

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 2: Fyzika

Gaussovo dělo

Gauss rifle

Autor: Mathias Palme

Škola: Doctrina - Podještědské gymnázium, Sokolovská 328/17, 460 14 Liberec

Kraj: Liberecký kraj

Konzultant: RNDr. Vladimíra Erhartová

Turnov 2022

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval/a samostatně a použil/a jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Liberci dne 31. března 2022

Mathias Palme

Anotace

V teoretické části práce byly popsány principy fungování základních typů Gaussova děla. V praktické části byl navržen více stupňový coilgun, jako univerzální experimentální aparatura, která umožňuje měnit škálu parametrů k ověření hypotéz. V rámci experimentů bylo měněno načasování první cívky a následně byla měněna vzdálenost mezi dalšími jednotlivými cívkami.

Klíčová slova

Elektromagnetismus; elektromagnetické dělo; Gaussovo dělo; coilgun

Annotation

In the theoretical part physical principles of basic types of Gauss Rifle were described. In the practical part a multistage coil gun was designed as a universal experimental apparatus that allows to change a large variety of parameters to verify hypothesis. During the experiments the timing of the first coil and then the distance between individual additional coils was changed.

Keywords

Electromagnetism; electromagnetic gun; electromagnetic rifle; Gauss gun; Gauss rifle; coil gun

Obsah

Úvod	6
1 Definice a základní typy Gaussova děla.....	7
1.1 Urychlování pomocí permanentních magnetů.....	7
1.2 Railgun.....	7
1.3 Coilgun	8
2 Východiska z předchozího měření	9
3 Praktická realizace.....	10
3.1 Princip experimentu.....	10
3.2 Konstrukce aparatury.....	11
3.3 Ovládání coilgunu.....	12
3.3.1 Základní deska.....	12
3.3.2 Modul cívky	12
3.3.3 CNC shield	13
3.4 Bezpečnost práce během experimentu.....	13
3.5 Firmware.....	13
3.6 Ovládací software	14
3.7 Navinutí cívek.....	15
3.7.1 Princip navíjení	15
3.7.2 Řízení navíječky	15
3.7.3 Firmware	15
3.7.4 Nastavení generování g-codu	15
3.8 Způsob měření rychlosti	16
3.8.1 Konstrukce	16
3.8.2 Ovládání	17
3.8.3 Zpracování dat.....	17
3.9 Vyhodnocení naměřených dat	18
Závěr.....	19
Bibliografie.....	21
Internet	21
Přílohy	22
Seznam použitých zkratk.....	23
Seznam elektronických příloh.....	24

Obrázky	25
Tabulky.....	41
Grafy.....	46

Úvod

Cílem práce bylo, navrhnout a sestrojít více stupňové Gaussovo dělo typu coilgun. Celá aparatura byla navržena tak, aby na ní bylo možno provádět měření i nad rámec této práce. K sestavení aparatury byly použity snadno replikovatelné výrobní postupy. Cílem měření bylo zjistit, jak závisí výsledná rychlost projektilu na vzdálenosti jednotlivých cívek a zdali se bude s každým dalším stupněm zvyšovat výsledná rychlost projektilu. Dílčími úkoly bylo teoreticky popsat základní typy a principy fungování Gaussova děla.

V teoretické části byly popsány základní typy, principy fungování Gaussova děla a fyzikální východiska k vytvoření hypotéz, které byly experimentálně ověřovány v praktické části. Teoretická i praktická část vychází z předešlé autorovy školní práce z roku 2020 s názvem „*Měření účinků Gaussova děla pomocí programu Audacity*“, v rámci které byl v praktické části sestrojen dvoustupňový coilgun.

1 Definice a základní typy Gaussova děla

Základním principem Gaussova děla je urychlování feromagnetických projektilů pomocí magnetického pole. U Gaussova děla v principu dochází k přeměně potenciální energie na kinetickou energii mezi zmagnetovaným tělesem a feromagnetickým projektil, který se v jeho okolí zmagnetuje. Postupným vývojem vzniklo několik verzí Gaussova děla. Název „Gaussovo dělo“ vznikl podle matematika a fyzika Johanna Carla Friedricha Gausse, který zformuloval matematický popis elektromagnetického účinku magnetických akceleratorů (FYZMATIK, 2022).

1.1 Urychlování pomocí permanentních magnetů

Urychlování projektilu pomocí permanentních magnetů není potřeba dodávat žádnou elektrickou energii k vytvoření magnetického pole, proto je tato verze Gaussova děla ze všech nejjednodušší.

Dělo se skládá z několika feromagnetických kuliček a jednoho či více permanentních magnetů. Přenos energie zde funguje podobně jako u Newtonovy houpačky. První kulička je uvolněna a je urychlena v magnetickém poli permanentního magnetu, dojde tedy k přeměně potenciální energie mezi kuličkou a magnetem na kinetickou energii, kterou získá kulička. Nárazem do permanentního magnetu působí kulička silou a magnetu předá svou kinetickou energii, která nakonec urychlí kuličku na konci téměř stejnou silou (po odečtení ztrát energie).

