem do budicí cívky. Indukované napětí  $u_i$  je pak rovno

$$u_i = NS\mu_0 H \frac{d\mu_r(t)}{dt}, \quad (2.1)$$

kde  $N$  je počet závitů cívky,  $s$  je plocha cívky,  $H$  je intenzita magnetického pole,  $\mu_r$  a  $\mu_0$  je relativní permeabilita a permeabilita vakua a poslední člen  $\frac{d\mu_r(t)}{dt}$  označuje změnu permeability vlivem saturace magnetického jádra [4].



## Kapitola 3

### Teorie a State of the art

Na trhu jsou dostupné navíječky pouze na klasická toroidní jádra, které nelze přímo použít pro navíjení racetrack jader a bylo by je zapotřebí modifikovat. Další variantou bylo zakoupení samotné navíjecí hlavy a stavba přípravku pro držení a pohyb racetrack jádrem, který by se k hlavě připojil. Jako poslední varianta by připadalo v úvahu zakoupení pouze navíjecího zásobníku a stavba celé navíječky kolem něj. Tyto tři varianty se liší jak konstrukční náročností, tak finančními náklady.

#### 3.1 Komerčně dostupné produkty

V úvahu přidaly stolní navíječky například z řady MINI od firmy Ruff (viz obr. 3.1a) nebo od firmy Jovil (viz obr. 3.1b). Řídicím parametrem je minimální vnitřní průměr cívky, který jsou tyto stroje schopné navinout, a ten nesmí překročit 4 mm. Všechny stroje jsou konstrukčně shodné a liší se pouze použitou řídicí elektronikou. Jejich cena se pohybuje od 90 tis. Kč až do 450 tis. Kč, což je příliš velká částka na to, aby byl stroj ještě dále modifikován a upravován.



(a) : Navíječka od firmy Ruff RW-35 MINI. (b) : Navíječka od firmy Jovil SMC-1S.

**Obrázek 3.1:** Komerčně dostupné navíjecí stroje.

Další možností bylo zakoupení samotné navíjecí hlavy bez pohonu a řídicí elektroniky. Opět se jednalo o produkty firmy Ruff, která samostatné navíjecí hlavy (viz obr. 3.2a) nabízí jako rozšiřující produkt pro své navíjecí stroje. Ceny samostatných navíjecích hlav jsou v rozmezí 50 tis. Kč - 70 tis. Kč, což opět bylo uznáno jako příliš velká částka. Jako náhradní díl je možné zakoupit samostatný navíjecí zásobník. Jeho cena je přibližně 10 tis. Kč, což z něj činí nejlevnější variantu. Pokud člověk nevlastní celou navíječku, výrobce není příliš ochotný zásobník prodat samostatně.



(a) : Navíjecí hlava ze série MINI.



(b) : Sada navíjecích zásobníků.

**Obrázek 3.2:** Produkty firmy Ruff.

Nakonec bylo rozhodnuto zakoupit samostatný zásobník a zkonstruovat navíječku kolem něj přesně podle našich potřeb. Přibližné náklady jsou v tabulce (viz tab. 3.1) a činí přibližně 30 tis. Kč pouze za materiál. Celkové náklady by zahrnovaly práci jednoho diplomanta, jednoho vedoucího a jednoho obráběče, bohužel však nebyly zaznamenány.

Položka	Cena [Kč]
Zásobník	10 000
Materiál 3D tisk	2000
Železářství	300
Ložiska, řemenice, řemen	1267
Lineární vedení, vozík	550
BLDC, driver	1130
Krok. motor NEMA 17 x2	500
ESP32, LCD, DC-DC, drivery	700
Plošný spoj	300
Napájecí adaptér	575
Airsoft kuličky	100
Lamino deska	200
Frézovaný hliník	12000
Celkem	29572

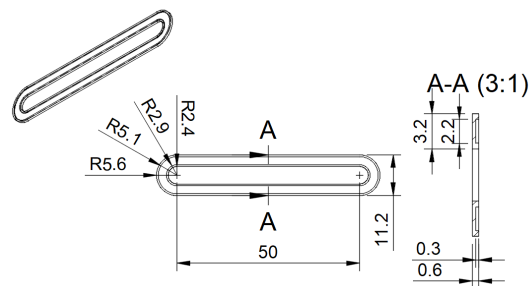
**Tabulka 3.1:** Tabulka nákladů na vývoj navíječky racetrack jader. Ceny jsou přibližné.

## 3.2 Racetrack jádro

Jádro používané ve fluxgate senzorech vyráběných v laboratoři MAGLAB má tvar tzv. racetracku (viz obr. 3.3). Jádro se skládá z kostry, vyfrézované z FR4<sup>1</sup>, a z magnetického jádra, vyřezaného laserem z 0.02 mm amorfního magnetického materiálu. Před vložením do drážky v kostře je magnetické jádro několik hodin žiháno v magnetickém poli, aby se správně orientovaly magnetické domény uvnitř. To ovlivňuje způsob magnetizace. Dalším faktorem ovlivňujícím magnetizaci jádra

<sup>1</sup>FR znamená Flame Retardant. FR4 označuje druh termosetu hojně využívaného v elektrotechnice [5]

je vinutí, které ho obklopuje. Princip navíjení, počet a tvar závitů a jejich vliv na vlastnosti fluxgate senzoru jsou předmětem této diplomové práce. Na následujících stránkách bude používán pouze termín jádro cívky, i když je myšlen komplet kostry s drážkou a vsazeným magnetickým jádrem.



**Obrázek 3.3:** Výkres kostry ve tvaru racetrack, do které je vsazeno feromagnetické jádro.

### 3.3 Princip navíjení drátu

Před manuálním navíjením racetrack jádra se odmotá potřebná délka drátu a navine se na člunek (někdy také jehla). Následně se člunek prostrkuje středem jádra, postupně se z něj odmotává drát a tak se vytváří další závit na jádře.



**Obrázek 3.4:** Manuálně navíjené jádro, kterým je provlékán člunek s drátem.

Při strojovém navíjení je tento proces stejný, pouze člunek je nahrazen kulatým zásobníkem, který svým otáčením ukládá drát na jádro. Nejlepší analogií je obrázek 3.5.



**Obrázek 3.5:** Zjednodušená demonstrace svlékání drátu ze zásobníku a jeho ukládání na jádro.





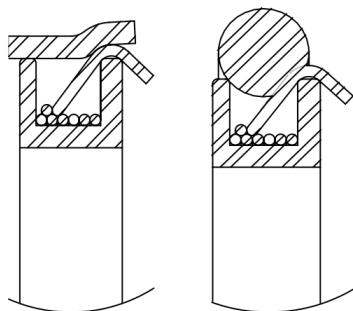
## 3.4 Zásobník

Zásobník drátu je srdcem celé navíječky. Jedná se o kovový kroužek profilu U, který je v jednom místě přerušen a je možné ho rozevřít a navléknout na něj jádro toroidní cívky.

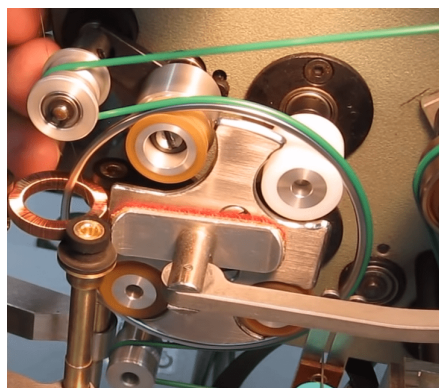
Na trhu je dostupné množství produktů nejrůznějších rozměrů a využití. My jsme však hledali pouze v nejmenší kategorii, kde se průměry drátu pohybují od 0.05 mm do 1 mm a průměru cívky do 100 mm. Dalším parametrem je nejmenší výsledný vnitřní průměr navinuté cívky. Postupným navíjením se vnitřní průměr zmenšuje, jak přibývá drátu na jádře. To omezuje maximální profil zásobníku, který se musí do jádra vejít včetně tolerance. Pro naše racetrack cívky je tento minimální průměr něco málo přes 3 mm.

### 3.4.1 Zásobník se řemenem

Obecně existují dva druhy zásobníků, které se dělí podle způsobu svlékání drátu. První je konstrukčně jednodušší a je naznačen na obrázku 3.7b. Otáčení zásobníku a posun jádra mají za následek napnutí drátu, které vede k jeho svlékání ze zásobníku. Aby mohl drát ze zásobníku pryč, musí se prosmýknout pod řemenem, který zásobník obklopuje a zároveň jím otáčí (viz kap. 4).



(a) : Řez zásobníkem, naznačený princip svlékání drátu ze zásobníku pod hnacím řemenem.



(b) : Navíječka toroidních cívek se zásobníkem hnaným řemenem.

Obrázek 3.7:

Napnutí hnacího řemenu určuje, jak moc snadno se může drát ze zásobníku smýkat, tedy jak moc bude drát napnutý a ve výsledku jak moc budou utažené závity na jádře.

Výhoda tohoto přístupu je možnost miniaturizace. Zásobník je pouze kovový kroužek s vyfrézovanou drážkou. Dokáže se vejít i do velmi malých otvorů v drobných cívkách. Je konstrukčně jednodušší. Zásobník obemknutý řemenem dokáže navíjet pouze tenkým drátem, neboť tlustý drát by se nedokázal zpod řemenu vyvléknout a řemen by musel být zbytečně tuhý, aby dokázal tlustý drát napnout.

### 3.4.2 Zásobník s jezdcem (shuttle)

Druhým principem konstrukce je zásobník s jezdcem. Toto řešení je konstrukčně složitější. Skládá se ze zásobníku, hnacího kola s jezdcem, třecí spojky a jezdce.



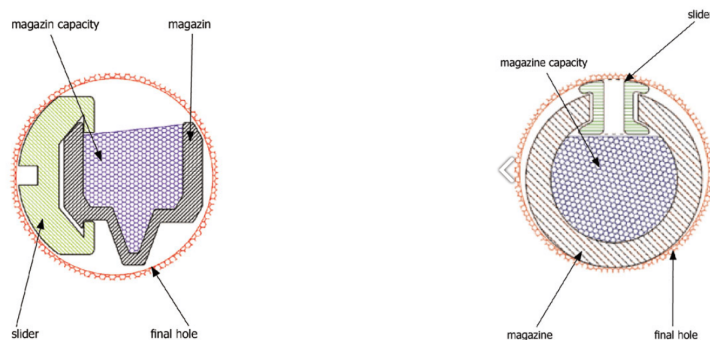
(a) : Pohled shora na zásobník a ozubené kolo s jezdcem. Jezdec není vidět.

(b) : Pohled shora na zásobník a kolo s jezdcem. Červená šipka naznačuje směr odvíjení drátu ze zásobníku přes jezdec na jádro cívky.

Obrázek 3.8:

Na obrázku 3.8a jsou vidět dvě kola. Kolo zásobníku, na které se uloží drát jako v předchozím případě. Ozubené kolo dále od čtenáře je kolo s jezdcem, který svléká drát ze zásobníku. Kola nejsou přímo mechanicky spojena. Hnané je kolo s jezdcem, jelikož je zodpovědné za navíjení, a zásobník je s ním spojen jednosměrnou spojkou ve smyslu, že zásobník se může otáčet pomaleji než kolo s jezdcem, ne naopak. Aby se zásobník volně neprotáčel a nesvlékal ze sebe drát, je jeho otáčení brzděno prokluzovou spojkou, gumovým kolečkem, jehož přítlak brzdí zásobník v pohybu vůči kolu s jezdcem.

Důsledkem tohoto je, že když jezdec utáhne drát na jádře, svlékne se ze zásobníku další část drátu, kterou zásobník svým pootočením zpět dotáhne a vytvoří se tak volné smyčky.

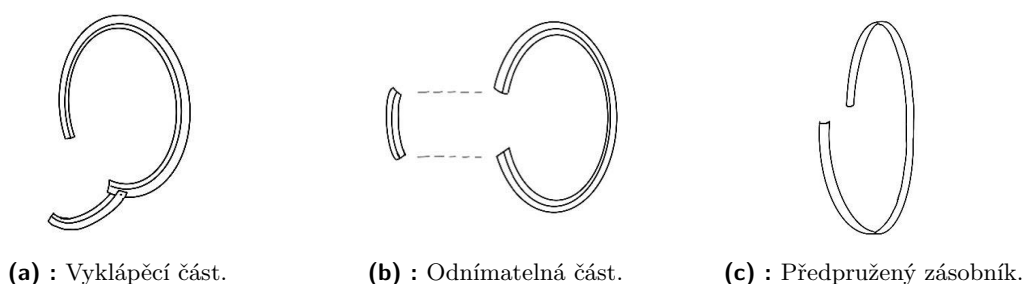


Obrázek 3.9: Různé konstrukce jezdců v průřezu jádrem.

Tato konstrukce se používá zejména u navíjení cívek větších rozměrů, neboť celá konstrukce kola, zásobníku a jezdce je velmi robustní a obsahuje velké množství pohyblivých částí. Výhodou této konstrukce je možnost práce i s tlustým drátem. Drát je jednoznačně veden jezdcem, který ho může utáhnout velkou silou.

### 3.4.3 Otevírání zásobníku

Opět existují dva hlavní přístupy k problému, jak navléknout toroidní jádro na zásobník. Prvním řešením je předělený předpružený zásobník. Zásobník se chová jako pružina tvaru C, která chce zůstat zavřená. Oba konce mají na sobě zvláštní zábrus - zámek, který zajišťuje, že se zásobník dá rozevřít pouze tahem zevnitř ven, nikoli ze strany na stranu. Můžete ho vidět na obrázku 3.10 úplně vpravo. Jeho výhodou je konstrukční jednoduchost a tedy miniaturizovatelnost. Zásobníky tohoto druhu mohou navíjet cívky do minimálního vnitřního průměru menšího než 1 mm. Nevýhodou je pouze malá vzdálenost roztažení. Tímto zásobníkem se dají navíjet cívky menších rozměrů. Aby zásobník držel v zavřeném stavu, musí být předpružený, je proto vyroben z kalené pružinové oceli, která musí být přesně obrobená a při velké deformaci praskne. Další nevýhodou je cena, která je způsobena náročností výrobního procesu.



Obrázek 3.10: Druhy otvírání zásobníku.

Dalším řešením je zásobník nějakým způsobem rozebiratelný a to buď s otvírací nebo rozebiratelnou sekcí. Zásobníky tohoto druhu bývají určeny k navíjení větších cívek, neboť otvíratelná sekce může mít velké rozměry, aby i masivní jádro bylo možné navléknout na zásobník. Otvíratelná část musí být v zásobníku zajištěna mechanickou západkou. Celá konstrukce zásobníku je robustnější a proto dovoluje navíjení i tlustým drátem. Zásobník nemusí být vyroben z žádné speciální oceli, což ho činí cenově přijatelným. Konstrukce tohoto druhu je vyobrazena na obrázcích 3.10a a 3.10b.

### 3.4.4 Shrnutí

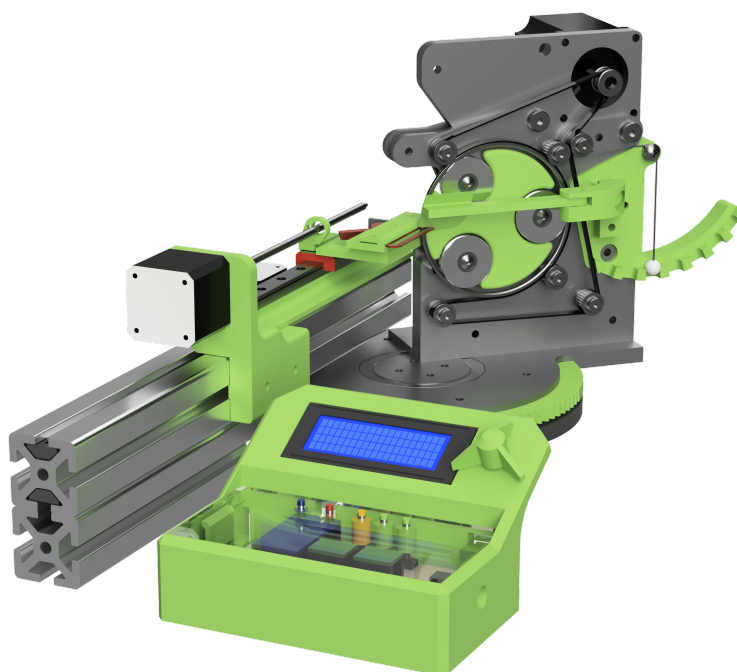
Ve skutečnosti jsou způsoby pohonu propojené se způsoby rozevírání a rozměry jader toroidních cívek. Drobná jádra se navíjejí tenkým drátem, který se dokáže prosmýknout pod řemenem, který pohání zásobník. Drobné jádro má malý minimální vnitřní průměr, takže i zásobník musí mít malý průřez a tím pádem připadá v úvahu předpružený zásobník. Na druhé straně velké cívky se většinou ovíjejí tlustým drátem, na který je potřeba velká síla k utažení, kterou dokáže vyvinout zásobník s jezdcem. Ten má sice větší průřez, ale u velkého jádra není problém, aby jím prošel.

Z těchto důvodů jsme zvolili předpružený zásobník hnaný plochým řemenem od firmy Ruff GmbH ze série MINI. Samostatné zásobníky jsou velmi obtížně dostupné. Běžně se prodávají pouze celé navíjecí hlavy nebo kompletní navíjecí stroje. Při manipulaci se zásobníkem je nutné dbát nejvyšší opatrnosti, aby se nezkroutil, neohnul nebo nezlomil.



## Kapitola 4

### Mechanická konstrukce



Nosným tématem této diplomové práce bylo nalezení správné konstrukce navíječky racetrack toroidních jader. Tato jádra jsou v našem případě velmi tenká a křehká a mají dlouhý a úzký profil. Jak již bylo zmíněno výše (viz kap. 3), jedná se o ne zcela prozkoumanou oblast.

Před započítím práce na návrhu jsme navštívili továrnu TRONIC spol. S r.o., která se zabývá vinutím transformátorů, tlumivek, dalších vinutých dílů a magnetických obvodů, kde nám ukázali navíječku toroidních tlumivek v chodu. Z této zkušenosti bylo čerpáno zejména při návrhu vlastní navíjecí hlavy.

#### 4.1 Vývoj navíječky

Jak již bylo řečeno, drtivá většina průmyslových strojů je konstruována pro navíjení toroidních jader. Samozřejmě existují i navíječky racetrack, či jader jiných tvarů například hranatých. Avšak žádná z metod používaných těmito stroji se nehodí pro naše potřeby.

### 4.1.1 Navíjecí hlava z plexiskla

První iterací celé navíjecí hlavy byl prototyp vypálený laserem z 5 mm plexiskla. Byly na ní učiněny první pokusy o navíjení drátu například na dřík šroubováku nebo na holé racetrack jádro (viz obr. 4.1). Tato navíječka neměla žádný způsob držení jádra, neboť se odstraňovaly nedostatky navíjecí hlavy.



**Obrázek 4.1:** První pokusy o navíjení drátu s navíjecí hlavou vypálenou laserem z plexiskla.

Výhodou této navíjecí hlavy byla její rychlá výroba, neboť vypalování z plexiskla je možné provádět po dohodě na Fakultě strojní. Plexisklo je dobře obrobitelný materiál, takže případné změny bylo možné rychle realizovat. Nedostatkem byla například nedostatečná tuhost zadní desky, obecně nízká robustnost řešení, ať už se jednalo o použité ložiska, či spojovací materiál.

### 4.1.2 Navíjecí hlava vytištěná na 3D tiskárně

Kvůli zásadním a rychlým změnám v konstrukci jsme přistoupili k vytištění celé konstrukce na 3D tiskárně. Bylo možné iterovat jednotlivé díly v řádu jednotek hodin a tím tak rychle odhalovat nedostatky. Díky své modularitě a flexibilitě tato konstrukce vydržela téměř až do samotného závěru vývoje. Na obrázku 4.2 je vidět ověřování prvních změn. Byla to nová vnitřní kola vysoustružená z hliníku se zaobleným okrajem a pozměněná konstrukce přitlačného ramene.

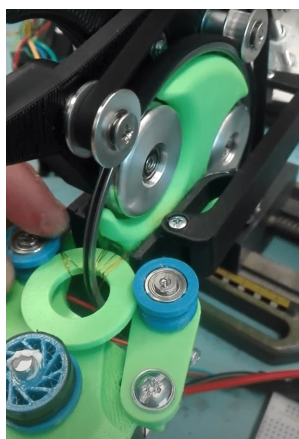


**Obrázek 4.2:** Navíjení drátu na dřík šroubováku na navíjecí hlavě vytištěné na 3D tiskárně.

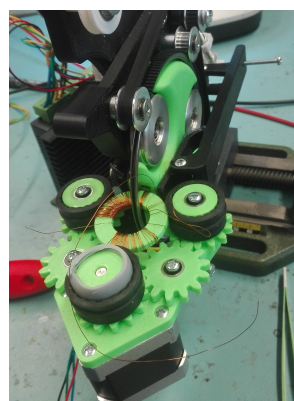


## ■ Navíjení toroidních jader

Po prvních pokusech o navíjení bylo zapotřebí ověřit přesnost a opakovatelnost ukládání závitů na jádro. Protože v laboratoři magnetického pole je poptávka i po klasických toroidních jádrech, byl zkonstruován doplněk (viz obr. 4.3a), který se přišrouboval na navíjecí hlavu a umožňoval plynulé otáčení toroidním jádrem. Nástavec sestával ze třech válců, z nichž jeden byl hnaný krokovým motorem a jeden byl na výklopném rameni přitahován gumičkou. Do rozevřeného zásobníku se navléklo toroidní jádro a usadilo se mezi tři válce. Válce byly vytištěny na 3D tiskárně z pružného materiálu TPU. Prvním poznatkem bylo, že vytištěné válce, i když z velmi měkkého materiálu, nemají dostatečně přilnavý povrch. Druhým poznatkem byla nutnost pohonu všech tří válců a jejich pevnější sevření jádra. V druhé iteraci (viz obr. 4.3b) byly vytištěny pouze středy válců, na které byly navlečeny gumové pneumatiky ze stavebnice LEGO. Přes sérii ozubených kol bylo spojeno otáčení všech tří válců a v ose pravého prostředního ozubeného kola bylo uchyceno vyklápění přítlačného ramene. Tento design se velmi osvědčil. Nízká kvalita navíjených jader byla způsobena nedokonalostí navíjecí hlavy, která nedokázala správně vést drát. Pokud by v laboratoři i nadále byla poptávka po navíjení klasických toroidních jader, nebyl by problém na stávající hliníkovou hlavu připevnit podobný nástavec a vyrábět i tento druh cívek.



(a) : Nástavec na navíjení toroidních cívek s jedním hnaným válcem.

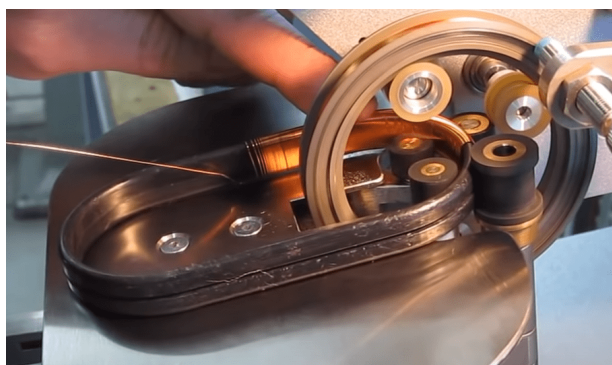


(b) : Nástavec na navíjení toroidních cívek se třemi hnanými válci.

Obrázek 4.3:

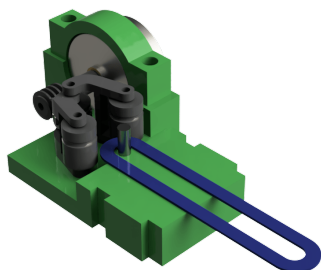
## ■ Pohyb racetrack jádrem pomocí válečků

Po odladění hlavních nedostatků navíjecí hlavy byl čas na návrh zařízení pro manipulaci s racetrack jádrem. Zvažovali jsme několik možných konstrukcí a jednou z nich bylo vedení racetrack jádra pomocí čtveřice válečků, jak je demonstrováno na obrázku 4.4. Dva válečky jsou v kontaktu s jádrem z vnějšku a dva z vnitřku. Dva vnitřní jsou na předpružených ramenech, kopírují měnící se tvar jádra a přitlačují ho na dva vnější válečky. Jedná se o velmi elegantní konstrukční řešení, avšak jádro musí mít dostatečně velký vnitřní rozměr, aby se do něj vešly dva válečky a navíjecí zásobník. To o našem jádru neplatí.



