

Bakalářská práce



**Fakulta elektrotechnická
Katedra řídicí techniky**

Fontána s Gaussovou puškou

Jakub Starý

**Vedoucí práce: Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.
Studijní program: Kybernetika a robotika
Květen 2019**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Starý** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **466313**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Fontána s Gaussovou puškou

Název bakalářské práce anglicky:

Coil Gun Fountain

Pokyny pro vypracování:

Postavte elektromechanickou fontánu, která bude schopna střílet kovové kuličky na předem určené pozice pomocí Gaussovy pušky a elektromagnetického vychylovacího systému.

1. Navrhněte systém pro vystřelování kovových kuliček s jednostupňovou, nebo vícešupňovou Gaussovou puškou.
2. Navrhněte systém pro vychylování vystřelených kuliček, aby bylo možné řídit místo jejich dopadu.
3. Vytvořte matematický model pro účely návrhu geometrického uspořádání a řízení systému.
4. Vytvořte demonstrační programy například animovanou fontánu nebo hraní na zvonkohru (pokuste se zvládnout i hraní akordů).

Seznam doporučené literatury:

- [1] Cook, J. S. DIY Coilgun! <https://blog.hackster.io/diy-coilgun-3c4400460406> [online]
[2] Brown, F. T. (2006). Engineering system dynamics: a unified graph-centered approach. CRC press.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Jiří Zemánek, Ph.D., katedra řídicí techniky FEL

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

Datum zadání bakalářské práce: **15.02.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **24.05.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **20.09.2020**

Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Jako první bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Jiřímu Zemánkovi, Ph. D. nejen za námět projektu, ale i za konstruktivní odborné konzultace a zpřístupnění 3D tiskáren, CNC frézky a laseru.

Dále pak děkuji celému týmu AA4CC za cenné rady a podporu v projektu. Jmenovitě Ing. Filipu Richterovi za pomoc s prací v prostředí Comsol multiphysics v začátku práce a za asistenci při měření sil reálných cívek.

Také děkuji Bc. Křištofu Pučejdlovi za konzultace ohledně mechanických konstrukcí a 3D tisku.

Rád bych poděkoval i Ing. Ondřeji Hanušovi z katedry měření za konzultaci ohledně napájecího zdroje.

Díky patří také mé rodině za podporu při studiu a vřelý zájem o výsledky mé práce.

Prohlášení

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

Jakub Starý

Ve Velkém Oseku, 22. května 2019

Abstrakt Abstract

Tato práce se v první části zabývá sestavením funkčního modelu Gaussovy pušky, angl. Coil gun, pomocí které jsou vystřelovány ocelové ložiskové kuličky s průměrem 8.713 mm vertikálně vzhůru. Urychlovací systém je tvořen dvěma cívkami.

Další část se zabývá vytvořením elektromagnetického vychylovacího mechanismu, pomocí kterého je možné řídit trajektorii vystřelené kuličky. Vychylovací systém se skládá ze tří cívek.

V rámci této práce byl vytvořen automatický podavač, který dává kuličky do hlavně. Tento systém využívá krokový motor, který řadu kuliček posouvá spodem do hlavně, kde je vystřelovaná kulička zachycena servo motorem.

Součástí tohoto podavače je i sběrací systém, který zachycuje vystřelené kuličky a odvádí je zpět zásobníku podavače. Kuličky jsou zachytány pomocí šestice desek, které je možné složit.

Součástí práce je návrh i fyzická realizace spínacího obvodu, který poskytuje galvanické oddělení od řídicího systému.

Poloha kuliček je sledována pomocí optických závor, které jsou připojeny do obvodu upravující jejich výstupní signál.

V závěru práce je zmíněn návrh napájení celého systému.

Klíčová slova:

Gaussova puška, Coil gun, Elektromagnetické vychylování, Podávací mechanismus, Sběrací systém

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Zemánek, Ph.D.
Katedra řídicí techniky: KN:E – 11
Karlovo náměstí 13/E
121 35, Praha 2

The first part of the thesis describes the construction of a functional coil gun model which fires steel bearing balls vertically upwards. Each individual ball has a diameter of 8.713 mm. The acceleration system consists of two coils.

The next part of the thesis deals with the creation of an electromagnetic deflection mechanism which creates the means to control the trajectory path of the fired ball. The deflection system consists of three coils.

For the purpose of this thesis, an automatic serving mechanism was created which serves balls into a barrel. A stepper motor then moves the row of balls down into the barrel where a fired ball is caught by the servo motor.

Part of this serving mechanism is also a collection system that captures the fired balls and returns them into the serving tray. The balls are captured by six foldable plates.

Part of the thesis is the design and build of a switching circuit, which ensures the galvanic separation from the control system.

The position of the balls is monitored by optical barriers that are connected to a circuit adjusting their output signal.

A concept which further specifies how the entire system is powered can be found at the end of this thesis.

Keywords:

Gauss rifle, Coil gun, Electromagnetic deflection, Serving mechanism, Collecting mechanism

Title translation:

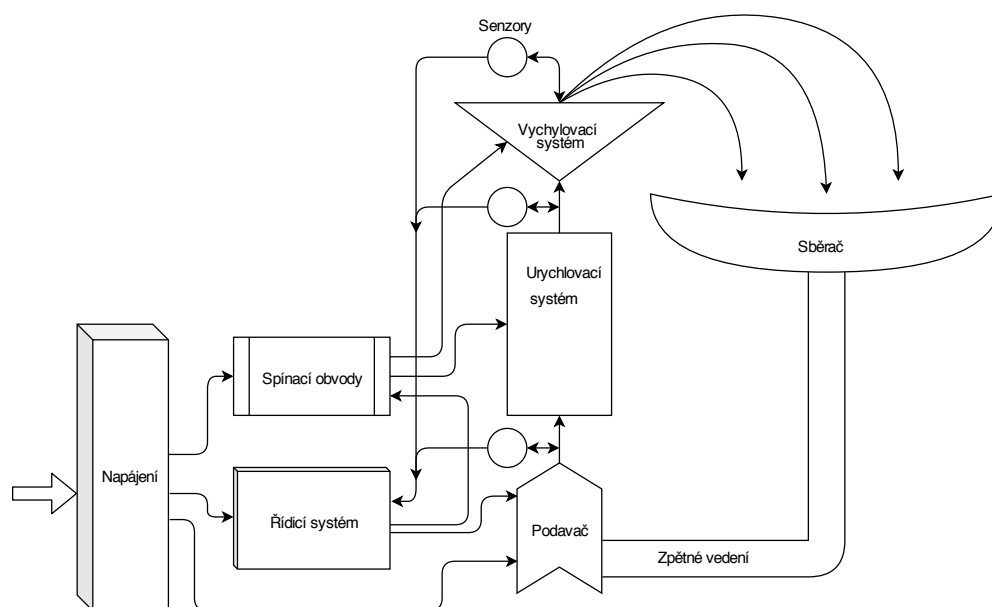
Coil Gun Fountain

Obsah

1. MOTIVACE	1	6.4. Výsledky simulace vychylování.....	26
2. ÚVOD	3	7. VYCHYLOVACÍ CÍVKY	28
2.1. Základní princip urychlování	3	7.1. Konektorování cívek.....	29
2.2. Spínací prvky.....	4	7.2. Testování vychylovací cívky.....	29
2.3. Napájení cívek.....	4	7.3. Úprava spínacího obvodu.....	30
2.4. Senzory měření polohy.....	5	7.4. Drát vinutí vychylovací cívky.....	32
2.5. Vychylovací systém.....	5	7.5. Držák vychylovacích cívek	34
3. SIMULACE VYSTŘELOVÁNÍ	6	7.6. Testování vychylovacích cívek	34
4. VYSTŘELOVACÍ CÍVKA	9	8. PODAVACÍ SYSTÉM KULIČEK	37
4.1. Průměr drátu	9	8.1. Návrhy podavacího systému	37
4.2. Tavný proud drátu	9	8.2. První realizace podavacího	
4.3. Odpor vodiče.....	10	mechanismu	38
4.4. Indukčnost cívky.....	10	8.3. Testování podavače.....	40
4.5. Časová konstanta cívky	12	8.4. Druhá realizace podavacího	
4.6. Kostra cívky a její navinutí	12	systému	41
4.7. Porovnání reálných parametrů		9. SBĚRAČ KULIČEK	42
cívky s vypočtenými.....	13	9.1. Sběrací trychtýř	42
5. REALIZACE URYCHLOVACÍHO OBVODU...	14	9.2. Vratná dráha	43
5.1. Měření rychlosti projektilu	15	9.3. Spojení sběrače a podavače	45
5.2. Spínání 2. stupně urychlovacího		10. FINÁLNÍ KONSTRUKCE	46
obvodu.....	16	10.1. Držáky plošných spojů.....	46
5.3. Korekce opakovatelnosti		10.2. Napájení systému	46
vystřelování	19	10.3. Napájení pro odpalovací obvody ...	47
6. SIMULACE VYCHYLOVÁNÍ	22	10.4. Napájení pro krokový motor	48
6.1. Minimalizace množství měřených		10.5. Napájení spínacího obvodu a	
dat ze simulace.....	23	řídící desky.....	48
6.2. Interpolace mezi měřenými body		10.6. Desky sběrače	48
ze simulace.....	24	11. ZÁVĚR	50
6.3. Simulace vychýlení letícího			
projektilu.....	25		

1. MOTIVACE

Hlavní motivace pro tvorbu systému, který bude schopen vystřelovat a vychylovat ocelové kuličky, je dělena na dvě části. V první pasáži se zaměříme především na základní funkčnost modelu. Tím se myslí zvládnutí vystřelování kuliček kolmo vzhůru, následné doplnění o vychylovací systém a pozdější automatické doplňování kuliček a jejich sbírání. Tímto stylem vytvoříme systém, který bude schopen sériově vystřelovat konkrétní počet kuliček stále dokola a bude připraven na iterativní zpřesňování řídicího algoritmu bez nutnosti přítomnosti operátora, který bude kuličky sbírat a opakovaně nabíjet projektil do hlavně.

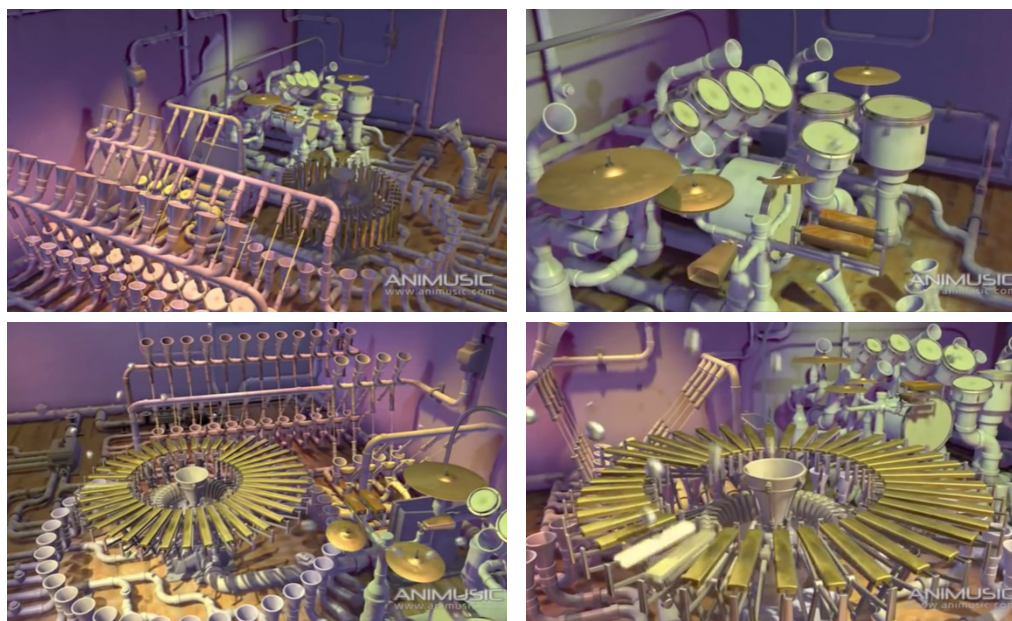


Obr. 1.1.: Blokové schéma projektu fontány s Gaussovou puškou

Druhá pasáž práce na tomto projektu bude zahrnovat doplnění o senzorku, která bude zaznamenávat pohyb kuličky po vychýlení a místo jeho dopadu v závislosti na provedeném akčním zásahu. Celkově systém vychylování nelze řídit standardní okamžitou zpětnou vazbou, neboť máme jediný pokus na provedení akčního zásahu ať už u cívek urychlovacích nebo vychylovacích. Poté, co projektil prolétne tímto polem již není možné jeho dráhu zpětnovazebně změnit. Můžeme pouze monitorovat místo dopadu vystřelené kuličky.

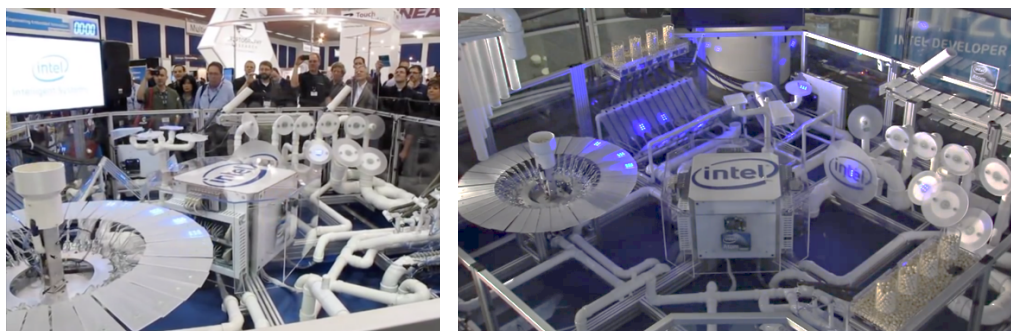
Takto vzniklý systém lze velmi jednoduše využít jako dekorativní fontánu demonstrující schopnost vychylování projektilu na předem dané místo. Umístíme-li do předem daných míst dopadu ozvučné desky xylofonu nebo metalofonu, vytvoříme elektronicky ovládaný hudební nástroj s velmi zajímavým efektem úderů do desek pomocí vychýlených kuliček.

Původní inspirací pro tento projekt byla videoanimace Pipe Dream Animusic.com. Na této animaci nebyla funkční pouze fontána, ale i hraní na bicí nástroje, varhany nebo struny.



Obr. 1.2.: Animace Animusic.com

Hlavním benefitem našeho projektu je fakt, že všechny jeho komponenty jsou umístěny staticky a elektromagnetické vychylování je naprosto tiché, což je značná výhoda oproti již vzniklému projektu společnosti Intel se stlačeným vzduchem.



Obr. 1.3.: Robotický hudebník – Představení firmy Intel

Při naklonění tohoto systému do vodorovné polohy by bylo možné proud kuliček vychylovat proti ploše a tím docílit provádět perforaci nebo značení materiálu.

Na začátku práce jsme ustanovili základní postup, který budeme v rámci projektu následovat. Základem pro vytvoření první z cívek, a to konkrétně cívek vychylovacích, jsou numerické simulace, pomocí kterých budeme zjišťovat, do jaké míry jsou představy o urychlování a vychylování reálné. V další části se zaměříme na realizaci fyzického modelu cívky. Současně s ním vytvoříme návrh spínacího obvodu, který bude dostatečně spolehlivý a především bezpečný. Dále budeme pokračovat doplněním projektu o systém senzorů. Poté se zaměříme na systém automatického podávání kuliček do hlavně před výstřelem. Další postup zahrnuje realizaci sběrače, který bude mít za úkol vystřelen kuličky zachytit a přepravit zpět do podavacího systému. Poté je ukončen proces realizace fyzického modelu a je možné přejít k tvorbě systému řízení.

2. ÚVOD

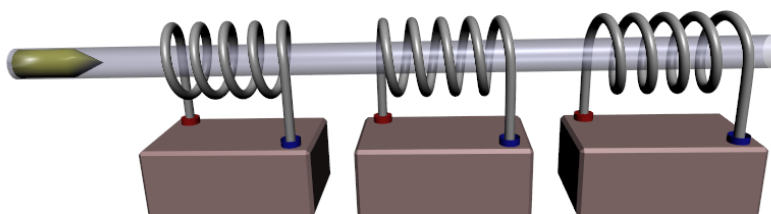
Cílem této práce je pomocí Gaussovy pušky, angl. Coil gun, vystřelovat kovové kuličky a následným elektromagnetickým systémem vychýlit jejich dráhu letu a ovlivnit místo dopadu.

Základem je tedy sestavení systému, který bude kuličky urychlovat. K tomuto účelu se používá Gaussova puška, která je tvořena jednou nebo více cívkami se vzduchovým jádrem umístěné na vystřelovací hlavni [1].

2.1. ZÁKLADNÍ PRINCIP URYCHLOVÁNÍ

Protéká-li proud cívkou, dojde k vytvoření magnetického pole. Toto pole svým silovým účinkem vtahuje feromagnetické projektily do středu cívky. Pokud proud cívkou zastavíme ve správném čase, dojde k utlumení magnetického pole a kinetická energie předaná prostřednictvím tohoto pole projektilu zajistí setrvání kuličky v pohybu. Časový okamžik, do kterého je potřeba pole utlumit, je vázaný na polohu kuličky uvnitř cívky. Jak již bylo řečeno, pole směřuje do středu cívky nezávisle na její orientaci, a tedy je třeba pole utlumit do chvíle, kdy se kulička bude nacházet právě ve středu cívky. Jinak by došlo k průletu skrze střed, poté by následovalo její zastavení a návrat do středu s opačnou rychlostí.

Tento princip urychlování lze násobit řazením cívek za sebe [2]. Poté jsou cívky spínány postupně v závislosti na průletu urychlovaného projektilu a dodávají tak kuličce další kinetickou energii průletem každou z cívek. Pokud využíváme maximální možnou dobu sepnutí cívek, předávaná energie je ve své podstatě kvantována. Tato varianta se nazývá vícestupňová Gaussova puška, angl. multistage Coil gun.

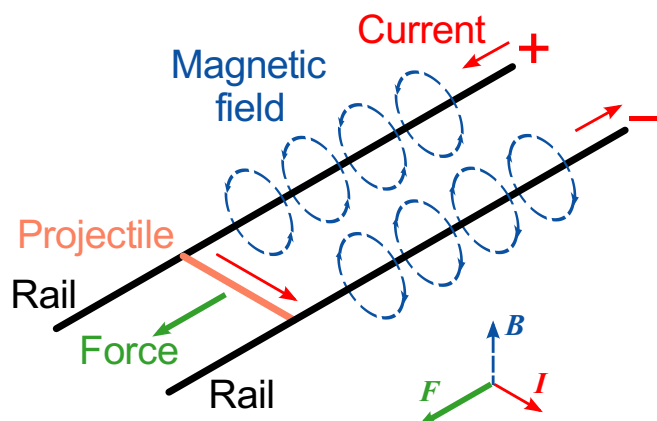


Obr. 2.1.: Vícestupňová Gaussova puška

Další formou je umístění párové cívky jako součást projektilu. Případně lze využít velmi silný magnet na kolejnici. Zde se urychluje jedna z kuliček do té doby, než narazí na magnet, z kterého odrazí další kuličku umístěnou na druhé straně.

Urychlení projektilu je možné docílit i pomocí elektromagnetického děla, angl. rail gun. Vodivý projektil je v tomto případě poháněn Lorentzovou silou. Aby došlo k urychlení je třeba vybudit velmi silný elektrický impuls. Elektromagnetické

dělo je tvořeno dvěma kolejnicemi, na které je přivedeno napájení. Umístěním kovového projektilu mezi kolejnice dojde k uzavření elektrického obvodu. Vzniká Lorentzova síla, která působí ve směru kolejnic. Tímto směrem urychluje vystřelovaný projektil.



Obr. 2.2.: Princip urychlování pomocí elektromagnetického děla

Hlavními problémy je nutnost fyzického dotyku projektilu a kolejnic, dále pak potřeba obrovského množství energie na provoz. Při výstřelu větších zařízení vzniká plazma, která výrazně poškozuje kolejnice.

2.2. SPÍNACÍ PRVKY

Abychom mohli Gaussovou pušku řídit, musíme zajistit spínání jednotlivých cívek. Existuje několik řešení. Jako nejjednodušší a zároveň nejméně efektivní se uvádí izolační mezera, která je proražena výbojem ve chvíli, kdy napětí mezi elektrodami dosáhne určité hranice.

Spolehlivější řešení nabízí spínání pomocí polovodičových tranzistorů. Nejčastěji se používají buď bipolární IGBT nebo unipolární MOSFET tranzistory [2]. Dále se často objevuje zapojení s tyristorem [3]. Tyto obvody jsou doplněny ochrannými diodami, které zajistí bezpečné samo-vybytí cívky po rozepnutí obvodu.

2.3. NAPÁJENÍ CÍVEK

Zdroj napájení cívek je řešen dvěma různými způsoby. První možnost je nabíjení kondenzátorové baterie na velmi vysoké napětí. Toho se docílí sériovo-paralelním zapojením kondenzátorů a step-up měničů. Veškerá energie uložená do kondenzátorů se pak v jeden okamžik vybije do cívek. Nevýhodou je časově náročné nabíjení a přítomnost velmi vysokého napětí, řádově kilovoly. Další nevýhodou je velikost kondenzátorových baterií.

Další variantou je použití série lithiových článků. Tyto baterie mají výhodu vysoké energetické hustoty a jsou tak schopny dodat velmi vysoký zkratový proud po dobu sepnutí. Nevýhodou v tomto případě je, že se baterie zahřívají a výrazně se snižuje jejich životnost.

2.4. SENZORY MĚŘENÍ POLOHY

Existují dva základní způsoby časování spínání proudu cívkami. První z nich je časování předpočítanou kapacitou kondenzátorů. Energie z kondenzátoru se vybije do cívky dříve, než projektil proletí jejím středem. Tato varianta s sebou nese fakt, že nejvíce energie je předáno v krátkém časovém okamžiku a jak se kondenzátor vybíjí proud cívkou klesá po exponenciále, a tak je předáváno energie výrazně méně.

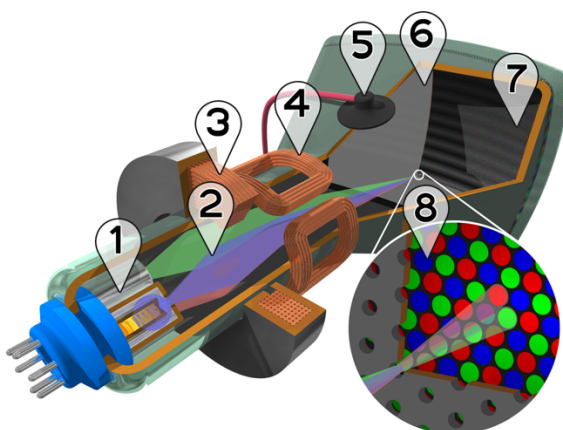
Druhá varianta je tvořena senzorem polohy, konkrétně optickou závorou [2]. Dvojice fototranzistoru a fotodiody je umístěna bezprostředně za cívku. Používají se projektily, které jsou delší než cívka samotná. Ve chvíli, kdy projektil přeruší optickou závoru (jeho střed ještě před středem cívky), dojde k rozepnutí napájení pro konkrétní cívku a projektil je tak vystřelen. Tato varianta klade požadavek na velikost projektilu, a to striktně větší, než je délka cívky. Dále je nutné vyvrtat dvě díry do hlavy pro umístění fototranzistoru a led diody.