Tento princip je však značně neefektivní, a to kvůli tření mezi kuličkou a dráhou a kvůli efektivitě přenosu kinetické energie skrze kuličky a magnet (Čada, 2017 str. 13).

1.2 Railgun

Railgun (česky „*kolejnicové dělo*“) je typ elektromagnetického děla, které využívá dvě rovnoběžně umístěné vodivé koleje. Na koleje je přiveden zdroj stejnosměrného napětí a projektil je umístěn tak, aby mezi kolejemi uzavřel elektrický obvod. Když se uzavře elektrický obvod, začne na projektil působit tzv. Lorentzova síla, která projektil urychlí.

Nevýhodou railgunu je vysoká míra opotřebení způsobená kontaktem mezi projektil, a kolejemi, při zrychlení projektilu dochází ke tření, které u silnějších děl může vést až k deformaci kolejnic (Svoboda, 2014 str. 11).

Princip urychlení projektilu lze vysvětlit pomocí Ampérova pravidla pravé ruky a Flemingova pravidla levé ruky. Ve chvíli, kdy projektil uzavře obvod mezi kolejnicemi, začne skrze projektil mezi kolejnicemi protékat elektrický proud ze zdroje. Vytvoří se elektromagnetické pole, jehož orientaci můžeme popsat Ampérovým pravidlem pravé ruky, které říká: „*Jestliže palec pravé ruky ukazuje směr elektrického proudu ve vodiči, pak pokrčené prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar.*“ Ve chvíli, kdy je zjištěn směr magnetických indukčních čar, lze aplikovat Flemingovo pravidlo levé ruky, které říká:

„Položíme-li otevřenou levou ruku na vodič tak, aby magnetické indukční čáry vstupovaly do dlaně a prsty ukazovaly směr proudu, vychýlí se vodič na stranu palce.“ (cez.cz, 2022)

V tomto případě je vychýleným vodičem projektil a vzhledem k tomu, že není nijak ukotven, bude na něj působit síla v celé délce kolejnic a tím pádem se bude v celé délce urychlovat, až nakonec kolejnice opustí, čímž se přeruší obvod (viz obr. 1).

1.3 Coilgun

Coilgun (česky „cívkové dělo“) urychluje feromagnetický projektil pomocí jedné či více cívek v řadě (tzv. „vícestupňový“). Když cívkou prochází elektrický proud, tak kolem ní vzniká elektromagnetické pole. Coilgun je konstruován tak, aby dráha, kterou bude prolétat projektil, procházela středem cívek. Elektromagnetické pole, které vzniká při průchodu elektrického proudu cívkou, poté začne axiálně urychlovat projektil. V případě vícestupňového coilgunu jsou cívky spínány postupně, aby se dosáhlo největší možné efektivity. Nejjednodušší coilgun lze sestavit z jedné cívky, spínače a zdroje elektrického proudu. V praxi je však vhodné využívat jako zdroj proudu kondenzátor, kvůli jeho schopnosti rychlého vybití a jako spínač používat polovodičové součástky jako je MOS-FET tranzistor, či tyristor. Jedná se o relativně levné součástky, které dokážou spínat a rozpínat obvod, na kterém může být vysoké napětí, a kterým může protékat silný proud, a to pomocí nízkého logického napětí. Tyto součástky tedy lze ovládat pomocí mikroprocesorů. Načasování a vzdálenost mezi cívkami jsou klíčové faktory, které ovlivňují výslednou rychlost projektilu. Je třeba, aby magnetické pole cívky zaniklo v moment (nebo o něco dříve) než projektil proletí středem cívky, jinak by došlo ke zpomalení projektilu, v některých případech až ke změně směru projektilu, či úplnému zastavení, protože by cívka začala vtahovat projektil zpět. Zanikne-li tedy magnetické pole včas, může projektil pokračovat v pohybu vlivem vlastní setrvačnosti a následně být přitahován další cívkou.

Výhodou oproti railgunu je, že vzhledem k povaze konstrukce coilgunu, není třeba, aby se projektil dotýkal cívek na rozdíl od railgunu, kde je potřeba, aby projektil uzavřel obvod. Tím pádem nedochází k tak výraznému tření (Čada, 2017 str. 15).

2 Východiska z předchozího měření

V předchozím projektu byl sestaven experiment, který měl ověřit následující hypotézu: „*Za předpokladu, že se bude měnit vzdálenost mezi první a druhou cívkou, ale čas sepnutí cívek zůstane konstantní, mění se tím i efektivita děla a tím i výsledná rychlost projektilu.*“

V rámci experimentu byla sestavena jednoduchá aparatura, která se skládala pouze ze dvou cívek. Cívky byly napájeny ze 48V spínaného zdroje, spínány pomocí MOSFET tranzistorů a spínání bylo řízeno pomocí desky Arduino NANO.