**Obrázek 4.4:** Otáčení racetrack jádrem pomocí čtyř válečků.

Zvažovali jsme však jinou variantu. A to použít vnitřní stranu zásobníku místo dvou napínacích válečků. Tento přístup by měl výhodu v minimálním řízení. Stačilo by, aby se válečky otáčely správnou rychlostí a závity cívky by byly rovnoměrně rozmístěny. Byl vyroben testovací prototyp (viz obr. 4.5a) ve zmenšeném měřítku, který měl v sobě vsazenou 3 mm hřídelku, která měla reprezentovat zásobník. Na ní bylo navlečeno jádro, na které byly přitisknuty dva poháněné válečky. Válečky byly spojené gumičkou, která je jednak držela v kontaktu s jádrem a zároveň přenášela kroutivý moment od motoru. Experiment prokázal, že je možné tímto způsobem otáčet rovnoměrně jádrem, avšak ne velkou silou. Během navíjení je jádro silně namáháno a je zapotřebí, aby bylo pevně uchyceno. Byl zhotoven nástavec (viz obr. 4.5b) připevnitelný k navíjecí hlavě, který měl pohybovat jádrem ve stejném duchu, jak bylo ověřeno na prototypu. Skládal se ze dvou ramen s krokovými motory, které poháněly válečky. Ramena byla přitahována gumičkou tak, aby tlačila jádro proti zásobníku. Bylo zjištěno, že pro spolehlivou manipulaci s jádrem musí být přítlačná síla enormní. Pod takovýmto tlakem se jádro zvedalo z podložky a muselo být přidržováno ve vodorovné poloze. Zároveň otáčející se zásobník měl tendenci strhávat jádro z podložky. Tato metoda byla zavržena proto, že se jádro otáčí proti směru hodinových ručiček a závity se ukládají napravo od zásobníku. Zásobník tedy drhnul přes čerstvě navinuté závity, což zhoršovalo pohyb jádra a poškozovalo vinutí cívky.



**(a)** : Prototyp pro ověření konceptu manipulace s jádrem mezi dvěma hnanými válečky a kluzným kolíkem.



**(b)** : Realizace konceptu manipulace s jádrem mezi dvěma hnanými válečky a zásobníkem.

**Obrázek 4.5:**



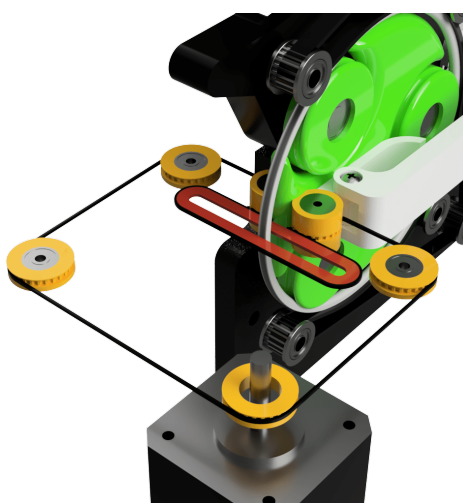
### ■ Pohyb racetrack jádrem obepnutým řemenem

Dalším oblíbeným průmyslovým přístupem pro manipulaci se zvláštními tvary toroidních jader je obepnutí jádra řemenem a jeho otáčením. Tato metoda (viz obr. 4.6) má obrovskou výhodu, že je s ní možné ovíjet jakýkoli (konvexní) tvar a rozměr jádra. Kolem podložky, na které leží jádro, vede řemen, který je obtažen kolem jádra a kolem dvou řemenic na úrovni zásobníku. Jádro je drženo mezi těmito dvěma řemenicemi a posouvání řemenu s jádrem otáčí tak, že obvodová rychlost jádra vůči zásobníku je konstantní a závity se na jádro usazují pravidelně.



**Obrázek 4.6:** Otáčení racetrack jádrem pomocí obepnutého řemenu.

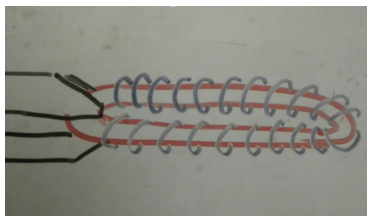
Pokud by se povedlo realizovat tento přístup, jednalo by se o velmi elegantní řešení, neboť jedna navíječka by mohla navíjet různé rozměry racetrack jader i klasických toroidních jader. Stačilo by pouze změnit napnutí řemenu a rozmístění dvou řemenic na úrovni zásobníku. Přes všechny klady, má tato metoda zásadní nedostatek a to, že funguje pouze pro jádra s velkou tloušťkou. Naše jádro má tloušťku necelý 1 mm a plocha, o kterou by se mohl řemen opřít v porovnání s napnutím řemenu potřebným k otáčení jádrem, je minimální. Byl navržen nástavec (viz obr. 4.7), který se o to však měl pokusit. Z laserové tiskárny byl vyjmut 500 mm dlouhý 1.5 mm široký zubový řemen, který byl napnut mezi šesti řemenicemi. Dvě řemenice by přidržovaly jádro a jedna byla hnaná. Ještě než byla konstrukce připravena k namontování na navíjecí hlavu, byly řemenice provizorně přišroubovány na dřevěnou desku, abychom ručně zkusili otáčet řemenem kolem jádra. Bylo zřejmé, že řemen sklouzává z jádra a ani s pomocí různých přitlačných desek se ho nedaří kinematicky omezit.



**Obrázek 4.7:** Návrh nástavce pro otáčení jádra obepnutým řemenem.

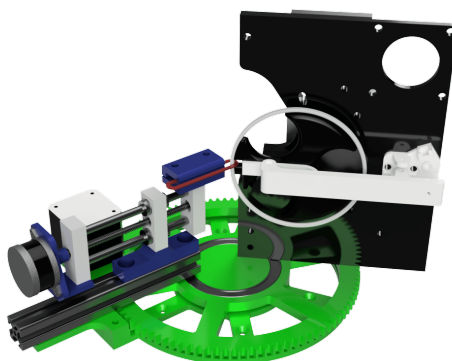
### ■ Uchycení racetrack jádra v kleštině

Závěrečná varianta vychází z metody navíjení hranatých toroidních jader. Jádru je upnuto kleštičkami a lineárně posouváno v ose kolmo k rovině zásobníku. Ing. Michal Dressler přišel s myšlenkou, že i v našem případě bychom mohli jádro uchytit do kleštiny (viz obr. 4.8) a pohybovat navíjecí hlavou kolem jádra. Poslední část, kde bylo jádro drženo v kleštině, by zůstala nenavínutá a dovinula se ručně.



Obrázek 4.8: Návrh kleštiny pro držení jádra.

Bylo tedy třeba zkonstruovat systém posuvu jádra a otáčení navíjecí hlavy kolem půlkulatých částí. Jak bude zmíněno v následujících kapitolách, byla navrhována první verze lineárního posuvu v kombinaci s otočnou platformou (viz obr. 4.9). Většina dílů byla vytištěna na 3D tiskárně zejména kvůli rychlosti výroby a snadné obrobitelnosti. Původní myšlenka úzké kleštiny, která by držela jádro jen za jeho malou část v jednom z ohybů, byla shledána nereálnou z důvodu, že tenké jádro je velmi pružné a při sebemenším namáhání se kroutí. Bylo patrné, že jádro bude potřeba podepírat na co největší ploše, aby nedošlo k jeho poškození. Bylo nutné přijmout kompromis – nenavíjet celé jádro v jednom kuse, ale navinout ho nadvakrát. Bude navinuta první polovina jádra, z poloviny první kulaté části do poloviny druhé kulaté části. Pak bude jádro vyjmuto, otočeno, znovu upnuto a proces bude zopakován i na druhé polovině jádra. Obě poloviny vinutí budou na jednom konci spájeny dohromady a vznikne tak souvislé vinutí. Myšlenkou bylo, že pokud bude spoj obou vinutí v kulaté části jádra, nebude jím příliš ovlivněn způsob magnetizace jádra cívky.

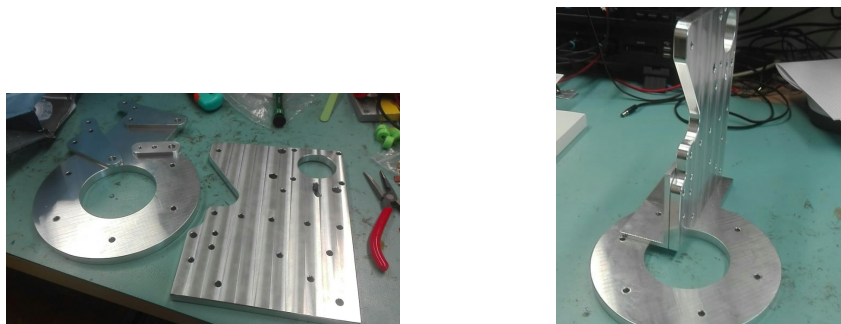


Obrázek 4.9: První verze navíječky s otočnou navíjecí hlavou a lineárním posunem.

#### ■ 4.1.3 Navíjecí hlava z frézovaného hliníku

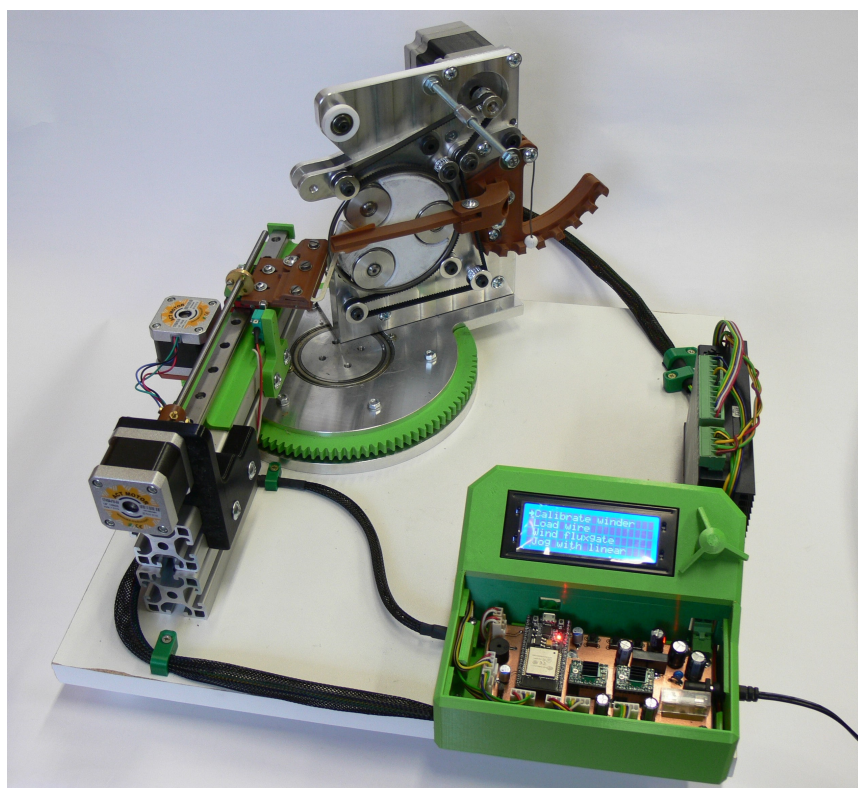
Poté co se na navíječce vyrobené z plastu odladila drtivá většina neduhů, bylo rozhodnuto, že pro celkové zvýšení tuhosti zařízení a opakovatelnosti navíjení je potřeba ji vyrobit z pevnějšího materiálu. Byl zvolen frézovaný hliník, kvůli jeho dobrému poměru hmotnost/tuhost. Z hliníku

byla vyfrézována zadní deska, horní a spodní díl otočné platformy, rozevírání zásobníku a páka napínání řemenu (viz obr. 4.10). Zadní deska s díly otočné platformy byly vyfrézovány na CNC stroji.



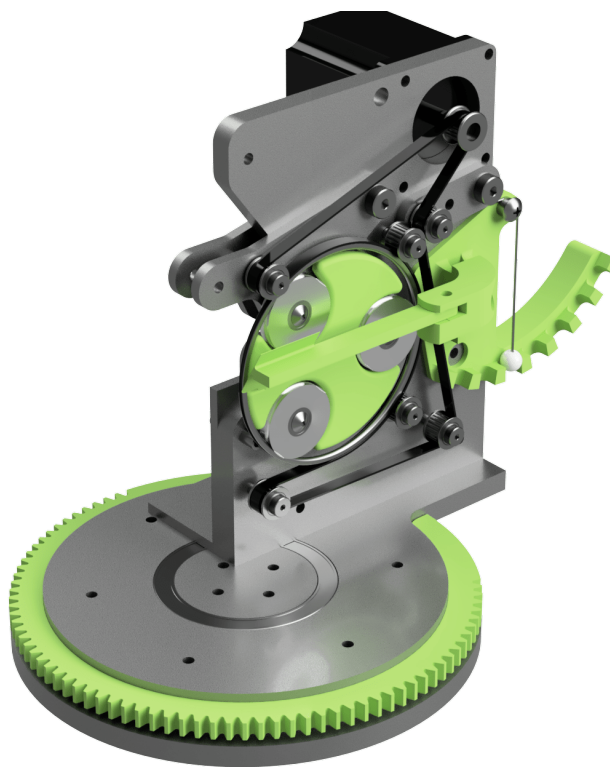
**Obrázek 4.10:** Čerstvě vybalené díly vyfrézované z hliníku.

Celá navíječka (viz obr. 4.11) byla postupně zkompletována z jednotlivých dílů, které budou popsány v další kapitole 4.2. Výsledný design není dokonalý a bylo by třeba dokončit několik drobností, které nejsou nutné pro správnou funkci navíječky.

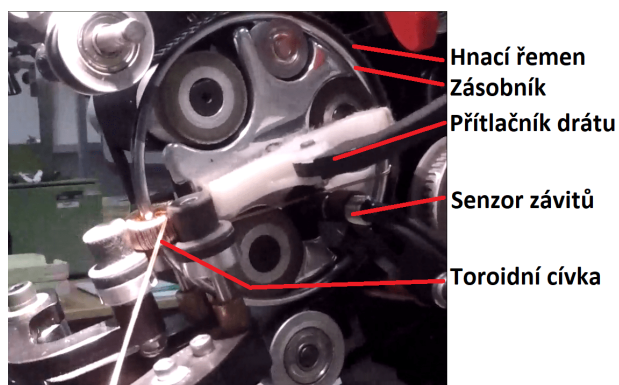


**Obrázek 4.11:** Finální verze navíječky s lineárním posuvem a otočnou navíjecí hlavou.

## 4.2 Navíjecí hlava

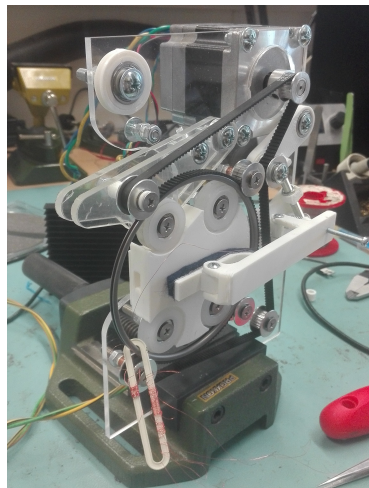


Navíjecí hlava je komponenta navíječky, která drží navíjecí zásobník, umožňuje jeho otáčení, rozevírání a má na sobě další prvky, které napomáhají vedení drátu.



**Obrázek 4.12:** Průmyslová navíječka toroidních jader a její základní součásti.

Na obrázku 4.12 je snímek pořízený v továrně. Tato navíjecí hlava je součástí velmi robustního navíjecího stroje. Protože se naše navíjecí hlava bude muset pohybovat kolem podlouhlého jádra, musí mít úzký profil. Tento koncept byl přepracován v první prototyp, který je na obrázku 4.13.



**Obrázek 4.13:** Prototyp navíjecí hlavy podle prvního návrhu.

Jsou vidět hlavní součásti, které budou popsány v dalších podkapitolách. Jedná se o čtyři vnitřní kola, která podpírají zásobník zevnitř, řemenice a řemen, který drží zásobník zvenku a zároveň ho pohání, BLDC motor, který pohání řemen a napínací vačka, která řemen napíná. V neposlední řadě také páka rozevírání zásobníku, vodící kolečko pro ukládání drátu na zásobník a nakonec přítlačné rameno brzdící drát.

#### ■ 4.2.1 Zadní deska

Základem navíjecí hlavy je zadní deska (viz obr. 4.14). Jsou k ní přišroubovány všechny ostatní komponenty navíjecí hlavy. Jedná se o CNC frézovaný 10 mm tlustý hliníkový plech. Ten je přes hliníkový úhelník 80x50x5 mm přišroubován do spodní otočné platformy s ložiskem.

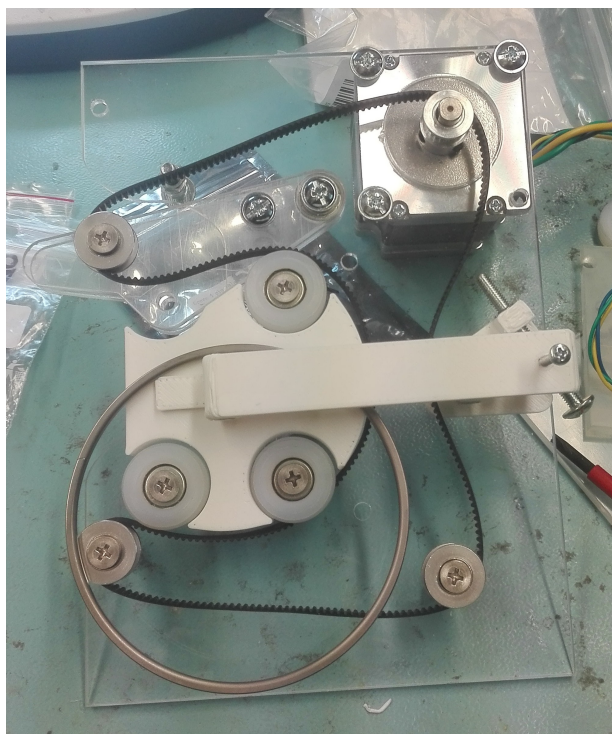


**Obrázek 4.14:** Zadní deska navíjecí hlavy se všemi otvory k připevnění ostatních součástí.



### ■ Vývoj zadní desky

V první verzi zadní desky šlo zejména o ověření správnosti rozložení řemenic tak, aby byl řemen optimálně napnutý. Rozložení řemenic bude hlouběji rozebráno v sekci 4.2.3. Zadní deska byla nejprve pomocí laseru vypálena z 5 mm tlustého plexiskla, jak je vidět na obrázku 4.15.



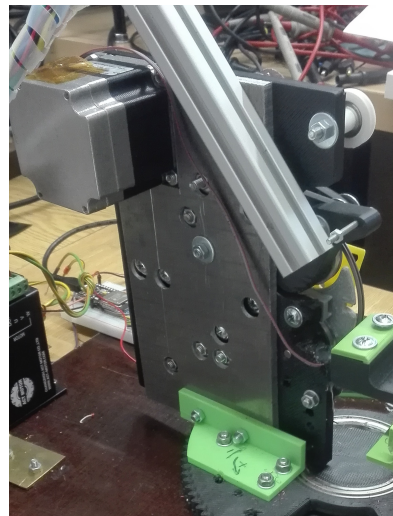
**Obrázek 4.15:** Zadní deska navíjecí hlavy vyřezaná laserem z plexiskla v průběhu kompletace.

Na tomto prototypu se ověřilo rozložení všech otvorů pro šrouby a bylo možné odhalit nedostatky ostatních komponent. Nedostatkem této zadní desky byla její nízká tuhost. Relativně těžký BLDC motor umístěný v jejím pravém horním rohu měl těžiště daleko od zadní desky a svou vahou ji ohýbal. To mělo za následek nepravidelný chod řemenu, vysmekávání zásobníku z vnitřních kol při jeho rozevření a další nedostatky.

V další iteraci bylo změněno rozložení vnitřních kol a tedy i rozložení otvorů pro jejich broušené hřídele. Byla přidána další páka na napnutí jednoho z vnitřních kol (viz obr. 4.16a). Celá zadní deska byla vytištěna na 3D tiskárně. Měla tloušťku 10 mm, což mělo za účel zvýšení její tuhosti. Tuhost byla skutečně zvýšena v porovnání s 5 mm plexisklem, ale v průběhu času opět došlo k zdeformování zadní desky. Jako rychlé provizorní řešení byl na desku zezadu přišroubován 5 mm hliníkový plech, který měl zvýšit její tuhost (viz obr. 4.16b). Tuhost a prohýbání, jak ze strany motoru, tak ze strany napnutého řemene, se zlepšily, avšak také vzrostla celková hmotnost navíjecí hlavy, což špatně nesla otočná platforma a zejména pak plastový spojovací úhelník. Při otáčení navíjecí hlavy docházelo k jejímu rozkřívání. To bylo taktéž vyřešeno provizorní výtuhou v podobě 3 mm mosazného plechu, který úhlopříčně spojoval vrchní kraj zadní desky s krajem otočné platformy.



(a) : Pohled na zadní desku vytištěnou na 3D tiskárně s pákou na dostředění zásobníku pomocí vnitřních kol.



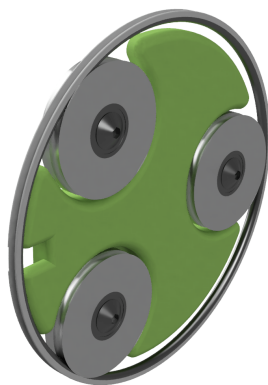
(b) : Provizorní výztuhy zadní desky. Hliníkový plech a hliníkový profil.

**Obrázek 4.16:** Druhá iterace zadní desky.

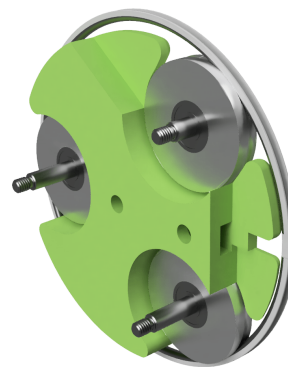
Zadní deska byla jedním z hlavních důvodů, proč bylo rozhodnuto všechny velké plastové díly nechat vyfrézovat z hliníku. Hliníková zadní deska odstranila všechny problémy způsobené nízkou robustností předchozích verzí.

#### ■ 4.2.2 Vnitřní kola a středová vložka

Zásobník je usazen na třech vnitřních kolech. Ta ho kompletně kinematicky omezují v prostoru kromě rotace kolem jeho vlastní osy. Mezi koly je středová vložka, po které klouže drát při navíjení.



(a) : Přední pohled.



(b) : Zadní pohled.

**Obrázek 4.17:** Zásobník otáčející se na středních kolech. Uprostřed středová vložka.

Vnitřní kola jsou vysoustružena z hliníku. Po jejich obvodu je půlkruhová drážka určená k držení zásobníku. Každé z kol je usazeno na páru kuličkových ložisek S685ZZ. Ložiska byla vyjmuta z motorů pevných disků. Jedná se o vysoce kvalitní ložiska s keramickými kuličkami, kvalitním

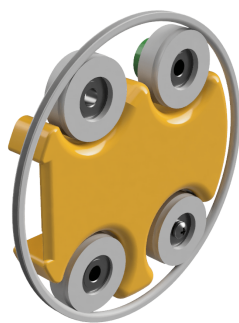
lubrikantem a minimální radiální a axiální vůlí. Ložiska jsou připevněna lícovanými šrouby k zadní desce.

Mezi koly je středová vložka, která byla zhotovena metodou 3D tisku z materiálu PLA, protože není nijak významně namáhána. Během navíjení po ní klouže drát, a proto všechny hrany přicházející s ním do kontaktu mají na sobě radius R3. Kvůli hladkému klouzání drátu byl její povrch vyhlazen broušením smirkovým papírem.

V přední části středové vložky je zářez, o který se opírá jádro cívky při navíjení. Při utahování závitů je drát napnutý a tímto napnutím deformuje navíjené jádro, která by v extrémním případě mohlo prasknout. Rozměry zářezu byly záměrně zvoleny takové, že při deformaci se jádro opře o středovou vložku a nezničí se.

#### ■ Vývoj vnitřních kol a středové vložky

Prototyp vnitřních kol byl nejprve vytisknut na 3D tiskárně. Každé kolo bylo nasazeno na ložisku 608ZZ, které se běžně používá při konstrukci 3D tiskáren. Jelikož se jedná o jednořadá ložiska a bylo použito pouze jedno, celé kolo mělo velkou axiální vůli (až 5°). Celý zásobník při otáčení kolísal ze strany na stranu, čímž byla kola axiálně namáhána. Tenká hrana drážky, která držela zásobník, byla rychle opotřebována. Kola byla původně čtyři, což mělo zlepšit vedení zásobníku. Bohužel výsledkem bylo, že se kvůli nepřesnostem ne všechna kola dotýkala zásobníku a zásobník se otáčel vždy jen na třech nerovnoměrně rozmístěných kolech.