2.5. VYCHYLOVACÍ SYSTÉM

Známý princip vychylování, které je dobře zdokumentováno, je systém vychylování proudu elektronů u starých obrazovek CRC. Existují dva základní principy.

Vychýlení elektrostatické, jehož úhel vychýlení je do 30° , obsahuje vychylovací systém tvořen dvěma dvojicemi vychylovacích desek. Jeden pár zajišťuje vertikální a druhý horizontální vychýlení. Tento způsob vychylování je možné používat i pro vysoké frekvence a tak tvoří základ pro analogové osciloskopy.

Obdobně pracuje vychylování elektromagnetické, které k vychýlení používá čtveřici cívek navinutých kolem obrazovky [4]. Opět dvě zajišťují vertikální a dvě horizontální vychýlení. Hlavní výhodou je vychýlení od 55° do 114° [5], což snižuje hloubkový rozměr obrazovky, avšak není možné je použít pro vysoké frekvence.



Obr. 2.3.: Struktura CRC obrazovky. 1 – Elektronové dělo, 2 – Svazky elektronů, 3 – Zastřovovací cívky, 4 – Vychylovací cívky, 5 – Připojení anody, 6 – Maska, 7 – Luminofor, 8 – Detail luminoforu

3. SIMULACE VYSTŘELOVÁNÍ

Jako první jsme se zaměřili na urychlovací cívku, která bude tvořit základ našeho systému. Dodá kuličce dostatečnou energii, která bude využita na vystřelení do výšky. Při simulaci jsme využili již hotový simulační program pro systém magnetické manipulace MAGMAN a upravili ho tak, aby splňoval naše požadavky.

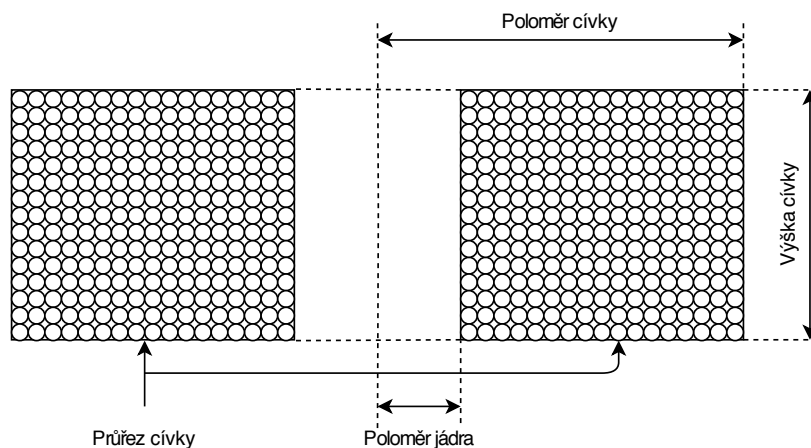
Při simulaci jsme uvažovali pouze jednu cívku se vzduchovým jádrem o takovém průměru, aby jím prošla ocelová kulička s průměrem 10 mm. Prováděli jsme simulace v prostředí Comsol průletu kuličky skrze jádro a měřili síly na ní působící. Testovali jsme několik různých tvarů cívky. Aby simulace byly rovnocenné, udržovali jsme konstantní proud cívku, konkrétně 1 A a konstantní počet závitů – 3 000. Dále jsme udržovali konstantní plochu průřezu cívky, myšleno plocha v průřezu – 4,2 cm², kudy prochází vodič. Sílu působící na ocelovou kuličku lze odvodit z vzorců pro magnetickou indukci cívky a její silové účinky,

$$\mathbf{B} \cong \mu \frac{NI}{l}, \quad (4.1.)$$

$$\mathbf{F} = Q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (4.2.)$$

kde \mathbf{B} je magnetická indukce, μ je permeabilita prostředí, N je počet závitů cívky, kterou protéká proud I a jejíž výška je l . Dále pak \mathbf{F} je síla působící na bodový náboj Q , který se pohybuje rychlostí \mathbf{v} v magnetickém poli.

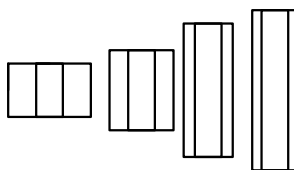
Pro tento průřez se dá z počtu závitů vypočítat poloměr cívky. Tedy jediný parametr, který jsme měnili byla výška cívky.



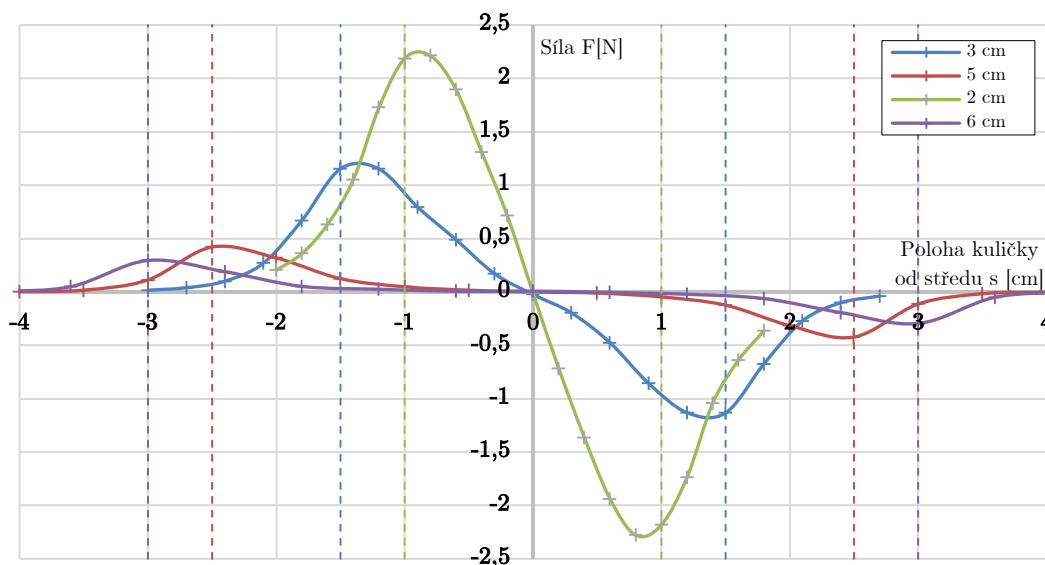
Obr. 3.1.: Řez nízké cívky, definice názvů velikostí cívky

Pro 4 vybrané typy tvarů cívek byly nasimulovány průběhy sil působící na projektil pohybující se v jádru. Vzhledem k tomu, že jsme měnili výšku cívky, tedy i cesta projektilu skrze cívky se s rostoucí výškou prodlužovala, bylo vhodné implementovat dynamickou změnu kroku změny polohy, po kterém se projektil pohyboval tak, abychom získali

stejný počet náměrů v relevantní oblasti měření. Zajímala nás síla působící ve směru osy jádra cívky. Síly v ostatních směrech, kolmé na osu jádra cívky, byly o 2 řády menší.



Obr. 3.2.: Testované tvary cívek, Zleva: výška 2, 3, 5, 6 cm



Obr. 3.3.: Porovnání sil působících na projektil pro různé tvary vystřelovací cívky

Z grafu obrázku 3.2. je zřejmé, že největší síla působí na projektil, pokud se jeho střed nachází právě na kraji cívky. Tyto kraje jsou vyznačeny svislou přerušovanou čarou se stejnou barvou příslušící danému průběhu. Z obrázku vyplývá, že vyšší síly jsou schopny vyvinout cívky kratší.

Dále jsme z těchto průběhů vypočítali maximální možnou energii, kterou jsou jednotlivé typy cívek schopny projektilu předat, dle známého vzorce

$$E_C = \int_{s_1}^{s_2} F \cdot ds \rightarrow \sum_{i=0}^{s/2} F_i \cdot \Delta s. \quad (4.3.)$$

Při přechodu do diskrétní podoby jsme použili dopředné metody, kdy uvažujeme, že se je síla mezi dvěma měřenými body konstantní, což neodpovídá realitě, ale pro představu o kvantitativním množství energie předané kuličce je dostačující. Dále je důležité podotknout, že integrujeme (sčítáme) pouze přes polovinu měřeného intervalu. Neboť v druhé polovině má působící síla opačnou hodnotu. Tato vlastnost způsobí, že pro předání maximální energie budeme muset proud cívkou zastavit právě v tu chvíli, kdy střed kuličky bude uprostřed cívky. Případně tento výpočet můžeme vylepšit využitím lichoběžníkové metody, výsledný vzorec přejde do tvaru

$$\sum_{i=0}^{s/2} F_i \cdot \Delta s \rightarrow \sum_{i=0}^{\frac{s}{2}-1} \frac{F_i + F_{i+1}}{2} \cdot \Delta s \quad (4.4.)$$

Tabulka 3.1.: Vypočítaná velikost energie, kterou cívka s testovanou velikostí předá projektilu, odpovídající rychlost a přibližná výška výstřelu kolmo vzhůru

Výška cívky [cm]	Celková energie [mJ]	Příslušná rychlost [m/s]	Výška výletu [cm]
2	24.37	3.44	60
3	14.52	2.66	36
5	5.31	1.61	13
6	3.77	1.36	9

Z tabulky 3.1. je zjevné, že nejvyšší energie je předána cívku s nejmenší testovanou výškou. Tuto hypotézu, že zpracování cívky se stejnými parametry má za následek zvýšení síly působící na projektil a zároveň zvýšení energie předané kuličce, jsme ověřili další simulací s cívkou, jejíž výšku jsme nastavili na hodnotu 10 mm, oproti nejmenší testované cívce 20 mm. Hypotéza byla potvrzena s celkovou vypočtenou hodnotou energie $E = 43.2$ mJ.

Vzhledem k tomu, že charakteristika síly je kolem středu cívky velmi strmá, časování a odhad polohy kuličky uvnitř hlavně by musel být velmi přesný, aby došlo k vypnutí proudu cívkou v přesně stanoveném čase, resp. místě, kde se bude nacházet střed kuličky. Z tohoto důvodu jsme se rozhodli pro ponechání výšky cívky 20 mm a tuto cívku jsme se rozhodli navinout.

4. VYSTŘELOVACÍ CÍVKA

Na základě výsledků simulace jsme se rozhodli vytvořit cívku s výškou 20 mm, průměrem 31 mm a průměrem jádra 10 mm. Jako první jsme ale provedli několik výpočtů.

4.1. PRŮMĚR DRÁTU

Vzhledem k tomu, že jsme nastavili průřez cívky na hodnotu 4,2 cm² a počet otáček na 3000, pak snadno vypočteme průřez drátu příslušící jednomu drátu. Budeme-li uvažovat ideální navrstvení drátů na sebe, pak prostor pro mezery mezi dráty s kulatým průřezem bude tvořit 14 % celkového průřezu, a tedy pro průřez jednoho drátu bude platit

$$S_{di}[\text{mm}^2] = \frac{(1 - 0.14) \cdot \left(\frac{S_c}{2}\right)}{3000} = \frac{0.86 \cdot 210}{3000} = 0.06 \text{ mm}^2. \quad (5.1)$$

Průměr drátu můžeme snadno vypočítat ze vzorce pro výpočet obsahu kruhu,

$$S_{di} = \pi \cdot r^2 \rightarrow r = \sqrt{\frac{S_{di}}{\pi}} \rightarrow d_i[\text{mm}] = 2 \cdot \sqrt{\frac{S_{di}}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{0.06}{\pi}} = 0.277 \text{ mm}. \quad (5.2)$$

Drát s tímto průřezem není problém sehnat a můžeme tedy pokračovat v dalších výpočtech, abychom zjistili, zda cívka splňuje naše požadavky.

4.2. TAVNÝ PROUD DRÁTU

Pokračujeme výpočtem maximálního proudu, který tímto drátem může téci. Je nutné podotknout, že drát musí být izolovaný a izolace drátu zabírá zhruba desetinu jeho průměru. Pro tavný proud pro vodiče s průměrem do cca 0.35 mm platí vztah,

$$I_{tav} = \frac{(d_i \cdot 0.9) - 0.005}{k_{Cu}}, \quad (A, \text{mm}, -), \quad k_{Cu} = 0.034, \quad (5.3)$$

$$I_{tav} = \frac{(0.277 \cdot 0.9) - 0.005}{0.034} = 7.2 \text{ A} \quad (5.4)$$

Tento proud je naprosto dostačující. Vzhledem k tomu, že naše simulace byly prováděny pro proud 1 A. Pravdou je, že při tomto proudu se cívka roztaví, při nižších proudech se bude pouze zahřívat. Aby došlo k roztavení, musel by tavný proud drátem téci trvale a v našem případě budeme tento proud spínat do cívky po dobu řádově desítky mikrosekund. Pokud nedojde k závažné chybě ve spínacím obvodu, měla by se cívka pouze mírně zahřívat.

4.3. ODPOR VODIČE

Na to, abychom zjistili, jaké bude třeba napětí ke spínání simulované 1 A, musíme odhadnout odpor vodiče cívky. K tomu se budeme snažit výpočtem odhadnout délku drátu, kterým bude cívka namotána. K přesnému výpočtu bychom museli počítat délku spirály, spokojíme se však se středním odhadem poloměru navíjení. Pro délku drátu pak bude platit

$$l = 2\pi r_v \cdot N, \quad (\text{m, m, -}), \quad (5.5.)$$

kde pro poloměr r_v platí vztah,

$$r_v = \frac{r_{\text{coil}} - r_{\text{core}}}{2} + r_{\text{core}}, \quad (5.6.)$$

$$l = 2\pi \cdot \left(\frac{0.0155 - 0.005}{2} + 0.005 \right) \cdot 3000 = 193 \text{ m}. \quad (5.7.)$$

Ze znalosti délky vodiče, průřezu a jeho měrného odporu můžeme vypočítat celkový odpor cívky,

$$R = \frac{\rho_{Cu} \cdot l}{S_d}, \quad (\Omega, \Omega\text{m, m, m}^2), \quad \rho_{Cu} = 0.0169 \cdot 10^{-6}, \quad (5.8.)$$

$$S_d = \pi \cdot \left(\frac{d_i \cdot 0.9}{2} \right)^2, \quad (5.9.)$$

$$R = \frac{0.0169 \cdot 10^{-6} \cdot 193}{\pi \cdot \left(\frac{0.277 \cdot 10^{-3} \cdot 0.9}{2} \right)^2} = 67 \Omega. \quad (5.10.)$$

Ze zjištěného odporu je zjevné, že pro udržení proudu 1 A vinutím po ustálení přechodového děje bude potřeba napětí 67 V. To lze zajistit sériovým spojením dvou regulovatelných zdrojů.

4.4. INDUKČNOST CÍVKY

Nyní nám pouze zbývá zjistit, jak rychlá cívka bude. Tedy spočítat časovou konstantu. K tomu potřebujeme zjistit indukčnost cívky, kterou chceme navinout. Jako první přiblížení jsem použil jednoduchý výpočet pro cívku typu solenoid. Pak pro indukčnost platí

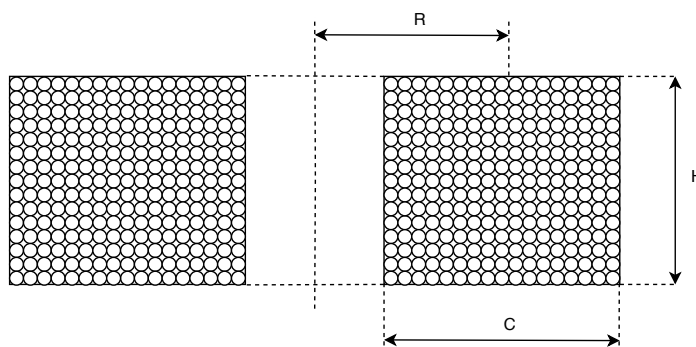
$$L = \frac{\mu \cdot N^2}{l} \cdot S, \quad (\text{H, Hm}^{-1}, -, \text{m, m}^2), \quad \mu = 4\pi \cdot 10^{-7}, \quad (5.11.)$$

$$S_v = \pi \cdot r_{\text{coil}}^2 - \pi \cdot r_{\text{core}}^2, \quad (5.12.)$$

$$L = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3000^2}{193} \cdot 6,76 \cdot 10^{-4} = 382 \text{ mH}. \quad (5.13.)$$

Tento odhad platí pro cívku typu solenoid, kdy její délka je výrazně větší než šířka. Hledal jsem tedy přesnější vzorec na výpočet cívek tohoto typu a našel jsem jednoduchý empirický vzorec H. A. Wheelera,

$$L = 0.02 \cdot \frac{R^2 \cdot N^2}{6R + 9H + 10C}, \quad (\text{mH, m, -, m, m, m}), \quad (5.14.)$$



Obr. 4.1.: Definice proměnných Wheelerova vzorce na řezu cívky

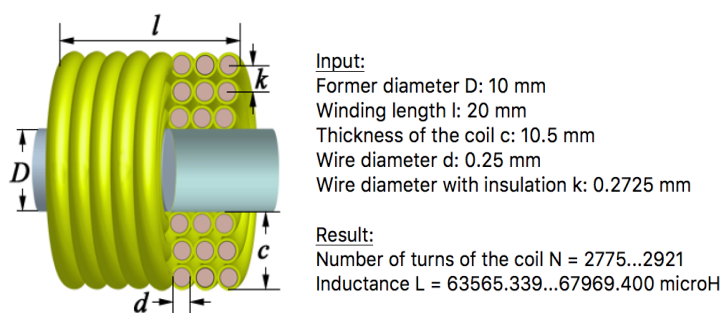
$$C = r_{\text{coil}} - r_{\text{core}}, \quad (5.15.)$$

$$R = \frac{c}{2} + r_{\text{core}}, \quad (5.16.)$$

$$H = h_{\text{coil}}, \quad (5.17.)$$

$$L = 0.02 \cdot \frac{0.0102^2 \cdot 3000^2}{6 \cdot 0.0102 + 9 \cdot 0.02 + 10 \cdot 0.0105} = 55 \text{ mH}. \quad (5.18.)$$

Vzhledem k tomu, že vypočítané hodnoty indukčnosti se výrazně liší, hledal jsem algoritmus, který tento problém bude řešit přesněji. Našel jsem program, který je schopný vypočítat indukčnost cívky pomocí eliptických integrálů s využitím Maxwellových rovnic. Jedná se o volně dostupný program Coil64.



Obr. 4.2.: Výstup programu Coil64 pro zadané parametry

Jak je z obrázku 4.2. zřejmé, program vyžaduje vstupní parametry týkající se rozměru cívky a jeho výstupem je počet závitů a výsledná indukčnost. Pro námi testovanou cívku je indukčnost rovna 68 mH. Tato hodnota se pohybuje mezi dvěma námi vypočtenými hodnotami, spíše se pak přiklání k empirickému vzorci H. A. Wheelera.

4.5. ČASOVÁ KONSTANTA CÍVKY

Jelikož nyní známe odhad indukčnosti cívky a zároveň její odpor, můžeme vypočítat časovou konstantu cívky, která je pro nás klíčovým ukazatelem, jak moc rychle proud v cívce budeme schopni měnit. Pro časovou konstantu LR obvodu platí vztah

$$\tau = \frac{L}{R}, \quad (s, H, \Omega), \quad (5.19.)$$

$$\tau = \frac{68 \cdot 10^{-3}}{67} = 1 \text{ ms}. \quad (5.20.)$$

Cívka se tedy zdá být rychlá, nicméně nás zajímá, jakou vzdálenost projektil urazí právě za tuto dobu. K tomu nejprve musíme vypočítat rychlost, kterou se bude projektil maximálně pohybovat. Ze změřených hodnot z tabulky 3.1. víme, že celková energie předaná projektilu je pro tuto cívku $E = 24,37$ mJ. Dále jsme schopni ze vzorce pro kinetickou energii vypočítat rychlost,

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0.0244}{0.004}} = 3.5 \text{ ms}^{-1}. \quad (5.21.)$$

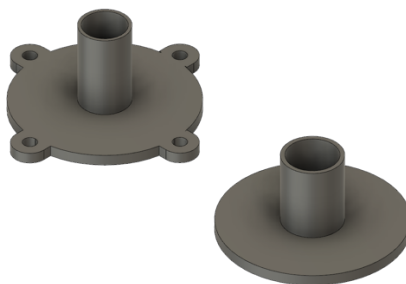
Uvažujme zjednodušení, že se projektil pohybuje po celou dobu ustálení touto rychlostí a vypočítejme, jakou vzdálenost za tuto dobu urazí,

$$v = \frac{s}{t} \rightarrow s = v\tau = 3.5 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 3.5 \text{ mm}. \quad (5.22.)$$

Vzhledem k tomu, že síla působící na projektil je největší v poloze, kdy je kulička na kraji cívky a ke středu strmě klesá, pak tato vzdálenost je dostatečně malá pro relativně přesné načasování vypnutí napájení cívky a doznění přechodového děje. Napomáhá tomu i fakt, že pokles proudu v cívce je exponenciální a závislost síly na proudu je kvadratická. Tedy po uplynutí jedné časové konstanty proud klesne na 37 % a síla tedy na 14 % původní hodnoty.

4.6. KOSTRA CÍVKY A JEJÍ NAVINUTÍ

Jádro cívky jsme se rozhodli vytisknout na 3D tiskárně. Pro eliminaci plytvání materiálem jsme se rozhodli konstruovat ji jako dvoudílnou, která po vytisknutí bude dohromady sesazena.



Obr. 4.3.: Dvoudílné jádro cívky

Na jádro cívky jsme pochopitelně nechali vytisknout i pomocné kotvící body. Po sesunutí jádra byla dovnitř umístěna hliníková trubka, jejíž vnitřní průměr byl vyvrtán na požadovaný rozměr kuličky, pro kterou jsme prováděli simulace, s průměrem 10 mm. Oproti simulovanému modelu jsme museli zvětšit vnitřní poloměr cívky právě o stěnu vystřelovací trubky – hlavně (cca 0,5 mm) a o stěny kostry cívky (cca 6 mm). Po sestavení jsme provedli navinutí 3 000 závitů měděným izolovaným drátem s průměrem 0.25 mm.