Během experimentu byl nastaven konstantní čas sepnutí obou cívek. Nejprve byla sepnuta jedna a následně ihned druhá cívka.

Výsledek experimentu hypotézu potvrdil. Výsledná rychlost projektilu, a tím pádem i efektivita, se měnila se vzdáleností mezi cívkami. Zároveň se potvrdilo, že další cívka je schopna projektil dále urychlit či zpomalit.

3 Praktická realizace

Pro účely praktické realizace byl zvolen pětistupňový coilgun. Byla navržena a sestrojena aparatura, která díky svému konstrukčnímu řešení umožňuje snadnou změnu vzdáleností mezi jednotlivými cívkami. Pro snadnou výrobu a replikovatelnost je celá aparatura sestrojena pomocí dílů tištěných na FDM 3D tiskárně, ocelových plechů vyřezaných na CNC laseru a dalších standardizovaných dílů, jako jsou hliníkové profily, lineární ložiska atd.

Hypotézy:

1. Za předpokladu, že čas sepnutí cívek zůstane konstantní, bude se vzájemnou vzdáleností cívek měnit i výsledná rychlost projektilu. Pokud bude vzdálenost příliš malá, magnetické pole cívky sice projektil urychlí, ale následně zpomalí. Pokud bude vzdálenost příliš velká, nedojde k maximálnímu možnému urychlení.
2. Při správném načasování sepnutí cívek umístěných v optimální vzdálenosti (za předpokladu, že jsou cívky identické a mají identické napájení), se bude s každým přidáním stupněm výsledná rychlost projektilu zvětšovat.
3. Při ideálně nastavených parametrech coilgunu se nárůst rychlosti v každém dalším stupni bude snižovat.
 - Za předpokladu, že se bude nominální rychlost projektilu v každém stupni zvyšovat, sníží se tím doba, po kterou je projektil v magnetickém poli cívky, a tedy doba po kterou je projektil urychlován.
4. Za předpokladu, že se bude nominální rychlost projektilu v každém stupni zvyšovat, se bude s každým dalším stupněm zvětšovat i optimální vzdálenost cívek.

3.1 Princip experimentu

Původní návrh experimentu vycházel z předpokladu, že po dobu, kdy se kondenzátor vybíjí do cívky, zároveň vzniká kolem cívky magnetické pole a během každého výstřelu se každý z kondenzátorů vybije úplně. Tuto přítomnost magnetického pole lze detekovat pomocí Hallova senzoru. Detekce magnetického pole umožňuje provést separátní experiment, který určí dobu mezi sepnutím cívek a zaniknutím magnetického pole (viz kapitola 3.5).

Po změření této hodnoty byl proveden hlavní experiment. V první fázi experimentu se v ovládacím softwaru nastaví čas (naměřená hodnota) a pracuje se pouze s jednou aktivní cívkou. Cílem je nalézt optimální počáteční polohu projektilu. Ve chvíli, kdy je zjištěna optimální počáteční poloha projektilu, lze pokračovat a aktivovat druhou cívku. Jako projektil byl použit ocelový váleček o průměru $(6,0 \pm 0,1)$ mm, délce $(50,0 \pm 0,1)$ mm a hmotnosti $(10,0 \pm 0,1)$ gramů.

Při změření detekce magnetického pole kolem cívky po dobu vybíjení kondenzátoru byla naměřena hodnota (110 ± 2) ms (viz tabulka 1). Po aplikování této hodnoty a metodiky hlavního experimentu, kdy byla s každým výstřelem měněna počáteční poloha projektilu, nebyl projektil schopen v žádné vzdálenosti získat dostatečnou rychlost na to, aby opustil

hlaveň, až nakonec v dostatečné vzdálenosti od cívky nedocházelo k žádnému zrychlení projektilu. Z toho byl vyvozen závěr, že doba, po kterou je cívka sepnutá, je příliš dlouhá a projektil nejprve urychlí, ale magnetické pole nezanikne včas a nakonec projektil opět zpomalí.

Proto byla metodika upravena a systém pro nastavení polohy hlavně byl nejprve nastaven do nejvzdálenější polohy (46 ± 1) mm a poté byl snižován čas sepnutí první cívky, kondenzátory se tedy vybijí jen částečně. V této počáteční poloze byl projektil (4 ± 1) mm uvnitř vinutí první cívky. Z naměřených hodnot byla sestavena tabulka a graf, ze které vyplývá, že optimální načasování sepnutí cívky pro tuto počáteční polohu projektilu je (15 ± 1) ms (viz tabulka 2 a graf 2). Tento čas byl následně aplikován na všechny stupně urychlovače, po uplynutí tohoto času byl ihned sepnut další stupeň.

Po určení hodnoty času byly postupně po jednom aktivovány další stupně urychlovače. Vždy bylo naměřeno deset hodnot výsledné rychlosti projektilu a následně byl rozestup mezi cívkami zvýšen o 10 mm. Z hodnot výsledné rychlosti byla sestavena tabulka a graf. Z grafu byla zjištěna optimální poloha cívky, cívka byla umístěna do této polohy a byl aktivován další stupeň, u kterého byl aplikován stejný postup.