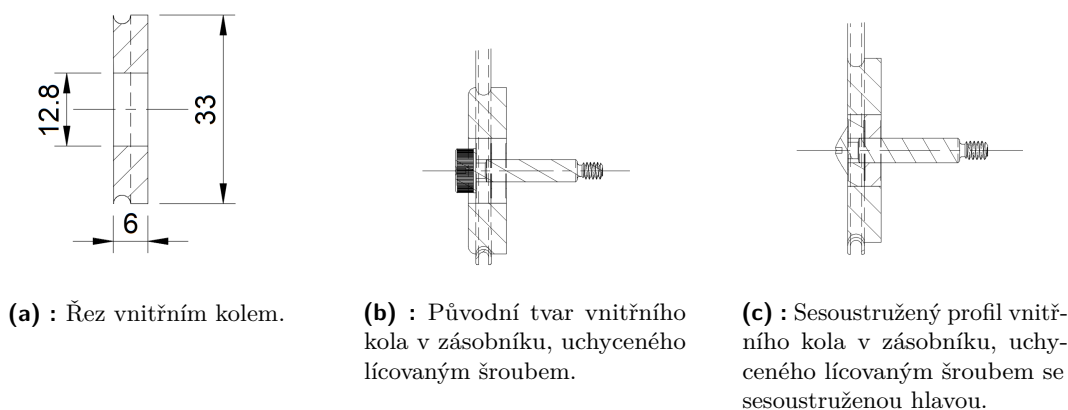


**Obrázek 4.18:** Původní uspořádání vnitřních kol a středu, které je vidět na obrázku 4.13.

Proto byla zhotovena kola hliníková s robustnější hranou, která byla usazena na dvě ložiska vyjmutá z motoru pevného disku.

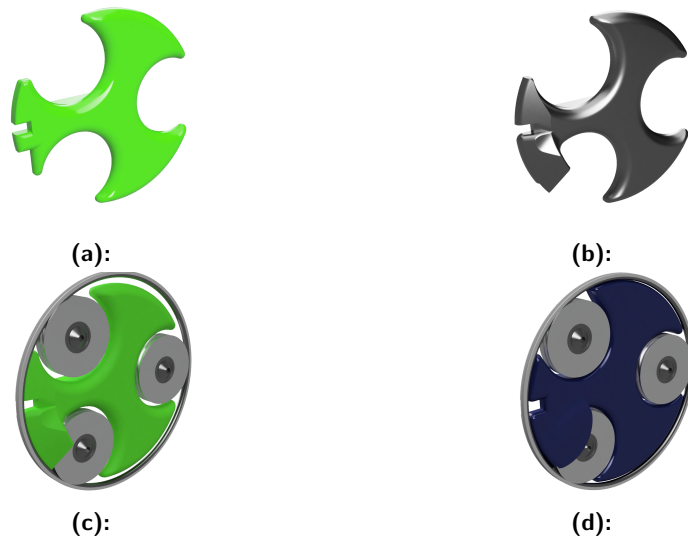
Původně ložiska procházely obyčejné šrouby M5, které byly později nahrazeny broušenými tyčemi a ve finálním návrhu lícovanými šrouby M4 s 5 mm dříkem.





Obrázek 4.19:

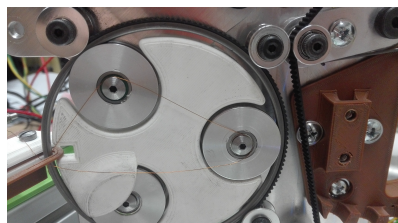
Mezi vnitřními koly je středová vložka, po které klouže při navíjení cívky drát. Během navíjení nastávalo několik situací, kdy se drát zachytával o součásti středu. Zejména mezi vnitřní kolo a zásobník, do drážky vnitřního kola nebo za lícovaný šroub, který držel vnitřní kolo. To jsme se pokusili vyřešit odkloněním chodu drátu mimo tato inkriminovaná místa. Nejprve vložím podložek pod středovou vložku, aby přesahovala náběžnou hranu kola a drát se tak nemohl pod kolem zachytit. To pouze způsobilo zachytávání drátu o části středové vložky. Vydali jsme se cestou návrhu "blatníku", který by drát směřoval mimo. Významné iterace jsou vidět na sérii obrázků 4.20.



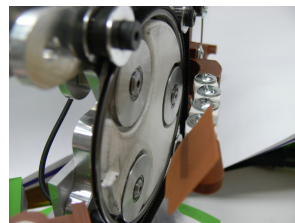
Obrázek 4.20: Vývoj "blatníku" na středové vložce, který měl sloužit k odklonění drátu od kol.

Poslední verze byla úspěšná v odklání drátu, který se už nezasekával mezi koly a zásobníkem, ani nenamotával na lícované šrouby. Bohužel tato cesta problém nevyřešila, pouze posunula do jiné oblasti. Drát se totiž při vyhýbání různě kroutil, nešel rovnoběžně s rovinou zásobníku, což mělo za následek, že se závity na jádro navíjené cívky ukládaly nepravidelně (viz kap. 6.2.1) a různě křížily nebo se drát měl tendenci zachytávat na jiné části navíječky, například přítlačné rameno.

Rozhodli jsme se proto odstranit všechny překážky, které brání drátu v pohybu rovnoběžném s rovinou zásobníku. Původně kulatá hrana vnitřního kola (viz obr. 4.19b), která byla pozůstatkem obav o rychlé opotřebení ostré hrany, byla sesoustružena tak, aby čelní strana vnitřního kola byla pod rovinou zásobníku (viz obr. 4.19c). Zároveň hlavy lícovaných šroubů byly zkráceny a byly jim maximálně sraženy hrany, aby co nejméně překážely chodu drátu, popřípadě po nich drát sklouznul.



(a) : Drát zachycený o sesoustružené hlavy lícovaných šroubů.



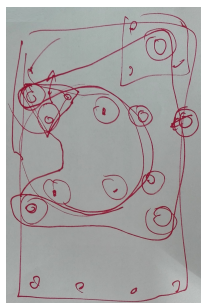
(b) : Finální verze středové vložky bez blatníku, vnitřních kol pod úrovní zásobníku a zkrácených šroubů se sraženými hranami.

Obrázek 4.21:

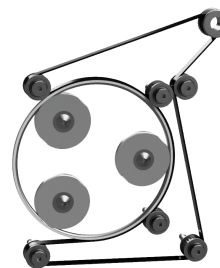
Na obrázku 4.21a jsou vidět částečně sesoustružená kola a lícované šrouby. I přes přítomnost "blatníku" se drát zachytával na hlavách šroubů a pod koly. Proto byl proces opakován, až do výsledku (viz obr. 4.19c). Finální iterace středu a vnitřních kol zásobníku je na obrázku 4.21b.

### 4.2.3 Řemenice a řemen

Rozhodli jsme se pro design navíječky se zásobníkem bez jezdce, z důvodů zmíněných v sekci 3.4.4. Řemen kolem zásobníku tedy plní dvojí funkci. Napíná drát, který se pod řemenem svléká ze zásobníku a přenáší točivý moment z motoru na zásobník. Řemen je veden řemenicemi a napínán napínací vačkou. Byl použit řemen a řemenice, které se běžně používají při konstrukci 3D tiskáren. Bylo použito pět dvacetizubových řemenic s ložiskem s vnitřním průměrem 5 mm, jedna hladká řemenice s ložiskem s vnitřním průměrem 5 mm a jedna dvacetizubová řemenice bez ložiska s vnitřním průměrem 8 mm. Ozubený řemen je široký 6 mm, má 325 zubů a je dlouhý 650 mm. Celý komplet má standard GT2, profil zubu je tedy půlkruhový o poloměru 0.5 mm a zuby jsou vzdáleny 2 mm od sebe. Rozmístění řemenic kolem zásobníku je naznačeno na obrázku 4.22.



(a) : První hrubý náčrt rozložení řemenic kolem zásobníku.



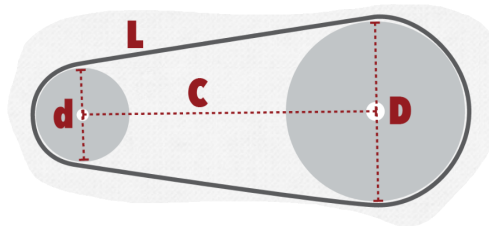
(b) : Výsledné uspořádání řemenic kolem zásobníku s řemenem.

Obrázek 4.22:

Návrh tohoto uspořádání představoval zajímavou otázku. Jak uspořádat řemenice v rovině, aby délka řemenu byla 650 mm? Pro dvě řemenice platí následující rovnice:

$$L = 2C + \frac{\pi}{2}(d + D) + \frac{(D - d)^2}{4C}, \quad (4.1)$$

kde  $L$  je délka řemenu,  $D$  průměr větší z řemenic,  $d$  průměr menší z řemenic a  $C$  je vzdálenost středů řemenic.



**Obrázek 4.23:** Ilustrační obrázek k výpočtu vzdálenosti dvou řemenic..

Pro větší počet řemenic začíná být úloha analyticky neřešitelná. Zejména v našem případě, kdy máme šest řemenic zevnitř a dvě vně řemenu, kdy zásobník je v podstatě také jednou řemenicí. Různé nástroje, například SOLIDWORKS 3D CAD, na tento úkol mají funkcionalitu, která uživateli dovolí kinematicky omezit pohyb řemenic v rovině, tak aby délka řemenu zůstala konstantní. Bohužel program Autodesk Fusion 360, ve kterém probíhal celý návrh mechanické části, takovou funkcionalitu nemá. Má však funkcionalitu na umístění kolmé roviny podél libovolné trajektorie ve vzdálenosti od počátku trajektorie. V nákresu byly tedy uspořádány řemenice přibližně a byla vytvořena trajektorie reprezentující řemen. Pomocí nástroje pro umístění roviny, byla na počátek trajektorie umístěna rovina, která se ručně posunula o pár desetin milimetru dozadu, čímž se dostala na konec trajektorie a zobrazila se délka trajektorie. Podle potřeby se pak iterativně upravovalo rozložení řemenic, než délka trajektorie odpovídala přibližně 645 mm, čímž vzniklo rozložení řemenic, na kterém bude 650 mm řemen volný a půjde snadno nasadit. O jeho napnutí se postará napínací vačka.

Celkový převodový poměr činí

$$\frac{\frac{o_{ZAS}}{GT2}}{n_{hnací}} = \frac{308}{2} = 7.7 : 1, \quad (4.2)$$

kde  $o_{ZAS}$  je obvod zásobníku v mm,  $GT2$  je vzdálenost zubů na řemenu v mm a  $n_{hnací}$  je počet zubů hnací řemenice. Důležitou poznámkou je, že zásobník se točí opačným směrem než motor, protože je v kontaktu s opačnou stranou řemenu.

## BLDC motor 57BLF01

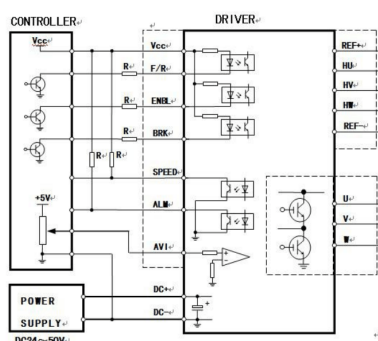
Zásobník se musí otáčet plynule konstantní rychlostí. Proto byl pro jeho pohon zvolen komplet BLDC motor 57BLF01 s driverem 8015A (viz obr. 4.24)



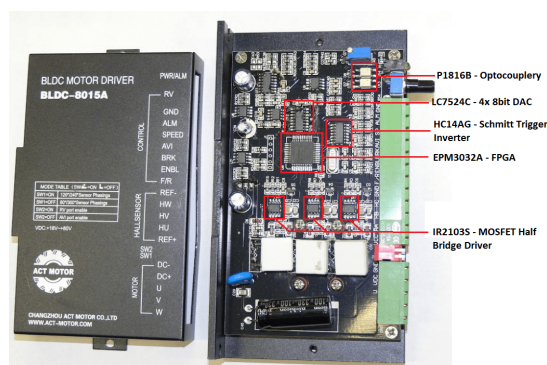
Obrázek 4.24: BLDC motor 57BLF s driverem 8015A

Motor má standardizovanou přírubu NEMA23 s výstupní hřídelí o průměru 8 mm profilu D, na tu byla připevněna hnací zubová řemenice. Jedná se o třífázový, osmipólový, bezkartáčový stejnosměrný motor, napájený napětím 24 V a kroutivý moment při 4 A činí 0.2 Nm. Na hřídel motoru je připojen enkodér se třemi Hallovými senzory, který na jednu otočku vygeneruje 12 pulzů kvadraturního signálu.

Motor je připojen do driveru 8015A. Ten přijímá instrukce od řídicí elektroniky navíječky o rychlosti a směru otáčení motoru a na základě zpětné vazby z enkodéru motoru řídí. Dále disponuje ochrannými prvky proti přepětí a velkému proudu. Driver je chlazen pasivně přes hliníkové žebrování za zadní straně šasi.



(a) : Schéma zapojení driveru 8015A.



(b) : Vnitřní plošný spoj driveru 8015A s vyznačenými významnými součástkami.

Obrázek 4.25:

Na obrázku 4.25a je vidět vnější a část vnitřního zapojení driveru. Vstupy F/R (forward/reverse), Enable a Break jsou galvanicky odděleny přes optocouplery, stejně tak oba výstupy Speed a Alarm a analogový vstup ovládající rychlost AVI. Na motorové části jsou pak tři fáze jdoucí na vinutí motoru, napájení enkodéru a výstupy z enkodéru.

Podle datasheetu [7] i částečně podle nákresu 4.25a by měla být výkonová část driveru galvanicky

oddělena od řídicí logické části. Po proměření vodivosti mezi výkonovou zemí a logickou zemí bylo zjištěno, že tomu tak není. Po rozebrání šasi a prozkoumání plošného spoje bylo zjištěno, že optocouplery P1816B jsou pouze na logických výstupech driveru Speed a Alarm.

Na obrázku 4.25b je snímek plošného spoje a na něm vyznačené některé součástky. Celý driver je řízen FPGA čipem EPM3032A, který se nachází uprostřed plošného spoje. O napájení vnitřní elektroniky se stará stabilizátor LM317, který je umístěn zespodu desky. Logické vstupy z vnějšku procházejí přes Schmittův spínací invertor HC14AG, který zrychluje případně pomalou náběžnou či pádovou hranu vstupního signálu. Nedaleko se nachází čtyřnásobný osmibitový paralelní číslicově analogový převodník LC7524C. Výkonové MOSFET tranzistory, které jsou umístěny zespodu desky, jsou řízeny čipem IR2103S, driverem polovičního H-můstku. Tranzistory MOSFET jsou na druhé straně kvůli odvodu tepla připevněny na chladič, který zároveň tvoří stěnu šasi.

V pravém horním rohu jsou vidět pouze dva optocouplery a to právě na výstupech driveru Speed a Alarm. Ostatní vstupy, které jsou ve schématu kresleny jako galvanicky oddělené, místo na anodu LED v optocoupleru, vedou přes sériový rezistor přímo na bázi tranzistoru. Výkonová i logická zem je uvnitř driveru spojena.

#### ■ 4.2.4 Napínání řemenu

Řemen je napínám přes řemenici, která je na něj přitlačována z jeho hladké strany. Řemenice je lícovaným šroubem M4 připevněna na napínací páce a napínací páka je lícovaným šroubem M6 připevněna k zadní desce tak, aby se mohla volně otáčet. Napínací páka je vyfrézována z 5 mm tlustého hliníkového plechu a přítlak na ni vyvíjí zkrutná pružina, jejíž druhý konec je možné aretovat v osmi různých polohách a tím diskrétně nastavovat napnutí řemenu. Na držáku napínání řemene je také příruba se dvěma vsazenými M5 matkami, která slouží k připevnění přítlačného ramena nebo jiných prvků sloužících k vedení drátu. Celá konstrukce je dobře vidět na obrázku 4.26. Při vyháknutí pružiny napínací páka dosedne na spodní doraz, z řemenu se uvolní veškeré napětí a je možné ho velmi snadno sundat.



**Obrázek 4.26:** Napínací páka s řemenicí a držák napínání se zkrutnou pružinou a její aretací.

## ■ Vývoj napínání řemenu

Napínání řemenu je zdánlivě jednoduchá součást navíjecí hlavy, avšak jeho špatná konstrukce může způsobit problémy jako přetrhávání drátu, smekání řemenu nebo deformaci zásobníku.



**Obrázek 4.27:** První verze napínací páky. Napínání pomocí utahování šroubu.

První verzí byla napínací páka (viz obr. 4.27) vytisknutá na 3D tiskárně, na niž byla přišroubována hladká řemenice šroubem M5. Na druhém konci bylo do napínací páky vsazeno ložisko 608ZZ, které bylo dalším šroubem M5 připevněno na zadní desku. Zespolu se o napínací páku opíral šroub M5x50, jehož utahováním byla napínací páka více či méně zatlačována proti řemenu.

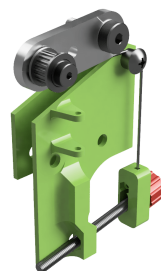
Tento design měl několik nedostatků. Prvním byla absence pružného elementu. Utahováním šroubu byl vyvíjen větší přítlak na řemen a ten se sám choval jako pružný element. Inspirace pocházela z automobilového průmyslu, kde se řemeny profilu V běžně napínají tak, že jedna z řemenic je umístěna na vačce, jejíž pohybem je možno řemen napnout a následně zajistit a není tedy potřeba napínací kladka s pružinou.

Dlouho neodhalený problém spočíval právě v tomto nepružném napínání řemenu. Zásobník totiž není dokonale kulatý, ale má mírně eliptický profil.

To má za následek, že při otáčení zásobníku se periodicky mění délka řemenu, která ho obklopuje. Dotažení napínací páky napevno vůči řemenu způsobí, že se napětí řemenu periodicky mění s otáčením zásobníku. Pokud k tomuto napnutí dojde během fáze svlékání drátu ze zásobníku, dojde k jeho přetržení zdánlivě bez příčiny. Tato závada se velmi špatně odhalovala, zejména proto, že se děla nepravidelně a zřídka. Problémy přetrvávaly až do posledních týdnů vývoje navíjecí hlavy, jak uvidíte na následujících obrázcích 4.28a.



**(a)** : Přetrvávající design napínání řemenu bez pružného elementu šroubem zespolu.



**(b)** : Nový návrh napínání řemenu se zkrutnou pružinou a šroubem mířícím dozadu.

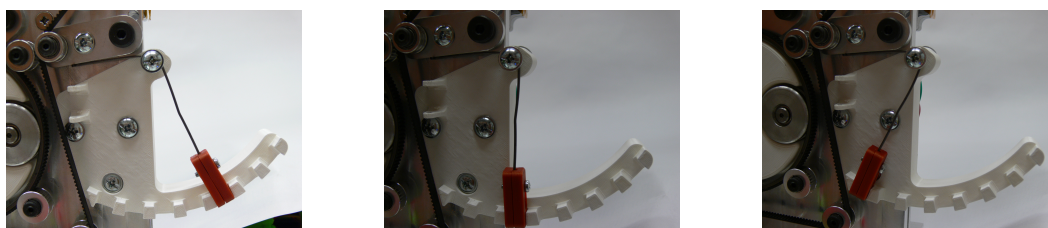
**Obrázek 4.28:**



Méně závažným nedostatkem, byla uživatelská nepřívetivost napínání řemenu. Hlava šroubu tlačícího na napínací páku mířila k zemi a pro zasunutí šroubováku do hlavy šroubu nebylo místo. Celá navíječka musela být správně umístěna na kraji stolu, aby bylo možné měnit napnutí řemenu, nehledě na to, že uživatel byl ve velmi nepříjemné pozici. Vznikl návrh na obrázku 4.28b, kdy utahováním šroubu byla vyvíjena síla na zkrutnou pružinu a ta ji otočením o 90° přenášela na napínací páku. Hlava šroubu byla opatřena krytkou pro lepší úchop.

Při utahování však konec šroubu začal zasahovat do řemenu a deformoval ho. Nevýhodou bylo, že pro rozumné zvýšení napnutí řemenu musel uživatel zašroubovat šroub o několik centimetrů.

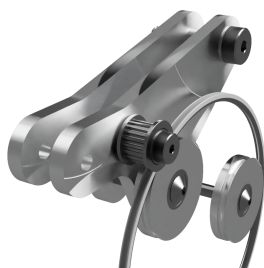
Výsledkem proto byla lišta s úchyty (viz obr. 4.29), do kterých je možné aretovat konec pružiny a tím nastavit sílu působící na řemen. Případně pružinu uvolnit a snadno tak servisovat řemen.



**Obrázek 4.29:** Tři polohy aretace pružiny pro tři úrovně napnutí řemenu. Zleva od nejmenší po největší napnutí.

#### 4.2.5 Rozevírání zásobníku

Protože používáme předpružený zásobník se zábrusem, je zapotřebí mechanismus, který dovolí zásobník podpírat a zároveň ho v případě potřeby dokáže roztáhnout, aby se na něj dalo nasadit jádro cívky.



**(a) :** Páky rozevírání zásobníku.



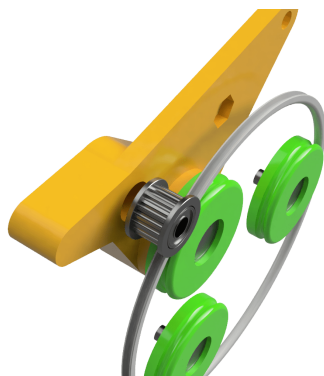
**(b) :** Pohled na dvojici pák rozevírání zásobníku spojených distančními sloupky.

**Obrázek 4.30:**

Komponenta (viz obr. 4.30a) sestává ze dvou identických pák vyfrézovaných z 5 mm tlustého hliníkového plechu. Páky jsou přes lícovaný šroub M6 volně připojeny k zadní desce. Do jedné páky je všroubováno jedno vnitřní kolo a jedna obvodová řemenice. Druhá páka slouží jako symetrická podpora, aby důsledkem napětí na řemenu nedocházelo ke zkroucení jedné páky, či deformaci lícovaného šroubu, který slouží jako čep. Na druhém pohledu 4.30b je vidět spojení obou pák dvěma distančními sloupky. Po dotažení z druhé strany se obě páky semknou kolem zadní desky a pevně drží na místě.

### ■ Vývoj rozevírání zásobníku

Mechanismus rozevírání zásobníku, jako jedna z mála komponent, se v podstatě od začátku vývoje změnil jen minimálně. V průběhu iterací navíjecí hlavy rozevírání sestávalo pouze z jedné páky vytištěné na 3D tiskárně (viz obr. 4.31). Díl fungoval dobře, ale po několika týdnech pod neustálým napětím řemenu došlo k jeho deformaci a následně špatnému vedení zásobníku.



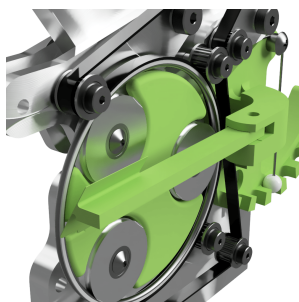
Obrázek 4.31: Jedna z iterací páky rozevírání zásobníku.

### ■ 4.2.6 Přítlačné rameno

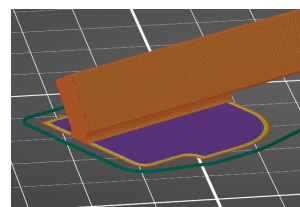
Přítlačné rameno je určeno k lepšímu vedení drátu. Jeho použití by mělo vést k pravidelněji navinutým závitům na jádře cívky. Hlavní částí je šikmá plocha, která při utahování svede drát vedle předchozího závitu. Celý díl byl vytisknutý na 3D tiskárně tak, že šikmá plocha celá ležela na tiskové podložce (viz obr. 4.32c). Šikmá plocha má tloušťku jedné vrstvy, tedy 0.2 mm, a proto se chová velmi pružně. Konec přítlačného ramena tak lépe kopíruje tvar jádra cívky a obecně lépe napomáhá správnému ukládání závitů. Další částí přítlačného ramena je jeho základna (viz obr. 4.32a), se kterou je spojeno šroubem, fungujícím jako čep. Přítlačné rameno je možné vyklonit o 90° od navíjecí hlavy a získat tak lepší přístup k zásobníku a jádru cívky. V základně ramena je malý zářez, do kterého při otočení o -90° zapadne výstupek, čímž rameno aretuje v prostoru. Je tedy možné během navíjení rameno odklonit, vyřešit případnou závadu a opět jej vrátit do stejné polohy v jaké má nejlepší účinky na pravidelnost závitů. Základna je přišroubována na přírubu, která je umístěna na držáku napínání řemenu (viz obr. 4.32b).