4.7. POROVNÁNÍ REÁLNÝCH PARAMETRŮ CÍVKY S VYPOČTENÝMI

Po navinutí jsme provedli měření reálných parametrů cívky. Odpor cívky byl pro nízké frekvence stanoven na 88.5 Ω a indukčnost 128 mH. V programu Coil64 jsme provedli korekce, aby rozměry co nejpřesněji odpovídali cívce, která se nám podařila navinout a výsledná indukčnost byla vypočtena na 122–129 mH. Odpor cívky vzrostl použitím drátu s menším průřezem. Pokračoval jsem výpočtem časové konstanty a dráhy, kterou projektil za tuto dobu urazí

$$\tau_{\text{real}} = \frac{L_{\text{real}}}{R_{\text{real}}} = \frac{128 \cdot 10^{-3}}{88.5} = 1.45 \text{ ms}, \quad (5.23.)$$

$$s = v\tau_{\text{real}} = 3.5 \cdot 1.45 \cdot 10^{-3} = 5.1 \text{ mm}. \quad (5.24.)$$

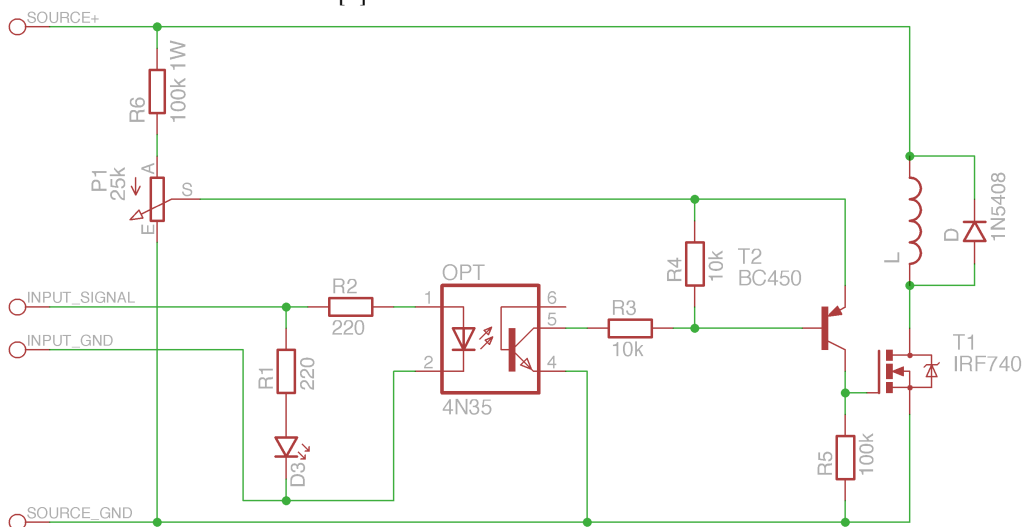
Vzdálenost 5 mm již není, vzhledem k rozměrům cívky, zanedbatelná. Po navinutí jsme začali s prvotním testováním odpalování projektilu.

5. REALIZACE URYCHLOVACÍHO OBVODU

Předtím, než jsme mohli začít testovat odpalování, museli jsme navrhnout obvod, který bude schopen do cívky řízeně dávkovat proud. Naše požadavky byly

- Řídicí napětí 5 V
- Galvanické oddělení
- Spínání napětí do 400 V
- Spínání proudu do 5 A
- Rychlosti sepnutí a rozepnutí do jednotek μs .
- Ochrana spínače před závěrným proudem cívky

Některé body byly v průběhu testování doplněny a výsledný obvod byl několikrát upraven do finální podoby, která plně vyhovuje našim požadavkům. Jako základní řídicí systém jsme zvolili jednodeskový počítač založený na mikroprocesoru ATmega328P od firmy Atmel – Arduino NANO [9].

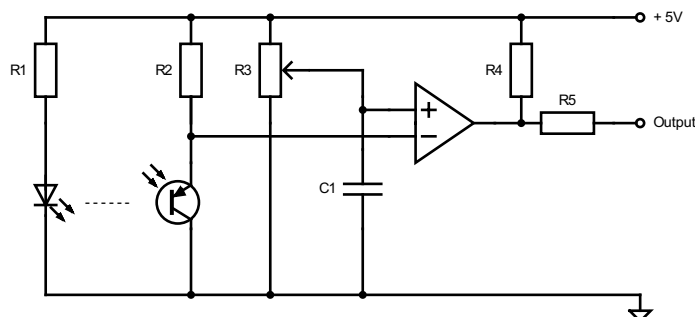


Obr. 5.1.: Schéma zapojení odpalovacího obvodu

Pro kontrolu nad výstupní rychlostí projektilu po odpálení jsme těsně za odpalovací cívku umístili optickou fotozávoru, která byla připojena na vstup μPc . Prvotní testování jsme prováděli spínáním cívky na určitou dobu, kterou jsme v průběhu testování ladili tak, aby projektil nabral co nejvíce kinetické energie. Celý systém jsme postavili tak, aby projektil vystřeloval vzhůru, tedy množství předané kinetické energie jsme mohli snadno kontrolovat výškou výstřelu. Spínané napětí do cívky jsme zvyšovali až do 100 V, kde již síla cívky byla natolik velká, že dokázala kuličku, která celým svým rozměrem byla pod vinutím cívky, zdvihnout a vtáhnout ji, do svého středu. Napětí jsme dále zvyšovali až na současných 140 V, kde jsme byly schopni dosáhnout výstřelu do výšky 8 cm nad okraj cívky. Toto napětí jsme vytvářeli sériovým spojením čtyř stejnosměrných zdrojů.

5.1. MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROJEKTILU

Ke sledování aktuální polohy projektilu uvnitř cívky jsme se rozhodli použít již zmíněnou optickou závoru. Závora je tvořena jednoduchým obvodem s jednou infračervenou LED diodou a fototranzistorem. Dále je obvod doplněn výstupním komparátorem s přednastavenou spínací úrovní napětí.



Obr. 5.2.: Schéma zapojení fotozávory s komparátorem, $R1 = 220 \Omega$, $R2 = 10 \text{ k}\Omega$, $R3 = 10 \text{ k}\Omega$, $R4 = 10 \text{ k}\Omega$, $R5 = 1 \text{ k}\Omega$, $C1 = 100 \text{ nF}$

Vzhledem k tomu, že jsme schopni tímto způsobem měřit nejen aktuální polohu, ale pokud změříme délku impulsu na výstupu komparátoru, jsme schopni vypočítat i rychlost projektilu. Jedinou neznámou je pro nás vzdálenost, kterou kulička urazí mezi sepnutím a rozepnutím komparátoru. Pro kuličku o průměru 10 mm jsme provedli několik výstřelů, u kterých jsme měřili délku impulsu a zároveň pomocí vysokorychlostního záznamu monitorovali výšku, do které kulička vystřelí. Z výšky jsme schopni vypočítat kinetickou energii, z té určit původní rychlost a následně vypočítat hledanou vzdálenost. Pokud je kulička v maximální výšce, pak se původní kinetická energie celá přeměnila na energii potenciální a tedy platí,

$$E_p = mgh = E_k = \frac{1}{2}mv^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2mgh}{m}}, \quad (6.1.)$$

$$s = vt \rightarrow s = t\sqrt{2gh}. \quad (6.2.)$$

Tabulka 5.1.: Změřené doby průletu a výška výstřelu, vypočtená konstanta vzdálenosti

Doba průletu [ms]	Výška výstřelu [cm]	Konstanta vzdálenosti [mm]
66.7	4.7	6.4
53.7	11.7	8.13
53.3	11.2	7.91
52.3	11.9	7.99
49.7	13.7	8.15
47.6	15.7	8.36

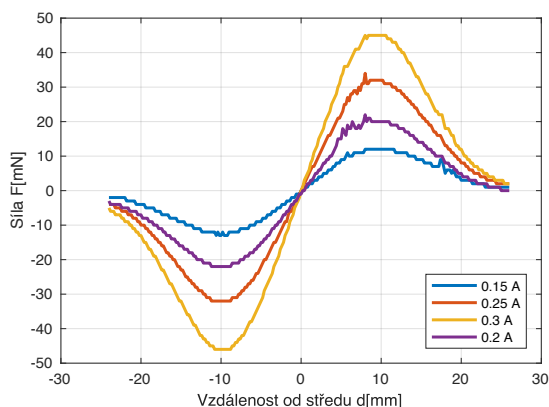
Z předchozích výpočtů jsme vzali průměr a určili tak konstantu pro výpočet rychlosti na vzdálenost 8.1 mm.

5.2. SPÍNÁNÍ 2. STUPNĚ URYCHLOVACÍHO OBVODU

Vzhledem k tomu, že výška 8 cm je pro náš projekt nedostačující, rozhodli jsme se urychlovací část obvodu rozšířit o druhou cívku a realizovat tak víceetapňové urychlování. Spínací obvod zůstává stejný, jen je duplikován pro každou z cívek. Cívky jsme od sebe na hlavě umístili do vzdálenosti 20 mm. Neboť kulička vystupuje z první cívky s rychlostmi s určitým rozptylem, je nutné provést pro jednotlivé výstřely různé časování. Abychom zjistili, kdy máme druhou cívku vypnout, musíme znát aktuální polohu kuličky uvnitř cívky. Ta je ale jen velmi obtížně měřitelná, a tak jsme se rozhodli vytvořit simulaci, která na základě vstupní rychlosti a síly působící na kuličku po dráze vypočítá aktuální rychlost kuličky, a tedy i její aktuální polohu v libovolném čase. Naším cílem je získat závislost vstupní rychlosti a výsledného času, kdy máme druhou cívku vypnout.

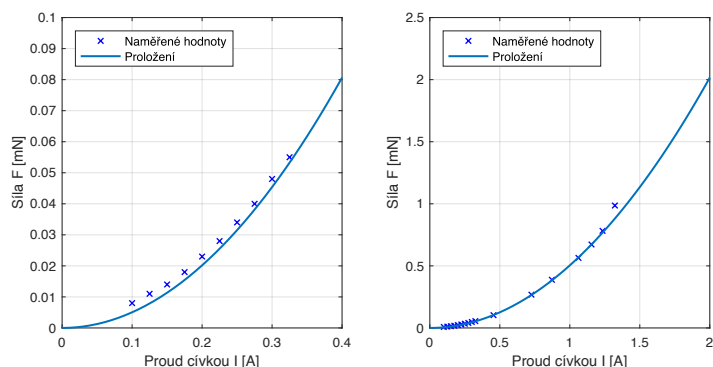
Jako první musíme změřit sílu působící na kuličku uvnitř hlavně. Toto měření jsme provedli již dříve pro kuličku s průměrem 10 mm. Siloměr byl umístěn na pohyblivém vozíku, jehož osa byla po náročné ruční kalibraci synchronizována s osou vystřelovací hlavně tak, aby kulička po měřené vzdálenosti nenarazila do vnitřní stěny hlavně, což by měření síly značně ovlivnilo.

Měření jsme prováděli pro několik různých proudů protékajících cívku a zjistili, jakým způsobem se nasimulované průběhy shodují se změřenými.



Obr. 5.3.: Závislost síly působící na projektil na poloze a velikosti proudu

Dále jsme vyjádřili závislost velikosti síly na velikosti proudu. Kuličku jsme umístili do měřené maxima a postupně zvyšovali proud a sledovali působící sílu. Pro vyšší proudy jsme prováděli měření při krátkém sepnutí, aby nedošlo k výraznému zahřátí cívky výkonovým úbytkem.

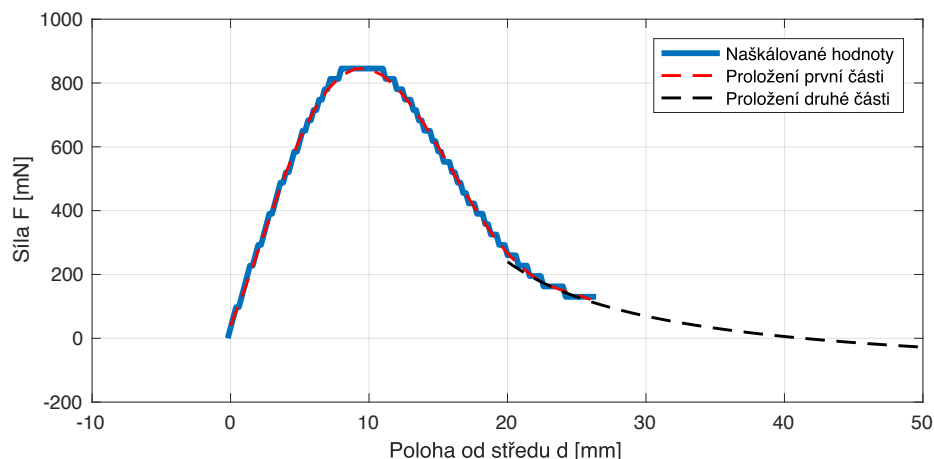


Obr. 5.4.: Závislost proudu cívku a síly, vlevo nízké proudy, vpravo celý rozsah

Zároveň jsme provedli proložení měřených dat, iterativně byla upřesněna funkční závislost proudu a síly na

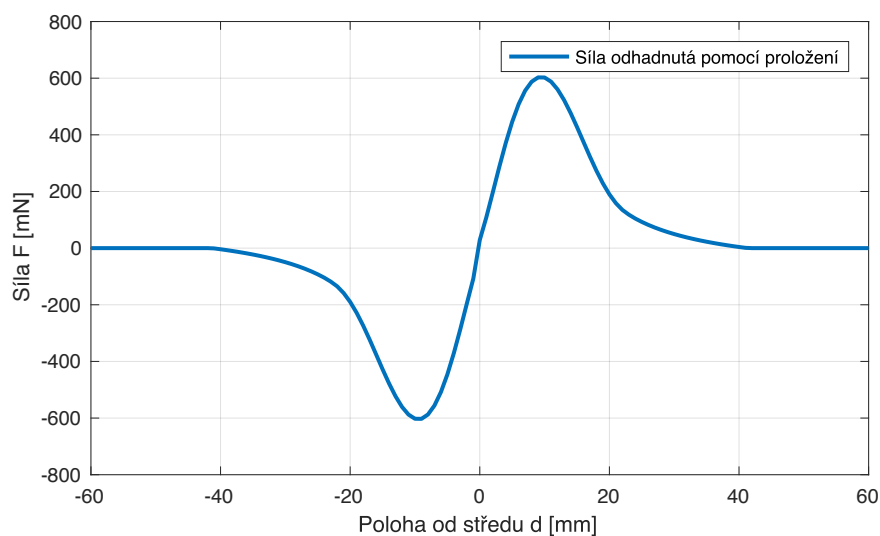
$$F = 10^{-3} \cdot (0.71 \cdot I)^2 \quad (6.3.)$$

Jako poslední jsme do místa měřeného maxima umístili kuličku s průměrem 8.731 mm a provedli jedno rychlé měření pro sepnutí cívky ze zdroje 140 V. Tuto hodnotu jsme použili k naškálování současných průběhů, zobrazených na obrázku 5.6., a odhadli průběh pro pracovní napětí. Tuto závislost jsme proložili dvěma polynomy, které nám umožní vypočítat hodnoty síly i pro nezměřené polohy.



Obr. 5.5.: Naškálovaná síla a dva prokládající polynomy

Takto vytvořená kombinace proložení funguje pro kladné polohy do 40 mm od středu, kde by již síla měla být téměř nulová a dále klesat. Vytvořili jsme tedy funkci v Matlabu, jejíž vstupem je vzdálenost středu kuličky od středu cívky a výstupem je síla působící na kuličku ve směru do středu cívky. Tato funkce kombinuje nejen zmíněné polynomy, ale nuluje sílu pro vzdálenosti větší a symetricky vrací sílu pro polohy před středem v druhé polorovině.



Obr. 5.6.: Výstupní průběh síly naprogramované funkce kombinující proložení

S takto naměřeným průběhem jsme dále provedli simulaci založenou na diferenciálních rovnicích popisující pohyb kuličky se zadanou počáteční rychlostí a se silou,

proměnlivou s aktuální polohou, na ni působící. Zvolili jsme numerickou metodu dopředného Eulera, která pro dostatečně krátký krok poskytne relevantní výsledky. Vstupem naší simulace je tedy rychlost na vstupu do elektromagnetického pole cívky a výstupem požadujeme čas, za který máme druhou cívku vypnout tak, abychom letící projektil urychlili na přesnou rychlost 2 m/s.

$$F = m \cdot a, \quad a = \frac{\Delta v}{dt}, \quad v = \frac{\Delta s}{dt}, \quad s_{t_0} = s_0, \quad v_{t_0} = v_0 \quad (6.4.)$$

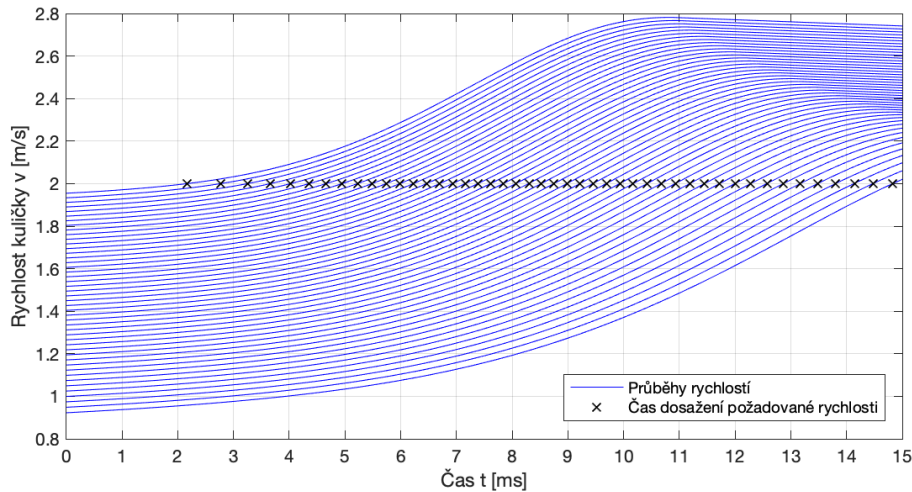
$$F = m \cdot a \rightarrow F_c(s_i) - F_G = m \cdot \frac{\Delta v}{dt} = m \cdot \frac{(v_{t_{i+1}} - v_{t_i})}{dt} \quad (6.5.)$$

$$v = \frac{\Delta s}{dt} \rightarrow s_{t_{i+1}} - s_{t_i} = v_i \cdot dt \quad (6.6.)$$

$$v_{t_{i+1}} = \frac{(F_c(s_i) - F_G) \cdot dt}{m} + v_{t_i} \quad (6.7.)$$

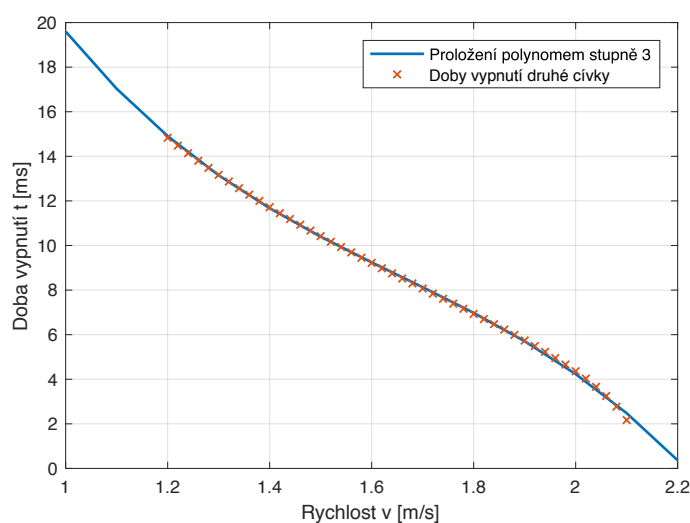
$$s_{t_{i+1}} = v_i \cdot dt + s_{t_i} \quad (6.8.)$$

Simulaci jsme provedli pro 45 různých rychlostí v počáteční podmínce v rozmezí od 1.2 do 2.1 m/s. Tato rychlost je měřena na výstupu z první cívky. Reálně naměřené rychlosti na výstupu první cívky byly od 1.8 do 2.0 m/s. Výstupním parametrem pro nás byl čas, kdy projektil dosáhne požadované rychlosti 2.0 m/s uvnitř druhé z cívek.



Obr. 5.7.: Simulace průběhu rychlostí pro urychlování kuliček s různými počátečními rychlostmi pomocí druhé cívky

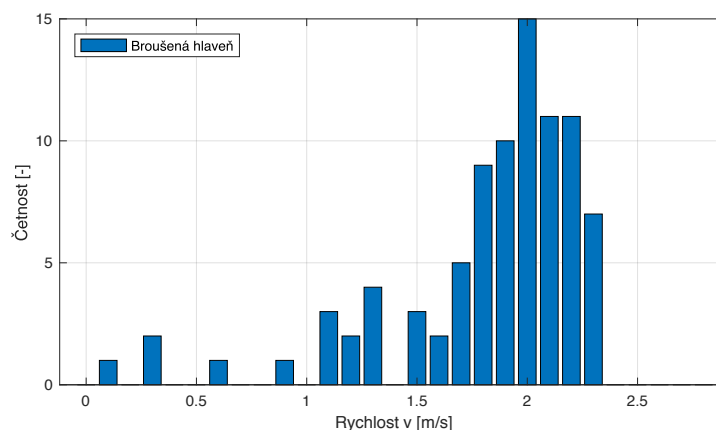
Vytvořenou závislost vstupní rychlosti a času, za který chceme druhou cívku vypnout, jsme proložili polynomem 3. stupně a zanesli tento výpočet do programu řízení.



Obr. 5.8.: Výsledná závislost změřené rychlosti na výstupu první cívky a doba, za kterou má být vypnuta druhá urychlovací cívka, aby došlo k urychlení na rychlost 2 m/s.

5.3. KOREKCE OPAKOVATELNOSTI VYSTŘELOVÁNÍ

Již při prvních výstřelech jsme měli podezření, že rychlosti výstřelu z vrtané hlavně o vnitřním průměru 10.5 mm a kuličkou s průměrem 10 mm, nejsou příliš dobře opakovatelné. Po doplnění systému o měření rychlosti se toto podezření potvrdilo.



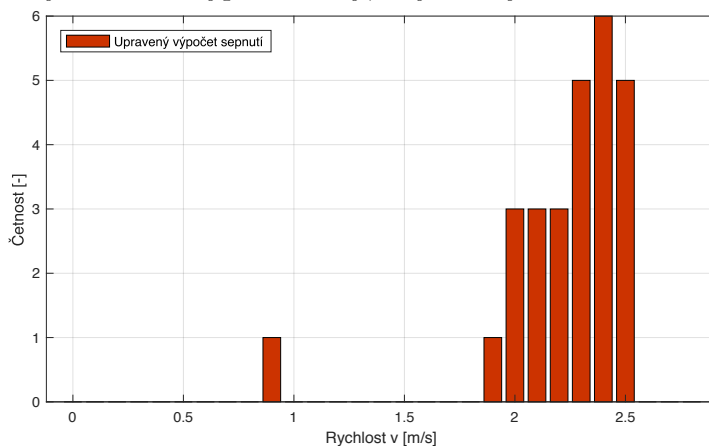
Obr. 5.9.: Četnosti výstupní rychlosti měřené za druhou cívku pro opakované výstřely

V této chvíli výstřely probíhali sepnutím cívky na určitý časový okamžik. První hypotéza byla, že než se kulička uvede do pohybu, resp. zdvihne, trvá to ne vždy stejný časový okamžik. Toto může být způsobeno mírně odlišnou počáteční polohou kuličky. Této hypotéze napomáhá i fakt, že pokud je projektil umístěn pod cívku a ta se ho snaží zdvihnout, pak na něj v této vzdálenosti působí relativně malou silou oproti síle, kterou na něj působí v maximum (střed kuličky na hraně cívky). Tento problém se nám podařilo vyřešit přidáním optické závory těsně před urychlovací cívku. Průběh odplování je pak časován v závislosti na tomto optickém snímači. Po

průchodu kuličky závorou, resp. ve chvíli, kdy kulička přestane závoru zakrývat, rozepneme proud protékající cívkou.