3.2 Konstrukce aparatury

Základem aparatury jsou dva standardizované hliníkové X profily s rozměry 20 mm x 40 mm o délce 500 mm (viz obr. 2, 3; e.p.¹ 1, 2, 3). Profily jsou pomocí šroubů M5x10 spojeny zepředu i zezadu s ocelovými plechy (viz obr. 4, 5; e.p. 4, 5), na které se následně montují další komponenty.

Na přední i zadní plech jsou namontovány spojky (viz obr. 4; e.p. 6), které v sobě drží vodící tyč o průměru 12 mm, která slouží pro lineární pohyb cívek. Každá z cívek (kromě první) je připevněna na modulu, který zajišťuje její automatizovaný pohyb (viz obr. 7; e.p. 7). Na každém modulu je umístěna jedna matice M6 a skrze modul procházejí celkem 4 závitové tyče M6. Každá ze závitových tyčí ovládá pohyb jednoho modulu. Celý modul včetně cívky vytištěný pomocí FDM 3D tisku je opatřen dvěma lineárními ložisky LM12UU, které se pohybují na vodících tyčích aparatury.

Na zadním i předním plechu aparatury jsou umístěny vždy dva krokové motory NEMA 17, které zajišťují pohyb závitových tyčí, čímž mění polohu cívek na aparatuře. Původní design uvažoval jiný typ motorů, které se neosvědčily. Z tohoto důvodu, byla navržena redukce pro montáž motorů NEMA 17 na plechové díly. Redukce byla vytištěna pomocí FDM 3D tisku (viz obr. 8, 9; e.p. 8, 9).

První cívka je připevněna přímo na zadním plechu pomocí čtyř M4x10 šroubů. Skrze celou aparaturu vede duralová hlaveň o vnějším průměru 7,8 mm a vnitřním průměru 6,7 mm.

¹ e.p. značí elektronické přílohy

Pro nastavení počáteční polohy projektilu byl vytvořen systém, který umožňuje manuálně nastavit polohu hlavně vůči první cívce (viz obr. 10; e.p. 10). Hlavní část konstrukce tohoto systému je tištěná na FDM 3D tiskárně, dále využívá dvě valivá ložiska (o vnitřním průměru 6 mm a vnějším 18 mm), skrze která prochází závitová tyč M6 o délce 70 mm. Na závitové tyči je připevněn tištěný díl, který je opatřený maticí M6. K tomuto dílu je pak připevněna hlaveň pomocí stavěcích šroubů M4x5. Systém se ovládá manuálně pomocí otáčecí kolečka, které mění rotační pohyb na lineární pohyb hlavně. Celý systém je připevněn pomocí šroubů M4x10 na zadní plech (viz obr. 11; e.p. 11).

3.3 Ovládání coilgunu

Coilgun je ovládán pomocí dvou desek Arduino UNO. Jedno Arduino zajišťuje ovládání spínání cívek, zatímco druhé zajišťuje pohyb cívek. Obě Arduina jsou propojená a komunikují v ovládacím softwaru (viz kapitola 3.5) pomocí bluetooth modulu HC-05. Pro účely tohoto experimentu byly navrženy celkem tři plošné spoje a jeden plošný spoj byl zakoupený hotový (konkrétně CNC shield pro Arduino UNO). První plošný spoj slouží jako základní deska, na kterou se napojují všechny komponenty coilgunu. Celý spoj je koncipovaný jako „*shield*“, který se nasadí na Arduino UNO. Dále se systém skládá z pěti identických modulů, které slouží k ovládání cívek. Poslední plošný spoj slouží k optickému měření rychlosti (viz kapitola 3.8).

Všechny plošné spoje byly navrženy v programu Fusion 360 a byly vyrobeny pomocí CNC frézování.

3.3.1 Základní deska

Základní deska se nasazuje přímo na Arduino UNO s firmwarem „*Coil_gun_master_uno.ino*“ (viz kapitola 3.5). Deska je osazena pouze piny na připojení kabelů s DUPONT konektorem. Na desku se připojuje bluetooth modul HC-05 Hallova sonda, modul pro měření rychlosti (viz 3.8), pět modulů na ovládání cívek (viz kapitola 3.3.2) a druhé Arduino s CNC shieldem. Je důležité zapojit pin Rx z CNC shieldu do pinu Tx základní desky a naopak (viz obr. 12, 13, 14; e.p. 12).

3.3.2 Modul cívky

Každá cívka má vlastní modul. Každý modul je osazen kondenzátorem s kapacitou 2200 μF o maximálním napětí 63 V. Jako spínací prvek mezi cívkou a kondenzátorem byl zvolen NPN MOS-FET tranzistor IRF3205. Kondenzátor je napájen ze spínaného zdroje s napětím 48 V. Na desku je připojena cívka. Paralelně na cívku byla umístěna dioda jako ochrana před vlastní indukcí cívky a jako indikátor sepnutí MOS-FETu pro uživatele je na desce umístěna LED dioda, která je umístěna paralelně na source a drain pin MOS-FET tranzistoru. Modul je následně zapojen na základní desku pomocí dvou pinů. Pin GND na pin GND základní desky a druhý pin na pin C1-C5 na základní desce (viz obr. 15, 16, 17; e.p. 13).