(a) : Přítlačné rameno.



(b) : Přítlačné rameno namontované na navíjecí hlavě.



(c) : Orientace přítlačného ramene při slicování pro 3D tisk.

Obrázek 4.32:

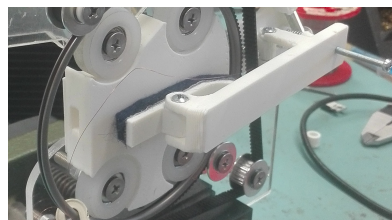


## ■ Vývoj přítlačného ramena

Už v prvních patentech (viz kap. 2.1) jsou na nákresech vidět různé přítlačníky a jiné pomůcky, které napomáhají vedení drátu. První inspirace pocházela z návštěvy továrny na navíjení toroidních tlumivek (viz obr. 4.33a).



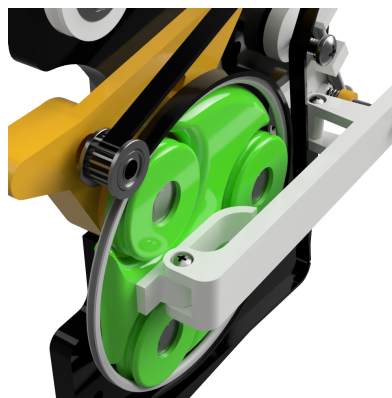
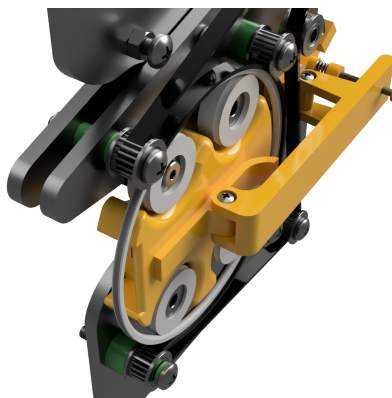
(a) : Přítlačné rameno na průmyslové navíječce.



(b) : První prototyp přítlačného ramena podle vzoru z průmyslového stroje.

**Obrázek 4.33:**

Cílem tohoto druhu přítlačného ramena je držet drát rovnoběžně s rovinou středové vložky mezi vnitřními koly. Přítlačné rameno je zakončeno lyžinou, na které je nalepena plst. Ta společně s přítlakem na rameno zpomaluje drát v chodu a napomáhá tak jeho správnému utažení. Bohužel v našem případě se tomu tak nedělo. Byly vyzkoušeny různé délky, šířky a různá umístění lyžiny (viz obr. 4.34). Byly otestovány různé přítlačné síly i různé druhy a tloušťky materiálů, které byly na lyžinu přilepeny. Byla vyzkoušena lyžina vyhlazená smirkovým papírem, tlustá vrstva filcu (viz obr. 4.33b), tenká vrstva stejného filcu, stejně jako bavlněná příze i vrstva fleecu. Výsledek byl vždy stejný, drát zachytával za vlákna tkaného i netkaného materiálu nebo byl lyžinou naveden na nějaký záhyb, o který se zamotal.



**Obrázek 4.34:** Dvě iterace přítlačného ramena s lyžinou. Dvě různé délky a různá umístění.

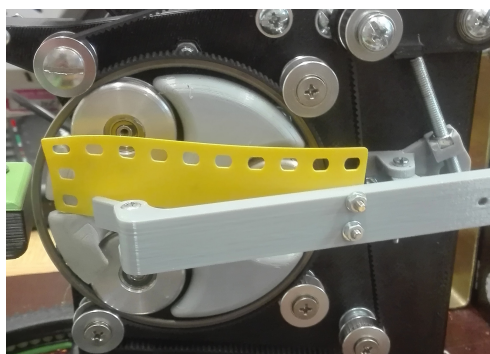
Byl učiněn provizorní experiment, který měl za cíl ověřit, kterým směrem by bylo dobré se vydat při návrhu přítlačného ramena. Vycházeli jsme z myšlenky, že je vhodné, aby drát šel rovnoběžně s rovinou zásobníku. Proto byl k mechanismu rozevírání zásobníku přišroubován teplem ohnutý kus tuhého plastu (viz obr. 4.35), který měl drát přitisknout k hraně zásobníku a tím usměrnit jeho chod.



**Obrázek 4.35:** Plastový pásek přitlačující drát směrem k zásobníku.

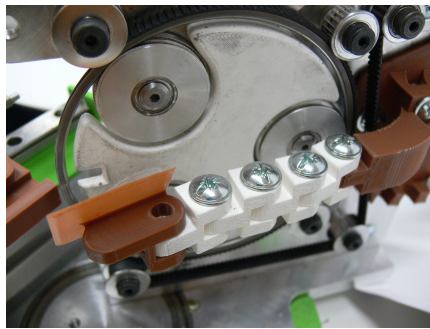
Tato konstrukce fungovala relativně dobře a spolehlivě a s její pomocí jsme byli schopni navinout první jádro v kuse bez přetržení drátu. Nevýhodou bylo její špatné upevnění na navíjecí hlavě. Plastový pásek byl připevněn jedním šroubem M3 do tehdy ještě plastové páky rozevírání zásobníku. Při pohybech navíjecí hlavy kolem jádra občas došlo k posunutí pásku příliš blízko k zásobníku, čímž se drát ustříhl.

Dalším experimentem bylo použití pružného kusu plastu jako formy k usměrnění pohybu drátu bez jeho zbytečného brzdění. Použit byl plastový díl ze stavebnice Merkur, který byl přišroubován na modifikované přitlačné rameno z prvního prototypu (viz obr. 4.36). Pružná povaha dovozovala kontakt plastu se zásobníkem, aniž by došlo k přestřižení drátu a zároveň klouzající drát byl umístěn hned vedle předchozího závitu.



**Obrázek 4.36:** Plastový díl ze stavebnice Merkur navádějící drát na jádro cívky.

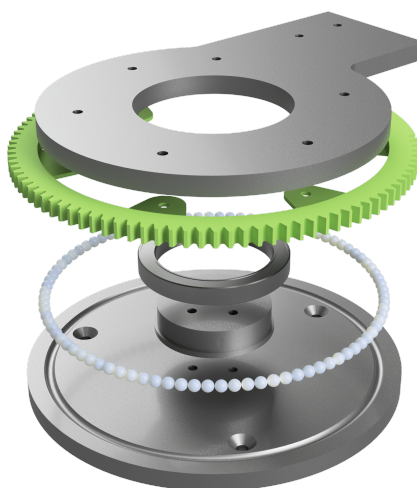
Pro ověření důležitosti pozice plochy a úhlu natočení směrem k zásobníku bylo vytvořeno nastavitelné článkované rameno (viz obr. 4.37). Rameno bylo přišroubováno na přírubu poslední verze držáku napínání řemenu a skládalo se z pěti článků. Články byly spojeny šrouby, po jejichž dotažení rameno zůstalo pevně v nastavené pozici. Díky tomu bylo možné odladit nejlepší orientaci plochy pro navádění závitů. Když byla tato pozice nalezena, celé rameno bylo odmontováno a oskenováno na běžném kancelářském skeneru. Podle tohoto skenu bylo možné v prostředí Fusion 360 jednoznačně určit orientaci šikmé plochy v relaci k přírubě a navrhnout stávající přitlačné rameno (viz obr. 4.32a). Rameno přináší uspokojivé a opakovatelné výsledky, avšak v rámci budoucího vývoje by mohl být znovu přepracován původní návrh ramena s lyžinou pokrytou plstí, neboť ve všech průmyslových zařízeních se jistým způsobem objevuje.



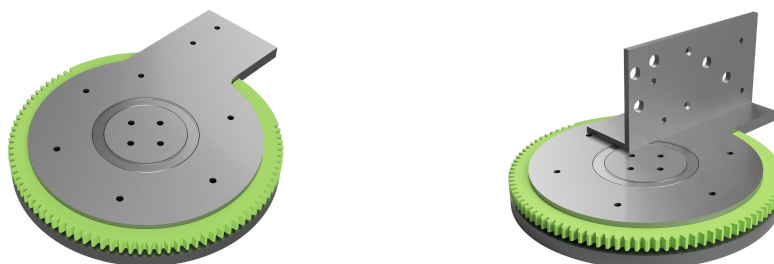
**Obrázek 4.37:** Pružná šikmá plocha na nastavitelném ramenu.

#### 4.2.7 Otočná platforma

Otočná platforma slouží k pohybu navíjecí hlavy kolem půlkruhových částí racetrack jádra. Sestává z několika částí. Do středu vrchní otočné části vyfrézované z 10 mm hliníkového plechu je nalisované ložisko 6812ZZ a do obvodu je přišroubováno ozubení vytisknuté na 3D tiskárně. Po zahřátí ložiska 6812ZZ byl do něj vlisován zchlazený střed vysoustružený z hliníku. Vlisovaný střed je zespodu přišroubován čtyřmi šrouby ke spodní desce, která se připevní k základně. Plastové ozubení a spodní deska mají v sobě drážku, ve které je umístěno devadesát 6 mm airsoftových kuliček. Celá sestava je v rozloženém pohledu vidět na obrázku 4.38. Otočná platforma funguje jako velké axiální kuličkové ložisko, které nese váhu celé navíjecí hlavy. Plynulé a koncentrické otáčení zajišťuje středové radiální kuličkové ložisko 6812ZZ. Navíjecí hlava je na otočnou platformu přišroubována přes hliníkový úhelník 80x50x5 mm (viz obr. 4.39). K pohonu otočné platformy slouží ozubení po obvodu vrchní části se 100 zuby. Do ozubení zapadá desetizubové kolo poháněné krokovým motorem (viz kap. 4.3).



**Obrázek 4.38:** Pohled na rozloženou otočnou platformu. Shora: Vrchní část, ozubení, ložisko 6812ZZ, vlisovaný střed, airsoftové kuličky, spodní deska.



**Obrázek 4.39:** Kompletní sestava otočné platformy a úhelníku k přimontování navíjecí hlavy.

### ■ Vývoj otočné platformy

Cílem bylo zajistit otáčení navíjecí hlavy tak, aby osa otáčení procházela zásobníkem v místě, kde je umístěno jádro racetrack cívky. Navíjecí hlava na otočné platformě musela být umístěna mimo geometrický střed platformy. Těžisté navíjecí hlavy bylo umístěno přibližně 12 cm od osy otáčení a docházelo k velkému axiálnímu namáhání radiálního ložiska, které bylo v ose otáčení. Bylo nutné přidat ještě axiální ložisko, které by neslo váhu navíjecí hlavy. Jednou z možností by bylo použití velkého axiálního válečkového či kuličkového ložiska (viz obr. 4.40a). Jedná se o ložisko AXK160200 s vnějším průměrem 200 mm a výškou 5 mm, což by odpovídalo našim rozměrovým potřebám. Jeho maximální statické zatížení činí 1000 kN, samotné váží 24 kg a jeho cena se pohybuje okolo 5000 Kč. Pro naše potřeby by bylo silně předimenzované.

Druhou zvažovanou variantou bylo použití ložiska z takzvané Lazy Susan. Jedná se o otočný pult, umístěný uprostřed kulatého stolu, určený k servírování jídla skupinám lidí [8]. Uvnitř se nachází axiální kuličkové ložisko (viz obr. 4.40b). Našim rozměrovým potřebám by vyhovovalo 8" ložisko s průměrem 20,32 cm. Výška ložiska je necelých 10 mm, maximální axiální zatížení je udáváno kolem 100 kg a jeho cena se pohybuje okolo 500 Kč. Velkým nedostatkem tohoto druhu ložisek je jejich zpracování. Jsou vyrobeny ze dvou lisovaných plechů, mezi kterými jsou v drážce ocelové kuličky. Plechy po vylisování nejsou dokonale rovné, při otáčení o sebe místy drhnou a jejich roviny nejsou rovnoběžné.

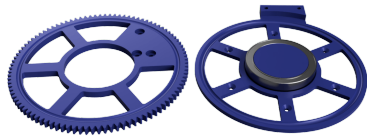


**(a)** : Axiální jehlová klec AXK160200 s vnějším průměrem 200 mm.

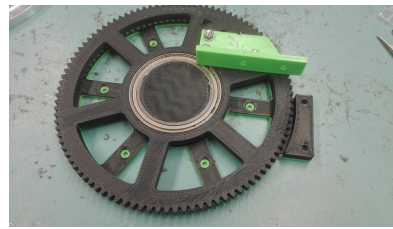
**(b)** : 8" ložisko určené do Lazy Susan.

**Obrázek 4.40:**

Pro ověření konceptu velkého axiálního ložiska byl na 3D tiskárně vytisknut prototyp z PLA. Jednalo se o dva kruhy o průměru 200 mm, které v sobě měly drážku na kuličky a uprostřed byly spojeny přes radiální ložisko (viz obr. 4.41a). Jako kuličky byly použity airsoftové kuličky o průměru 6 mm.



**(a)** : Návrh první verze otočné platformy vytištěné na 3D tiskárně. Dvě poloviny s drážkou na kuličky spojené ložiskem 6812ZZ.



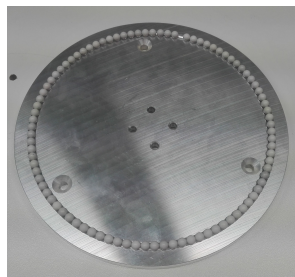
**(b)** : Zkompletovaný prototyp otočné platformy.

**Obrázek 4.41:**

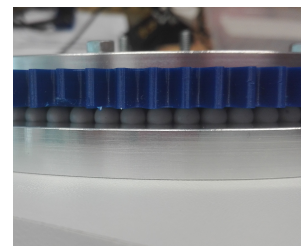
Výsledek experimentu je na obrázku 4.41b. Tento prototyp byl zatížen 65 kg. Bylo zjištěno, že při tomto zatížení se kuličky odvalují hladce, nedochází k drhnutí a po delším testování ani k výraznému opotřebení. Je tomu tak zejména proto, že díly tištěné na 3D tiskárně mají lepší pevnostní vlastnosti v tlaku než například v lomu či smyku. Navíjecí hlava byla k této otočné platformě připevněna zeleným úhelníkem (viz obr. 4.41b), což se ukázalo jako nedostatečné a ve finální verzi byl úhelník nahrazen hliníkovým.



**(a)** : Vyhlazení drážky pro kuličky na ozubení na soustruhu.



**(b)** : Finální verze spodní desky s airsoftovými kuličkami vyfrézovaná z 10 mm hliníkového plechu.



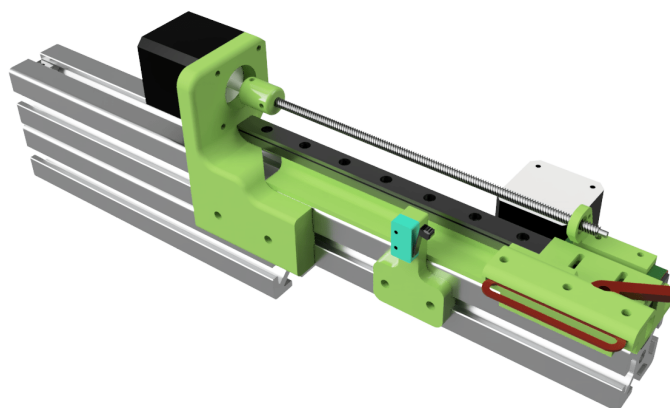
**(c)** : Boční pohled na zkompletovanou otočnou platformu.

**Obrázek 4.42:**

Tento design se velmi osvědčil, a proto je součástí finální verze navíječky. Aby byl chod kuliček v drážce 3D vytisknutého ozubení hladký, byla drážka stočena na soustruhu nožem s třímilimetrovým rádiusem (viz obr. 4.42a). Po umístění do spodní desky otočné platformy byly kuličky lubrikovány vazelínou a byla připevněna vrchní deska otočné platformy (viz obr. 4.42c).



## 4.3 Lineární posuv



Lineární posuv je druhá velká součást navíječky. Stará se o posun jádra tak, aby otočná navíjecí hlava mohla navinout jak půlkruhové, tak rovné části jádra. Protože průmyslové navíječky navíjejí v drtivé většině toroidní jádra, nebylo kde se na konstrukci lineárního posuvu inspirovat. Hlavní komponenty lineárního posuvu jsou připevněny na 40x40 mm IM hliníkový drážkový profil, což umožňuje vysokou flexibilitu a modularitu konstrukce.

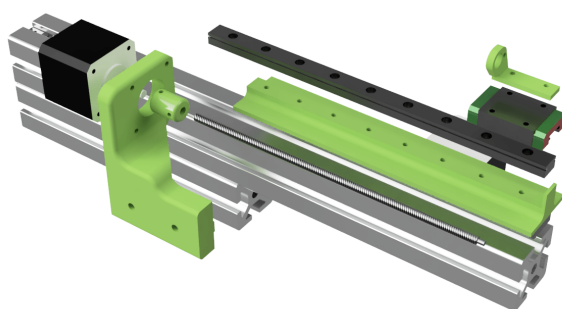
### 4.3.1 Lineární vedení

Úkolem lineárního vedení je posunovat kleštinu, ve které je upnuto jádro racetrack cívky. Kleština je připevněna na vozíku lineárního vedení MGN9. Vozík je poháněn krokovým motorem s přírubou NEMA17 pomocí nerezové trapézové závitové tyče T5x1 mm s mosaznou maticí s přírubou (viz obr. 4.43), která je připevněna k vozíku.



**Obrázek 4.43:** Lineární posuv s vozíkem MGN9 a trapézová závitová tyč T5 s maticí.

Celá sestava je přišroubována do hliníkového profilu šrouby M3 do hranatých matic, což umožňuje její jemné seřízení. Hliníkový profil má dvě na sobě ležící části, aby celá sestava byla ve správné výšce vůči navíjecí hlavě. Obě části hliníkového profilu jsou přišroubovány třemi šrouby do podložky. V rozloženém pohledu (viz obr. 4.44) je vidět držák krokového motoru, samotný motor, trapézová závitová tyč a spojka, která ji připojuje k motoru. Další částí je distance pod lineární vedení, které má na sobě zarážku, aby vozík lineárního vedení nemohl sjet. V takovém případě by se z vozíku vysypaly kuličky a bylo by obtížné je všechny do vozíku vrátit. Na vozíku jsou čtyři otvory se závitem M3. Do dvou z nich je zašroubován držák na mosaznou trapézovou matici T5 a do druhých dvou kleština pro upnutí jádra cívky.



**Obrázek 4.44:** Rozložený pohled na lineární posuv.

### ■ Vývoj lineárního vedení

Na začátku vývoje nebylo jasné, jaké pohyby bude navíjecí hlava kolem lineárního posuvu vykonávat. Proto byla vyvíjena snaha, aby byl profil lineárního posuvu co nejužší. Jak je vidět na obrázcích 4.45, posuv byl navržen tak, aby pohyblivá část zabírala co nejméně místa a kleština s jádrem se mohla co nejvíce přiblížit k navíjecí hlavě. Lineární posuv byl zhotoven z třech dílů z frézovaného hliníku, které tvořily začátek a konec pojezdu a střední ukotvenou část. Ve střední části byla umístěna dvě lineární ložiska LM8UU běžně používaná při konstrukci tiskáren. V ložiscích se pohybovaly dvě 8 mm hlazené tyče, které byly upevněny v krajních částech pojezdu. Středem pojezdu procházela trapézová závitová tyč uložená na jednom konci v kuličkovém ložisku a na druhém připojena ke krokovému motoru. Ve střední části byla přišroubována trapézová matka. Při otáčení motorem se pohyboval celý pojezd včetně motoru, neboť středová část byla připevněna k hliníkovému drážkovému profilu MI 20x20 mm.



**(a)** : Základní pozice.

**(b)** : Vysunutá pozice.

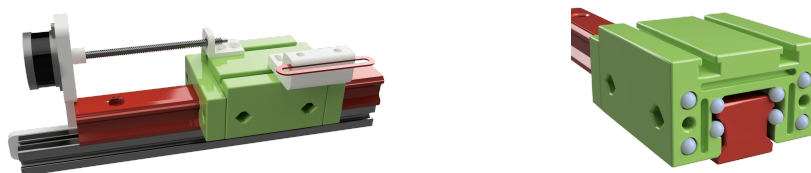
**Obrázek 4.45:** První verze úzkoprofilového lineárního posuvu.

Tento posuv měl mnoho nedostatků, většina z nich byla mechanických. Mezi hlazenými tyčemi a koncovými bloky pojezdu byla příliš velká vůle, takže se celý pojezd kroutil podle namáhání, kterému byl vystaven. Vůle byla částečně vymezena pomocí vložek z tenkého hliníkového plechu. I nadále byl pojezd zkroucený a při pohybu kleština opisovala část šroubovice. Celý pojezd byl k hliníkovému profilu připojen pouze malou plochou středního bloku s ložisky přes dva krátké šrouby M3. I při silném dotažení, kdy hrozilo stržení závitů, se celý pojezd otáčel kolem svislé osy. Posledním problémem bylo špatné zpracování hlazených tyčí, které měly nerovný povrch a v lineárních ložiscích zadržovaly.

V rámci experimentování jsme zkusili použít projekt [9] lineárního kuličkového vedení vytisknutého na 3D tiskárně. Bylo navrženo tak, aby lištu i vozík bylo možné vytisknout a jako kuličky bylo

možné použít BB do vzduchových zbraní. Průměr BB<sup>1</sup> kuličky činí 0.18", tedy 4.572 mm. Na trhu jsou k dostání standardní 6 mm kuličky do airsoftových zbraní, proto bylo třeba model naškálovat koeficientem 1.312.

Celý model se skládá ze tří částí. Lišta, po které jezdí vozík, střední část vozíku, která drží kuličky v kontaktu s lištou a dva boční díly, které zajišťují cirkulaci kuliček. Vozík bez jedné boční stěny je vidět na obrázku 4.46b. Po namontování na navíječku (viz obr. 4.46a) byl systém důkladně lubrikován. Byl robustnější a stabilnější při namáhání z různých směrů a kleština se pohybovala po přímce. Přetrvávajícím problémem však bylo zadrhávání. Vytištěné díly nejsou dokonale hladké, dají se brousit smirkovým papírem, ale kvůli složitému tvaru pojezdu to nebylo možné. Problém by odstranilo zvýšení tolerancí, ale utrpěla by přesnost pohybu. Tento zvětšený model lineárního vedení nám pomohl porozumět, jak funguje lineární vedení a jak v případě potřeby vrátit vysypané kuličky zpět do vozíku.



(a) : Lineární posuv s vytištěným lineárním pojezdem.

(b) : Otevřený vozík 3D vytištěného lineárního pojezdu. Jsou vidět čtyři kanály, kterými při pohybu vozíku cirkulují kuličky.

**Obrázek 4.46:**

Ve finále byl zakoupen komplet lineárního vedení s vozíkem střední kvality. Před použitím bylo lineární vedení vyčištěno isopropanolem, bylo vypláchnuto původní mazivo a nahrazeno kvalitní vazelínou. Byly zabroušeny otřepy a ostré hrany z výroby. Přes to vozík na posledních 7 cm lišty drhnul. Proto využíváme pouze druhý konec lišty, kde se vozík pohybuje plynule.

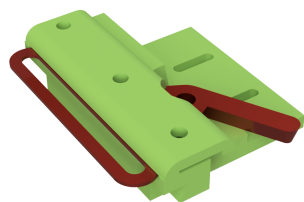
### 4.3.2 Kleština

Kleština je připevněna k vozíku lineárního vedení a slouží k upnutí jádra racetrack cívky. Kleština je navržena tak, aby držela cívku za co největší plochu a zároveň nebránila pohybu zásobníku středem cívky.