Vzhledem k tomu, že střed optické závory je fyzicky umístěn 4.5 mm od začátku vinutí cívky (3 mm – tloušťka kostry cívky, 1.5 mm – poloměr IRLED diody) a poloměr detekovaný vzdálenosti z optického senzoru je 4.05 mm (polovina z 8.1 mm), pak se kulička ve chvíli opuštění optické závory nachází daleko blíže maximu působící síly, a tedy časování je v tohle ohledu daleko přesnější.

Při spínání tímto způsobem je třeba doplnit kód o bezpečnostní pojistku. Ve chvíli, kdy dojde k jakémukoli problému, při kterém by se stalo, že snímač nerozepne, např. chyba v připojení snímače, absence samotné kuličky, pak by řídicí jednotka držela proud do cívky sepnutý pořád a došlo by k jejímu poškození převážně z důvodu velkých tepelných ztrát. Proto je třeba veškeré čekající smyčky doplnit o maximální možnou dobu čekání a v případě překročení této doby veškeré proudy rozepnout a vyhlásit chybu. Dále, z provedeného měření síly na reálné cívce, jsme doplnili spínání druhé cívky o rovnici výpočtu doby, kdy má být druhá cívka vypnuta



Obr. 5.10.: Četnost výstupní rychlosti měřené za druhou cívkou pro opakovaně vystřelily s upraveným výpočtem doby vypnutí druhé cívky

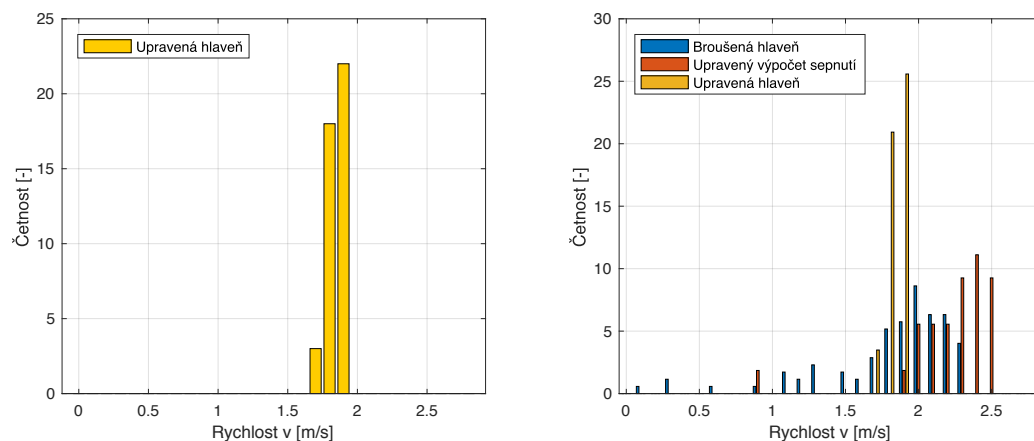
Po aplikování těchto úprav jsme provedli několik dalších zkušebních výstřelů s relativně stejnými počátečními podmínkami. Výsledky se mírně zlepšili, ale zásadně opakovatelnost nezlepšili.

Při opakovaném vystřelování bylo vypořádováno, že v některých případech se kulička vznese hlavní bez jejího dotyku, pak je tento případ kvitován vyšší výstupní rychlostí, naopak v jiných případech kulička slyšitelně do vnitřní stěny hlavně narazí. V tomto případě dochází k výraznému snížení výstupní rychlosti. Další hypotézou, jak zlepšit opakovatelnost výstřelů bylo nahradit současnou vrtnou hlavěň, se zjevně výraznými nerovnostmi uvnitř, vzniklé samotným vrtáním, hlavěň s vnitřní stěnou, která je výrazně hladší.

Zde se nabízelo několik variant. První byla sehnat takovou hlavěň, jejíž vnitřní průměr je přesně 10 mm, tak aby do něj současná kulička přesně pasovala. Bylo by možné shánět v železářství trubku s co nejbližším vnitřním průměrem, a nebo koupit přímo střelnou hlavěň s přesně definovaným a kalibrovaným vnitřním průměrem. Vzhledem k velikosti kuličky by se ale již jednalo o hlavěň s vysokým kalibrem, např. od brokovnice, a její cena by byla v řádu deseti tisíc korun. Naopak by bylo možné za rozumnou cenu, do jednoho tisíce korun, koupit přesně kalibrovanou hlavěň s vnitřním průměrem 6.02 mm, která se prodává jako náhradní díl pro zbraně na airsoft. Do ní by nebyl problém sehnat kuličku s přesným průměrem 6 mm.

Nejjednodušší a nejrychlejší variantou se však ukázalo vzít původní nevrtanou hlavěň s vnitřním průměrem 8.9 mm a do ní sehnat kuličku s co nejbližší velikostí. Podařilo se nám sehnat ocelovou ložiskovou kuličku s průměrem 8.731 mm.

Po osazení této hlavěň a převrtání všech optických závor jsme provedli několik odpalovacích zkoušek s cílem zjistit aktuální opakovatelnost.



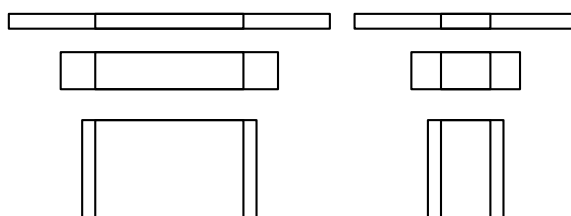
Obr. 5.11.: Četnost výstupní rychlosti měřené za druhou cívkou pro opakované výstřely s hlavní a porovnání s předchozími měřeními (Vzhledem k různému počtu náměrů, byla četnost v pravém grafu normalizována)

Je zjevné, že tímto krokem jsme výrazně zlepšili opakovatelnost vystřelování. Je zde sice určitý rozptyl, který by dle dalších hypotéz mohl být zlepšen nákupem přesnější hlavěň. Roli v tomto případě hraje jak rozdíl průměrů hlavěň a kuličky, dále pak stálost průměru hlavěň v celé délce.

6. SIMULACE VYCHYLOVÁNÍ

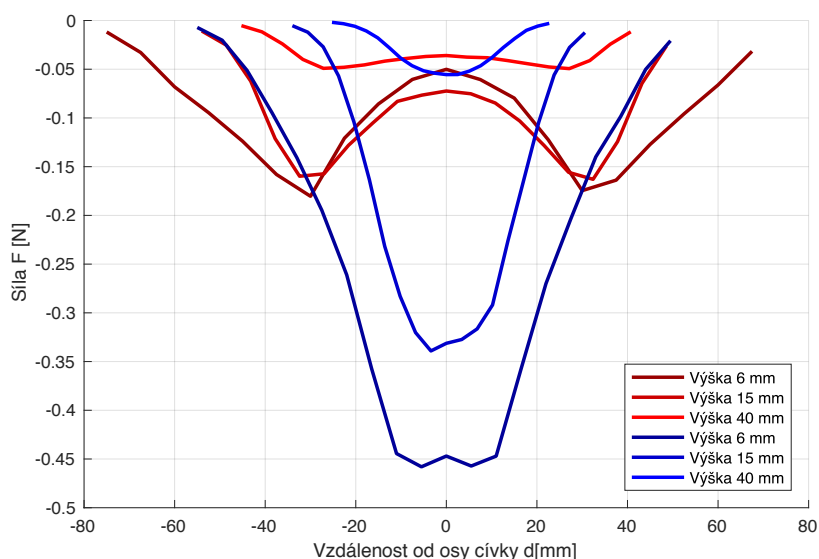
V další části práce jsme se zabývali konstrukcí cívky, jenž bude urychlený projektil ve volném prostoru vychylovat do různých směrů. Kuličku vystřelujeme kolmo vzhůru, a tedy uvažujeme cívky, které budou umístěny vertikálně a prolétající projektil k nim bude přitahován. Dojde tedy k zakřivení dráhy kuličky a ta dopadne mimo konec hlavně, z které byla vystřelena.

Opět jsme se zaměřili na zvolení správného tvaru cívky, který je schopen kuličku co nejvíce přitáhnout. Pro konstantní průřez cívky a pro konstantní vzdálenost projektilu od cívky jsme testovali různé druhy cívek a pro ně v simulačním programu Comsol Multiphysics měřili sílu na kuličky působící.



Obr. 6.1.: Různé tvary testovaných cívek, Vlevo poloměr jádra 3 cm, Vpravo poloměr jádra 1 cm, Shora výška cívky 6, 15, 40 mm.

Testovali jsme jak různé velikosti cívky v průměru, pak i vliv velikosti průměru vzduchového jádra.



Obr. 6.2.: Silové účinky pro 6 různých typů cívek

Na obrázku 6.2. jsou vyznačeny dva druhy cívek. Červené průběhy odpovídají cívkám se poloměrem vzduchového jádra 3 cm, modré odpovídají cívkám s poloměrem jádra 1 cm.

Bylo zjištěno, že pro velké průměry jádra se působící síla, při průletu nad středem jádra, začne značně snižovat a dojde k vytvoření dvou maxim v místech vnitřního okraje cívky. Pokud naopak snížíme poloměr jádra na 1 cm, můžeme pozorovat sloučení těchto dvou maxim do jediného, které se nachází právě nad středem cívky. Nejen, že došlo k eliminaci dvoumaximového průběhu, ale zvětšila se i hodnota těchto maxim až na 2.3násobek. Dále jsme provedli jeden test, při kterém jsme pro cívku s největší zjištěnou hodnotou maxima změnili počet navinutých závitů ze 3 000 na 1 000 a sledovali, jaký tato změna bude mít vliv na hodnotu maxima. Největší naměřená hodnota se z původního maxima 0.45 N zmenšila na 0.5 N, tedy při zmenšení počtu závitů třikrát došlo k devítinásobnému poklesu působící síly. Můžeme tedy odhadnout, že tato závislost je kvadratická.

Dále jsme se rozhodli prověřit dva kandidáty s největšími naměřenými silami v této kategorii a prověřit, jakým způsobem intenzita magnetického pole s rostoucí vzdáleností projektilu od cívky klesá.

Zjistili jsme, že s rostoucí vzdáleností z 5 mm na 20 mm síla pro první cívku klesla na 7.6 % oproti maximu a v případě druhé cívky byl pokles pouze na 17.8 %. Tedy závěrem lze konstatovat, že nejvhodnější cívka pro vychylování projektilů má velmi malé jádro a je velmi tenká. Nad takovouto cívkou je relativně silné a nepříliš výrazně zakřivené magnetické pole.

Problémem této cívky zůstává její průměr, neboť je velmi jednoduché navinout cívku o průměru 6 cm, ale budeme-li se snažit umístit několik takto vyrobených vychylovacích cívek okolo konce hlavně, budeme prostorově omezeni a takto široké cívky pro nás budou problémem.

Pro snazší představu jsem vytvořil skript v Matlabu, který dokáže simulovat výstřely projektilu nad takovouto cívkou a umožní nám simulovat výstřely s různými počátečními podmínkami a vykreslí dráhu letu projektilu.

6.1. MINIMALIZACE MNOŽSTVÍ MĚŘENÝCH DAT ZE SIMULACE

Jako první jsem se zaměřil na formát vstupních dat pro simulaci. Chtěl jsem minimalizovat počet nutných nasimulovaných dat, neboť simulace v jednom bodě nad cívkou trvala zhruba 1 min. Pokud bych chtěl změřit intenzitu pole v každém bodě nad cívkou po 1 mm do výšky 5 cm, pak by simulování naměřených dat trvalo přes 220 dní.

Rozhodl jsem se využít rotační symetrie cívky a využít znalostí průběhů sil z předchozích experimentů. Navrhl jsem automatickou simulaci, která provedla měření v jednom z řezů cívky, a to pouze od jednoho okraje do středu, abych nedostával symetrické výsledky v druhé polovině, a toto měření jsem opakoval pro různé vzdálenosti projektilu od cívky. Získal jsem tak síť, která jednoznačně v každém měřeném bodě popisovala jakost magnetického pole nad cívkou pomocí sil působících ve třech ortonormálních osách X, Y, Z. Takto jsem potřebný čas simulace zkrátil na přibližně 90 minut. Zároveň, díky rotační symetrii cívky, jsem minimalizoval problém hledání velikosti sil v libovolném bodě z funkcí

$$F_x = f(x, y, z), \quad F_y = f(x, y, z), \quad F_z = f(x, y, z) \quad (7.1.)$$

tří proměnných na sedm funkcí dvou proměnných,

$$F'_x = f(x, z), \quad F'_y = f(x, z), \quad F'_z = f(x, z), \quad (7.2.)$$

$$F_x = g(F'_x, \varphi), \quad F_y = g(F'_y, \varphi), \quad F_z = g(F'_z, \varphi), \quad \varphi = g(x, y), \quad (7.3.)$$

Což na první pohled nezní jako zjednodušení, ale porovnáme-li měření ve tří rozměrném prostoru a jeho následnou aproximaci pro libovolný bod prostoru, dopustíme se větší chyby než pro aproximaci hodnot v rovině a jejich následnou přesnou distribuci vzhledem k rotační symetrii. Toto zlepšení je zjevné, pokud si uvědomíme, které funkce budou muset být aproximací a které jsou jednoznačné. Pro výraznější odlišení jsem je označil jako funkce f a g , kde f je funkce aproximační a funkce g je jednoznačná.

6.2. INTERPOLACE MEZI MĚŘENÝMI BODY ZE SIMULACE

Jako první je nutné pro přesnější výsledky simulace vytvořit odhad velikosti sil pro libovolný bod nad cívkou, neboť po provedení měření v programu Comsol máme pouze dané hodnoty v konkrétních bodech. Mezi nimi je třeba provést jistou aproximaci. Nejvhodnější by bylo naměřené hodnoty proložit funkcí, což je pro obecné průběhy problém. Vzhledem k tomu, že výsledná simulace bude sloužit v základní podobě pro představu chování vystřelené kuličky v prostoru nad cívkou, můžeme provést pouze jednoduchou lineární aproximaci, která při dostatečné blízkosti měřených bodů, bude poskytovat relevantní výsledky.

Budeme se zabírat situací, kdy máme naměřené hodnoty pro rohy čtverce. Při dostatečném rozlišení bude rozdíl těchto hodnot minimální a s rozlišením jdoucím limitně k nule bude i maximální rozdíl těchto naměřených hodnot nulový. Pokud tyto 4 hodnoty budou ležet na jedné ploše, pak s aproximací není problém, k čemuž bohužel nedojde téměř nikdy, neboť plocha je dána pouze třemi body. Je tedy třeba zabývat se situací, kdy body neleží v jedné ploše a mezi nimi hledat určité proložení.

Se znalostí lineární aproximace pro funkci jedné proměnné můžeme použít formuli, pomocí které získáme libovolnou hodnotu mezi dvěma danými body. Budeme chtít takovou hodnotu, která je mezi body A a B na úrovni hledaného bodu P. Stejný postup provedeme mezi body C a D. Získali jsme tak odhad dvou hodnot AB a CD. Následně mezi těmito body provedeme druhou lineární aproximaci a mezi nimi zjistíme hodnotu, která přímo odpovídá hledanému bodu P. Zde vystává otázka, v jakém pořadí volit body A, B, C a D. Stejně tak bychom jako první mohli spočítat hodnotu mezi body A a C, pak dále mezi body B a D, poté vypočítat příslušnou hodnotu mezi body AC a BD.

Tímto způsobem získáme typicky dva různé odhady hodnoty v bodě P, ovšem nevíme, která je více blíže pravdě. Zde se můžeme vzdáleně inspirovat Heunovou numerickou metodou. Tato metoda odhaduje hodnotu funkce pomocí dopředné a zpětné derivace, jejichž výsledky průměruje. Stejným způsobem můžeme i my dvě vypočtené hodnoty zprůměrovat.

Pravdou je, že pokud měřená veličina nebude v prostoru hladká, budou zde fluktuace menší, než je polovina vzorkovací vzdálenosti, pak může dojít k fatálnímu zkreslení průběhu měřené veličiny.

Tímto způsobem jsme schopni pro libovolný bod v řezné ploše odhadnout velikost sil, které působí v jednotlivých směrech. Dále je třeba tento výpočet provést pro všechny 3 směry, ve kterých měření probíhalo.

Pokud chceme získat hodnoty sil nad libovolným bodem cívky, pak využijeme rotační symetrie a přepočítáme původní síly pomocí úhlu, který vypočteme z aktuální polohy projektilu nad cívku.

Síla ve směru osy Z zůstává stejná, mění se pouze velikosti sil ve směru os X a Y. Tímto způsobem jsme získali funkci, která je schopna na základě minima nasimulovaných hodnot vypočítat sílu působící na projektil kdekoli v okolí prostoru cívky.

6.3. SIMULACE VYCHÝLENÍ LETÍČÍHO PROJEKTILU

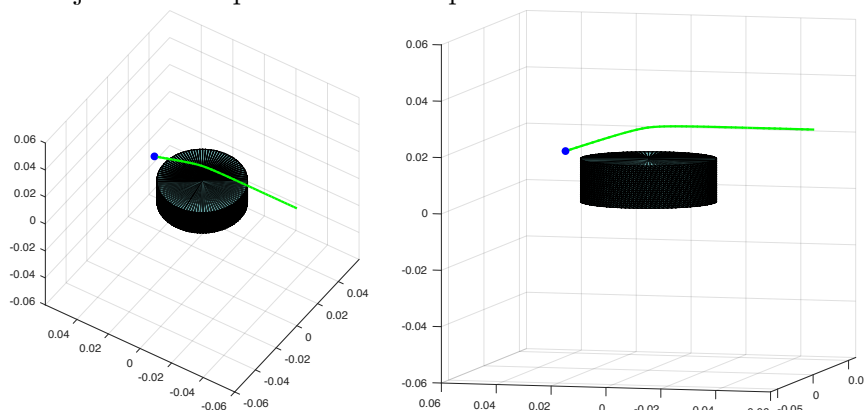
Již v přechodí části při spínání druhého stupně urychlovacího obvodu jsme pomocí diferenčních rovnic řešili numericky situaci výstřelu. Kulička se mohla pohybovat pouze v jednom směru uvnitř hlavně. Nyní v pohybu není omezena. Upravíme výpočet do vektorové podoby a dostaneme

$$\vec{F}_i = (F_{x_i}, F_{y_i}, F_{z_i}) = f(x_i, y_i, z_i) = f(\vec{s}_{t_i}) \quad (7.4.)$$

$$\vec{v}_{t_{i+1}} = \frac{\vec{F}_i \cdot dt}{m} + \vec{v}_{t_i} \quad (7.5.)$$

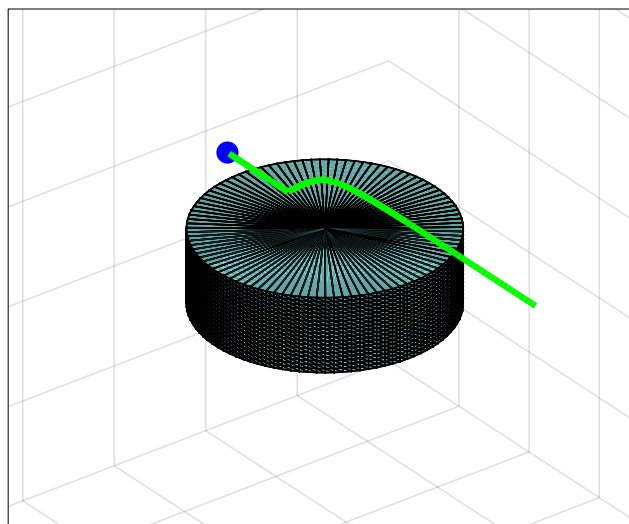
$$\vec{s}_{t_{i+1}} = \vec{v}_i \cdot dt + \vec{s}_{t_i} \quad (7.6.)$$

Při přidání počátečních podmínek simulace vypočítá trajektorii letu. Rozhodl jsem se tyto data pro lepší představu nechat vykreslit ve 3D grafu. Implementoval jsem program, který nejprve provede numerickou simulaci a poté vypočtená data předá algoritmu, který provede jejich animaci. V grafu se vykreslí 3D cívka, dle zadaných rozměrů. Tyto rozměry jsme si uložili jako součást nasimulovaných dat pro jakost cívky z Comsolu. Dále pak vykresluje vypočítaná data a interpretuje je jako pohybující se bod, který za sebou zanechává barevnou stopu, která dle aktuální rychlosti mění svoji barvu ze spektra zelené až po žlutou.



Obr. 6.3.: Snímky výsledků simulace

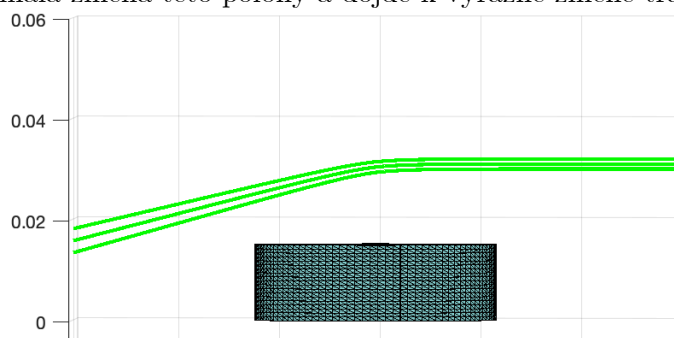
Během simulace došlo k situaci, kdy se kulička přiblížila k cívce natolik, že skrze ni prošla. Tato situace v realitě není možná, dojde k zastavení pohybu kuličky ve směru k cívce nárazem do jejího těla. Toto omezení jsem tedy implementoval do své simulace, aby co nejvíce odpovídala realitě. Vzhledem k tomu, že náraz do cívky je pro naši aplikaci vcelku fatální problém, doplnil jsem výpis tohoto programu o varovné hlášení.



Obr. 6.4.: Simulace s nárazem do cívky

6.4. VÝSLEDKY SIMULACE VYCHYLOVÁNÍ

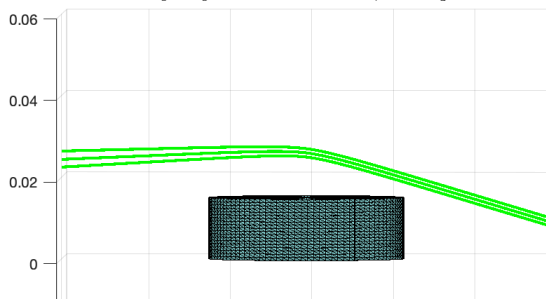
Nejprve jsem prováděl standartní testování, abych zjistil, jaký vliv má počáteční vzdálenost osy hřídele vystřelující kuličku od cívky. Bylo zjištěno, že tento vliv je značný. Stačí malá změna této polohy a dojde k výrazné změně trajektorie letu.