Na jádro cívky bylo navinuto 500 závitů izolovaného měděného vodiče o průměru 0,8 mm.

3.3.3 CNC shield

CNC shield pro Arduino UNO byl osazen čtyřmi drivery krokových motorů s označením A4988. Na desku byly připojeny čtyři motory NEMA 17 a čtyři koncové spínače (osy X, Y, Z na piny „ENSTOPS“ a osu A na pin „SpnEn“). Arduino je napájeno ze základní desky a CNC shield je napájen pomocí 12V adaptéru.

3.4 Bezpečnost práce během experimentu

Experiment pracuje s kondenzátory s relativně vysokou kapacitou a napětím. Z tohoto důvodu by se experimentátor neměl dotýkat žádných elektronických součástí po dobu, kdy je zařízení pod proudem. Pro ukončení experimentu byla do uživatelského rozhraní implementována funkce pro vybití kondenzátorů. Experimentátor by měl před ukončením experimentu odpojit 48V zdroj od napájení, zkontrolovat, zdali v hlavni nezůstal projektil a pomocí funkce „Discharge capacitors“ nechat vybit kondenzátory. Poté lze odpojit zbytek elektronických ovládacích prvků od napájení a bezpečně s nimi manipulovat.

Po dobu experimentu by nikdo neměl stát v dráze hlavně a ani za ní. Při nesprávném umístění projektilu může dojít k obrácení směru výstřelu a projektil může letět opačným směrem hlavně. Jako terč by měl být využit měkký materiál, jako je například molitan, aby materiál absorboval kinetickou energii, a aby se projektil neodrazil nežádoucím směrem. Pro účely tohoto experimentu byla využita molitanová terčovnice určená na střelbu z luku.

3.5 Firmware

Každá ze dvou desek Arduino UNO má vlastní firmware. Arduino které je osazené základní deskou má firmware s názvem „Coil_gun_master.ino“ (viz e.p. 14) a Arduino osazené CNC shieldem má firmware s názvem „Coil_gun_slave.ino“ (viz e.p. 15).

Firmware „Coil_gun_master.ino“ ovládá spínání cívek, měření rychlosti a měření pomocí Hallova senzoru. Má definované celkem čtyři základní funkce. Funkce „shoot()“ přečte z ovládacího softwaru (viz e.p. 16), na jak dlouho má sepnout každou cívku a kolik cívek má použít, a následně postupně spustí cívky v určeném intervalu.

Funkce „hall()“ je určena k měření doby od sepnutí cívky až po zaniknutí magnetického pole, které se kolem ní vytvoří. Funkce sepne MOS-FET první cívky a spustí časovač. Následně čeká po dobu, kdy Hallova sonda indikuje přítomnost magnetického pole a jakmile pole zanikne, časovač se zastaví a pošle uživateli hodnotu času v milisekundách.

Funkce „discharge()“ sepne všechny MOS-FETy zároveň po dobu jeden a půl sekundy, aby se vybitly všechny kondenzátory. Jedná se o bezpečnostní prvek, který je určený pro ukončení experimentu, aby uživatel nebyl ohrožen nabitými kondenzátory při manipulaci s aparaturou.

Funkce „gate()“ zajišťuje změření výsledné rychlosti projektilu.

Jednotlivé funkce se volají pomocí jednoznakových příkazů, které posílá po sériové lince uživatelské rozhraní ovládacího softwaru.

Firmware „*Coil_gun_slave.ino*“ zajišťuje pohyb cívek na aparatuře. Firmware přijímá informace po sériové lince z ovládacího softwaru. Firmware je ovládán pomocí dvou základních příkazů. První je pro pohyb a druhý pro kalibraci.

Příkaz pro pohyb se skládá z jednoho z atributů X, Y, Z, A, (které označují cívky 2-5) a z číselného parametru, který určuje souřadnici v milimetrech. Chce-li tedy uživatel posunout druhou cívku na souřadnici 50 mm, ovládací software pošle příkaz „X50“.

Pro kalibraci slouží atribut „h“ (jako „home“) s parametry X, Y, Z, nebo A. Pokud chce uživatel kalibrovat například třetí cívku, ovládací software pošle příkaz „hY“ (Na malých a velkých písmenech u příkazů nezáleží.).

3.6 Ovládací software

Ovládací software byl naprogramován v jazyce C# ve Windows Forms .NET Frameworku. Uživatelské rozhraní komunikuje s bluetooth modulem po sériové lince. Rozhraní volá jednotlivé funkce tím, že po sériové lince posílá výše uvedené příkazy (viz obr. 18; e.p. 16).