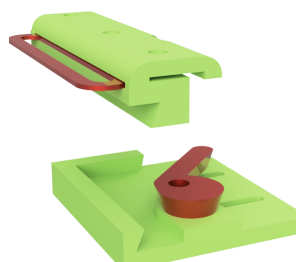
Kleština se skládá z úchyty se zámkem, který je přišroubovaný na vozík, a držáku jádra (viz obr. 4.47b). Vrchní držák jádra má v sobě zahloubení ve tvaru racetrack jádra. Při upínání jádra je tedy zaručeno, že bude umístěno v kleštině vždy stejně. Vrchní držák i spodní úchyt mají v sobě dva na sebe kolmé rybinové zářezy. Když je horní díl zasunut do spodního, tak otočení červenou pákou zatlačí horní rybinu do spodní a držák jádra je tak vždy na stejném místě. Po namontování kleštiny (viz obr. 4.48a) na vozík lineárního vedení byla kleština seřizena tak, aby se jádro pohybovalo kolmo k rovině zásobníku. To umožňuje opakovaně vyměňovat držáky (viz obr. 4.48b) s upnutými jádry a mít jistotu, že všechny budou správně usazeny a pevně uzamknuty v úchyty. Stejná poloha úchyty se zámkem je také důležitá pro kalibraci pomocí koncových spínačů (viz kap. 4.4.2).

<sup>1</sup>BB z amerického "Bird buckshot". Jedná se o průměr broku v náboji do brokovnice určeném pro lov ptáků [10].





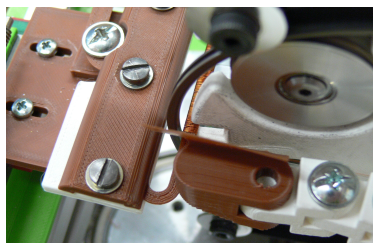
(a) : Celá sestava kleštiny s uchyceným jádrem.



(b) : Dvě části kleštiny. Držák jádra a úchyt se zámkem.

**Obrázek 4.47:**

Další výhodou je, že při změně tvaru či rozměrů jádra, stačí vytisknout nový držák s odpovídajícím zářezem, což zajistí, že bude správně upnut. Prozatím byly vytvořeny dvě různé kleštiny, které se liší v hloubce zářezu pro uchycení jádra. První kleština má zářez mělký, do kterého dobře zapadne holé jádro. Druhá kleština má zářez o pár desetin milimetru hlubší, aby do ní dobře zapadlo jádro již omotané drátem.



(a) : Kleština s jádrem uzamčená v navíječce během navíjení.

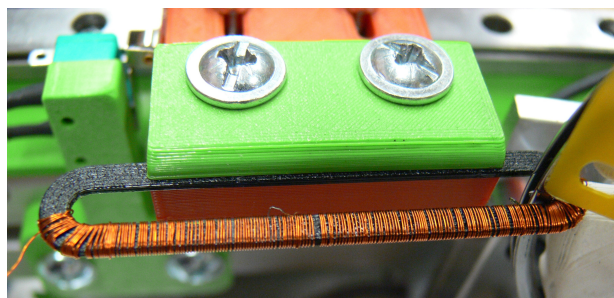


(b) : Vyjmutá kleština s jádrem po dokončení navíjení.

**Obrázek 4.48:**

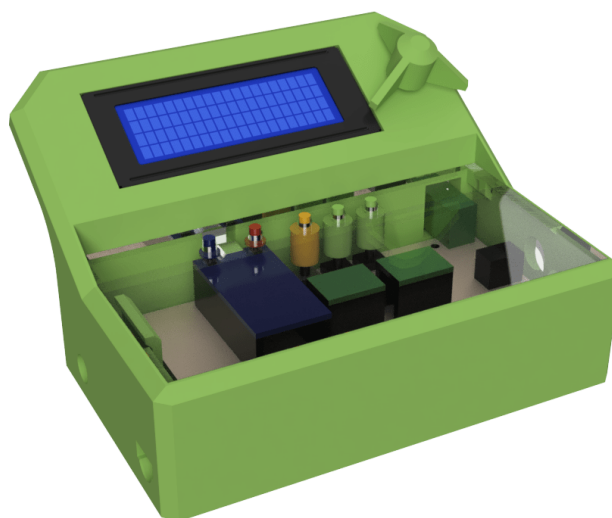
### ■ Vývoj kleštiny

Předchůdcem výše zmíněné rybinové kleštiny byl obyčejný svorkový držák (viz obr. 4.49), který byl přišroubován na vozíku lineárního vedení. Nevýhodou bylo, že způsob upnutí jádra nebyl nijak omezen. Jádro mohlo být upnuto křivě, což v průběhu navíjení způsobovalo drhnutí zásobníku o vnitřek jádra. Před každým navíjením musela být celá kleština seřizena, aby k drhnutí nedocházelo. Svorka podpírala jádro jen uprostřed rovné části. Během navíjení krajů pak docházelo k jejich ohýbání.



**Obrázek 4.49:** Svorková kleština s navinutou polovinou jádra.

## 4.4 Řídicí elektronika



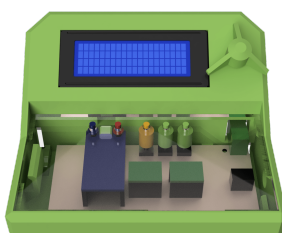
Závěrečnou částí mechanické konstrukce je organizace řídicí elektroniky a uspořádání kabeláže. Uspořádání řídicí elektroniky nemá na funkci navíječky vliv a z kvalitňuje pouze uživatelský zážitek.

### 4.4.1 Box s elektronikou a ovládacím panelem

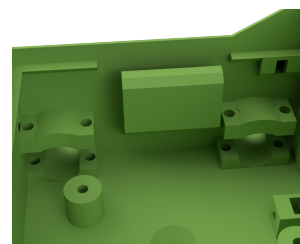
Byl navržen a vyroben plošný spoj, který sdružuje veškerou elektroniku a řídí všechny elektronické komponenty navíječky (viz kap. 5.1.7). Z plošného spoje vede množství kabelů, které je třeba zorganizovat tak, aby nedocházelo k vytrhávání konektorů z plošného spoje. Byl navržen box, do kterého je plošný spoj umístěn. Na boxu je umístěn držák LCD a enkodéru, který slouží jako uživatelský vstup. Oba prvky jsou nakloněny pod úhlem 30°, což zaručuje dobrou čitelnost displeje a příjemnou obsluhu (viz obr. 4.50a). Plošný spoj je krytován z estetických důvodů 5 mm silným plexisklem. Otvory v plexiskle je možné ovládat tlačítka umístěná na plošném spoji (viz obr. 4.50b). Uvnitř boxu jsou prvky (viz obr. 4.50c) pro upevnění vnější kabeláže od motorů a vnitřní kabeláže z řídicí desky například k LCD a enkodéru. Celý box je přišroubován dvěma vruty k podkladu na místě, kde nepřekáží pohybu navíjecí hlavy.



(a) : Pohled na box s řídicí elektronikou zezadu. Je vidět přimontovaný displej a enkodér.



(b) : Pohled na ovládací prvky na boxu a řídicí desku pod plexisklem.



(c) : Detail vnitřku boxu. Vpravo a vlevo svorky pro připevnění kabeláže od motorů, uprostřed klipsna pro uspořádání kabelů k LCD.

Obrázek 4.50:

### 4.4.2 Koncové spínače

Zvýšení spolehlivosti a opakovatelnosti navíjení ztelně napomáhá opakovatelná výchozí pozice navíječky. Proto byla navíječka osazena dvěma koncovými spínači, jedním pro kalibraci natočení navíjecí hlavy a druhým pro kalibraci pozice lineárního posuvu. První koncový spínač (viz obr. 4.51a) byl připevněn tak, aby navíjecí hlava byla rovnoběžná s přímkou, po které se pohybuje vozík lineárního posuvu. Druhý koncový spínač (viz obr. 4.51b) byl připevněn na hliníkový drážkový profil, aby při jeho sepnutí byla kleština v místech optimálních pro započítání navíjení.



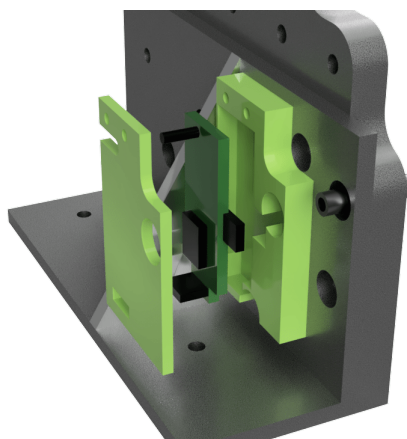
(a) : Koncový spínač přišroubovaný do podložky vedle navíjecí hlavy.

(b) : Koncový spínač přišroubovaný na drážkový profil k lineárnímu posuvu.

Obrázek 4.51:

### 4.4.3 Pouzdro na LDC

Ke snímání otoček zásobníku byl použit senzor vířivých proudů s převodníkem LDC, kterým byl osazen zvláštní plošný spoj (viz kap. 6.1.2). Kabel spojující senzor s převodníkem by měl být co nejkratší, proto byl navržen držák (viz obr. 4.52) tohoto plošného spoje, který je připevněn na zadní desku. Kabel vedoucí z LDC byl připojen do svazku kabelů jdoucích od BLDC motoru a přiveden do řídicí desky.



Obrázek 4.52: Rozložený pohled na držák plošného spoje s LDC na zadní desce.



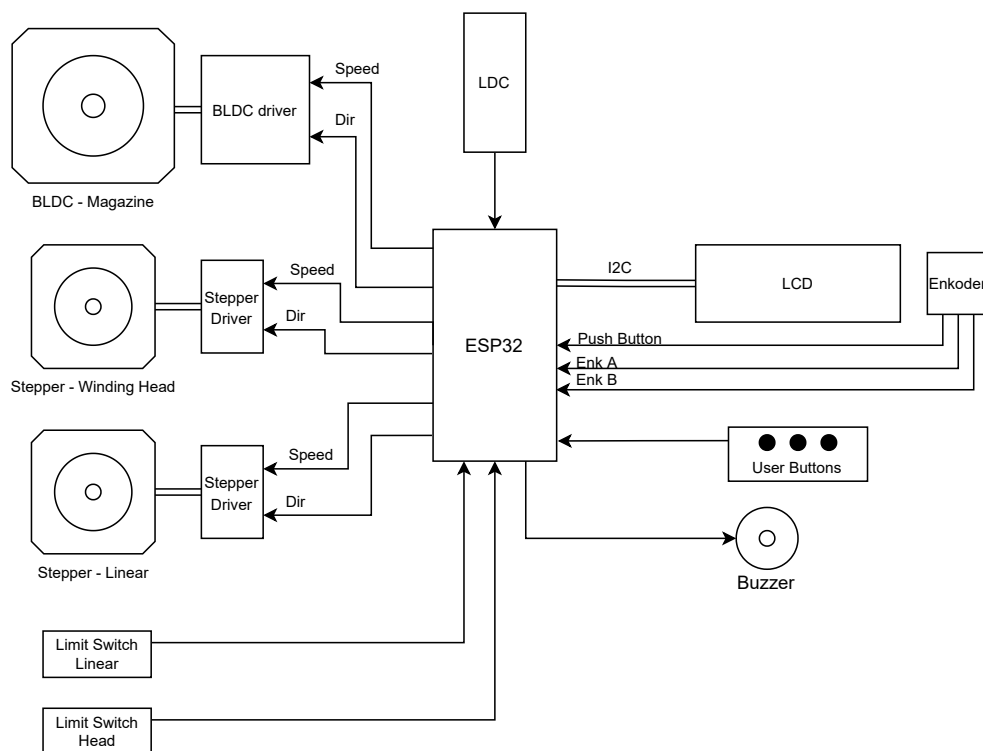
## Kapitola 5

### Řídicí elektronika a firmware

Souběžně s vývojem mechanické části se vyvíjela i řídicí elektronika a její firmware. Řídicí elektronika až do samotného závěru vývoje byla osazena na nepájivém kontaktním poli. Po odladění byl vytvořen plošný spoj, na kterém bylo vše integrováno. Vývoj firmwaru probíhal kvůli zvoleným součástkám zejména v Arduino IDE a částečně v STM32CubeIDE.

#### 5.1 Řídicí elektronika

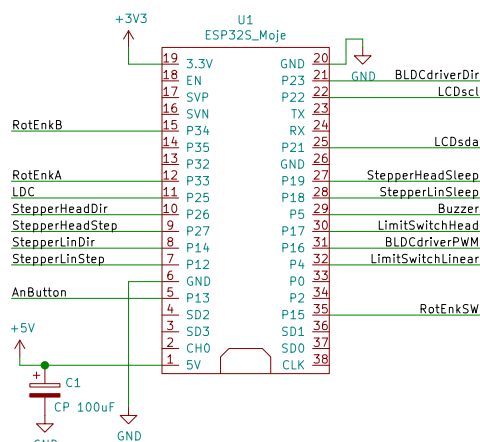
Srdcem řídicí elektroniky je modul ESP32S V.1, který byl zvolen kvůli dostupnosti, snadné obsluze a počtu GPIO pinů. Modul disponuje množstvím pokročilých funkcí, jako například WiFi či Bluetooth, které nebyly v tomto projektu použity. Blokové schéma celého zapojení je vidět na obrázku 5.1.



Obrázek 5.1: Blokové schéma zapojení řídicí elektroniky.

ESP32 (viz obr. 5.2) řídí dva krokové motory driverem A4988 a jeden BLDC motor driverem 8015A. Pro počítání otoček zásobníku je připojen převodník LDC1614 (viz. Kapitola 6.1.2) s mikrokontrolerem STM32 a pro kalibraci otočení navíjecí hlavy a lineárního posuvu jsou

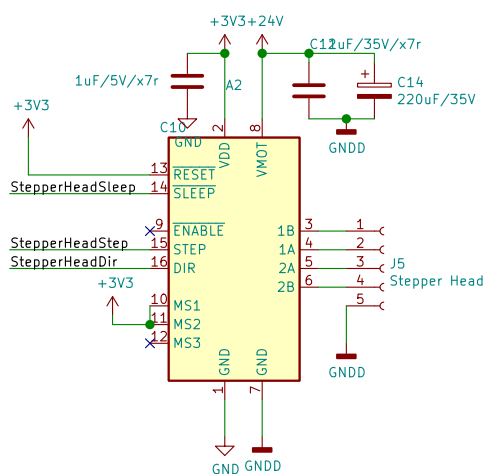
připojeny dva koncové spínače. Jako uživatelské rozhraní slouží čtyřřádkový dvacetiznakový LCD 2004 s I2C převodníkem, enkodér s tlačítkem, tři tlačítka a piezo měnič.



Obrázek 5.2: Zapojení vstupně-výstupních pinů řídicí desky ESP32.

### 5.1.1 Driver A4988

Driver krokových motorů je ovládán dvěma piny DIR a STEP. Pokud je DIR pin HIGH, točí se krokový motor po směru hodinových ručiček. Na pin STEP je přiveden obdélníkový signál, jehož frekvence určuje rychlost otáčení krokového motoru.



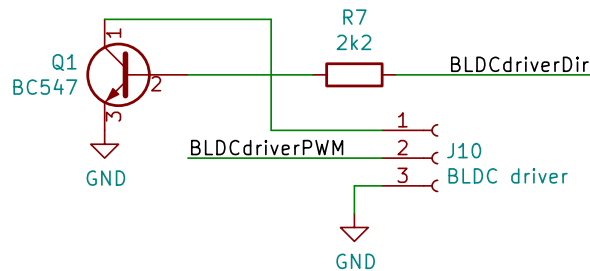
Obrázek 5.3: Zapojení breakoutboardu s driverem krokových motorů A4988.

Na napájení driveru (viz obr. 5.3) byly paralelně k zemi připojeny vyhlazovací kondenzátory. Piny STEP, DIR a SLEEP byly připojeny k řídicí desce ESP32. Piny MS1-3, nastavující microstepping, byly nastaveny na HIGH, HIGH, LOW, čímž se nastavil microstepping osminásobný.

### 5.1.2 Driver 8015A

Jako driver krokových motorů, je ovládán BLDC motor pohonu zásobníku. Je ovládán piny F/R a AVI. Pin F/R (Forward/Reverse) ovládá směr otáčení motoru a pro HIGH se otáčí po směru

hodinových ručiček. AVI je analogový vstup, na který je přiváděna PWM o frekvenci 1 kHz, jejíž střídou se nastavuje rychlost otáčení.

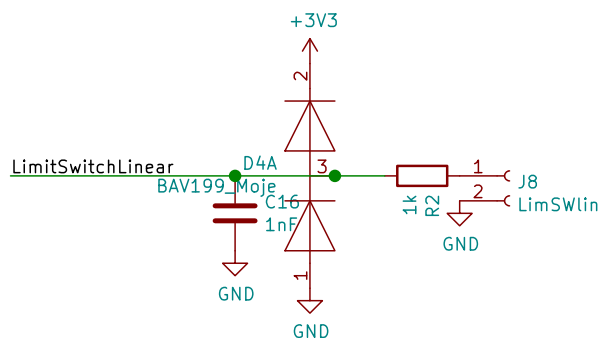


**Obrázek 5.4:** Zapojení předřazené vstupu do BLDC driveru 8015A.

BLDC driver 8015A pracuje na 5-voltové logice, zatímco ESP32 na 3.3-voltové. Logický vstup řídicí směr otáčení F/R byl kvůli rozdílným úrovním napětí připojen přes tranzistor (viz obr, 5.4). Na analogový vstup AVI, který nastavuje rychlost motoru, je přivedena PWM přímo z ESP32. Je tím omezena maximální rychlost otáčení motoru, pro kterou by bylo na vstup AVI potřeba přivést 5 V. To však nečiní problém, neboť využíváme přibližně 40% rozsahu nižší úrovně.

### 5.1.3 Koncové spínače

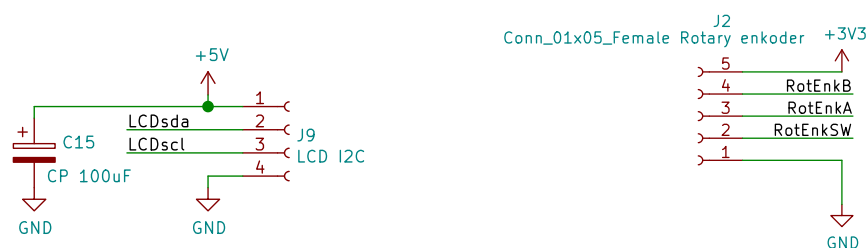
Pro kalibraci navíječky, tedy natočení navíjecí hlavy a polohu lineárního posuvu, byly použity dva koncové pákové spínače s kladkou. Koncové spínače jsou připojeny přes konektor na obrázku 5.5 vpravo. Na řídicí desce byl aktivován vnitřní pull-up rezistor. Jako ochrana proti statickému výboji (přepětí na pinu řídicí desky) byly předřazené dvě diody mezi 3.3 V a zem.



**Obrázek 5.5:** Zapojení předřazené koncovému spínači.

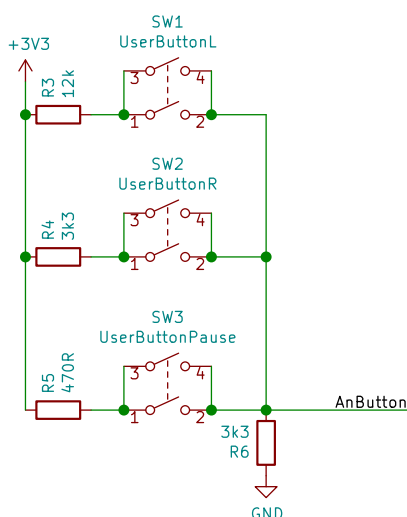
### 5.1.4 LCD, enkodér a tlačítka

LCD 2004A má čtyři řádky a na každém řádku dvacet znaků. Samotný displej je řízen HD44780 paralelním řadičem a pro jeho připojení by bylo třeba šest digitálních výstupů na řídicí desce. Kvůli obsazenosti pinů na desce ESP32 byla zvolena varianta připojení přes I2C převodník. Pro ovládání menu, zobrazeného na displeji, slouží rotační enkodér s tlačítkem KY-040 s 20 pulzy na otočku. Výstupem z enkodéru je dvojice kvadraturních signálů a signál z tlačítka přes vnitřní pull-up.



Obrázek 5.6: Piny jdoucí do LCD a rotačního enkodéru.

Jako další část uživatelského rozhraní slouží trojice tlačítek. Kvůli úspoře počtu pinů potřebných na řídicí desce, byla tlačítka zapojena v kombinaci s odporovým děličem a výstup z děliče přiveden na 12-bitový AD převodník na ESP32 (viz obr. 5.7).



Obrázek 5.7: Zapojení třech tlačítek s odporovým děličem.

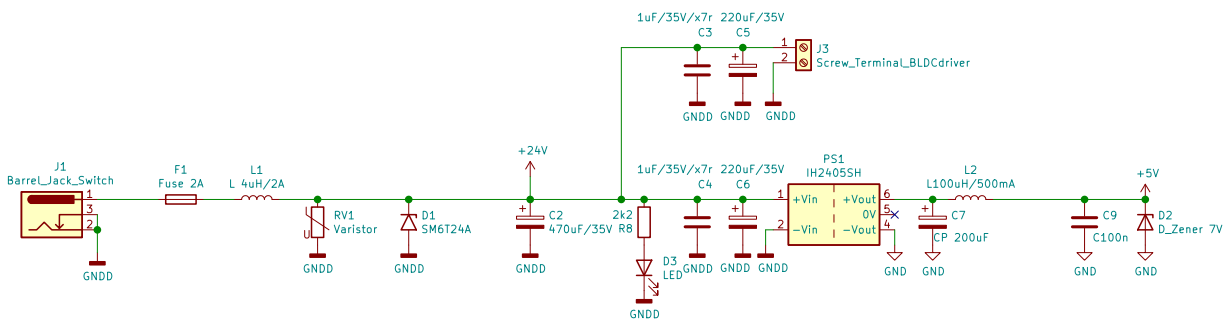
### 5.1.5 LDC

Ke snímání otoček zásobníku byl vytvořen modul s převodníkem LDC a mikrokontrolerem STM32F042F6 pro měření vířivých proudů (viz kap. 6.1.2). Jedná se o samostatný plošný spoj, jehož výstupem je pouze binární signál označující detekovanou otočku zásobníku.

### 5.1.6 Napájení

Navíječka pracuje na několika napěťových úrovních. Vše je řízeno 3.3-voltovou logikou, podsvícení displeje potřebuje napájení 5 V a motory jsou napájeny 24 V. ESP32 má vnitřní stabilizátor napětí na 3.3 V a vstupní napětí od 3.3 V do 5.5 V. Napájecí struktura byla navržena následovně: Spínaný síťový adaptér s výstupním napětím 24 V, následovaný DC-DC měničem s výstupem 5 V, které jsou přivedeny na stabilizátor ESP32, jehož výstupem je 3.3 V pro logickou část obvodu. Celé zapojení včetně ochranných prvků je na obrázku 5.8.



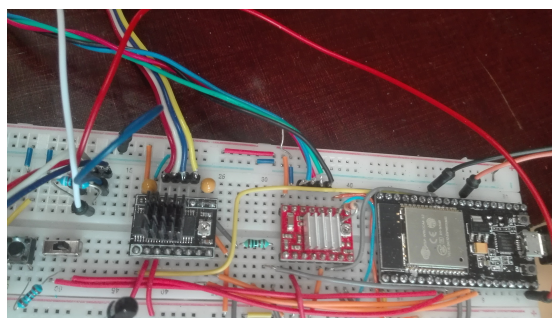


Obrázek 5.8: Zapojení napájecí části obvodu.

V levé části obvodu je přivedeno napětí 24 V z konektoru, do kterého je připojen spínaný síťový adaptér. Za ním následuje pojistka proti překročení proudového omezení. Dále tlumivka, která slouží jako proudové omezení při nabíjení filtračních kondenzátorů. Vybitý kondenzátor má nízký odpor a chová se jako zkrat. Na začátku jeho nabíjení by jím tekla velký proud, který by spálil pojistku. V kombinaci s kondenzátory slouží tlumivka jako LC filtr a omezuje tak napěťové špičky. Varistor slouží jako ochrana proti přivedení většího napájecího napětí než je 24 V. Po jeho překročení půjde do zkratu, čímž se spálí pojistka. Unipolární transil slouží zároveň jako ochrana proti přepólování v případě připojení špatného zdroje s prohozenými vývody. Slouží jako dodatečná ochrana v kombinaci s varistorem, který reaguje pomalu, zatímco transil má rychlejší odezvu. Kondenzátor C2 vyrovnává kolísání napětí při zatěžování zdroje nebo úbytku napětí způsobeném dlouhým přívodním kabelem. Následuje LED jako indikace připojeného napájení. V horní větvi je vyvedeno napájení pro výkonovou část driverů motorů s ochrannými kondenzátory pro vyrovnávání kolísání napětí při spínání motorů. Ve spodní větvi je napětí přivedeno do DC-DC měniče, jehož výstupem je stabilizovaných 5 V. Za ním následuje CLC článek, který filtruje rušení. Zenerova dioda eliminuje případné přepětí na výstupu DC-DC měniče. Odrušovací kondenzátory jsou vždy umísťovány blízko pulzních spotřebičů, kvůli snížení impedance. Z tohoto důvodu jsou používány keramické kondenzátory s nízkou impedancí.