Obr. 6.5.: Různé počáteční podmínky, rozdíl kolmé vzdálenosti od cívky o 1 a 2 mm

Tento efekt je dán nelinearitou magnetického pole nad cívkou. Čím je projektil blíže středu, tím na něj působí větší síla. Tedy pokud do pole vlétá postupně zdáli, působí na něj síla velmi malá a je schopen se při své rychlosti dostat daleko dál, než na něj začne působit silnější pole cívky u jejího středu, než když už na začátku projektil umístíme blízko cívky, do silnějšího pole. Pokud by cívka a vystřelovací hlaveň byly právě v této konfiguraci bude celé zařízení velmi citlivé na polohu ve které kulička hlaveň opustí. S vědomím tohoto chování jsem otestoval, jakým způsobem by fungovali, kdyby vychylovací cívka nebyla umístěna svisle, ale pod určitým úhlem a projektil by tak hlaveň opouštěl přímo u hrany nakloněné cívky podél které by

postupně zakřivoval svoji dráhu. Cívka by tak projektil ihned po opuštění hlavně zachytila ve svém relativně silném poli, které sice na kraji cívky není výrazně intenzivní, ale samotná blízkost projektilu tomu napomůže. V simulaci jsem neupravoval algoritmus tak, aby nakláněl cívky, namísto toho jsme změnil počáteční podmínky projektilu, který jsem kolem cívky vystřelil šikmo, což je ekvivalentní situace.

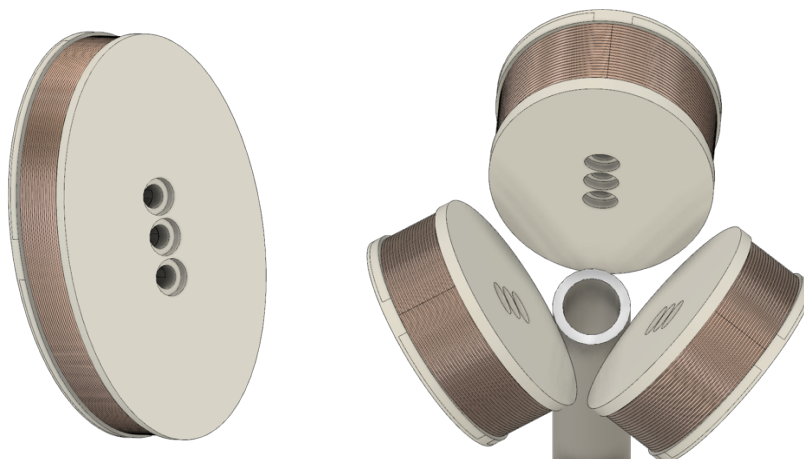


Obr. 6.6.: Různé počáteční podmínky, rozdíl kolmé vzdálenosti od cívky o 1 a 2 mm pro nakloněnou cívku

Tato změna mírně zlepšila citlivost na počáteční vzdálenost. Ovšem souvisejíc s tímto faktem vzniká další problém. Testovaná cívka má průměr 6 cm, pakliže bychom umístili 4 cívky okolo hlavně, projektil by byl při opuštění hlavně vzdálen od kraje cívky 3 cm, a v této konfiguraci jsme zjistili velkou citlivost na počáteční vzdálenost po výstřelu. Na druhé straně můžeme cívky naklonit a kuličku poslat přímo do bezprostřední blízkosti cívky, ale zde je mechanický problém. Cívky tohoto průměru nelze umístit ve větším počtu do takové konfigurace, aby všechny měly svůj okraj blízko konci hlavně.

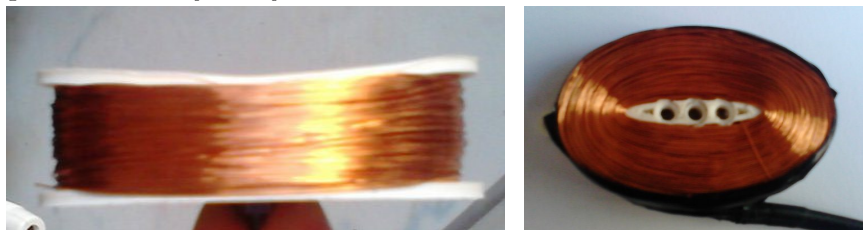
7. VYCHYLOVACÍ CÍVKY

Zabýval jsem se tedy jaký zvolit design cívky takový, aby svým průměrem byl co největší a zároveň bylo možné umístit jich několik blízko sebe. Došel jsem ke tvaru elipsy, která má několik výhod. Po jejím naklonění jsme schopni její konce umístit těsně nad hlavěň a zároveň druhý její delší rozměr nám poskytne dostatečný prostor, resp. čas, po který bude při průletu na kuličku působit vychylovací síla. Zároveň průměr jejího jádra bude minimální. Po návrhu jejího jádra ve 3D jsem vyzkoušel, jaký způsobem bude možné takto vyrobené cívky kolem konce hlavně umístit a zkušební jádro jsem vytiskl na 3D tiskárně. Zvolil jsem mírně modifikované rozměry. Rozměry elipsy jsou 60 mm a 35 mm, tloušťka je 10 mm.



Obr. 7.1.: Model vychylovací cívky a jejich uspořádání nad hlavní

Samotné navíjení probíhalo výrazně pomaleji než pro kulaté urychlovací cívky. To bylo způsobeno jednak menší tloušťkou cívky, druhá oválným jádrem. Po navinutí bylo pozorováno prohnutí kostry cívky.



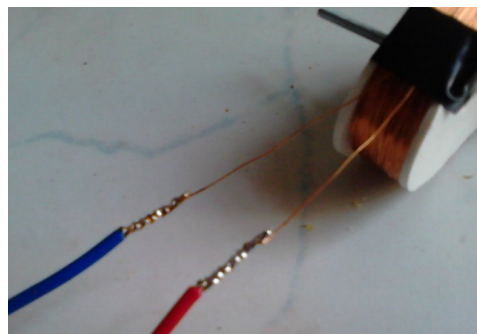
Obr. 7.2.: Prohnutí kostry cívky, odhalená cívka s jádrem

To je způsobeno nedostatečnou pevností kostry cívky z plastu, které nemůže být příliš tlusté, aby výrazně neovlivňovalo magnetické pole cívky a také, aby se kulička byla schopna cívice přiblížit co nejvíce. Prohnutí vznikne především při utahování drátu při navíjení. Při navíjení jsem zkoušel cívku méně utahovat, ale výsledkem bylo, že jádro nedrželo dostatečně pevně pohromadě, a hlavně by se na cívku vešlo méně závitů.

7.1. KONEKTOROVÁNÍ CÍVEK

Neboť jsem navinutou cívku potřeboval připojit do spínacího obvodu do svorkovnice, musel jsem tenký drát vinutí nakonektorovat tak, aby nedošlo k jeho utržení a zároveň jsem byl schopen minimalizovat přechodový odpor při připojení. Vyvinul jsem metodu, která tyto požadavky splňuje.

Jako první provedeme zkrácení vnitřního a vnějšího drátu vinutí tak, aby končili stejně. V případě, že jeden z drátů je výrazně delší, můžeme jej několikrát omotat kolem cívky a zastříhnout pouze jeho zbytek. Po omotání následuje odstranění izolace. Zde záleží na vlastnostech zakoupeného drátu, v některých případech pájitelného izolovatelného drátu jej stačí ohřát páječkou na 150°C a lak povolí, v ostatních případech lze tuto izolaci seškrábnout žiletkovým nožem. Při tomto způsobu je třeba dbát zvýšené opatrnosti, aby nedošlo k přerýznutí nebo přetržení tenkého drátu vinutí.



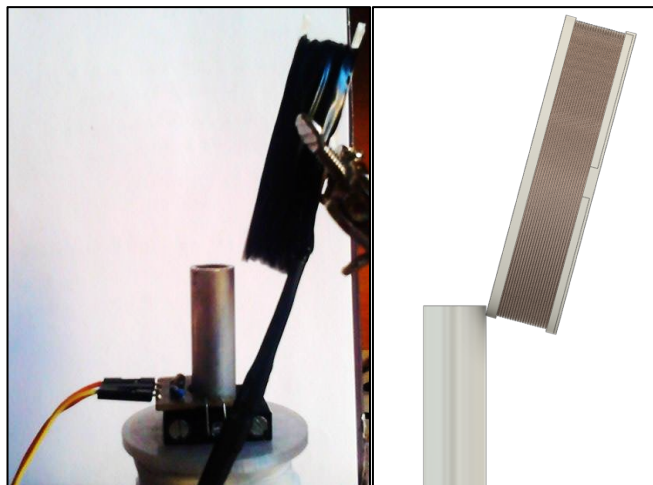
Obr. 7.3.: Konektorování cívek

Takto izolujeme 4-5 cm drátu, který poté doporučuji pocínovat. Poté odizolujeme 1.5 cm tlustého drátu, který bude připojován do svorkovnice. Jeho délku volíme dle potřeby. Provedeme jeho pocínování a následně tenký drát omotáme kolem tlustého. Následně tento spoj zahřejeme a přidáme cín, čímž vytvoříme pevný přechod mezi tenkým (křehkým) vodičem a pevným (napájecím) vodičem.

Spoje doporučuji zatavit ve smršťovací izolaci, abychom zamezili zkratování cívky. Dále je pak vhodné celé vinutí cívky omotat elektrikářskou izolační páskou. Zpevníme tak celé vinutí a zamezíme jejímu rozmotávání.

7.2. TESTOVÁNÍ VYCHYLOVACÍ CÍVKY

Po navinutí první z vychylovacích cívek jsem provedl testy její funkčnosti. Jako první jsem cívku umístil do vertikální polohy vedle konce hlavně a provedl několik zkušebních výstřelů. Pokud cívka byla umístěna do vzdálenosti 5 mm, docházelo k nárazu projektilu do jejího jádra během vychylování. V případě, že jsem cívku umístil dále, k nárazům přestalo docházet, ale místo dopadu kuličky se pro opakované výstřely příliš lišilo. Rozptyl těchto měření byl 5 cm. Toto chování potvrdilo naše výsledky testování. Rozhodl jsem se provést test vystřelování s nakloněnou cívkou.



Obr. 7.4.: Nakloněná vychylovací cívka, vlevo reálná, vpravo model

Zde jsme při umístění začátku cívky těsně za konec hlavně a pro výklon 15° od osy získali pro opakované výstřely rozptyl dopadu 2 cm.

Dále jsem začal testovat, jakým způsobem bude možné řídit vzdálenost dopadu od hlavně cívky prostřednictvím vychylovací cívky. Pomocí pulzně šířkové modulace jsem spínal vychylovací cívku a sledoval míru vychýlení projektilů. Jako první jsem ale musel určit potřebnou frekvenci spínání. Změřil jsem tedy parametry navinutí cívky. Indukčnost byla 81 mH a sériový odpor 74Ω . Časová konstanta tedy,

$$\tau = \frac{L}{R} = 1.1 \text{ ms}, \quad (8.1)$$

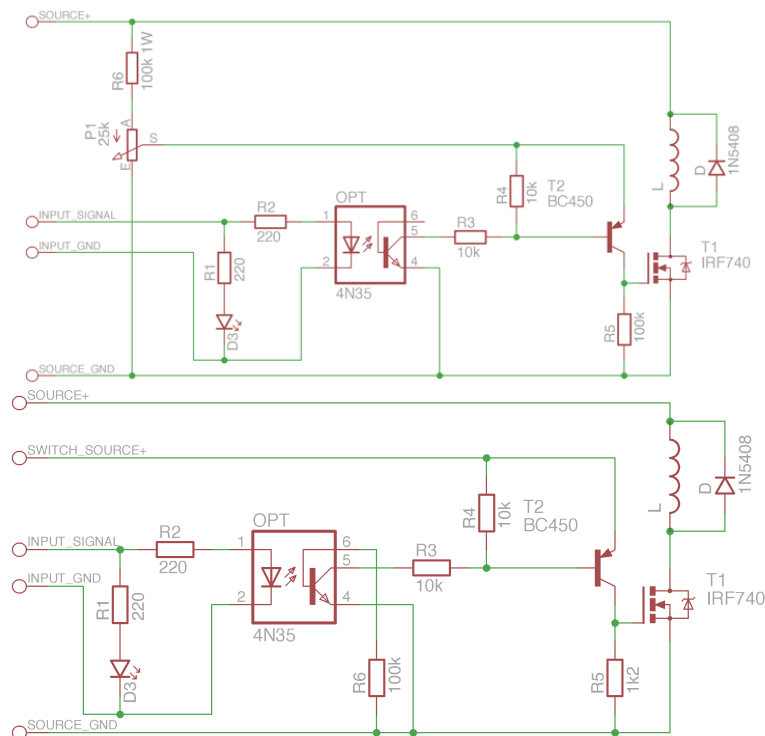
$$f_{PWM} > \frac{1}{\tau} = 913 \text{ Hz}. \quad (8.2)$$

Zvolil jsem tedy frekvenci spínání 20 kHz a testoval jakým způsobem bude vychylování probíhat. Pro nízké hodnoty střídavy, do 20 %, k vychýlení nedocházelo vůbec a od střídavy 50 % více docházelo ke stejné míře vychýlení. Mezi 20 a 50 % byl projektil vychylován od pěti cm dopadu až do 12 cm vzdálenosti dopadu od osy hlavně. Pro lepší kontrolu nad obvodem, jsem před cívku zařadil bočníkový odpor s hodnotou $1 \Omega/5 \text{ W}$. Měřením bylo zjištěno, že do hodnoty pod 20 % střídavy cívku neteče téměř žádný proud a pro hodnoty vyšší 50 % střídavy skrze ni teče proud konstantní.

7.3. ÚPRAVA SPÍNACÍHO OBVODU

Z těchto poznatků jsem usoudil, že spínací obvod mnou navržený není dostatečně rychlý, aby dokázal na této frekvenci spínat napájení cívky. Ověřil jsem, že zvolené součástky na této frekvenci pracovat umí a dále jsem svoji hypotézu chyby v návrhu ověřil sledováním průběhu signálu na GATE výkonového tranzistoru T1 na obrázku č. 5.1. a 7.4.

Bylo zjištěno, že tento signál nekopíruje výstupní průběh PWM řídicího obvodu, neboť zde dochází k výrazným přechodovým dějům. Za pomoci simulací a experimentů jsem spínací obvod upravil.

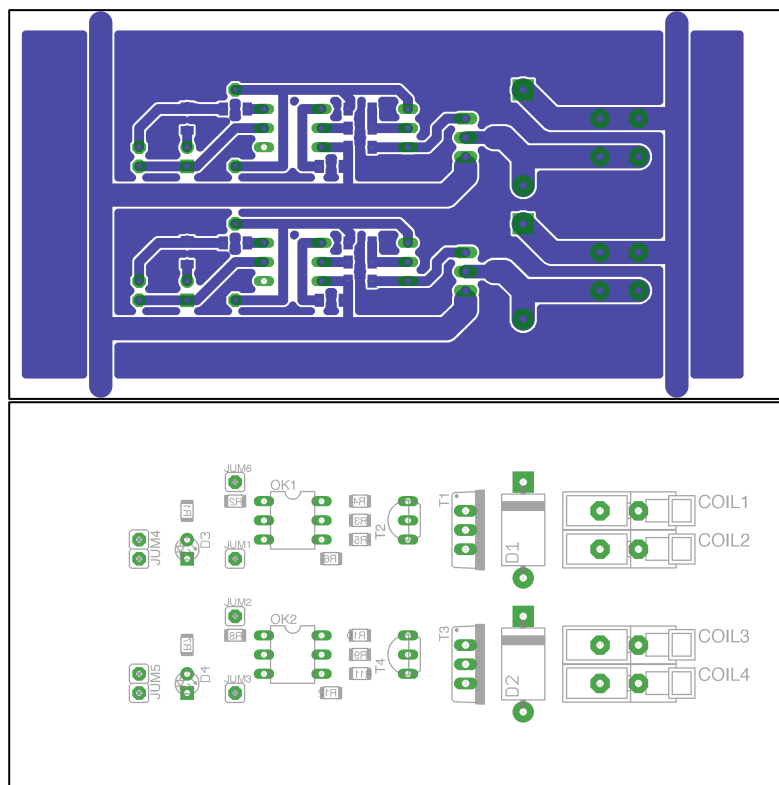


Obr. 7.5.: Úprava spínacího obvodu, Nahoře starý model, Dole úprava

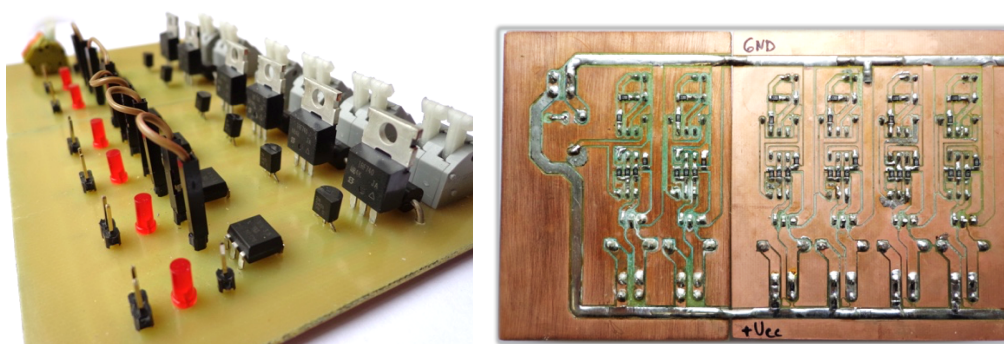
První změna proběhla již u galvanického oddělení optronem. Zjistil jsem, že je vhodné přes odpor (v obrázku č. 7.4. R6) uzemnit vyvedený přívod báze, čímž pro vysoké frekvenci docílím rychlejších přechodových dějů při spínání. Dále jsem v obvodu výrazně zmenšil vybíjecí odpor R5 u GATE tranzistoru T1. Pro provedení těchto změn jsem znovu provedl otestování takto vytvořeného spínacího obvodu.

Byl zjištěn další problém. Napětí, které napájí tento spínací obvod a vytváří tak signál pro výkonový tranzistor, bylo v původní verzi odvozené od napájecího napětí (140 V) odporovým děličem. Ten bohužel v takto upravené verzi rychlejšího spínacího obvodu je zatěžován větším proudem, a tak není schopen udržet dostatečně vysoké napětí. Výkonový tranzistor chceme provozovat v režimu saturace a k tomu je třeba spínací napětí o velikosti 10 – 20 V(max) [7]. Umístil jsem za odporový dělič blokovací kondenzátor o velikosti 100 μF a otestoval jeho vliv na udržení napětí po dobu spínání. Pro nízké hodnoty střídavého napětí byl schopen udržet napětí po celou dobu na 10 V, avšak pro vyšší hodnoty střídavého napětí na 50 % docházelo k výraznému poklesu.

Řešení jsou v zásadě dvě. První z nich navrhuje změnit odpory v odporovém děliču, tak aby byl odolnější pro větší zatížení. To s sebou ale nese trvalé zatížení děliče větším proudem. Druhá varianta je dělič nahradit stabilním zdrojem napětí. V pozdější fázi této práce jsem se přiklonil k této variantě. Provedl jsem mírnou modifikaci již vyrobeného plošného spoje, který jsem pomocí změny a přidání odporu upravil pro větší spínací frekvence a pokračoval jsem tvorbou modulu spínacího obvodu, který původní 2 obvody rozšířím na 6.



Obr. 7.6.: Plošný spoj a osazovací výkres upraveného spínacího obvodu, (1:1)



Obr. 7.7.: Fyzická realizace plošného spoje

Plošné spoje jsem navrhl tak, aby je bylo možné modulově spojit, jak je vidět na obrázku 7.6. S upraveným obvodem jsem pokračoval v testování spínání vychylování a původní problém spínání pomocí PWM jsem úspěšně vyřešil.

Potvrdil jsem funkčnost svých návrhů vychylovací cívky, jejího naklonění i umístění. Zbývalo těchto cívek vyrobit více a pokračovat doplněním systému o vychylováno do všech směrů okolo hlavní.

7.4. DRÁT VINUTÍ VYCHYLOVACÍ CÍVKY

Problémem bylo, že jsem na poslední cívku vypotřeboval zbytek drátu (0.26 mm), se kterým jsem doteď pracoval. Bylo tedy nutné najít jeho náhradu. Rychle dostupný byl drát ze skladu s průměrem 0.23 mm včetně izolace. Nepřímým měřením jsem porovnal jejich odpory. Pro původní drát jsem naměřil $0.42 \Omega/\text{m}$ a pro nový drát $0.58 \Omega/\text{m}$. Vytiskl jsem nové jádro, provedl navinutí nové cívky, provedl nakonektorování a změřil její parametry.

Tabulka 7.1.: Změřené a vypočítané parametry navinutých cívek

Průměr drátu [mm]	Počet závitů [-]	Indukčnost [mH]	Odpor [Ω]	Čas. konstanta [ms]	Proud drátem [A]
0.26	1900	81	74	1.1	1.89
0.24	2520	136	127	1.1	1.10

Po otestování nové cívky s tenčím drátem jsem zjistil, přestože její počet závitů je o 33 % větší, že její síla je výrazně nižší. Tento fakt bude souviset s celkovým výkonem, který cívce dodáme. Cívka s tenčím drátem má při stejném počtu závitů větší odpor, pokud ale chceme celé jádro zaplnit, musíme namotat drátu podstatně víc, což na jedné straně zvětší počet závitů, tedy zároveň i působící sílu, ale zvětší i celkový odpor. Pokud cívku napájíme ze zdroje konstantního napětí, její odpor omezuje proud, a tedy i celkový výkon, který do ní jsme schopni dodat. Pro lepší odhad parametrů cívky ještě před navinutím jsem vytvořil skript, který pro dané rozměry cívky, jádra a průřez drátu vypočítá počet závitů, odpor, proud protékající vnutím a potřebnou délku drátu a jeho hmotnost. Hmotnost počítáme z důvodu, že různí prodejci prodávají izolované dráty vinutí buď dle jeho délky nebo dle jeho hmotnosti.

Tabulka 7.2.: Vypočítané hodnoty pomocí skriptu

Průměr drátu [mm]	Počet závitů [-]	Odpor [Ω]	Proud drátem [A]	Délka drátu [m]
0.26	1900	74	1.89	198
0.24	2520	129	1.09	260
0.30	1395	40	3.50	144
0.40	840	14	9.96	87

Z tabulky 7.2. vyplývá, že zatímco proud vinutím roste s desetinou milimetru 2.8krát, počet vinutí klesá pouze 1.7krát. Tedy obecně pokud budeme cívku napájet z konstantního zdroje napětí, bude výhodnější navinout je silnějším drátem, abychom maximalizovali její sílu.

Jako nejvhodnější z testovaných průměrů byl drát s průměrem 0.3 mm. Nejen, že maximální proud jsme schopni dodat z laboratorních zdrojů do 4 A, ale i je tento průměr snadno k dostání v běžných obchodech s elektrotechnickými součástkami.