K navázání komunikace mezi bluetooth modulem a počítačem je nejprve nutné počítač spárovat s bluetooth modulem (jméno je obvykle „HC-05“ a v případě, že modul vyžaduje heslo, je to obvykle „1234“, nebo „0000“). Po spárování je třeba v nastavení počítače zjistit, jaký port byl modulu přiřazen. Tento port musí uživatel následně zadat do textového pole v levém horním rohu uživatelského rozhraní a stisknout tlačítko „Open“ pro zahájení komunikace (pro ukončení slouží tlačítko „Close“).

Tlačítko „Shoot“ vyvolá funkci „shoot()“ (viz kapitola 3.5). Tato funkce také volá funkci „gate()“, takže coilgun změří výslednou rychlost projektilu a vypíše hodnotu do textového pole a vloží uživateli do schránky (pro usnadnění při zpracování dat). V poli „number of active coils“ uživatel nastavuje, kolik cívek má coilgun použít při volání funkce „shoot()“. Pole „Discharge time (ms)“ nastavuje dobu sepnutí jedné cívky (tuto hodnotu je pokaždé změně třeba aktualizovat pomocí tlačítka „Set discharge time“). Tlačítko „Coil time“ vyvolá funkci „hall()“ (viz kapitola 3.5). Následně vypíše hodnotu do textového pole uprostřed rozhraní a hodnotu uživateli vloží do schránky.

Tlačítka Coil 1-5 slouží k individuálnímu sepnutí jednotlivých cívek. Po stisknutí se daná cívka sepne po dobu nastavenou v poli „Discharge time (ms)“. Tlačítko „Discharge capacitors“ vyvolá funkci „discharge()“.

Pravá strana uživatelského rozhraní slouží k nastavení pozice jednotlivých cívek. Uživatel může zadat číselnou souřadnici a pomocí tlačítka „Update position“ poslat příkaz k pohybu. Tlačítka „Home Coil“ slouží ke kalibraci pozice (viz kapitola 3.5).

3.7 Navinutí cívek

Pro účely navíjení cívek byla navržena a sestrojena CNC navíječka. Konstrukce byla navržena v CAD softwaru Fusion 360 a jednotlivé součástky následně vyrobeny pomocí FDM 3D tisku z materiálu PET-G a CNC frézování z materiálu MDF.

3.7.1 Princip navíjení

Stroj se skládá z jedné rotační a jedné axiální osy (viz obr. 19, 20; e.p. 17, 18, 19). Na axiální ose jsou dvě kladky, mezi kterými je zaveden drát (viz obr. 21; e.p. 20). Na rotační ose je umístěno jádro cívky. Axiální a rotační osy se posouvají tak, aby se drát navíjel rovnoměrně. Obě osy jsou umístěny na díle vyfrézovaném z materiálu MDF (viz obr. 22, 23; e.p. 21, 22).

3.7.2 Řízení navíječky

Pro řízení navíječky byla použita deska Arduino UNO v kombinaci s CNC shieldem V3 osazeným dvěma drivery DRV825 a jako firmware byl použit GRBL. O axiální a rotační pohyb na tomto stroji se starají krokové motory NEMA 17. CNC shield je napájen pomocí 12V zdroje.

3.7.3 Firmware

Do desky Arduino UNO byl nahrán nepozměněný firmware GRBL. GRBL je naprogramovaný jako univerzální firmware pro CNC stroje řízené pomocí g-codu. Výhodou tohoto firmware je, že pro úpravu přizpůsobení nastavení pro konkrétní stroj není třeba zasahovat do samotného kódu, ale lze přizpůsobit jeho nastavení pomocí posílání g-codu přes sériovou linku mezi deskou a počítačem.

3.7.4 Nastavení generování g-codu

G-code je strojový kód, který deska interpretuje a podle toho posouvá jednotlivé osy stroje. Pomocí g-codu lze také nastavit řadu parametrů, jako jsou akcelerace, maximální rychlost osy atd. V tomto případě je zásadním parametrem „*steps per milimeter*“ neboli o kolik kroků se musí motor otočit, aby jeho osa urazila jeden milimetr.

Vzhledem k tomu, že je GRBL v základu koncipován pro CNC stroj se třemi axiálními osami, a pro účely navíječky je potřeba jedna rotační osa, muselo tomu být uzpůsobeno nastavení firmwaru a také podle toho musel být adekvátně naprogramován generátor g-codu.

Jako rotační osa byla zvolena osa Y. Její hodnota „*steps/mm*“ byla nastavena tak, aby stroj jednu otáčku osy považoval za jeden milimetr posuvu. Vzhledem k tomu, že byl využit motor NEMA 17, který je rozdělen na 200 kroků na otáčku, byla tedy nastavena hodnota „*steps/mm*“ pro osu Y na hodnotu 200. Dostane-li tedy stroj g-kod, který příkazuje posun o jeden milimetr v ose Y, tak se tato osa otočí přesně o jednu otáčku.