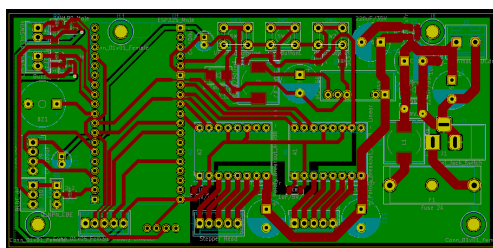
### 5.1.7 Návrh plošného spoje

Celá řídicí elektronika byla sestavena nejprve na nepájivém kontaktním poli (viz obr. 5.9). Postupem času bylo nepájivé pole zaplněno a nespolehlivost některých spojů způsobovala obtížně odhalitelné chyby.

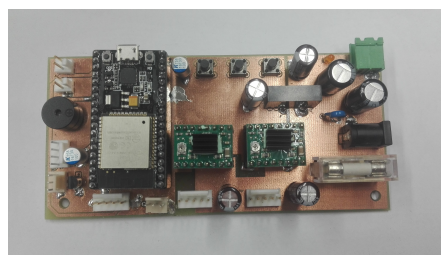


Obrázek 5.9: Nepájivé pole v prvních fázích vývoje.

Proto bylo zapojení z nepájivého pole převedeno na dvouvrstvý plošný spoj (viz obr. 5.10), který byl vyroben fotolitografickou metodou leptání [11]. Byla snaha galvanicky oddělit logickou část od výkonové, nebo alespoň zkrátit proudové smyčky, aby proud netekl nedefinovaně obvodem. Mohl by způsobit napěťové úbytky a pokles logických úrovní, což by mohlo mít za následek špatnou funkčnost systému. Proto byl zvolen galvanicky oddělený DC-DC měnič a na plošném spoji jsou vidět dvě zřetelné oblasti oddělených zemí. Bohužel bylo zjištěno, že drivery krokových motorů nejsou galvanicky odděleny a ani driver BLDC motoru nemá galvanicky oddělenou výkonovou část od logické i přes to, že to výrobce deklaruje. Skutečného oddělení tedy nebylo dosaženo. Země jsou alespoň spojeny na definovaných místech a je menší šance, že by se vytvářely nechtěné napěťové smyčky.



(a) : Návrh plošného spoje v prostředí KiCad.



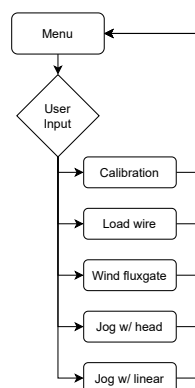
(b) : Vyleptaný a osazený plošný spoj.

Obrázek 5.10:

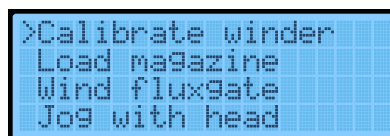
## 5.2 Firmware

Programová část se skládá ze dvou kódů. Z hlavního řídicího programu a z programu zpracování dat z LDC (viz kap. 6.1.2). Oba kódy byly vytvořeny v jazyku C s využitím prostředí Arduino IDE a STM32CubeIDE.

Hlavní řídicí program je stavový automat (viz obr. 5.11a), který přepíná mezi jednotlivými funkcemi na základě uživatelského vstupu z menu. Menu je vykresleno na LCD, aktuální položka je označena šipkou a otáčením enkodéru je možno se pohybovat v menu nahoru a dolů. Na obrazovce jsou zobrazeny vždy čtyři položky z menu, po skoku na pátou položku je vykreslena další obrazovka s položkami 5-8. Výběr položky uživatel provede stisknutím enkodéru.



(a) : Vývojový diagram programu na ESP32.

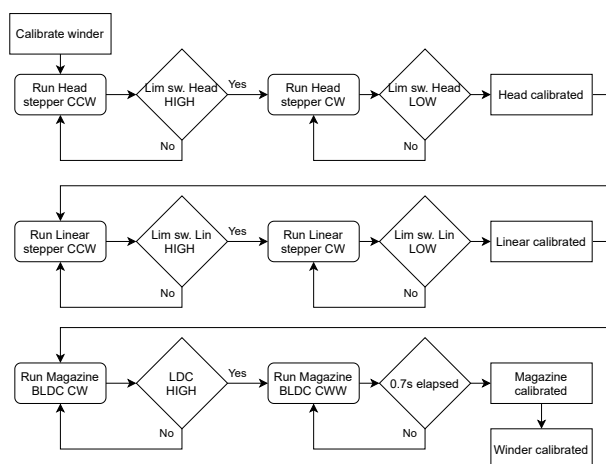


(b) : Obrazovka menu.

Obrázek 5.11:

### 5.2.1 Kalibrace navíječky

Pro opakovatelnost navíjení jader je zapotřebí stejná výchozí pozice. Navíječka se kalibruje ve třech fázích: navíjecí hlava, lineární posuv a zásobník. Nejprve je potřeba natočit navíjecí hlavu tak, aby rovina zásobníku byla přibližně kolmo k ose posunu lineárního posuvu. Jinak by mohlo dojít ke kolizi lineárního posuvu se zásobníkem. Jak je vidět na diagramu 5.12, krokový motor se točí po směru hodinových ručiček, dokud kleština nesepe koncový spínač. Pak se motor začne otáčet opačným směrem, než je koncový spínač rozepnut. Tato metoda zajišťuje přesnější kalibraci, než jen první kontakt. Zároveň je rychlejší, neboť se kleština může pohybovat vyšší rychlostí a sepnout spínač, následně se od něj pomaleji a přesněji vzdalovat, než ho rozepne. Po kalibraci lineárního posuvu nemůže dojít ke kolizi s navíjecí hlavou a stejným způsobem je zkalibrováno i její natočení. Kalibrace natočení zásobníku není nutná pro správnou funkčnost navíječky, ale usnadňuje uživateli obsluhu. Zásobník se otáčí proti směru hodinových ručiček (opačně než BLDC motor), dokud LDC nevyše signál o průchodu význačného místa na zásobníku. Pak se zásobník točí vymezený čas opačným směrem, čímž se přerušení zásobníku dostane do úrovně kleštiny a je možné zásobník rozevřít a vložit jádro. Po ukončení kalibrace vydá navíječka zvukový signál.



Obrázek 5.12: Vývojový diagram kalibrace navíječky.

### 5.2.2 Plnění zásobníku

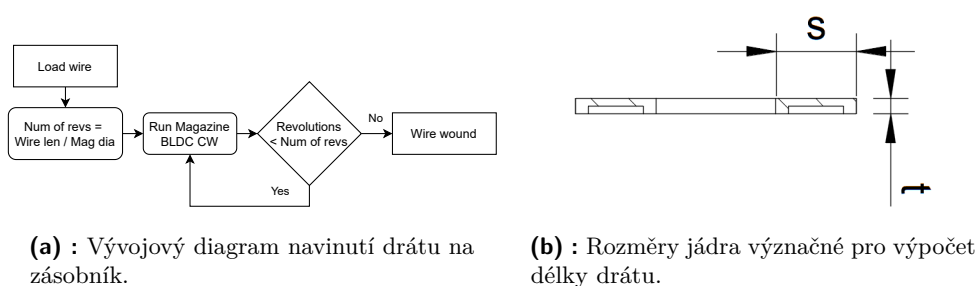
Pokud je jádro upnuto v kleštině a navlečeno na zásobníku, je na zásobník navinut drát. Je potřeba odměřit délku drátu, aby nedošel před navinutím požadovaného počtu závitů a zároveň po navinutí nezbývalo příliš mnoho a nedocházelo k plýtvání. Délka drátu  $l$  se vypočte následovně:

$$l = 2N_{Z\dot{A}V}(s + t), \quad (5.1)$$

kde  $N_{Z\dot{A}V}$  je počet závitů a  $s, t$  jsou rozměry jádra naznačené na výkresu 5.13b. Protože dokážeme počítat pouze celé otočky zásobníku, je počet otoček zaokrouhlen vždy nahoru:

$$N_{OT} = \left\lceil \frac{l}{o_{Z\dot{A}S}} \right\rceil, \quad (5.2)$$

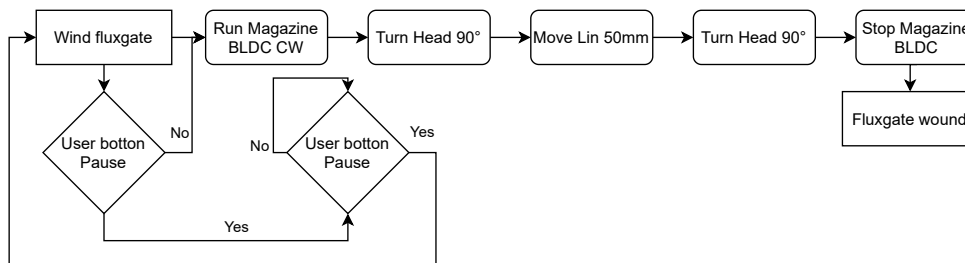
kde  $N_{OT}$  je počet otoček zásobníku a  $o_{Z\dot{A}S}$  je obvod zásobníku. Drát je zaháknut za zářez v zásobníku, je roztočen BLDC motor a po napočítání správného počtu pulzů  $N_{OT}$  z LDC je BLDC opět zastaven (viz obr. 5.13a).



Obrázek 5.13:

### 5.2.3 Navíjení jádra

Jádro je navíjeno ve dvou polovinách (viz kap. 4.1). Navíjení jedné poloviny (viz obr. 5.14) se skládá z navíjení první čtvrtotočky, navíjení rovné části, navíjení druhé čtvrtotočky.



Obrázek 5.14: Vývojový diagram navíjení racetrack jádra.

Aby bylo rozložení závitů rovnoměrné jak v kulatých, tak rovné části, je zapotřebí synchronizovat rychlost otáčení krokových motorů s otáčením zásobníku. Byla naměřena převodní charakteristika mezi střídou PWM signálu řídicím rychlost BLDC a trváním jedné otočky (viz obr. 5.15a). Aby bylo možné synchronizovat rychlosti pohybů s rychlostí navíjení, je potřeba znát dobu navíjení jednoho závitu. Proto byly body (viz obr. 5.15a) proloženy křivkou, do které je zadána aktuální rychlost v podobě střídy PWM a odečtena doba navíjení jednoho závitu  $t_{ZÁV}$  v milisekundách. Spočteme tedy dobu za jakou se bude muset navíjecí hlava otočit o  $90^\circ$  a za jakou dobu bude muset lineární posuv urazit vzdálenost rovné části  $L$ . V následujících rovnicích, kde  $R$  a  $L$  jsou rozměry jádra (viz obr. 5.15b), je naznačen výpočet doby pro otočení navíjecí hlavy a posunu lineárního posuvu.

$$L_{JÁD} = \frac{2\pi R}{2} + L \quad (5.3)$$

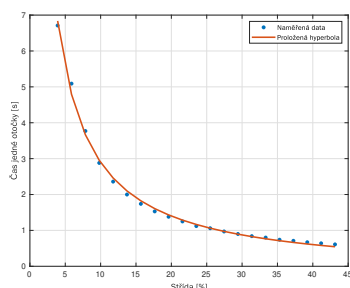
$$L_{ZÁV} = \frac{L_{JÁD}}{N_{ZÁV}} \quad (5.4)$$

$$L_{ZAT} = \frac{2\pi R}{4} = \frac{\pi R}{2} \quad (5.5)$$

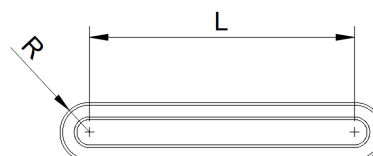
$$t_{ZAT} = \frac{L_{ZAT}}{L_{ZÁV}} \cdot t_{ZÁV} \quad (5.6)$$

$$t_{LIN} = \frac{L}{L_{ZÁV}} \cdot t_{ZÁV} \quad (5.7)$$

Z času  $t_{ZAT}$  a úhlu  $90^\circ$  se vypočte rychlost a počet potřebných kroků krokového motoru, společně s dalšími parametry jako jsou převodový poměr a microstepping. Analogicky se to samé provede o pro lineární posuv. Je patrné, že celé řízení navíjení probíhá přímovězně, což nezaručuje přesný a opakovatelný počet závitů napříč navíjenými jádry. Proto součástí dalšího vývoje bude regulátor rychlosti BLDC motoru v závislosti na časové prodlevě impulsů z LDC.



(a) : Převodní charakteristika mezi střídou PWM řídicí BLDC a trváním otočky zásobníku.



(b) : Rozměry jádra pro výpočet rychlostí pohybů navíječky.

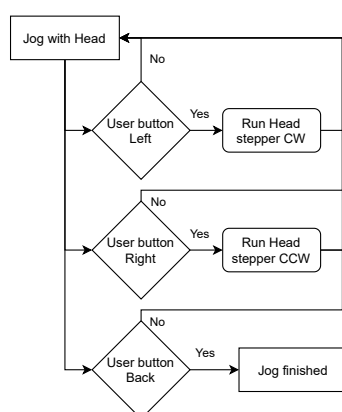
Obrázek 5.15:

Naměřené body převodní charakteristiky (viz obr. 5.15a) byly proloženy hyperbolou, neboť mezi rychlostí motoru a časem otočky platí nepřímá úměra. Byly určeny parametry křivky, jež má tento předpis

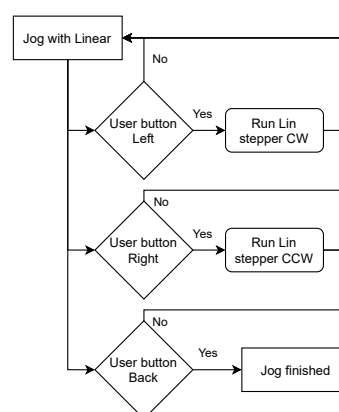
$$t_{OT} = \frac{34,0116}{PWM + 0,8926} - 0,2273. \quad (5.8)$$

## 5.2.4 Manuální ovládání navíječky

Poslední význačnou funkcí je manuální ovládání pohybu lineárního posuvu a otáčení navíjecí hlavy (viz obr. 5.16). Navíjecí hlavou je možné otáčet rukou, neboť je s krokovým motorem spojena ozubenými koly. Lineární posuv je však poháněn závitovou tyčí a otáčení rukou je zdlouhavé. Byly přidány funkce, které za použití tlačítek, dovolují uživateli pohyb s navíječkou.



(a) : Vývojový diagram manuálního otáčení navíjecí hlavy.



(b) : Vývojový diagram manuálního posuvu lineárního posuvu.

Obrázek 5.16:



# Kapitola 6

## Testování měření

### 6.1 Snímání otoček zásobníku

Pro navinutí správného počtu závitů na kostru cívky je důležité počítání otoček zásobníku. Jedna otočka zásobníku odpovídá jednomu závitu na kostře. Vyzkoušené metody snímání by se daly rozdělit do dvou kategorií. Přímé snímání otáčení zásobníku a snímání otoček motoru.

Není nutné určovat polohu zásobníku, pro počítání závitů na kostře je dostačující počítání celých otoček.

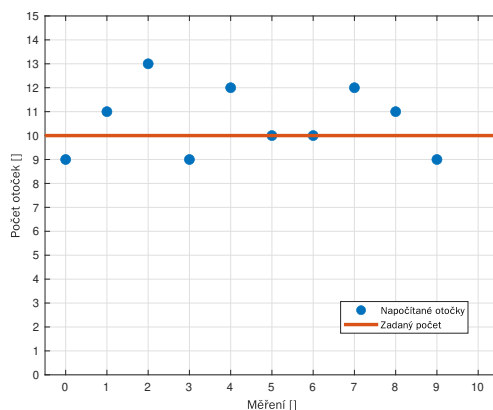
#### 6.1.1 Snímání otoček motoru

##### Enkodér motoru 57BLF01

Bezkartáčový stejnosměrný motor 57BLF01, který je používán k pohonu zásobníku je osazen magnetickým enkodérem se třemi Hallovými senzory. Tento enkodér primárně slouží jako zpětná vazba rychlosti pro regulátor BLDC8015a. Enkodér na jednu otočku vygeneruje 12 pulzů. Převodový poměr mezi dvacetizubovou řemenicí motoru a zásobníkem s obvodem 308 mm vychází 7.7:1. Byl proveden experiment, kdy byla na zásobník nakreslena značka. Motor měl zásobníkem otočit 10x a byly zaznamenány reálné počty otoček zásobníku. Výsledky jsou zobrazeny v tabulce 6.1 a grafu 6.1. Výsledky byly neuspokojivé a vzhledem k tomu, že chceme měřit rychlost zásobníku, bylo od této metody upuštěno.

Počty otoček	9	11	13	9	12	10	10	12	11	9
--------------	---	----	----	---	----	----	----	----	----	---

**Tabulka 6.1:** Skutečné počty otoček při použití originálního enkodéru. Cílem bylo 10 otoček.



**Obrázek 6.1:** Počty otoček zásobníku při použití enkodéru BLDC motoru 57BLF01 odchylovající se od cílového počtu 10 otoček.



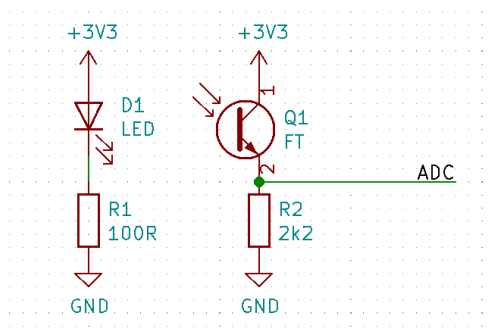
Taková nepřesnost by způsobovala nerovnoměrné navíjení jader. Pokud by na jedné polovině jádra bylo více závitů než na druhé, magnetické pole v jeho středu by bylo nerovnoměrné. Proto jsme od této metody počítání otoček ustoupili.

### 6.1.2 Přímé snímání zásobníku

Na průmyslovém stroji ze sekce 4, se počet závitů počítá jako počet průchodů drátu před indukčností senzorem. Bohužel v našem případě je drát tak tenký, že ho náš senzor téměř nebyl schopen detekovat. Vydali jsme se proto cestou počítání průchodů význačného místa zásobníku kolem senzoru.

#### Optická metoda

Jedním z přístupů bylo nakreslení kontrastní značky na zásobník a snímání změn intenzity osvětlení pomocí fototranzistoru. Pro zmírnění účinků okolního osvětlení byl vybrán fototranzistor citlivý v infračervené části spektra a zároveň byl zásobník přisvicován IRED.



Obrázek 6.2: Zapojení fototranzistoru a IRED.

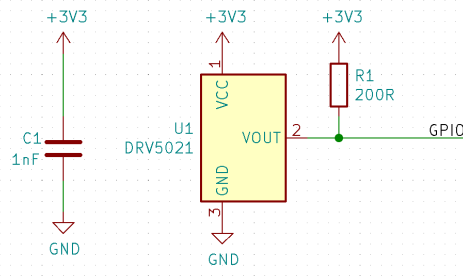
Na zásobník byl bílým lakovým fixem nanesen proužek. Problémem byla nízká úroveň signálu z odraženého světla a to i při zakrytí celého zařízení krabicí, aby se odfiltrovala stejnosměrná složka způsobená okolním osvětlením. Dalším problémem bylo opotřebování bílé značky. Zásobník je veden středovými koly, která ho podepírají ze tří stran a která tak obrušovala lakový nátěr.

Možností by bylo vytvořit do zásobníku zářez, který by byl snímán optickou závorou. To však nepřipadalo v úvahu zejména z důvodu ceny zásobníku a také materiálu z kterého je vyroben.

#### Hallova sonda a magnet

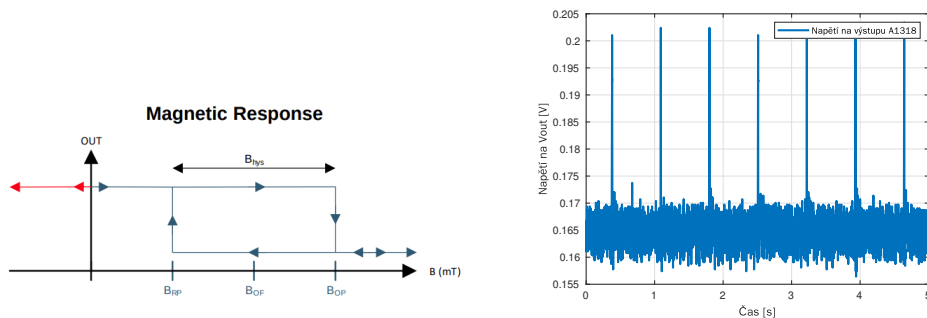
Jak již bylo zmíněno v kapitole 3.4.1, zásobník má v sobě otvor na prostrčení drátu a zářez pro jeho zaháknutí. Do tohoto zářezu byl vlepen malý kousek odštípnutého neodymového magnetu (cca 1x0.6 mm) pomocí lepidla Loctite 276 určeného pro trvalé zajišťování šroubů.

Při otáčení zásobníku tento magnet míjel unipolární spínací Hallovu sondu DRV5021A1.



**Obrázek 6.3:** Zapojení spínací Hallovy sondy DRV5021.

Pokud se k sondě přiblíží jižní pól magnetu, výstup sondy je uzemněn. Pokud se k sondě přiblíží severní pól nebo siločáry nesměřují kolmo skrz sensor, má výstup sondy vysokou impedanci [12]. Průběh intenzity magnetického pole při otáčení zásobníku byl zaznamenán pomocí analogové Hallovy sondy A1318 (viz obr. 6.4b).



**(a)** : Výstup ze spínací Hallovy sondy DRV5021 pro dvě orientace magnetického pole, kde  $B_{OP} = 2.9 \text{ mT}$  a  $B_{RP} = 1.8 \text{ mT}$

**(b)** : Výstup z analogové Hallovy sondy A1318 za pomalého otáčení zásobníku. Převodní konstanta činí  $50 \text{ V/T}$ .

**Obrázek 6.4:**

Z grafu jsou vidět dva důležité parametry. Prvním je poměr signál/šum a to zejména šum způsobený kolísáním zásobníku ze strany na stranu. Poměr signál/šum je více než desetinasobný, což je pro naši práci dostačující. Druhým parametrem je amplituda píků pohybující se kolem  $30 \text{ mV}$ . Hallova sonda A1318 má převodní konstantu  $5 \text{ V/T}$  [12]. Pík  $30 \text{ mV}$  tak odpovídá  $6 \text{ mT}$ . Unipolární spínací Hallova sonda DRV5021 má hysterezi  $2.9 \text{ mT} - 1.8 \text{ mT}$  (viz obr. 6.4a). Při otáčení zásobníku by tedy měla spolehlivě spínat.

Nevýhodou tohoto řešení je právě nutnost vlepění magnetu do zásobníku. Vzhledem k faktu, že magnet byl odštípnut z většího kusu, není na něm jednoznačně definována poloha severního a jižního pólu.

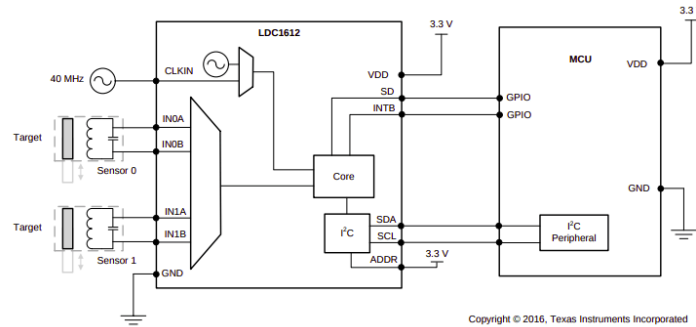
Kvůli nevhodnému severo-jížnímu natočení je citlivost Hallovy sondy špatná, proto musí být sonda blízko u magnetu. To způsobuje občasné dření magnetu o sondu a tím se magnet obrousuje. Neodym-železo-borový prach pak kontaminuje laboratoř magnetického pole a znehodnocuje ostatní měření prováděná v laboratoři. Také poškozuje samotnou navíjenou cívku budicího vinutí fluxgate senzoru.

Vlepený magnet překáží správnému zajištění drátu v drážce k tomu určené, což způsobuje občasné přetrhávání nebo vysmekávání drátu.

## Metoda vířivých proudů

Kvůli třem výše zmíněným důvodům bylo přikročeno k bezkontaktnímu a neinvazivnímu snímání otoček zásobníku. Aby mohl být zásobník rozevřen, je v jednom místě přerušen. Při snímání metodou vířivých proudů dochází v tomto místě k nárůstu indukčnosti.