Podařilo se mi sehnat balení drátu s délkou 150 m a průměrem 0.3 mm. Provedl jsem jeho navinutí a změřil předem odhadnuté parametry. Navinou jsem celou špuli 150 m na 1400 závitů, indukčnost 53 mH a odpor 38 Ω .

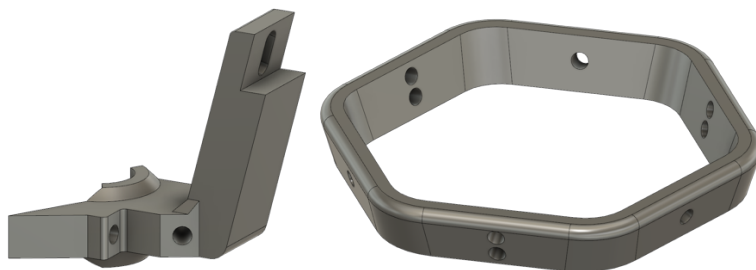
Provedl jsem test této cívky a při náklonu 15° od osy hlavně se mi podařilo docílit vychýlení s dopadem 30 cm od středu hlavně. Tento výsledek považuji za dostačující. Provedl jsem tedy navinutí dalších dvou cívek ze stejného drátu.

Tabulka 7.3.: Parametry navinutých cívek z drátu 0.3 mm

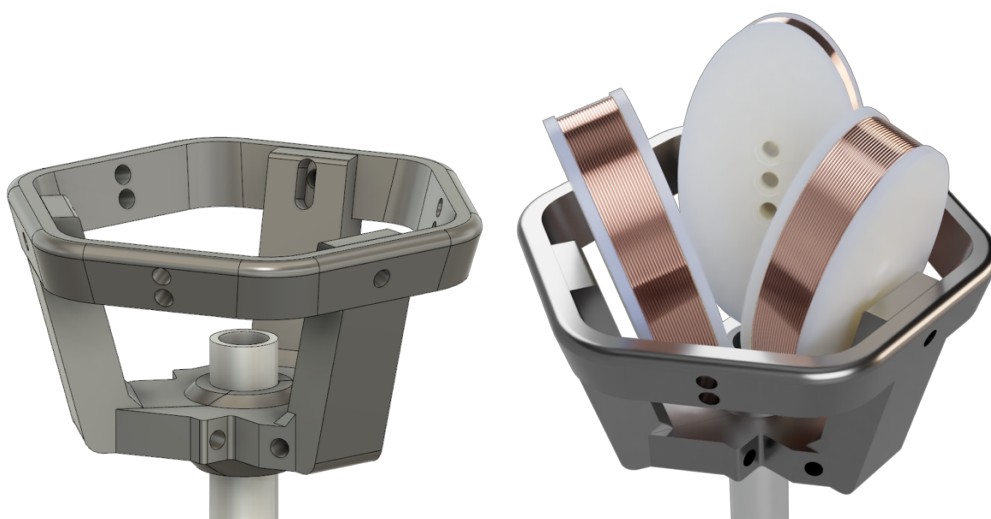
	Počet závitů [-]	Odpor [Ω]	Indukčnost [mH]
1. cívka	1400	38.0	53.0
2. cívka	1420	38.0	53.3
3. cívka	1430	39.2	56.0

7.5. DRŽÁK VYCHYLOVACÍCH CÍVEK

Vychylovací cívky bylo nutné určitým způsobem přichytit ke konci hlavně a zafixovat je do nakloněné polohy. K tomuto účelu jsem vytvořil 3D model takového držáku, který se sestává ze tří totožných částí, které mezi sebe uchytí hlavěň. Dále jsem vytvořil prstence, který tyto části zafixuje dohromady a vytvoří náklon jednotlivých cívek. Tento prstenec jsem účelně vytiskl jako jednotlivý komponent, neboť dává možnost případně ho upravit a docílit tak jiné polohy cívek, případně jiného náklonu bez nutnosti znovu navrhovat a tisknout celou třídílnou základnu.



Obr. 7.8.: Jednotlivé díly držáku



Obr. 7.9.: Sestavený držák a vizualizace s vertikálními cívkami

V místě uchycení cívek jsem nechal prostorovou rezervu, která umožní cívky umístit do různé vzdálenosti od hlavní vystřelovací osy. Všechny části jsem nechal vytisknout na 3D tiskárně a následně sestavil i s vychylovacími cívkami.

7.6. TESTOVÁNÍ VYCHYLOVACÍCH CÍVEK

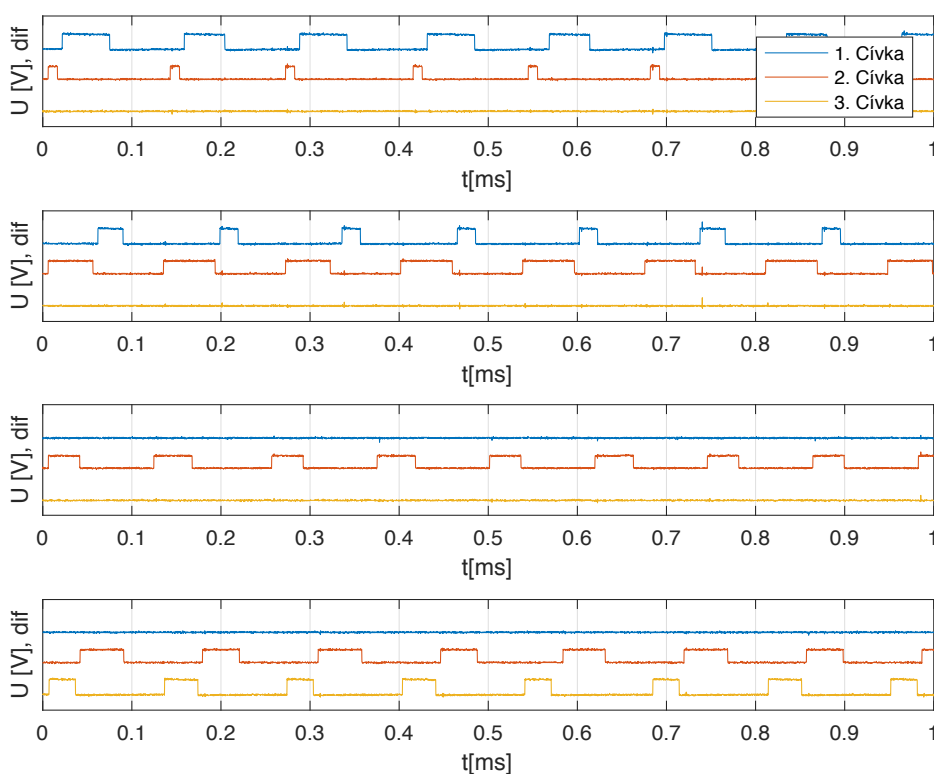
Po sestavení celého vychylovacího mechanismu jsem začal testovat jakým způsobem bude možné provádět vychylování projektilu plynule mezi dvěma cívkami. K tomu jsem napsal spínací program, jehož vstupem je úhel, který udává směr, kterým chceme, aby se kulička vychylovala. Celý interval od 0 do 360 stupňů jsem rozdělil na několik intervalů.

V rozmezí $\pm 10^\circ$ přímo ve směru jedné z cívek se spíná pouze daná cívka, v ostatních mezi-intervalech se spínají vždy dvě cívky současně. Doba sepnutí jednotlivých

cívky se plynule mění se směrem požadovaného vychýlení. Celkovou periodu spínání dvou cívek jsem nastavil na 100 μs a délku intervalu, jehož čas se rozděluje mezi spínání dvou cívek jsem nastavil na 40 μs . Se stejným omezením spínám cívku samostatně. Pro vyšší hodnoty dochází velmi často k nárazu do jedné z cívek.

Při testování jsem zjistil nesymetřicitu v chování dvojice cívek 1-2. Pro ostatní kombinace 2-3 a 3-1 se kulička vychylovala ve směru daným úhlem. Pouze pro kombinaci 1-2 nedocházelo k vychýlení kuličky mezi dvě cívky, právě naopak. Kulička byla vychýlena mezi protější dvě cívky.

Jako první jsem pečlivě otestoval běh programu, zda opravdu do cívek pouštím správnou kombinaci signálu. Po otestování pomocí výpisů z programu jsem správnost programu ověřil pomocí osciloskopu.



Obr. 7.10.: Průběhy spínání třech vychylovacích cívek pro různé požadované úhly, Shora: 15°, 90°, 120°, 170°

Na obrázku 7.10. je zřetelně vidět princip rozdělování doby sepnutí jednotlivých cívek v závislosti na úhlu. Po konzultaci této problematiky s vedoucím práce jsme se zaměřili na otestování, jakým směrem jsou jednotlivé cívky navinuty. To jsme provedli přiložením magnetu k jednotlivým cívkám a jejich sepnutí. Bylo zjištěno, že dvojice cívek 2-3 a 3-1 jsou vždy otočeny opačně, avšak dvojice 1-2 má stejný smysl orientace vinutí vzhledem ke středu hlavně.

Abychom potvrdili tuto hypotézu zavinění nesymetřicity směru vychylování stejným směrem směru otáčení drátu v cívce, prohodili jsme konektory cívky 2 ve spínacím obvodu. S vědomím toho, že ochranná dioda je umístěna přímo na desce spínacího obvodu, můžeme toto prohození snadno provést. Pokud by ochranná dioda byla umístěna přímo na cívce, pak by se musela otočit i tato ochranná dioda. Získali

jsme tedy různé směry vinutí pro kombinace cívek 1-2 a 3-1 a stejnou orientaci pro kombinaci 2-3. Poté docházelo ke správného vychylování mezi cívkami 1-2 a 3-1. Pro kombinaci spínání cívek 2-3 chování bylo obdobné jako pro předchozí stejně orientované cívky 1-2. Hypotéza tak byla ověřena.

Musíme tedy v konstrukci dodržet opačný smysl orientace vinutí pro každou z dvojic cívek. To bohužel není pro lichý počet cívek možné. Řešením by bylo zvětšit počet vychylovacích cívek na 4, což s sebou nese geometrické problémy sestavení těchto cívek blízko středu. Tento problém lze řešit daleko snadněji dynamickou záměnou dvojice napájecích vodičů u jedné z cívek dle toho, kterou dvojici budeme chtít spínat. Toho docílíme buď pomocí H-můstku, nebo přidáním dvou dalších spínačů před současný spínací obvod, které tuto záměnu budou provádět a efektivně tak nahradí H-můstek.

8. PODAVACÍ SYSTÉM KULIČEK

V další části práce bylo třeba řešit podavací systém, který bude dávkovat kulička do hlavně a připravovat je pro výstřel. Do této chvíle byla hlaveň umístěna kolmo vzhůru na stole a kuličku bylo před výstřelem třeba vždy dodat vhozením do lahve.

Zabýval jsem se tvorbou podavacího systému, který bude dostatečně rychlý a dostatečně přesný na to, aby bylo možné vystřelit alespoň 3 kuličky za sekundu. Tento počet jsem určil na základě analýzy rychlosti hudebních melodií. S upraveným podavačem totiž bude možné kuličky vystřelovat na ozvučnice, a tak hrát melodii. Rychlost 3 kuličky za sekundu odpovídá rychlosti 180 BPM, což pro většinu skladeb je dostatečná rychlost, nezahrnujeme-li trioly, přírazy, arpeggio a melodické ozdoby.

8.1. NÁVRHY PODAVACÍHO SYSTÉMU

Všechny vzniklé návrhy bych rozdělil do dvou základních oblastí – s akčním členem a bez něj. Konstrukce bez akčního členu jsou především tvořeny samospádem.

U těchto řešení je problém, že kuličky na sebe vzájemně tlačí, tedy poslední kulička určená k výstřelu není volně ložena. Cívka tedy musí překovávat tuto přítlačnou sílu. Další problém je se samotnou pozicí ostatních kuliček. Jsou příliš blízko urychlovací cívce a jsou umístěny nesymetricky, což nepříznivě ovlivňuje magnetické pole generované vystřelovací cívkou. Dále se pak musí vytvořit boční otvor do hlavně, kterým se kuličky budou dodávat.

Druhou skupinu tvoří mechanismy s akčním členem. Jako první můžeme řešit problém přítlačné síly od ostatních kuliček.

Výhodou této konstrukce je, že můžeme přesně v časových intervalech kuličky dodávat do mechanismu a máme tedy jasnou kontrolu nad konkrétní polohou kuliček v zásobníku. Problémem je samotná konstrukce vrtule. Otázkou je, jakým způsobem zvolit geometrii lopatek rotačního tělesa tak, aby nedocházelo k zasekávání kuliček při podávání a aby poslední kulička byla co nejpřesněji fixována pod vystřelovací hlavní. Problém, který tento návrh neřeší, je pozice ostatních kuliček, které ovlivňují magnetické pole vystřelovací cívky.

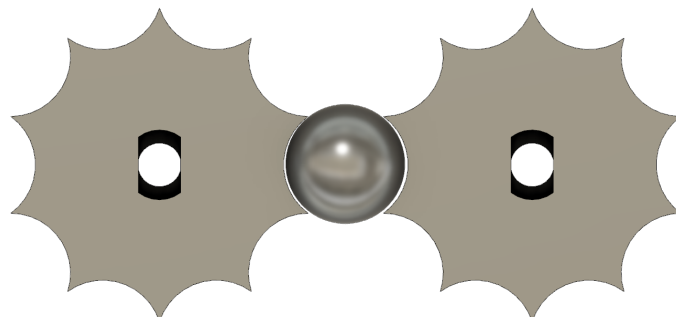
Tento problém můžeme částečně řešit další návrhem rotačního podavače, který je inspirován podáváním projektilů v koltu.

Je zde řešeno několik problémů. Kuličky jsou fyzicky odděleny a v případě fyzického dorazu by bylo možné je i relativně přesně umístit pod hlaveň cívky. Bohužel při vyšších rychlostech by bylo náročné plnění samotného mechanismu. Dále pak zůstává problém s polohou kuliček.

Tento problém můžeme vyřešit prohnutím podavacího vedení pod cívkou tak, aby posledních několik kuliček bylo již v ose hlavně.

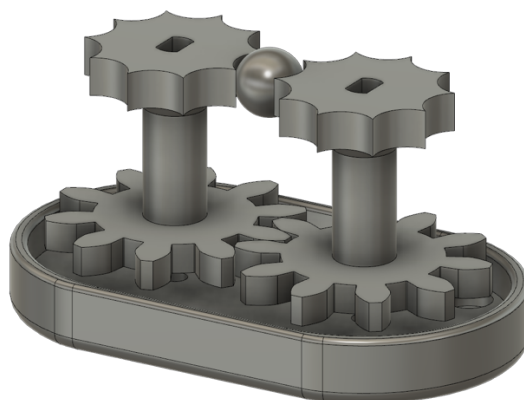
Lze zvolit různé varianty akčního členu, který bude kuličky do hlavně tlačit. Problém se zasekáváním u vrtulového mechanismu by mohl řešit mechanismus pásovým, který je ovšem mechanicky náročnější na výrobu.

Po konzultaci všech návrhů řešení podavače s vedoucím práce jsem se rozhodl vytvořit geometrickou rotační konstrukci, která zajišťuje bezpečnější a zároveň spolehlivé podávání. K tomu jsem vytvořil dvojici těchto mechanismů, které budou proud kuliček posouvat ve směru vedení.



Obr. 8.1.: Geometrie návrhu podavače kuliček

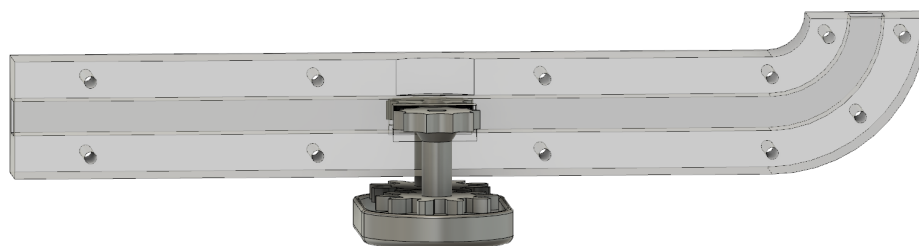
Zároveň jsem ověřil, že navržený mechanismus opravdu umožňuje plynulé podávání a kuličky se v něm nemají možnost zaseknout. V další fázi je třeba tyto dva mechanismy podavače rotačně inverzně spojit, kde jeden z nich bude poháněn motorem přímo a druhý se bude otáčet v závislosti na prvním. Provedl jsem tedy návrh dvou ozubených kol, úložného a spojovacího mechanismu.



Obr. 8.2.: Konstrukce podavače kuliček včetně uložení

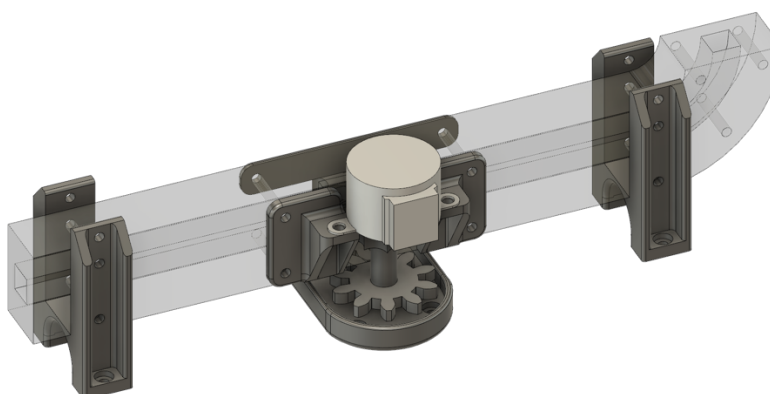
8.2. PRVNÍ REALIZACE PODAVACÍHO MECHANISMU

Všechny díly konstrukce jsem opět vytisknul na 3D tiskárně a sestavil je. Samotné vedení kuličky, ve kterém budou kuličku uloženy, jsme se rozhodli vytvořit z různě silného plexiskla. Abych docílil vnitřního průměru 9 mm, nechal jsem díly vedení vyřezat laserem do plexiskla o síle 4 a 5 mm. Tak jsem vytvořil vedení se čtvercovým průměrem, do kterého kulička s průměrem 8.731 mm přesně pasuje a vedení ji umožňuje volný pohyb. Stěny vedení jsou rovněž z plexiskla, aby do celého mechanismu bylo vidět. Místo, ve kterém bude umístěn podavač, bylo potřeba zvnějšku zkosit, aby se rotační mechanismus byl schopen dostat do požadované polohy. To jsem provedl odfrézováním pod daným úhlem.



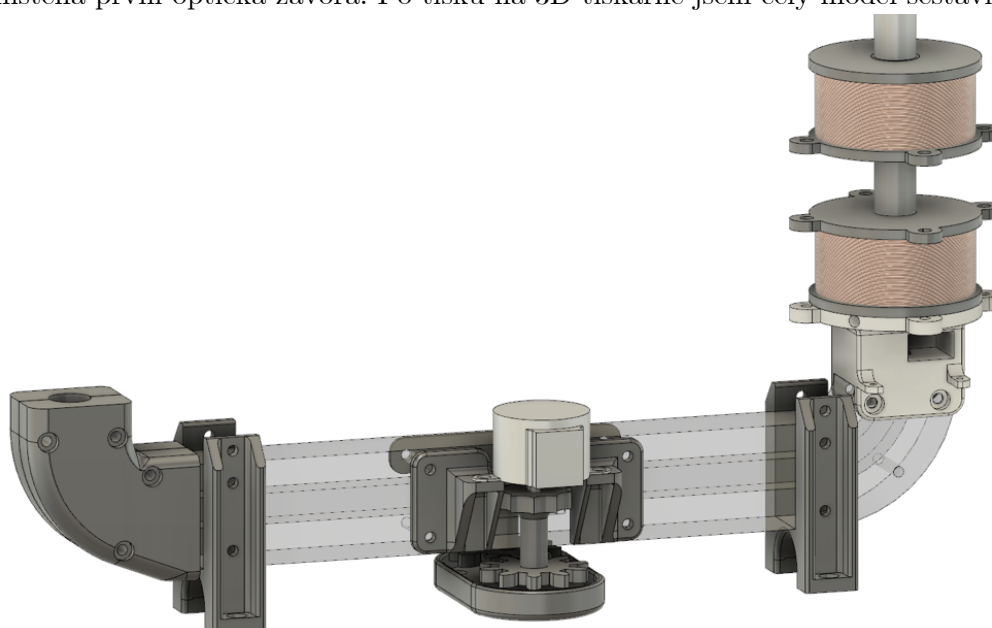
Obr. 8.3.: Vizualizace čtvercového vedení kuličky

V další fázi bylo třeba vytvořit stojany pro vedení a umístit na celý mechanismus akční člen. Rozhodl jsem se použít krokový motor, právě vzhledem k jednoduchosti jeho řízení a možnosti přesného polohování. Zároveň tedy bylo potřeba vytvořit uchycení tohoto motoru, tak aby celý mechanismu byl dostatečně pevný a stabilní.



Obr. 8.4.: Vizualizace konstrukce s krokovým motorem a upevněním

Jako poslední jsem navrhl ukončení podavače, kterým se budou do systému do dávat kuličky a dále díl, který v sobě bude integrovat spojení mechanismu s urychlovacími cívkami, plynulý přechod z čtvercového průřezu vedení na kruhový průřez hlavně a jako poslední bylo potřeba do mechanismu udělat díry, do kterých bude umístěna první optická závora. Po tisku na 3D tiskárně jsem celý model sestavil.



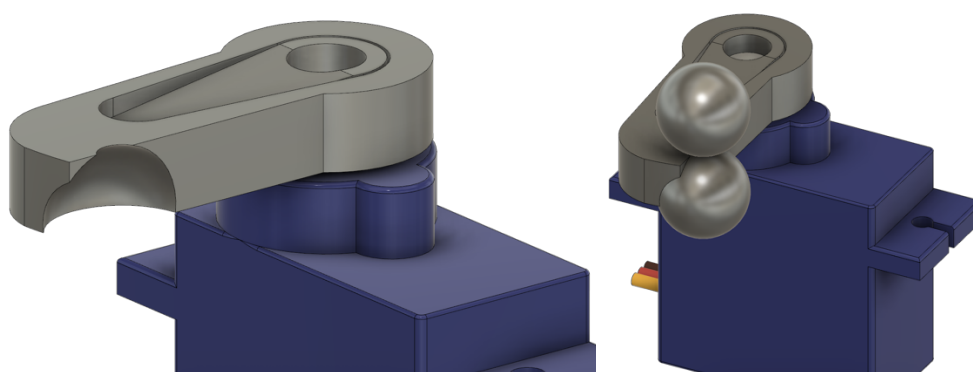
Obr. 8.5.: Finální konstrukce včetně vystřelovací hlavně a urychlovacích cívek

8.3. TESTOVÁNÍ PODAVAČE

Jako první jsem se zaměřil na funkčnost rotačního mechanismu podavače. Ten zprvu fungoval velmi dobře, kuličky se nezasekávali, bylo možné otáčet oběma směry, avšak projevila se malá síla motoru. Při větším počtu kuliček ve vedení, již nebyl motor schopen tuto řadu posunout. Dále při malém počtu kuliček v mechanismu docházelo k problému, kdy se kuličky málo vzájemně tlačili do podavacího mechanismu s krokovým motorem a ten tak stále rotoval a řada kuliček před ním se již nepohybovala, neboť nebyly samospádem dodávány ostatní kuličky.