V ose X byla použita závitová tyč M6 k převodu na axiální pohyb. Tato závitová tyč má stoupání (tedy posuv na jednu otáčku) přesně jeden milimetr. Hodnotu „steps/mm“ pro axiální osu lze vypočítat jako součin stoupání závitové tyče a počtu kroků na jednu otáčku motoru. Po dosazení vyjde opět hodnota 200 kroků na milimetr. Konečná konfigurace firmwaru (viz obr. 24).

Generátor g-kodu byl naprogramován jako .NET Framework Windows Form aplikace v jazyce C# v prostředí Microsoft Visual studio. Do programu je třeba zadat celkem šest vstupních parametrů, přičemž proměnná „*vnitřní průměr cívky*“ nemá vliv na výsledný g-code, ale slouží k orientačnímu výpočtu výsledné tloušťky cívky (viz obr. 25; e.p. 23).

Do programu se zadávají parametry: délka cívky, průměr navíjeného drátu, počet vinutí, hodnota počátečního vinutí, průměr jádra cívky a rychlost navíjení.

Algoritmus tohoto generátoru využívá toho, že když GRBL dostane příkaz, aby společně posunul osy do polohy s rozdílnými hodnotami (například $x=20$ a $y=40$), tak na tyto souřadnice dorazí obě osy současně.

Algoritmus vypočítá, kolikrát lze navinout drát na jádro bez toho, aby se jednotlivá vinutí překrývala (toto se zaznamená jako proměnná n). A následně pokračuje ve dvou fázích, dokud není navinut požadovaný počet vinutí. V „*nulté fázi*“ jsou obě hodnoty X a Y rovny nule. V první fázi je souřadnicí X (tedy axiální osy) délka cívky a souřadnicí Y (rotační osy) je Y plus n . Ve druhé fázi je souřadnicí X nula, protože je třeba změnit směr navíjení a navíjet druhou vrstvu cívky. Souřadnice Y je nastavena na Y plus n . Toto se opakuje, dokud není navinut požadovaný počet vinutí.

3.8 Způsob měření rychlosti

Pro účely určení výsledné rychlosti projektilu byla sestrojena optická brána, která se napojuje přímo na základní desku coilgunu.

3.8.1 Konstrukce

Konstrukce se skládá ze dvou tištěných dílů a jednoho plošného spoje. Do spodního dílu patří plošný spoj (viz obr. 26; e.p. 24, 25) a dva šrouby M4x10, které spojují systém s předním plechem coilgunu. Do vrchního dílu patří dvě čtvercové matice M4 (viz obr. 27; e.p. 26). Spodním dílem a plošným spojem prochází dva šrouby M4, které se zašroubují do čtvercových matic vrchního dílu.

3.8.2 Ovládání

System má vlastní plošný spoj (viz obr. 28, 29; e.p. 22). Plošný spoj je osazen dvěma rezistory a dvěma fotorezistory, které jsou umístěny ve vzdálenosti 25 mm. Na desku se připojují dvě laserové diody, které se pomocí stavěcích šroubů M4x5 montují na vrchní díl konstrukce tak, aby mířily přímo na fotorezistory. Posledním komponentem je čtyřpinová lišta, která slouží jako připojení na základní desku. Výstup z fotorezistorů je připojen na analogové piny Arduina.

3.8.3 Zpracování dat

V případě, že systém volá funkci „*gate()*“, Arduino čeká, až dojde ke snížení intenzity světla na prvním fotorezistoru. K tomu dojde průletem projektilu, který má trajektorii mezi laserovou diodou a fotorezistorem. V tu chvíli začne počítat čas, a jakmile dojde ke snížení intenzity světla na druhém fotorezistoru, počítání času zastaví a výslednou hodnotu času v mikrosekundách odešle po sériové lince do uživatelského rozhraní. Než se výsledná hodnota uživateli zobrazí, systém ještě hodnotu přepočítá na rychlost. Software počítá s tím, že fotorezistory jsou od sebe vzdáleny (25 ± 1) mm. Lze tedy využít vztahu:

$$v = \frac{s}{t} \quad (1)$$

Kde v je rychlost v m/s, s je vzdálenost v metrech a t je čas v sekundách. Software za s dosadí 0,025 (vzdálenost fotorezistorů přepočítaná na metry) a za t dosadí miliontinu naměřené hodnoty, aby výsledná rychlost vyšla v m/s.

Software tedy počítá s výsledným vztahem:

$$v = \frac{25 \times 10^{-3}}{t \times 10^{-6}} \quad (2)$$

Po úpravě výrazu:

$$v = \frac{25}{t \times 10^{-3}} \quad (3)$$

Výsledná hodnota rychlosti je následně zobrazena v uživatelském rozhraní a je vložena uživateli do schránky. Vzhledem k přesnosti měření času a přesnosti konstrukce lze odchylku měření určit na $\pm 0,1$ m/s.