Byl použit indukčnost-číslcový převodník LDC1614, který disponuje čtyřmi kanály a frekvenčním rozsahem senzoru od 1 kHz až 10 MHz [13].



Obrázek 6.5: Zjednodušené schéma zapojení a použití převodníku LDC1614.

Na obrázku 6.5 je vyobrazeno zapojení převodníku. V našem případě je využívána pouze jedna snímací cívka. Jako řídicí mikrokontroler byl použit STM32F042F6, který po sběrnici I2C komunikuje s převodníkem.

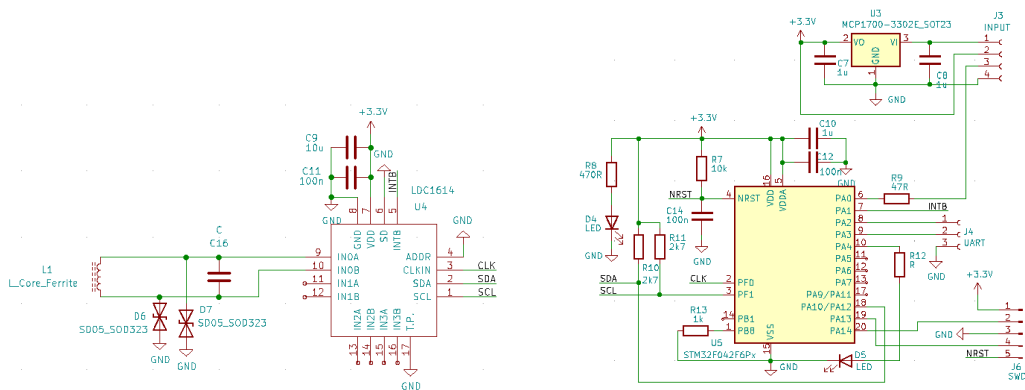
Převodník budí měřicí cívku danou frekvencí. Následně měří rozladění  $f_{SENSOR}$  vůči referenční frekvenci  $f_{REF}$ . Naměřenou  $f_{SENSOR}$  převede na číslcovém převodníku a odešle po sběrnici I2C.

Referenční frekvence  $f_{REF}$  může být nastavena na frekvenci vnitřního oscilátoru nebo na vnější oscilátor. My jsme použili vnitřní oscilátor o frekvenci

$$f_{REF} = f_{CLK}/FREF\_DIVIDER, \quad (6.1)$$

kde

$$f_{CLK} = 32 \text{ MHz}. \quad (6.2)$$



(a) : Skutečné zapojení převodníku LDC1614.

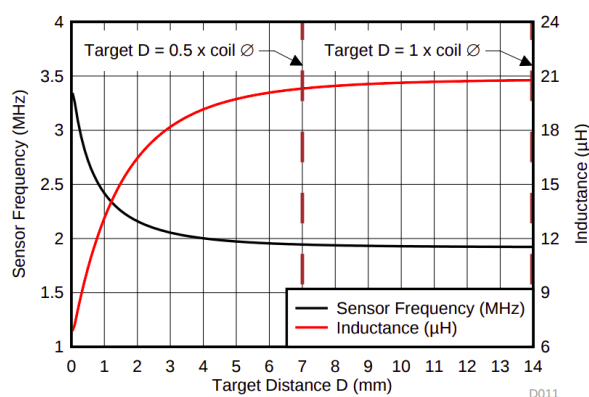
(b) : Zapojení mikrokontroleru STM32F042F6 se stabilizátorem napětí pro napájení 3.3-5 V.

Obrázek 6.6:

**Princip měření.** Měřicí cívka je připojena na LC rezonanční obvod, který ji budí danou frekvencí  $f_{SENSOR}$ .

Buzená cívka kolem sebe vytváří měnící se magnetické pole, které ve vodivých předmětech indukuje vířivé proudy. Kvůli Lenzovu zákonu mají tyto indukované proudy opačný smysl než proud protékající cívkou.

Přiblížení vodivého předmětu k cívce má za následek nárůst frekvence  $f_{SENSOR}$ , kterou je senzor buzen (viz obr. 6.7). Frekvence senzoru je porovnávána s referenční frekvencí.



**Obrázek 6.7:** Převodní charakteristika LDC1614. Použita 14 mm PCB cívka jako snímač a 1.5 mm hliníkový plech jako cíl.

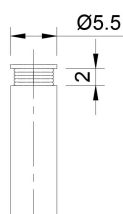
Výsledná hodnota

$$\frac{f_{SENSOR}}{f_{REF}}$$

je odeslána I2C řadičem po sběrnici do mikrokontroleru STM32.

Převodník LDC1614 podporuje snímání z více senzorů tak, že pomocí multiplexoru přepíná mezi jednotlivými cívkami a postupně měří jejich frekvence  $f_{SENSOR_{1-4}}$ . V našem případě byly vnitřní registry nastaveny tak, aby převodník měřil kontinuálně hodnotu pouze na prvním vstupu, čímž se zvýšila maximální vzorkovací frekvence.

**Návrh měřicí cívky.** Měřicí cívka by měla co nejvíce vyzářovat magnetické pole, aby se v měřeném materiálu dobře indukovaly vířivé proudy. Prvním návrhem byla vzduchová cívka navinutá na plastové kostičce (viz obr. 6.8).



**(a)** : Výkres kostičky měřicí cívky.



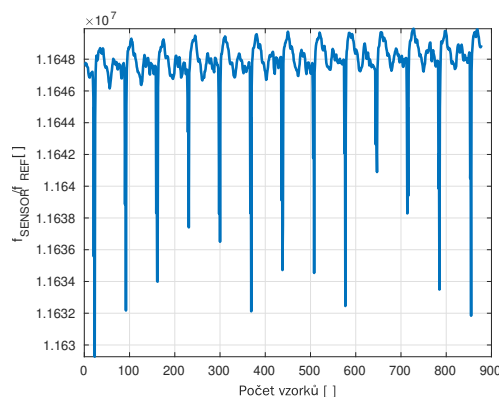
**(b)** : Návrh měřicí cívky.



**(c)** : Měřicí cívka s kostičkou vytištěnou na 3D tiskárně.

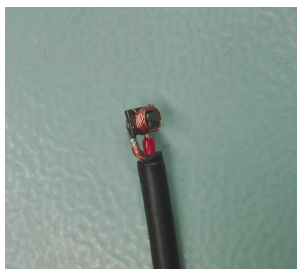
**Obrázek 6.8:**

Jednalo se o prvotní experiment, zdali je možné použít libovolnou cívku. Na plastové jádro bylo navinuto několik desítek závitů drátu o průměru 0.15 mm. Na grafu 6.9 jsou vidět naměřené změny frekvence s použitím tohoto druhu snímací cívky.

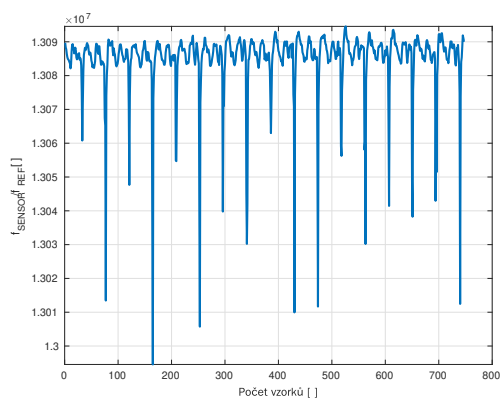


**Obrázek 6.9:** Data naměřená LDC při použití vzduchové cívky jako senzoru vířivých proudů.

Je patrné, že senzor reaguje na otáčející se zásobník. Dalším experimentem byla modifikace výkonové SMD tlumivky. Tlumivce byla odstraněna vrchní část jádra (viz obr. 6.10a) a magnetická indukce by tak z tlumivky měla více unikat do prostoru. Na grafu 6.10b je vidět výstup z převodníku LDC za použití upilované tlumivky jako snímací cívky.



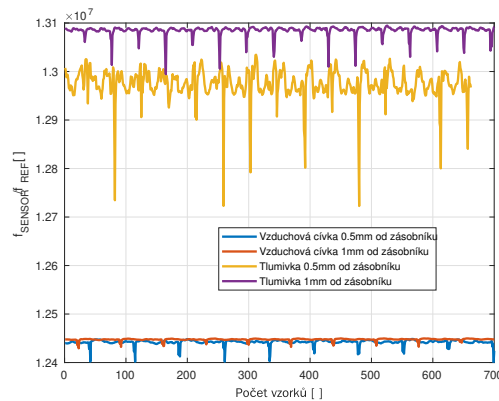
**(a)** : Výkonová SMD tlumivka s upilovaným vrškem.



**(b)** : Data naměřená LDC při použití ubroušené tlumivky jako senzoru vířivých proudů.

**Obrázek 6.10:**

Při srovnání výstupu pro vzduchovou cívku a upilovanou tlumivku (viz obr. 6.11) je vidět změna výstupní frekvence se změnou vzdálenosti senzoru od zásobníku. Upilovaná tlumivka má vyšší offset i amplitudu signálu. Je vidět zvětšení šumu způsobeného stranovým kolísáním zásobníku při zkrácení vzdálenosti. Na základě tohoto grafu jsme se jednoznačně přiklonili k použití upilované tlumivky v přibližné vzdálenosti 1 mm od zásobníku jako senzoru vířivých proudů.



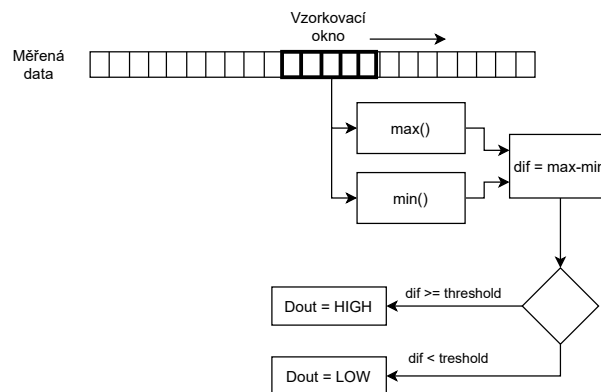
**Obrázek 6.11:** Srovnání úrovní naměřených LDC při použití vzduchové cívký a tlumivky jako senzorů vířivých proudů ve vzdálenostech 0.5 mm a 1 mm.

**Softwarové řízení.** Jak bylo zmíněno výše, data z LDC převodníku vyčítá mikrokontroler STM32F042F6 po sběrnici I2C a dál je zpracovává. Z mikrokontroleru vede logický výstup do hlavní řídicí desky, na kterém se objeví vysoká úroveň, když kolem senzoru projde přerušená část zásobníku.

Pro LDC1614 existuje knihovna[14] pro prostředí Mbed online IDE. Dále byla použita knihovna pro práci s I2C[15].

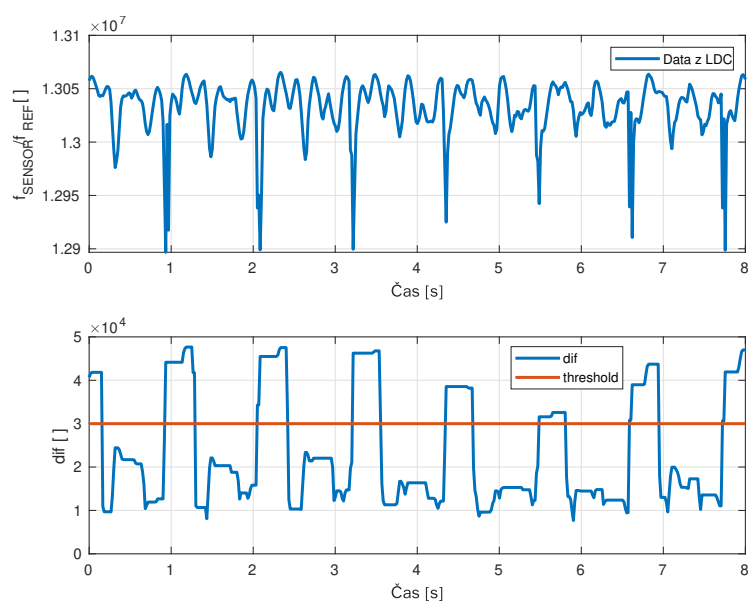
Při každé otočce zásobníku senzor detekuje výrazný pokles podílu frekvencí  $f_{SENSOR}/f_{REF}$  (viz obr. 6.11). Statický offset se může měnit v závislosti na usazení zásobníku ve vodičích kolech, nečistotách a okolním prostředí. Proto poklesy frekvence detekujeme metodou rozdílu maxima a minima ve vzorkovaném okně.

Celý program v prostředí Mbed je velmi jednoduchý (viz obr. 6.12).



**Obrázek 6.12:** Blokové schéma programu na mikrokontroleru STM32.

Postupně přicházející data po sběrnici I2C se ukládají do pole, o délce vzorkovacího okna, které se postupně přepisuje. V tomto poli je nalezeno minimum a maximum a pokud jejich rozdíl přesáhne nastavený threshold, je detekována otočka zásobníku a digitální výstup je nastaven na úroveň HIGH.



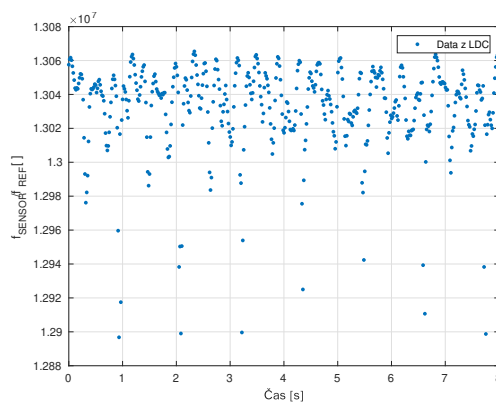
**Obrázek 6.13:** Naměřená data a detekované otočky zásobníku metodou hledání velkého rozdílu maxima a minima.

Na grafu 6.13 je vidět průběh zaznamenaných dat při pomalém otáčení zásobníku. Jedna otočka zásobníku trvala přibližně 1.13 s. Délka vzorkovacího okna byla experimentálně určena na 30 vzorků a threshold pro detekci otočky na 30000. Vzorkovací frekvence byla 60 Hz.

**Problémy.** Jak bylo zmíněno pod grafem 6.13, vzorkovací frekvence byla přibližně 60 Hz a doba jedné otočky  $t_{ot} = 1.13$  s. Experimentálně bylo určeno, že senzor vířivých proudů dokáže detekovat úsek zásobníku dlouhý přibližně  $l_{DET} = 2$  mm. Obvod zásobníku činí  $o_{ZÁS} = 308$  mm. Když dosadíme do rovnice

$$l_{VZ} = \frac{1}{f_{VZ}} o_{ZÁS} = \frac{1}{60} 308 = 4.54 \text{ mm}, \quad (6.3)$$

zjistíme, že senzor vířivých proudů dokáže detekovat přerušení zásobníku v každém 4.54 mm dlouhém úseku. V každém píku jsou jeden až dva body (viz obr. 6.14), což je na hranici možnosti vzorkování.



**Obrázek 6.14:** Stejná data jako v grafu 6.13, pouze vykreslena v bodech.

Při zvýšení rychlosti otáčení zásobníku by začalo docházet k aliasingu a falešným detekcím průchodu přerušení. Převodník LDC1614 disponuje možností nastavení poměru citlivosti vůči rychlosti čtení. Delší interval čtení znamená vyšší rozlišení. Doba čtení se pohybuje v intervalu od  $3.2 \mu\text{s}$  do  $26.2 \text{ ms}$  [13]. Data, která vidíte v grafech 6.13 a 6.14 byla naměřena s rozlišením nastaveným téměř na maximum.

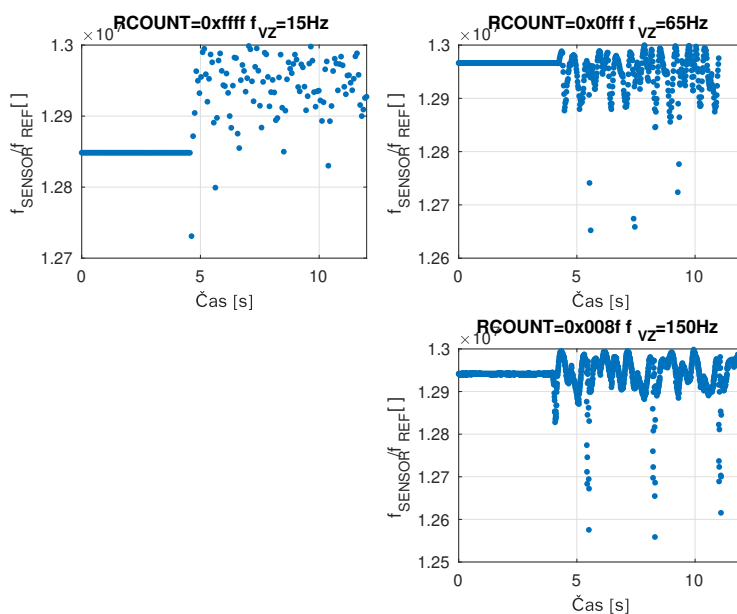
Teoretickou potřebnou vzorkovací frekvenci můžeme odhadnout následovně. V každém píku bychom chtěli alespoň  $n_{VZ} = 10$  bodů, aby mohl být spolehlivě detekován. Rychlost otáčení zásobníku ze zkušenosti zvolíme  $3 \text{ ot/s}$ , tedy  $t_{OT} = \frac{1}{3} \text{ s}$ , pak

$$f_{VZ} = \frac{1}{\frac{t_{DET} \cdot t_{OT}}{o_{ZAS}}} n_{VZ} = \frac{1}{\frac{2 \cdot \frac{1}{3}}{308}} 10 = 526 \text{ Hz}. \quad (6.4)$$

Doba čtení ze senzoru se dá nastavit přepsáním hodnoty v registru RCOUNT na úkor citlivosti měření, kde doba čtení  $t_C$

$$t_C = \frac{RCOUNT \times 16}{f_{REF}}. \quad (6.5)$$

V grafu 6.15 je záznam třech měření, kdy na počátku byl zásobník v klidu a pak se roztočil rychlostí  $0.36 \text{ ot/s}$ . Je zřejmé, že vzorkovací frekvence opravdu roste se snižováním hodnoty v registru RCOUNT. Je pozitivní, že není patrný nárůst šumu i přes výrazné snížení citlivosti. Plyne z toho, že naše měřicí cívka má dost velký poměr signál/šum, abychom mohli měřit i s velmi sníženou citlivostí.



**Obrázek 6.15:** Změna vzorkovací frekvence při změně hodnoty v registru RCOUNT.

O dalším snižování hodnoty v RCOUNT vypovídá už pouze tabulka 6.2. Při dalším zvyšování rychlosti čtení senzoru se však vzorkovací frekvence ustálila na  $152 \text{ Hz}$ , což je v rozporu s datasheetem výrobce, který udává až  $4 \text{ kS/s}$ .



RCOUNT	0x008f	0x007f	0x000f	0x0005
$f_{VZ}$ [Hz]	150	152	152	152

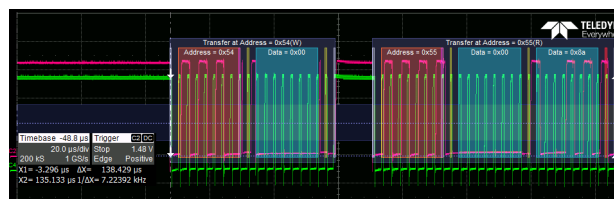
**Tabulka 6.2:** Další snižování hodnoty RCOUNT bez dalšího zvýšení vzorkovací frekvence.

Bylo odhaleno, že I2C komunikace mezi LDC a STM32 neběží na 400 kHz, jak bylo nastaveno, nýbrž pouze na 25 kHz. Ze senzoru je tedy vyčítána hodnota správně, prodleva vzniká až na jejím odesílání přes I2C. S tímto problémem se potýká několik uživatelů a nejspíše je způsoben prostředím Mbed online IDE. Řešení bylo nalezeno v podobě přepsání kódu v STM32CubeIDE, který neobsahuje RTOS. Na začátku programu byly nastaveny všechny registry tak, aby LDC měřil kontinuálně na nultém vstupním kanále.

- RCOUNT = 0x000f - podle rovnice 6.5  $t_C = 16\mu s$
- OFFSET = 0x0000
- SETTLECOUNT = 0x0032
- CLOCK\_DIVIDERS = 0x2002 - podle rovnice 6.1 nastaví  $f_{REF} = 32 MHz/2 = 16 MHz$
- CONFIG = 0x1881 - vypne režim spánku, pouze kanál 0 vždy aktivní, aktivuje kontinuální měření
- MUX\_CONFIG = 0x020C - aktivuje čtení pouze z prvního kanálu

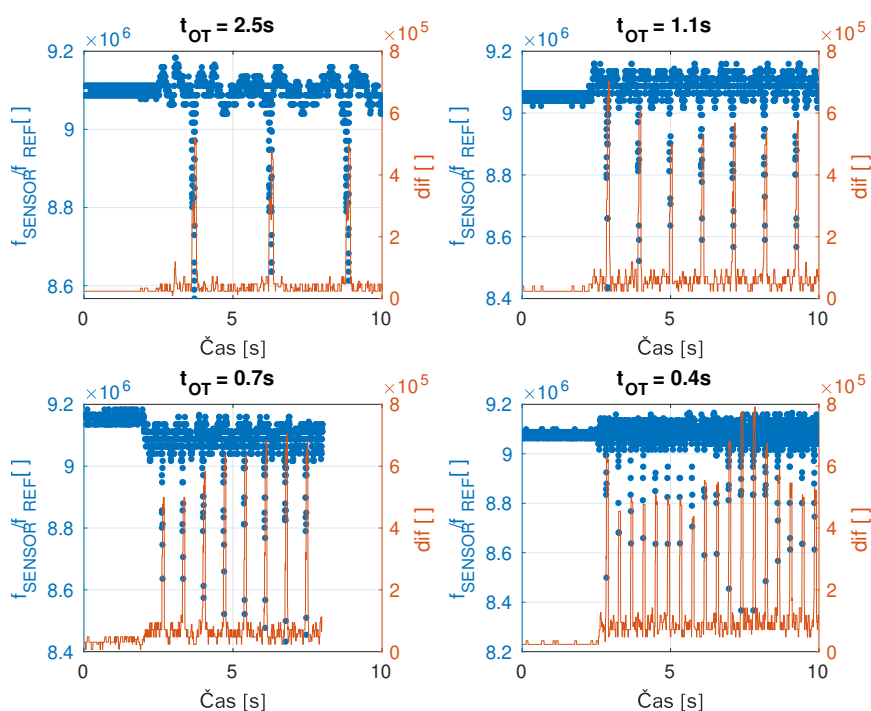
Čtení probíhá na registrech DATA\_MSB a DATA\_LSB. Oba registry mají dohromady čtyři byty, avšak první čtyři bity registru DATA\_MSB jsou vyhrazeny chybovým hláškám. Po tom, co se tyto první čtyři bity zahodí, se čísla vyčtená z obou registrů spojí a výsledek je zpracován v duchu programu, který byl původně v prostředí Mbed (viz obr. 6.12).

Byla ověřena správná funkčnost komunikace po I2C (viz obr. 6.16).



**Obrázek 6.16:** Záznam komunikace po I2C mezi LDC1614 a STM32.

Můžeme vidět první segment (viz obr. 6.16), kdy STM32 žádá o odeslání čísla z registru s adresou 0x00 (DATA\_MSB) a druhý segment, kdy LDC posílá dva byty s tímto číslem. Zpráva pro pokyn ke čtení se skládá ze Start či Stop condition, sedmi bitů adresy zařízení a Ack bitu, to celé dvakrát. Dohromady 18 bitů. Příjem dat se skládá s osmi bitů dat a Ack bit, to celé dvakrát. Dohromady 18 bitů. Když takto přečteme 4 byty, celkem se pošle 72 bitů. Celkem na vyčtení jednoho měření musí po sběrnici přejít přibližně 100 bitů. Při rychlosti I2C 400 kHz to odpovídá teoretické maximální vzorkovací frekvenci 4 kS/s, kterou deklaruje výrobce.



**Obrázek 6.17:** Průběhy naměřené LDC1614 a detekované otočky pro čtyři různé rychlosti otáčení zásobníku.

Na závěr byla ověřena schopnost zařízení detekovat otočení zásobníku pomocí senzoru vířivých proudů s převodníkem LDC1614 při různých rychlostech. Z grafu 6.17 plyne, že při rychlosti, kdy jedna otočka trvá 0.4 s, se opět blížíme k hranici vzorkovací frekvence. Snížená citlivost je vidět na šumu, kde jsou patrné jednotlivé úrovně LSB. Zásobníkový šum má třikrát až čtyřikrát větší amplitudu než šum měřicího zařízení.