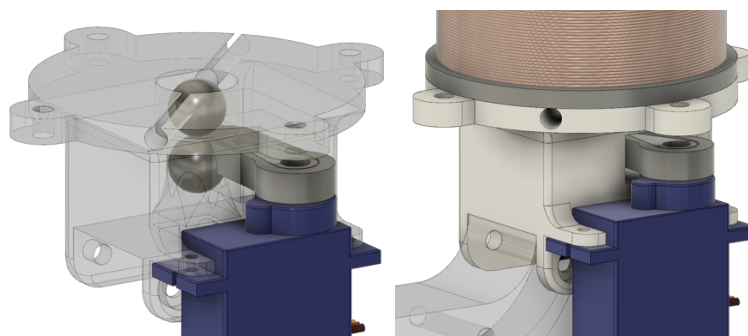
Dále byl zjištěn fatální problém při vystřelování. Navrhl jsem algoritmus, který při povelu k výstřelu začal kuličky posouvat směrem do hlavní až do té doby, než první z kuliček byla detekována první optickou závorou. V tuto chvíli jsem posouvání ukončil a provedl sepnutí první urychlovací cívkou a tím zahájil vystřelování. Bohužel došlo k vystřelení několika kuliček najednou, které byly vytaženy z mechanismu vedení proudu kuliček. Přestože magnetická síla je v místě aktuální polohy druhé z takto připravených kuliček téměř nulová, došlo k vytažení trojice, někdy i čtveřice kuliček. Tento jev jsem po konzultaci s vedoucím práce vysvětlil neoddělenými kuličkami. Při fyzickém kontaktu objektů se totiž chovají jako jeden.

Otázkou pro řešení tohoto problému bylo, jakým způsobem řešit fyzické oddělení těchto kuliček ve vedení těsně pod hlavní s urychlovacími cívkami. Je zde několik možností. První z nich je změna celkového systému podavače, případně volba jiného vedení proudu kuliček. Další možnost je mezi proud kuliček po ukončení posouvání vrazit oddělovací desku. Zde bude problém s odsakováním horní kuličky, což by mohlo způsobit nepřesnosti v časování jejího výstřelu. Zvolil jsem šetrnou variantu, která využívá servo pohonu, na jehož rameno jsem navrhnul speciálně tvarovanou oddělovací lopatku, která umožní horní kuličku bezpečně, a hlavně volně udržet v hlavní a spodní kuličce umožní volný pohyb zpět ve směru podávání. Rameno bylo navrženo tak, aby se dalo vložit na již existující rameno na servu, které obsahuje vnitřní vruby pro nasunutí na osu serva. Rameno bylo vtyštěno na 3D tiskárně a k původnímu ramenu bylo přilepeno.



Obr. 8.6.: Servo s upraveným ramenem a kuličkami

V této chvíli bylo potřeba upravit ukončovací díl, který spojuje vedení kuliček a systém hlavně s urychlovacími cívkami. Nově tak bude obsahovat uchycení pro servo pohon a díru pro rameno, kterým kuličky budou oddělovány.



Obr. 8.7.: Nově upravený díl přechodu ze čtvercového vedení do hlavní

Po vytištění na 3D tiskárně jsem tento díl vyměnil a nově osadil servo-pohon s upraveným ramenem. Dále jsem doplnil ovládací program o tento prvek a nadefinoval mu dané polohy pro konkrétní místa v programu vystřelování.

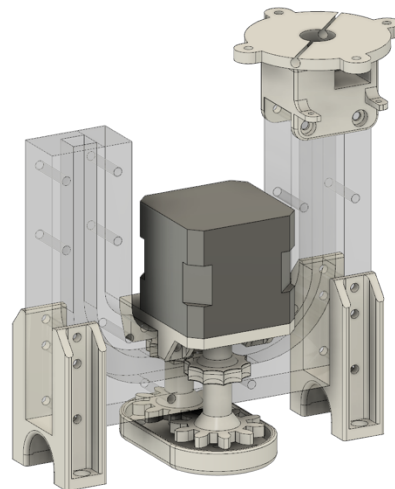
Celkový program nyní funguje následujícím způsobem. Servo je v klidovém stavu otevřeno a umožňuje tak volný průchod kuliček mechanismem. Po povelu k výstřelu začne rotovat motor, který posunuje kuličky vedením směrem k hlavni až do chvíle přerušení první optické závory. V tuto chvíli motor přestane rotovat a servo se přesune do polohy zavřeno, kdy rozdělí první a druhou kuličku v podavači. V tuto chvíli motor začne rotovat sérii kuliček zpět, aby došlo k výraznému fyzickému oddělení. Vzdálenost, která je potřebná, je předmětem dalšího testování. V tuto chvíli je první z kuliček držena volně servem a ostatní jsou odrotovány od ní. Poté dojde k samotnému výstřelu. Tento je již proveden úspěšně. Základní systém podavače je tedy vytvořen a zbývá vyřešit problémy se silou motoru a problémy s podáváním způsobené množstvím kuliček v podavači.

8.4. DRUHÁ REALIZACE PODAVACÍHO SYSTÉMU

Rozhodl jsem se celé vedení kuliček výrazně zkrátit a eliminovat tak míru tření kuliček s vedením, které způsobovalo jejich nedokutálení až k podavači. Použil jsem krokový motor Nema 17 [8], který jsem řídl přes řídicí desku A4988.

Navrhl jsem tedy nové vedení, které jsem opět vyřezal z plexiskla, dále jsem upravil uchycení motoru a vytvořil stabilnější rotační mechanismus.

Výhodou byla univerzálnost ukončovacího dílu s osazeným servem, a tak jej nebylo třeba tisknout znovu. Stejně tak stojany, které drží celý mechanismus a dodávají mu stabilitu. V poslední fázi jsou připraveny k osazení na společnou základní desku. Opět jsem začal provádět testování takto upraveného mechanismu a všechny vady z první realizace byly úspěšně odstraněny.



Obr. 8.8.: Vizualizace upraveného mechanismu

9. SBĚRAČ KULIČEK

V předchozí kapitole se nám podařilo vyvinout spolehlivý systém, do kterého budou kuličky jednou stranou umisťovány a na straně druhé budou úspěšně vystřelovány. V podobě zbraní by se jednalo o samonabíjecí systém. Nyní ale zbývá vytvořit další systém, který bude vystřelené projektily zachytávat a vracet je zpět do nabíjecího systému. Z výsledků testů vychylovacích cívek je známa maximální vzdálenost od středu hlavně, do které jsme schopni vystřelenou kuličku vychýlit. Tato vzdálenost je téměř 30 cm.

9.1. SBĚRACÍ TRYCHTÝŘ

Hlavní představou o sběrači byl otočený kónický kužel, který by byl umístěn okolo hlavně a svými stěnami by sbíral dopadající kuličky a směřoval je do středu. V ideálním případě by se jednalo o tvar, který by ve středu měl vyříznutou díru, ve které by byla umístěna vystřelovací cívka. Kuličky by byly postupně svažovány do jediného bodu, odkud by byly odváděny do podavacího systému.

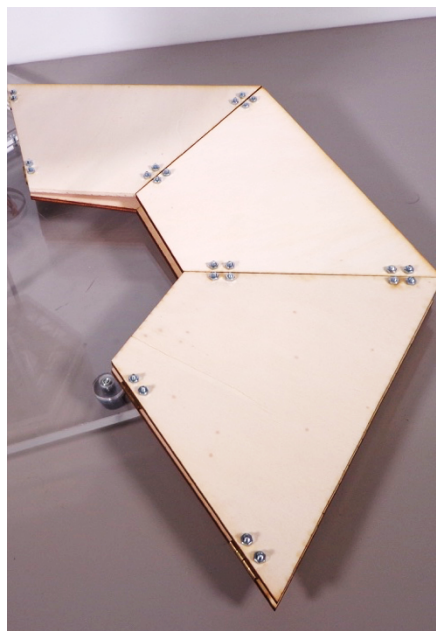
Návrh tohoto systému by byl možný, ale nejspíš by bylo nutné jej vytisknout celý na 3D tiskárně, což by vzhledem k myšleným velikostem bylo časově výrazně náročné. Rozhodl jsem se tedy tento systém upravit a rozdělit na několik částí.

Jako první jsem se rozhodl okolní sběrací trychtýř vytvořit jako šestici lichoběžníků z deskového materiálu. V mém případě jsem zvolil 5 mm překližku.



Obr. 9.1.: Sběrací desky

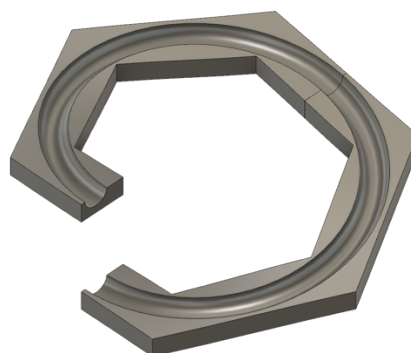
Všechny díly jsem nechal vyřezat na laseru. Po složení se ukázala největší výhoda tohoto návrhu, a to je skladnost. V první verzi po složení jsem desky vůči sobě fixoval pomocí lepicí pásky, která svojí flexibilitou umožnila tento sběrací systém skladně složit. Překližkové lichoběžníky jsem tedy při finalizaci doplnil dírami a spojil malými panty.



Obr. 9.2.: Složené sběrací desky

9.2. VRATNÁ DRÁHA

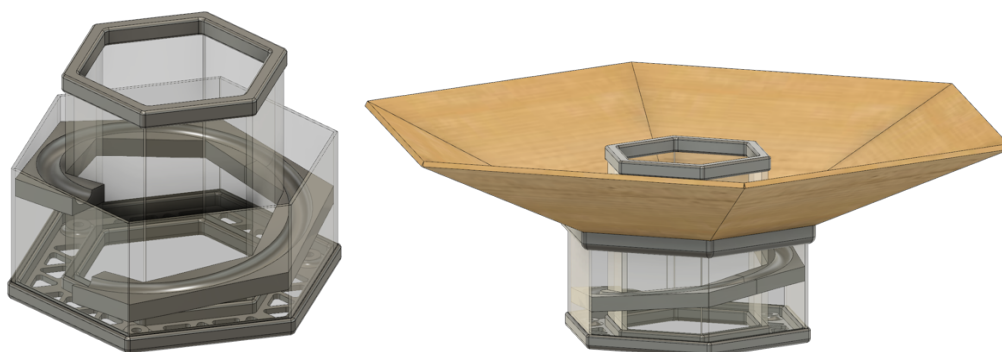
Poté, co se kulička dostane samospádem na okraj sběracího systému, bude třeba ji přepravit na konec řady kuliček, které dopadli před ní. Pro řešení tohoto problému jsem vytvořil design vyspádované dráhy s kanálem, do kterého se kulička dostane a jenž jí bude vést v požadovaném směru. Celkový spád jsem zvolil 5 cm na okruh s průměrem 17 cm. Abych minimalizoval množství materiálu tisknutého 3D tiskárnou a tak i čas strávený tiskem, odstranil jsem nezbytný materiál na maximum a provedl tisk pouze nosné konstrukce, u které jsem nastavil precizní kvalitu tisku 0.06 mm na tisknutou vrstvu.



Obr. 9.3.: Vyspádované vedení kuličky

Zároveň bylo nutné vytvořit stěny tohoto vyspárovaného vedení, aby kuličky nemohli vypadnout mimo. Neboť uvnitř mechanismu budou umístěny vystřelovací cívky, chtěl jsem, aby k nim byl vizuální přístup. Z tohoto důvodu jsem pro materiál stěn zvolil plexisklo. Po rozměření velikosti vystřelovacích cívek jsem na laseru vyřezal vnitřní a vnější stěny.

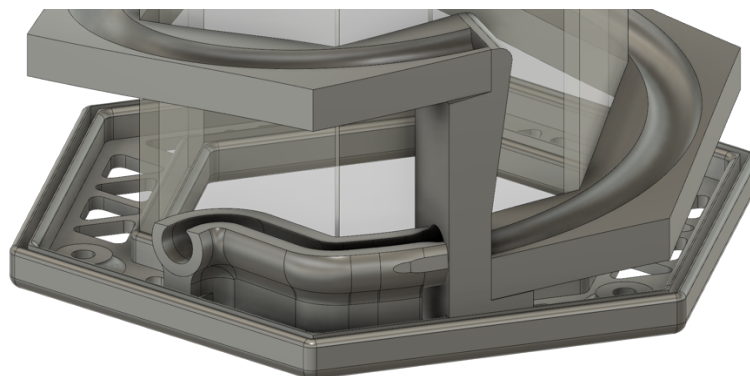
Dále bylo potřeba celý tento mechanismus se stěnami a sběracím trychtýřem spojit dohromady. Vytvořil jsem tedy spojovací díl vnitřních stěn, dále pak spojovací díl vnějších stěn, který umožňuje uložení rozloženého sběracího trychtýře a dále pak spodní díl, který spojuje vnitřní a vnější stěny a obsahuje tři díry pro kotvící konstrukci.



Obr. 9.4.: Vyspádované vedení a sběrací desky

Jako poslední bylo třeba navrhnout díl, který spojí vyspárované vedení a z jeho ukončení přepraví kuličku ven z takto vytvořeného hexagonu. Vytvořil jsem trubici, do které kulička z vyspádovaného vedení zajede. Trubice zároveň omezí počet stupňů volnosti kuličky pouze na jeden. Trubicí jsem navrhl z vrchu z části otevřenou, aby bylo možné sledovat pohyb kuliček uvnitř. Zároveň tato modifikace umožnila tisk

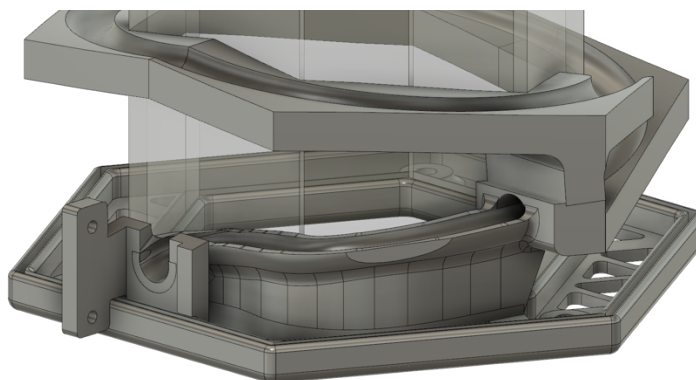
dílu bez nutných podpor uvnitř trubice. Pokud by se totiž vytiskli podpory materiálu při tisku dovnitř uzavřené trubice, bylo by je velmi složité odstranit a vyčistit kanál tak, aby jím kulička volně procházela.



Obr. 9.5.: Výstupní trubice a spojka vyspádovaného vedení

Po vytištění všech komponentů a jejich následném sestavení se ukázali jisté nedostatky tohoto návrhu. Pokud máme pouze jednu z kuliček, která prochází sběračem, proběhne to bez větších problémů. Avšak pokud se několik kuliček ve sběrači zastaví, což může být způsobeno naplněním podavače, nedojde již v mnoha případech k jejich opětovnému rozpohybování. Vysledoval jsem, že tento jev je způsoben především malým spádem vytvořené trubice.

Přepracoval jsem tedy model této trubice. Zkrátil jsem vyspádované vedení úhlově o 60 stupňů, z pohledu půdorysu. Horní část vedení jsem doplnil o zrcadlový díl, který překrývá spodní část vedení. Ten také pomáhá minimalizovat výšku, z které padá kulička ze sběracího trychtýře do vyspádovaného vedení.



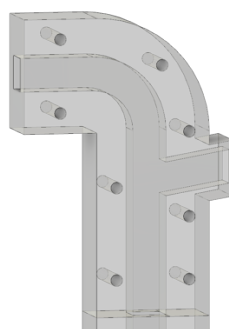
Obr. 9.6.: Upravená trubice s doplněním o spojení s vedením kuliček a rozšíření vyspádovaného vedení

Po vytištění nových dílů jsem provedl jejich slepení. Při lepení se ukázalo, že se jedná o vcelku komplikovaný tvar a některé spoje se nepodařilo slícovat přesně jako ve 3D modelu, podle kterého byli vytisknuti. Ve finální verzi by je bylo vhodné vytisknout jako jeden celek, což s sebou bohužel nese i tisk velkého množství podpor.

Celkový model jsem po slepení usadil mezi stěny plexiskla a otestoval jeho funkčnost. Podařilo se odstranit problém se zasekáváním kuličky po zastavení. Tentokrát se již kulička sama opět rozkutálí. Tomu jsem napomohl vytisknutím modelu s precizní kvalitou tisku 0.06 mm výšky vrstvy, a ještě to podpořil vybroušením vedení dohladka.

9.3. SPOJENÍ SBĚRAČE A PODAVAČE

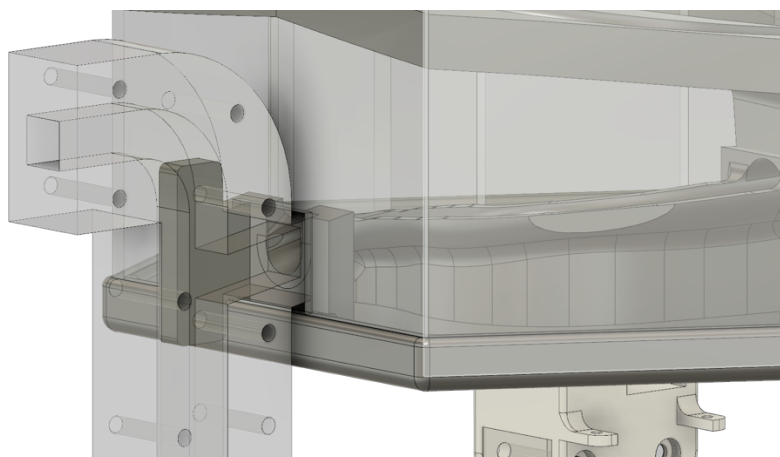
Jako poslední bylo potřeba vytvořit spojení mezi výstupem vyspádovaného vedení a vstupem podavače. Zde jsem zvolil variantu prodloužení původního vedení podavače dalším dílem z plexiskla. Z návrhu algoritmu podávání bylo jasné, že motor v jednu chvíli kuličky posune vpřed a poté je posune zpět. Aby při zpětném posunu nemusel motor posouvat všechny kuličky v zásobníku, rozhodl jsem se vytvořit nad sérií kuliček v podavači prostor, prodloužené vedení, do kterého se budou kuličky z podavače schopny posunout bez toho, aby musela zdvihát i ostatní kuličku v sběrači.



Obr. 9.7.: Model spojení vedení a vyspádovaného vedení

Zároveň jsem prodloužené vedení vyvedl ven ze systému tak, aby bylo možné kuličky do systému přidávat, případně je hromadně vysunout. Aby spojení, mezi koncem trubice ve sběrači a vstupem vedení v novém spojovací dílu, bylo vůči sobě dostatečně pozičně fixováno, již při tisku dílu s trubicí jsem tento díl doplnil o spojovací desku, která tuto fixaci zajistí.

Jako poslední bylo třeba navrhnout díl spojující nově vytvořený spojovací díl a původní vedení podavače. Zvolil jsem dvě jednoduché destičky a do jedné z nich zapustil matice.



Obr. 9.8.: Výsledné spojení s ostatními komponenty

Při statickém testování tohoto spojení se objevil problém, kdy při vysunutí kuliček zpět vedením podavače nad vstup sběrače, byly tyto kuličky zadrženy vlastní silou sérií kuliček ve sběrači a nebylo dovoleno jejich opětovné uvolnění. Avšak tento problém se vyřešil ve chvíli, kdy jsem spustil systém podávání motorem. Motor totiž částečně vibruje s celým systémem, a to zablokovanou kuličku uvolní.

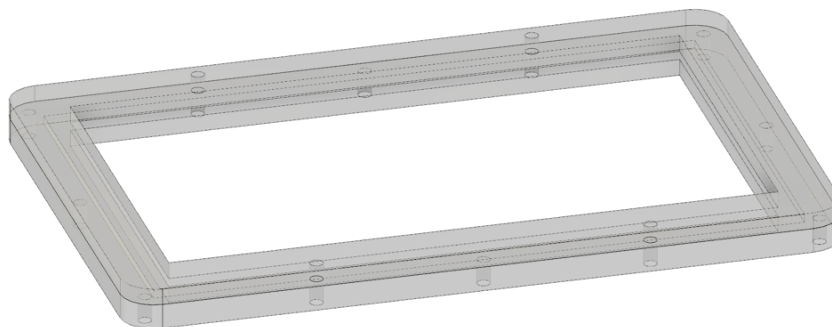
10. FINÁLNÍ KONSTRUKCE

Aktuální stav celého systému je takový, že je vyřešen základní princip vystřelování a vychylování ocelových ložiskových kuliček s průměrem 8.731 mm. Zároveň je zajištěno jejich zachytávání a odvedení do systému, který zajistí jejich podávání, resp. nabíjení, pro další vystřelování.

Všechny systémy jsou momentálně pevně umístěny na desce plexiskla, která přesně vymezuje jejich pozice. Zároveň jsem vytvořil držáky navrhnutých plošných spojů. Vzhledem ke skutečnosti, že se na nich pracuje s napětím 140 V, konstrukce vyžaduje zajištění proti nechtěnému dotyku.

10.1. DRŽÁKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Vytvořil jsem kotvici obdélníkové desky z plexiskla, které jsou tvořeny dvěma vrstvami. První, spodní, vrstva, na které leží plošný spoj, je vysoká 4 mm a zajišťuje tak izolační mezeru mezi deskou plošného spoje a spodní plexisklovou základní deskou. Plošný spoj je fixován pomocí obrysu z plexiskla o tloušťce 2 mm. Aby jej nebylo možné vyjmout, je překryt rámečkem opět z plexiskla o tloušťce 4 mm, který je k držáku přišroubován čtyřmi šrouby do matic, které jsou zafrézovány do spodního dílu.



Obr. 10.1.: Držák plošného spoje

Takovéto držáky jsem vytvořil dva. V jednom je umístěn plošný spoj se spínacími obvody a v druhém je umístěn plošný spoj obsahující vyhodnocení výstupu senzorů optických závor. Zde jsem ponechal místo pro umístění plošného spoje, který v sobě bude integrovat propojení řídicího modulu s vytvořenými plošnými spoji, ovládacím modulem motoru, případně napájecí moduly upravující úroveň napětí.

10.2. NAPÁJENÍ SYSTÉMU

Současný stav napájení je řešen pomocí laboratorních zdrojů. Nejvyšší napětí, 140 V, pro odpalovací obvody jsem vytvořili sériovým spojením čtyř zdrojů. Zároveň

máme k dispozici další zdroj 12 V, který poskytuje napájení krokového motoru. Současně toto napájení používáme jako spínací napětí pro spínací obvody. K nim totiž přivádíme spínací signál z řídicího modulu, který je galvanicky oddělen. Tento signál slouží k sepnutí GATE výkonového tranzistoru, kde je maximální povolená hodnota napětí 20 V. Toto napětí zároveň v obvodu napájí logiku vyhodnocení signálů na výstupu galvanického oddělení. Pro napájení krokového motoru je doporučované napětí 24 V. Jako poslední napájíme řídicí modul, který je v současné době tvořen deskou Arduino Nano, která je napájena po USB z PC, tedy hodnotou 5 V. Navrhl jsem tedy způsob řešení napájecího systému pro tento projekt.

10.3. NAPÁJENÍ PRO ODPALOVACÍ OBVODY

Aktuální hodnota napětí pro napájení odpalovacích obvodů je 140 V. Spínací obvody jsou dimenzovány na napětí 400 V. Je několik možností realizování napájecího zdroje tohoto napětí.

První variantou je toroidní transformátor 230/115 V s výkonem 500 W, za něj by bylo možné připojit dvoucestný usměrňovač a kondenzátorovou baterii. Zde je zásadní problém v bezpečnosti. Tento zdroj by byl přímo připojen na síťové napětí, což by vyžadovalo další bezpečnostní opatření.

Druhou variantou by byl spínaný zdroj. Bohužel tento typ zdroje se na takto vysoké napájení standardně nevyrábí, a tedy jedinou variantou by ho bylo vyrobit. Což s sebou nese nejen návrh obvodu, pro spínání 500 W, ale i řídicí obvod se zpětnovazební smyčkou.

Po konzultaci jsem se rozhodl, že nejlepší způsob řešení tohoto problému bude využití průmyslových napájecích zdrojů na DIP lištu. Tyto zdroje se vyrábí standardně do hodnoty napětí 48 V, u některých je možnost zvýšení jejich napětí na 55 V. Je třeba, aby jejich výstupní proud byl 5 A. Dále je nutné, aby jejich výstup byl izolovaný, tedy výstupní zemní potenciál nebyl spojen s nulovým vodičem napájení ze sítě. Pouze v této chvíli můžeme zapojit do série tři tyto zdroje a s jmenovitou hodnotou 48 V na zdroj dostaneme na výstupu napětí 144 V.

Dále je potřeba na výstup zdroje připojit kondenzátorovou baterii, která výstupní napětí podrží na dostatečně dlouhou dobu, než zareaguje na prudké zvýšení odběru samotný spínaný zdroj.

Provedl jsem numerickou simulaci, abych zjistil, jak velké kondenzátory jsou potřeba, aby výstupní napětí nepokleslo na 95 % své původní hodnoty při sepnutí cívky s odporem 38 Ω a indukčností 53 mH, což odpovídá sepnutí vertikální cívky. Dobu sepnutí jsem nastavil na 30 ms, což je doba, do které je deklarováno, že typický spínaný zdroj na DIN lištu ustabilizuje výstupní napětí.

Pomocí numerické simulace bylo zjištěno, že kondenzátory s kapacitou 10 000 μF jsou schopny po dobu 30 ms zajistit maximální pokles spínaného napájení o méně než 5 %. Cena těchto kondenzátorů se pohybuje v řádech 100 Kč za kus. Dále je vhodné takto vytvořenou kondenzátorovou baterii doplnit kondenzátorem s menší kapacitou a z jiného materiálu. Tento kondenzátor zajistí větší odolnost proti vyšším frekvencím.

10.4. NAPÁJENÍ PRO KROKOVÝ MOTOR

Námi použitý krokový motor Nemá 17 je s řídicím obvodem A4988 [6] vhodné napájet ze zdroje stejnosměrného napětí 24 V. Neboť jsem pro napájení odpalovacích obvodů doporučil použití zdroje na DIN lištu, zopakuji toto doporučení i pro tento zdroj. Proud tohoto zdroje by měl být alespoň 2 A.

10.5. NAPÁJENÍ SPÍNACÍHO OBVODU A ŘÍDICÍ DESKY

V současné chvíli toto napětí je identické v napájení krokového motoru a to 12 V. Pokud ale budeme chtít napětí zdroje krokového motoru zvýšit na 24 V, už jej nemůžeme použít pro spínání výkonového tranzistoru, jehož maximální napětí na GATE je 20 V. Jelikož odběr z tohoto zdroje bude maximálně do proudu 1 A, využil bych jednoduché zapojení s integrovaným obvodem 78S12, a jako jeho vstup zvolil přímo 24 V ze zdroje pro krokový motor.

Stejně tak můžeme vytvořit napájení pro řídicí obvod a vyhodnocovací logiku optických závor, kde potřebujeme napájení 5 V. Opět bychom využili obvodu 78S05 a vytvořili dostatečně silný zdroj napájení pro tuto část projektu.

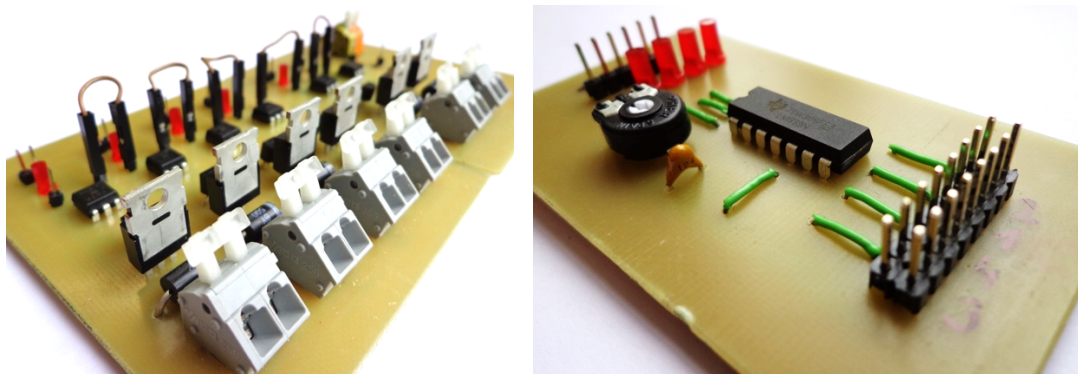
10.6. DESKY SBĚRAČE

Vytvořený sběrací trychtýř je osazen malými panty, což umožňuje jeho snadné odejmutí a složení. Zároveň je velmi jednoduché tento sběrač vyměnit za jiný. Ten může mít například upravenou velikost, výraznější náklon, případně i jiný tvar.

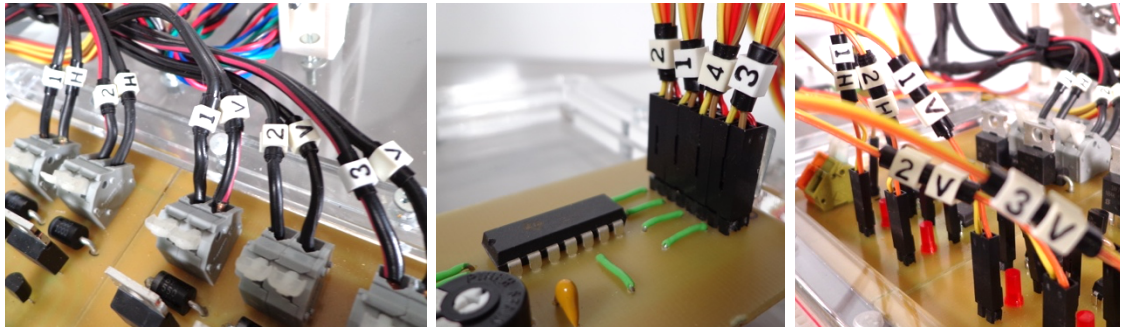
Tento sběrač je dále možné osadit nasouvacími držadly, na kterých mohou být umístěny kupříkladu ozvučné xylofonové desky a dopadem kuličky na jejich povrch je snadno rozeznáme.

Dále by bylo možné vytvořit dotykovou síť, která se umístí na desky a pomocí nich se bude monitorovat místo dopadu kuličky po vychýlení. Stejné monitorování by bylo možné udělat pomocí vysokorychlostní kamery umístěné nad hlavní systémem.

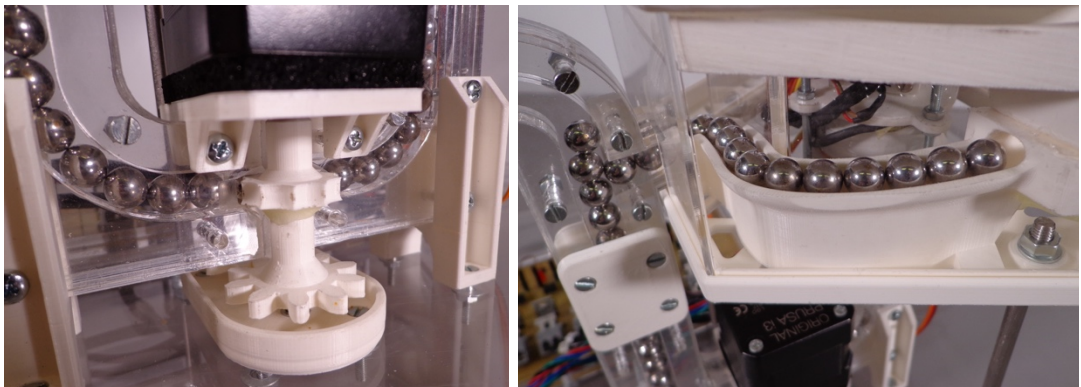
Po dokončení celého systému, jsem provedl jeho obsáhlou fotodokumentaci. Systém je samostatně přenosný, v současné chvíli bez napájecího zdroje, a jeho řízení je prováděno přes sériovou linku rozhraním USB-UART.



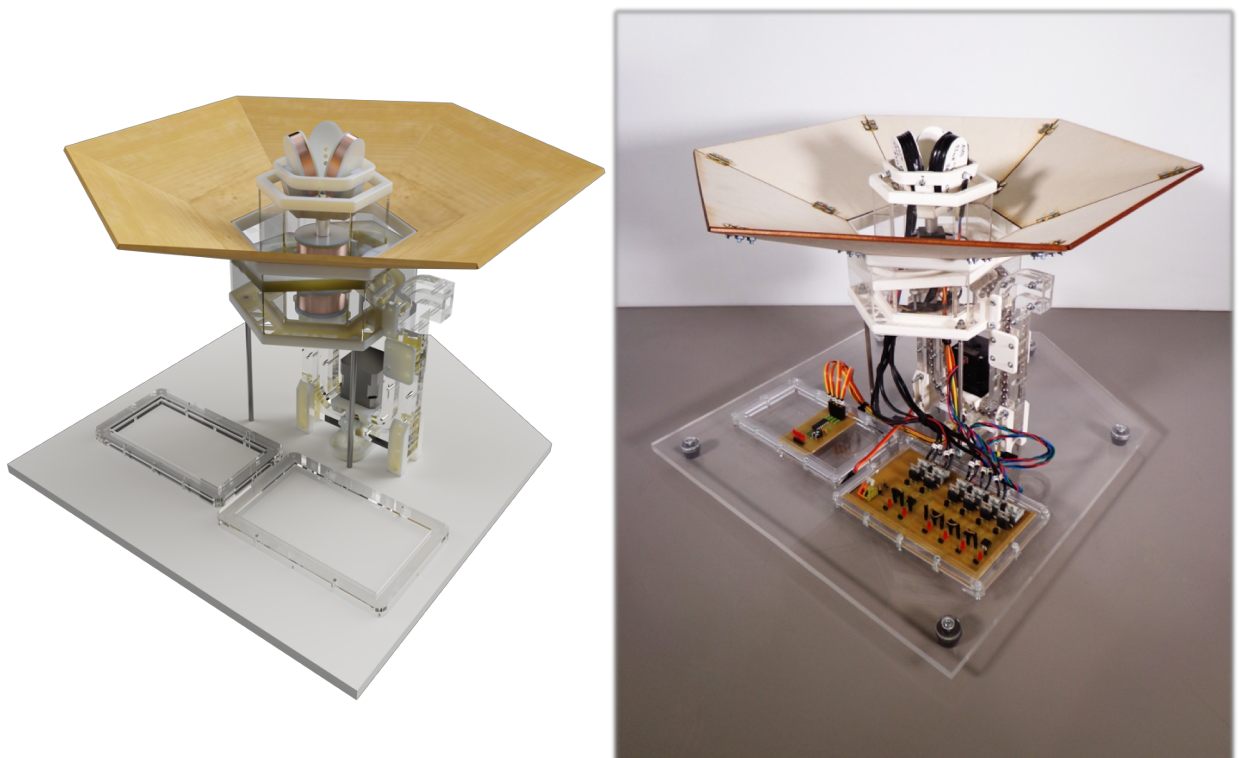
Obr. 10.2.: Spínací obvody a plošný spoj s logikou vyhodnocující senzory



Obr. 10.3.: Popisky vodičů



Obr. 10.4.: Podavač kuliček a jejich vedení



Obr. 10.1.: Vizualizace a reálný model

11. ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval tvorbou zařízení, které bude schopno vystřelovat ocelové kuličky kolmo vzhůru a následně je vychýlit na předem určenou pozici. Jako první jsem se zaměřil na vytvoření urychlovacího obvodu. Zkoumali jsme, jaký tvar cívky bude pro tento účel nejvhodnější. Pro urychlování kulatých projektilů se ukázal nejvhodnější typ cívky s nízkou výškou, tedy malým rozměrem délky jádra. Čím jsou cívky kratší, tím je divergence magnetického pole větší a je tedy náročnější provést přesné časování. Zvolili jsme tedy výšku cívky 20 mm a pokračovali navinutím cívky na vytisknuté jádro z materiálu PLA. Urychlovací cívka byla navinuta drátem o průměru 0.25 mm a má testovaných 3 000 závitů. Její odpor je 88.5Ω a její indukčnost 128 mH. Po navinutí jsem vytvořil spínací obvod, jehož vstupní signál je galvanicky oddělen a spínací prvek je unipolární tranzistor IRF 740. Jako napájení bylo zvoleno sériové zapojení laboratorních zdrojů o výsledném napětí 140 V. Při spínání napětí do této cívky jsme docílili maximální výšky výstřelu 15 cm, což bylo pro tento projekt nedostačující. Rozhodl jsem se navinout druhou cívku, se stejnými rozměry, a realizovat dvoufázové vystřelování.

Od této chvíle bylo nutné doplnit systém o senzory polohy kuličky vzhledem k nutnosti časovat spínání druhé cívky. Zvolil jsem optické závory s led diodou a fototranzistorem. Vyhodnocovací obvod jsem doplnil komparátorem pro strmější průběhy na výstupu snímače. Dále jsme změřili průběh síly působící na kuličku uvnitř urychlovací cívky a změřená data použili v numerické simulaci vystřelování kuličky pomocí cívek, jejímž výsledkem byla závislost vstupní rychlosti na délce sepnutí druhého stupně tak, aby výstupní rychlost vystřeleného projektilu byla 2 m/s. K výraznému zlepšení z hlediska opakovatelnosti pomohla výměna vrtané hlavě za hlavě tvořenou hliníkovou trubkou o průměru 8.9 mm a zakoupení ocelových ložiskových kuliček s průměrem 8.731 mm.

V další fázi jsem se zaměřil na vychylovací systém. Testoval jsem vliv tvaru cívky na velikost síly působící na kuličku letící okolo cívky v různých směrech. Nejlepší výsledky byly zjištěny pro průlety nad plochou cívky kolmo na osu cívky. Dále jsem hledal nejvhodnější rozměry cívek pro toto vychylování. Zajímala nás především velikost síly působící na kuličku směrem k cívce. Bylo zjištěno, že nejvhodnější je cívka s co největším průměrem a minimálním poloměrem jádra. Dále jsem vyvinul skript v Matlabu, který pro různé počáteční podmínky polohy a rychlosti kuličky dokáže nasimulovat její průlet nad testovanou cívkou a vykreslí zakřivení její trajektorie. K tomu jsem použil nasimulovaná data z prostředí Comsol Multiphysic, jejichž množství jsem se snažil co nejvíce omezit, vzhledem k časové náročnosti výpočtu sil pro jednotlivé body. Na základě těchto simulací, prostorových možností a vzhledem k dostačující síle jsem navrhl model cívky s eliptickým tvarem jehož rozměry jsou 60 mm a 35 mm, výška cívka je 10 mm. Pro tyto cívky jsem navrhl dvoudílné sestavovací jádro a cívky navinul drátem o průměru 0.3 mm a délkou 150 m. Cívka má 1400 závitů, odpor 385Ω a indukčnost 53 mH.

Po navinutí první vychylovací cívky jsem testoval, jaká poloha cívky vůči hlavní je nejvhodnější. Ideální se ukázalo naklonění cívky o 15° od osy hlavně. Tímto způsobem se podařilo do bezprostřední blízkosti hlavně umístit 3 cívky, což je nejmenší počet pro všesměrové vychylování. Vytvořil jsem držák těchto cívek a po navinutí zbylých vychylovacích cívek je do něj osadil. Proud cívkami, a tak i intenzitu magnetického pole nad nimi, jsem se rozhodl řídit pomocí pulzně šířkové modulace. Bylo nutné upravit původní spínací obvod na toto rychlejší spínání.

Současně jsem vyvíjel podavač kuliček, který by umožňoval automatické nabíjení projektilů do hlavně. Zvolil jsem krokový motor s tvarovaným rotačním podavačem. Dále jsem vytvořil vedení řady kuliček z desek plexiskla. Podavač bylo nutné doplnit o servomotor, který přidrží první z kuliček určenou k výstřelu a fyzicky ji oddělí od ostatních. V současné chvíli krokový motor nasouvá kuličky do hlavně dokud není přerušena první optická závora. Poté servo upraveným ramenem oddělí první z kuliček a krokový motor ostatní kuličky posune zpět. Poté dojde k výstřelu.

V další části bylo potřeba vytvořit sběrač, který vystřelené kuličky zachytí a vrátí je zpět do zásobníku podavače. Vytvořil jsem šestici desek umístěných okolo vychylovacích cívek, které jsou vzájemně spojeny malými panty a celý sběrač se tak dá složit. Následovala tvorba zpětného vyspádovaného vedení, které kuličky usměrní v pohybu a nasměruje je zpět do zásobníku. Po několika úpravách se mi úspěšně podařilo tento úkol splnit.

Jako poslední jsem umístil celé zařízení na desku plexiskla o tloušťce 8 mm, která dostatečně přesně vymezí pozice jednotlivých komponentů. Na desce jsou zároveň umístěny plošné spoje se spínacími obvody a vyhodnocovací logika pro optické závory.

V dalším postupu by bylo vhodné zaměřit se na zabudování výkonnějšího řídicího systému, případně doplnit další senzory. V současné chvíli je systém schopen opakovaně samostatně vystřelovat kuličky. Toho lze využít pro iterativní testování vychylovacího systému, který by bylo možné monitorovat vysokorychlostní kamerou umístěnou v ose vystřelovací hlavně.

Případně by bylo možné otestovat další varianty vychylovacího systému. Nabízí se zde již zmíněné vychylovací cívky z CRT obrazovek. Tam by bylo potřeba nastudovat jejich strukturu, případně jednu z cívek fyzicky z obrazovky odejmout a otestovat intenzitu sil působících na projektil námi používaný.

Dále je potřeba se zaměřit na urychlení podavače. V současné chvíli je schopen vystřelovat kuličky rychlostí jednu kuličku za 0.65 s. Pro účely hraní melodií na přidružený xylofon, by bylo vhodné tuto rychlost alespoň zdvojnásobit.

Dále by bylo možné snížit hlučnost celého systému. Největším zdrojem hluku je samotný krokový motor, který je řízen pomocí driveru A4988. V současné chvíli byl zakoupen nový driver trinamic silent step stick TMC2208, který umožňuje výrazně tišší chod krokového motoru a snižuje tak intenzitu jeho vibrační do celého systému.

Literatura a zdroje

- [1] Cook, J. S. DIY Coilgun! <https://blog.hackster.io/diy-coilgun-3c4400460406> [online]
- [2] Hrobak, S. Coil gun <https://youtu.be/CrLVrr8KwBU> [online]
- [3] Wiliams, K. P. Electromagnetic coil gun projekt https://www.nutsvolts.com/magazine/article/electromagnetic_coil_launcher_project [online]
- [4] Tyson, J. & Carmack, C. How Computer Monitors Work <https://computer.howstuffworks.com/monitor7.htm> [online]
- [5] Britanica, Principles Of Television Systems <https://www.britannica.com/technology/television-technology/Principles-of-television-systems> [online]
- [6] Dejan, How To Control a Stepper Motor with A4988 Driver and Arduino <https://howtomechatronics.com/tutorials/arduino/how-to-control-stepper-motor-with-a4988-driver-and-arduino/> [online]
- [7] VISHAY Siliconix, Datasheet IRF740, <https://www.vishay.com/docs/91054/91054.pdf> [online]
- [8] CUI Inc, Datasheet Nema 17, <https://www.cui.com/product/resource/nema17-amt112s.pdf> [online]
- [9] Atmel, Arduino Nano, <https://store.arduino.cc/arduino-nano> [online]

Citace

Obr. 1.2.: Animace Animusic.com

Video screen, YouTube, LLC: Video: "Pipe Dream" - Animusic.com [online], 17. 10. 2011, [cit. 2019-20-05]. Dostupný na [www](https://www.youtube.com/watch?v=hyCIpKAIFyo&):
<https://www.youtube.com/watch?v=hyCIpKAIFyo&>

Obr. 1.3.: Robotický hudebník – Představení firmy Intel

Video screen, YouTube, LLC: Video: The Robotic Musicians known as: Intel's Industrial Control in Concert | Intel [online], 17. 10. 2011, [cit. 2019-18-05]. Dostupný na [www](https://www.youtube.com/watch?v=JLdB0WEixjM): <<https://www.youtube.com/watch?v=JLdB0WEixjM>>

Obr. 2.1.: Vícetupňová Gaussova puška

ZeroOne, Commons.wikimedia.org: File: Coilgun.png [online], 24 August 2006, [cit. 2019-18-05]. Dostupný pod licencí Creative Commons na [www](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coilgun.png):
<<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coilgun.png>>

Obr. 2.2.: Princip urychlování pomocí elektromagnetického děla

Stannered & DrBob, Commons.wikimedia.org: File: Railgun-1.svg [online], 24 April 2007, [cit. 2019-18-05]. Dostupný pod licencí Creative Commons na [www](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Railgun-1.svg):
<<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Railgun-1.svg>>

Obr. 2.3.: Struktura CRC obrazovky

Grm wnr, Commons.wikimedia.org: File: CRT color enhanced.png [online], 4 May 2006, [cit. 2019-18-05]. Dostupný pod licencí Creative Commons na [www](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CRT_color_enhanced.png):
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:CRT_color_enhanced.png>

Rovnice 5.3.

<http://stuntj.sweb.cz/file/tabmeddps.pdf>

Rovnice 5.14.

<https://coil32.net/theory/faq.html>