## 6.2 Vlastnosti strojově navinutých budicích cívek fluxgate

Aby mohla být navíječka využita k výrobě fluxgate senzorů, nesmí mít cívky jí navinuté výrazně horší parametry. Byl určován feedthrough, tedy "přeslech" z budicí cívky na snímací cívku, a šum senzoru na frekvenci 1 Hz, neboť dobře reprezentuje pomalé jevy.

### 6.2.1 Vady vinutí

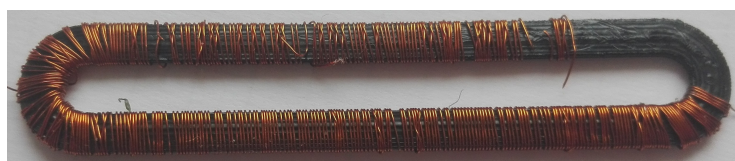
Špatné vlastnosti fluxgate senzorů mohou být způsobeny různými faktory. Jedním z faktorů, které nedokážeme ovlivnit je například složení magnetického materiálu, ze které je vyrobeno jádro. Může dojít ke změně receptury na straně výrobce a vlastnosti senzoru se zhorší. Dalším těžko ovlivnitelným faktorem je nesprávné vyžehání jádra a tedy nesprávná orientace magnetických domén.

Faktory, které lze ovlivnit, jsou například pravidelnost a hustota závitů budicího vinutí. Bylo pozorováno několik druhů vad vinutí, zde budou rozebrány jen ty nejvýznamnější a nejlépe popsání.

### ■ Přetrhávání drátu

Přetržený drát není ve většině případů možné spojit. Magnetizace jádra by v tomto místě byla rozdílná od ostatních částí a byla by zvýšená úroveň šumu. Při našem způsobu navíjení vycházíme z předpokladu, že uprostřed oblé části je místo nejméně náchylné na ovlivnění napojením drátu a proto ho využíváme k přerušení navíjení.

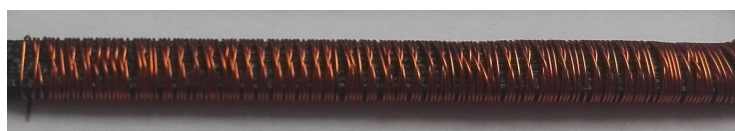
Přetrhávání drátu (viz obr. 6.18) může být způsobeno výčnělkou, které zasahují do trajektorie drátu. Může být příliš napnutý řemen, který drátu nedovolí správně sklouznout ze zásobníku. Při nesprávném zaháknutí začátku drátu na zásobník se může vytvořit smyčka, která nedovolí svlékání drátu a dojde k jeho přetržení. Neposledním z důvodů také může být špatné smýknutí drátu od zásobníku, kdy zásobník opět drát namotá a přetrhne ho. Drát se také může skřípnout mezi zásobník a jádro a dojde k jeho ustřížení.



**Obrázek 6.18:** Část jádra s přetrhanými závity. Přetrhávání bylo způsobené špatným smýkáním drátu ze zásobníku.

### ■ Křížení drátu

Ve velkém množství případů docházelo k tvorbě shluků závitů (viz obr. 6.19), které se pravidelně křížily. Byly patrné opakující se vzorce. Například kdy první dva závity šly rovnoběžně spolu doleva a třetí je křížil zprava následován mezerou. To bylo způsobeno nerovnoběžnou trajektorií drátu s rovinou zásobníku. Tento problém byl důsledkem používání blatníku zmíněného v sekci 4.2.2. Křížení drátu bylo odstraněno použitím správného tvaru přítlačného ramene a odstraněním všech překážek z trajektorie drátu.



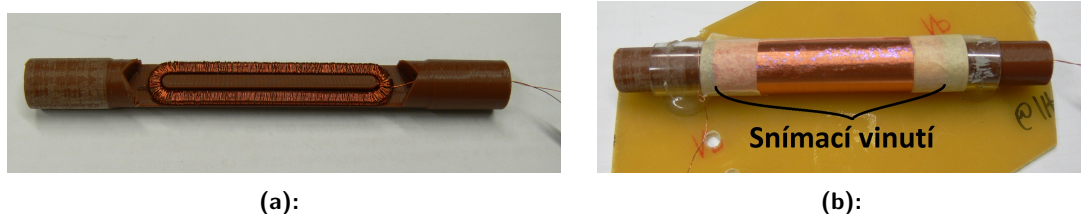
**Obrázek 6.19:** Část jádra s překříženými závity ve shlucích.

### ■ Nedostatečně utážené závity

Jedním z mála nedostatků, které stále sužují navíječku, je občasné nedotažení závitu. Drát projde středem jádra a napnutím řemenu by mělo dojít k jeho utážení na jádře. Svlékne se však větší množství drátu, než je zásobník schopný utáhnout během jedné otočky a na jádře zůstane nedotažená smyčka. Při dalším oběhu zásobníku se na tuto smyčku může chytit další závit a drát se tak hromadí, nebo se neutažená smyčka dostane pod závity a zdánlivě není vada vidět. V případě, že k neutažení závitu dojde, musí uživatel navíjení pozastavit, manuálně závit dotáhnout a pak pokračovat v navíjení. Tato závada zatím nebyla pochopena a bude snaha ji odstranit během dalšího vývoje.

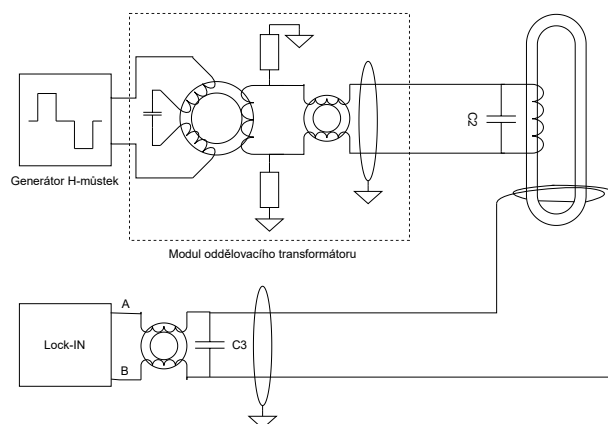
### 6.2.2 Měření parametrů cívek fluxgate

Navinutá budicí cívka byla umístěna do válcového snímacího vinutí zasunutím ve 3D vytištěném přípravku (viz obr. 6.20). Snímací vinutí bylo použito stejné pro všechny navinuté budicí cívky. Stejná byla i poloha a orientace budicí cívky, což bylo zajištěno zalícováním rysek.



**Obrázek 6.20:** Navinutá budicí cívka v přípravku a po zasunutí do válcové snímací cívky.

Pro měření šumu bylo zapotřebí určit převodní konstantu celého fluxgatu. Nejprve byla změřena velikost vektoru magnetického pole Země, které použijeme pro kalibraci. Na lock-in zesilovači byl nastaven největší možný vstupní rozsah - 1 V. Fluxgate senzor byl umístěn do stejné pozice, ve které bylo provedeno měření magnetického pole Země, byla nastavena fáze zesilovače, byla odečtena hodnota na lock-in zesilovači. Převodní konstanta (V/T), byla určena jako podíl napětí na lock-in zesilovači vůči velikosti magnetického pole. Tato hodnota byla zadána do prostředí vytvořeném v LabView, určeném k zaznamenávání dat z lock-in zesilovače a výpočtu PSD<sup>1</sup>. Všechny budicí cívky byly navinuty na stejném jádře, aby měření nebyla ovlivněna různými vlastnostmi feromagnetického jádra.



**Obrázek 6.21:** Schématické zapojení pro měření šumu fluxgatu.

Námi navinuté budicí vinutí je buzeno výkonovým H-můstkem. Oddělovací transformátor se sériovou tlumivkou se chová jako zdroj proudu pro rezonanční obvod C2-excitační vinutí. Paralelně k budicímu vinutí je připojen kondenzátor C2. Ten slouží k naladění obvodu do rezonance. Snímací vinutí s rezonančním kondenzátorem C3 bylo připojeno přes oddělovací common mode tlumivku do lock-in zesilovače, na kterém byl zapnut diferenciální mód A-B.

<sup>1</sup>Power spectral density, neboli výkonová spektrální hustota, je veličina, která udává rozložení výkonu signálu s náhodným charakterem a spojitým frekvenčním spektrem [16]

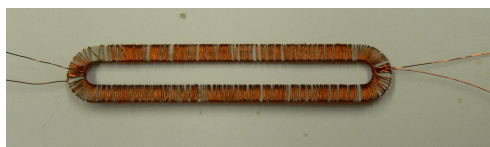
## ■ Měřená jádra

**Ručně navinuté jádro.** Jako reference bylo navinuto jedno jádro ručně. Závity byly skládány jeden vedle druhého a celkem jich na jádře bylo 500. Vinutí je pravidelné a závity se nekříží.



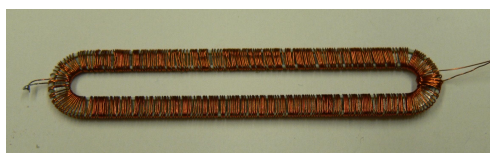
**Obrázek 6.22:** Ručně navinuté jádro, sloužící jako referenční, se 500 závity.

**Řídce a nerovnoměrně.** Pro ověření vlivu pravidelnosti závitů bylo použito jádro, jehož navíjení neprobíhalo bezchybně. Drát se při navíjení zadržoval, tvořily se nepravidelné shluky závitů mezi kterými byly mezery. Na jádro bylo navinuto přibližně 400 závitů.



**Obrázek 6.23:** Nepravidelně navinuté jádro se 400 závity.

**Řídce a rovnoměrně.** Nedostatky navíjení předchozího jádra byly odstraněny a jádro bylo navinuto pravidelněji se stejným počtem závitů 400.



**Obrázek 6.24:** Pravidelně navinuté jádro se 400 závity.

**Hustě a nerovnoměrně.** Pro ověření vlivu počtu závitů na šum byl navýšen počet závitů na 700. Tloušťka drátu nedovolovala, aby se všechny závity vešly vedle sebe a docházelo tedy k překryvu. Takováto jádra se navíjejí velmi obtížně, protože několik vrstev drátu výrazně zmenšilo vnitřní průměr jádra a zásobník při otáčení drhnul o již navinuté závity. To způsobovalo jednak degradaci izolace na drátu a také časté přetrhávání navíjeného drátu.



**Obrázek 6.25:** Hustě navinuté jádro se 700 závity.

**Hustě navinuté zatáčky.** Dalším jádrem s experimentálním rozložením závitů bylo jádro s 500 závity, kde hustota závitů v oblých částech byla dvojnásobná. Navíjení takovýchto jader bylo opět

problematické kvůli zužující se vnitřní šterbině. Zásobník drhnul o již navinuté závitě a trhal navíjený drát.



**Obrázek 6.26:** Jádru s hustě navinutými oblými částmi s 500 závitů.

**Rovnoměrně husté.** Posledním proměřeným jádrem vylo jádro se stejnými parametry (viz kap. 6.2.3). Na obou polovinách bylo rovnoměrně rozmístěno 300 a 300 závitů, které se co nejméně křížily.



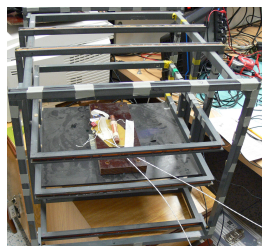
**Obrázek 6.27:** Jádru s rovnoměrně rozmístěnými 600 závitů.

## ■ Naměřená data

Jádra byla postupně umísťována do měřicího přípravku (viz obr. 6.20a). Na zdroji s výkonovým H-můstkem (viz obr. 6.28a) byla nastavena budicí frekvence 16.67 kHz a napětí tak, aby proud procházející budicí cívkou, měřený klešťovou proudovou sondou, byl špička-špička 1.3 A. Pro určení převodní konstanty pro každé jádro byl fluxgate senzor umístěn do Merrittových cívek (viz obr. 6.28b), ve kterých bylo vytvořeno homogenní magnetické pole. Na lock-in zesilovači (viz obr. 6.28c) byla nastavena fáze signálu. Následně byl fluxgate senzor umístěn do stínění, které v rovině X-Y zeslabuje okolní magnetické pole přibližně 200 000x. Osa citlivosti senzoru byla rovnoběžná s rovinou X-Y, a byl vynulován offset. Po ustálení byl v prostředí LabView zapnut sběr dat z lock-in zesilovače, jejich spektrální analýza a její průměrování.



**(a)** : Výkonový zdroj s H-můstkem.



**(b)** : Kalibrace senzoru v Merrittových cívkách.



**(c)** : Lock-in zesilovač v módu A-B.

**Obrázek 6.28:**

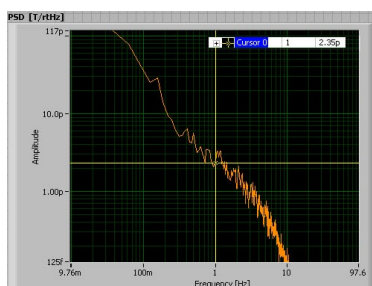
V tabulce 6.3 jsou zaneseny podrobnosti měření šumů a průniku budicího signálu námi navinutých budicích jader. První dva řádky sloužily k ověření teorie, že s vyšším proudem poklesne měřený šum, ale zvětší se průnik budicího signálu. S tím také souvisí vlastnost, kdy s vyšší teplotou poklesne šum. Při vyšším proudovém zatížení se cívka více zahřeje a méně šumí. Cílem bylo, aby z výsledků v tabulce 6.3 byla vidět korelace mezi způsobem vinutí a úrovní šumu. Chtěli jsme



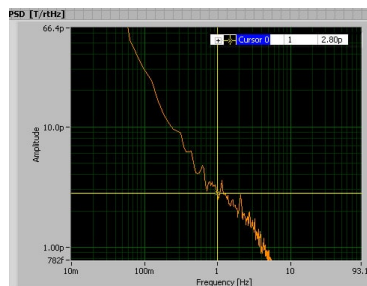
ověřit teorii, že husté a pravidelné závitů mají nejlepší vliv na magnetizaci jádra. To se částečně potvrdilo, jak je vidět z referenčního ručně navinutého jádra a rovnoměrně hustě navinutého jádra. Problémem byla opakovatelnost měření, která byla ovlivněna okolními podmínkami laboratoře. Pro věrohodnější výsledky by bylo zapotřebí od každého druhu jádra navinout alespoň pět kusů, což je však časově náročné. Zůstává otázkou, jak moc použité jádro degraduje opakovaným navíjením. Tabulka spíše vypovídá o šumu strojově navíjených jader, který je přibližně jedenapůlkrát vyšší než u ručně navíjených. Zda-li to bude dostatečné pro výrobu senzorů fluxgate, ukáže další vývoj.

Typ jádra	$U_{Bud}$ [V]	$I_{Bud}$ š-š [A]	Přev. Konst. [V/T]	Feedthrough [mV]	Šum na 1 Hz $\left[\frac{pT_{RMS}}{\sqrt{Hz}}\right]$
Referenční	10	1.0	18500	do 20	2.87
Referenční	15	1.3	20500	do 20	2.35
Řídce a nerovnoměrně	13	1.3	20244	do 50	2.80
Řídce a rovnoměrně	13	1.3	19760	do 50	3.00
Hustě a nerovnoměrně	15	1.2	22620	do 20	3.65
Hustě a nerovnoměrně	6.2	0.65	20000	do 20	3.80
Hustě zatačky	13	1.2	22469	do 20	3.80
Rovnoměrně husté	15	1.3	21116	do 50	2.71

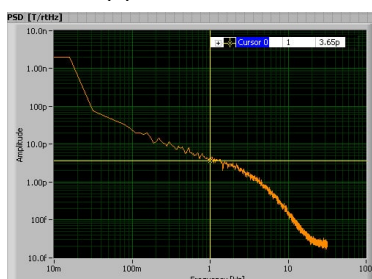
**Tabulka 6.3:** Vstupní parametry, naměřené úrovně šumu a průnik budícího signálu pro navinutá jádra.



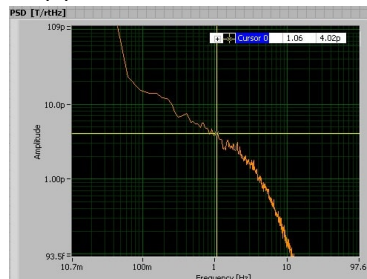
(a) : Referenční.



(b) : Řídce a nerovnoměrně.



(c) : Hustě a nerovnoměrně.



(d) : Hustě zatačky.

**Obrázek 6.29:** Úrovně šumu pro několik budících cívek na 1 Hz.

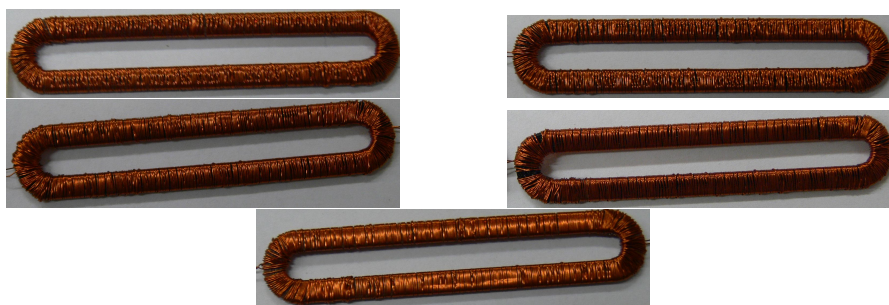


### 6.2.3 Opakovatelnost navíjení

Pro ověření opakovatelnosti navíjení bylo navinuto pět jader (viz obr. 6.30), kde každá polovina jádra měla mít 300 závitů. V tabulce 6.4 jsou výsledné navinuté počty závitů a čas potřebný pro navinutí každého z jader. Průměrná odchylka od cílového počtu závitů činí 1.27%, což je dobrý výsledek vzhledem k tomu, že používáme přímovazební regulátor. Důležitým faktorem pro dobrou citlivost a nízký šum senzoru je shodný počet závitů na obou polovinách budicí cívky. Průměrná odchylka od střední hodnoty počtu závitů na obou polovinách činí pouhých 0.75%. Průměrný čas jednoho navíjení včetně přípravy jádra a drátu je necelých 20 minut. Všechny tyto hodnoty hovoří o spolehlivosti navíječky a dobré opakovatelnosti navíjení specifických jader pro fluxgate senzory.

Jádro	Počet závitů na první polovině [ ]	Počet závitů na druhé polovině [ ]	Čas navíjení [min]
1	298	293	22
2	292	298	20
3	299	295	21
4	294	299	18
5	298	296	18

**Tabulka 6.4:** Tabulka parametrů jader navinutých pro test opakovatelnosti.



**Obrázek 6.30:** Pět navinutých jader pro ověření opakovatelnosti.



# Kapitola 7

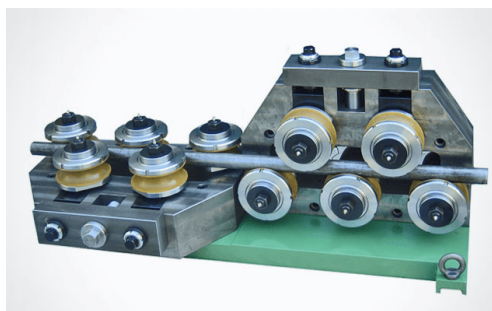
## Závěr

V rámci této diplomové práce byla navržena a zkonstruována navíječka toroidních racetrack jader. Jedná se o unikátní řešení co se týče rozměrů a tvaru navíjených jader, která jsou velmi tenká a mají úzkou vnitřní šterbinu. Jádra, která navíječka produkuje, mají dobrou citlivost, nízkou úroveň šumu a jsou srovnatelná s jádry navíjenými ručně. Časová náročnost navinutí jednoho jádra byla zkrácena na šestinu. Celé zařízení bylo integrováno na jedné podložce a je možné ho snadno přenášet, či uskladnit. K ovládání slouží příjemné uživatelské rozhraní na LCD, které uživatele vede krok za krokem, jak při navíjení postupovat.

V průběhu řešení své diplomové práce jsem navrhl několik variant mechanické části, které jsem vymodeloval v prostředí Fusion 360. Tyto prototypy jsem realizoval pomocí 3D tisku, testoval a dále iteroval, než jsem došel k finální verzi. Během vývoje jsem zároveň navrhoval řídicí elektroniku na nepájivém poli. Navrhl jsem plošný spoj, který jsem osadil a zakomponoval do navíječky. Naprogramoval jsem řídicí firmware a otestoval funkčnost celého zařízení. Na závěr jsem provedl měření vlastností navinutých jader a test opakovatelnosti, s jakou je možné jádra vyrábět.

### 7.1 Future work

I přes dobrou funkčnost navíječky by bylo vhodné dokončit ještě poslední úpravy. V rámci dalšího vývoje bude navíječka rozšířena o držák cívky s drátem pro plnění zásobníku. Drát by měl být konstantně napnutý a měl by procházet přes vyrovnávací kladky (viz obr. 7.1), které by ho deformovaly tak, aby drát přišel o paměťový efekt. To by mělo mít za efekt pravidelnější skládání závitů na jádro.



Obrázek 7.1: Průmyslová aplikace vyrovnávání paměťového efektu drátu.

Též by bylo vhodné předělat přímovazební regulátor rychlosti posuvu a otáčení navíjecí hlavy na zpětnovazební regulátor. Nejspíše bude dostačující proporcionální regulátor, který na základě změny doby otočky zásobníku upraví rychlost pohybu jádra.

V poslední řadě by se hodilo rozšířit uživatelské rozhraní o další funkce jako například zadávání parametrů cívky na navíječce, zatímco nyní je možné tyto parametry měnit pouze přímo v programu.

V případě, že bychom konstruovali druhou navíječku, která by pracovala na stejném principu, bylo by vhodné zakoupit zásobník s menší kapacitou a menším průřezem. Protože navíjíme každou polovinu jádra zvlášť, stačí nám poloviční délka drátu, než s kterou jsme při výběru zásobníku počítali. Zásobník s menším profilem by se lépe pohyboval uvnitř jádra a bylo by možné navinout více vrstev drátu na sebe.

# Příloha A

## Literatura

- [1] F. Auty, “Method of winding toroidal coils,” Mar 1925.
- [2] D. C. Harder, “Machine for winding toroidal coils,” Mar 1954.
- [3] C. Gramling, “A wwii submarine-hunting device helped prove the theory of plate tectonics,” Sep 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencenews.org/article/fluxgate-magnetometer-submarine-plate-tectonics>
- [4] P. Ripka and A. Típek, *Modern Sensors Handbook*. Wiley Online Library, 2010.
- [5] “Why fr4 material is commonly used in pcb fabrication?” Jul 2021. [Online]. Available: <https://www.protoexpress.com/blog/why-fr4-material-in-pcb-fabrication/>
- [6] R. Fahrbach, “Method and apparatus for winding toroidal coils,” Mar 1967.
- [7] *DCBL8015A user manual rev. A*, Changzhou Long Motor, 10 2021.
- [8] “Lazy susan,” Apr 2010. [Online]. Available: <http://www.worldwidewords.org/qa/qa-laz1.htm>
- [9] 3DPRINTINGWORLD, “Square rail linear ball bearing,” Mar 2018. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:2816093>
- [10] V. Pedchenko, “Shotgun shells explained - types of ammo (birdshot, buckshot, slugs),” Feb 2021. [Online]. Available: <https://www.rem870.com/2016/01/25/shotgun-shells-explained-types-of-ammo-birdshot-buckshot-slugs/>
- [11] T. Hájek, “Plošňáky.cz - technologie.” [Online]. Available: <https://www.plosnaky.cz/technicke-parametry>
- [12] *DRV5021 Low-Voltage, Unipolar, Digital-Switch Hall Effect Sensor*, Texas Instruments, 10 2021.
- [13] *LDC1614 Multi-Channel 28-Bit Inductance to Digital Converter*, Texas Instruments, 10 2021.
- [14] “Ldc1614 - library to communicate with ldc1614.” [Online]. Available: <https://os.mbed.com/users/bobgiesberts/code/LDC1614/>
- [15] “i2c - api references and tutorials | mbed os 6 documentation.” [Online]. Available: <https://os.mbed.com/docs/mbed-os/v6.15/apis/i2c.html>
- [16] J. Vodrážka, “Spektrální kompatibilita digitálních přenosových systémů pro účastnická metalická vedení xdslj,” Jul 2004. [Online]. Available: <http://access.fel.cvut.cz/view.php?cisloclanku=2004072809>