3.9 Vyhodnocení naměřených dat

Měření přítomnosti magnetického pole v okolí cívky ukázalo, že pro tuto konkrétní aparaturu není vhodné během výstřelu vybit celý kondenzátor (viz tabulka 1). Alternativní metoda, která spočívala v měnění načasování první cívky v závislosti na výsledné rychlosti projektilu, ukázala, že vhodným intervalem pro tuto konkrétní aparaturu a tuto konkrétní počáteční polohu projektilu je (15 ± 1) ms. Tím byl určen interval pro ostatní stupně aparatury (viz graf 2, tabulka 2). Z naměřených dat také vyplývá, že výsledná rychlost projektilu závisí na době přítomnosti magnetického pole v okolí cívky. V případě, že je interval příliš krátký, nedojde k maximálnímu urychlení, a naopak když je interval příliš dlouhý, dojde sice k maximálnímu možnému urychlení, ale zároveň k následnému zpomalení ve chvíli, kdy projektil proletí středem cívky, protože ho přítomné magnetické pole začne urychlovat opačným směrem. Projektil je sice v měřeném intervalu schopen opustit cívku, protože nedojde k dostatečnému zpomalení a vlivem setrvačnosti opustí hlaveň, ale ztratí získanou rychlost.

Další část experimentu, při které se postupně přidávaly další aktivní cívky a měnila se jejich vzájemná poloha, potvrdila první a druhou hypotézu. Grafy 3-5 potvrzují závislost mezi vzdáleností cívek a výslednou rychlostí projektilu. V případě, že je cívka příliš blízko předchozího stupně, dojde k urychlení a následnému zpomalení projektilu, protože ve chvíli, kdy projektil prochází středem cívky, je stále přítomno magnetické pole v okolí cívky.

Naopak ve chvíli, kdy je cívka umístěna příliš daleko od předchozí cívky, dojde ke vzniku magnetického pole v okamžiku, kdy není schopno měřitelně urychlit projektil, a naopak zanikne příliš brzy, tedy dříve, než se projektil dostane do středu cívky. Nedochozí tedy ke zpomalení, ale zároveň projektil nedosahuje maximálního možného zrychlení.

Maximální naměřené hodnoty v grafech 3-5 také ověřují hypotézu, že s každým přidaným stupněm v optimální poloze se výsledná rychlost projektilu nelineárně zvyšuje.

Z naměřených dat však nelze potvrdit třetí hypotézu. Rozdíl nárůstů rychlosti mezi druhou a třetí cívkou je na úrovni odchylky, ale na druhou stranu nárůst u čtvrté cívky byl výrazně vyšší než předchozí hodnoty. Pro ověření či vyvrácení této hypotézy by bylo třeba provést podrobnější měření ideálně s ještě více stupni.

Závěr

Práce navazuje na předchozí autorův projekt s názvem „Měření účinků Gaussova děla pomocí programu Audacity“, v rámci kterého byl sestrojen dvoustupňový coilgun, na kterém byla ověřena závislost mezi vzdáleností cívek a výslednou rychlostí projektilu. V této navazující práci byly v teoretické části popsány základní typy Gaussova děla a bylo zde popsáno jejich fyzikální vysvětlení.

V praktické části práce byl navržen a sestrojen pětistupňový coilgun. Celá aparatura byla navržena univerzálně tak, aby na ní bylo možno měnit parametry a provádět měření i nad rámec ověřování hypotéz v této práci. Měření ověřilo příčinnou závislost mezi vzdáleností cívek a výslednou rychlostí projektilu. Použitá metodika se ukázala jako vhodný postup na experimentální nalezení optimální vzdálenosti mezi cívkami.

V rámci experimentu musela být částečně pozměněna původně navržená metodika. Podle původní metodiky mělo dojít během výstřelu k úplnému vybití kondenzátorů. K tomuto postupu byl využit Hallův senzor, pomocí kterého se měl počítat čas od spuštění vybíjení kondenzátorů až po zaniknutí magnetického pole v okolí cívky. Po provedeném experimentu a aplikování tohoto časového intervalu na první cívku se ukázalo, že je interval příliš dlouhý, protože projektil s tímto nastavením v žádné počáteční poloze nebyl schopen opustit hlaveň.

Z tohoto důvodu byl proveden alternativní experiment, během kterého se měnil čas sepnutí první cívky a tím byl na základě výsledné rychlosti určen optimální časový interval pro zvolenou počáteční polohu projektilu. Tímto experimentem byla také prokázána závislost mezi dobou přítomnosti magnetického pole v okolí cívky a výslednou rychlostí projektilu. Pro úspěšné provedení původní metodiky experimentu by bylo možné použít kondenzátor s menší kapacitou, který by se tedy vybil rychleji, a navíc by bylo možné určit účinnost zařízení se středoškolskou znalostí fyziky.

Po nalezení optimální polohy ostatních cívek bylo prokázáno, že se s každým stupněm ve správné vzdálenosti výsledná rychlost projektilu zvyšuje a zároveň se optimální vzdálenosti cívek zvyšují s každým přidaným stupněm.

Z naměřených dat nebylo možné ověřit, zdali se bude s narůstající výslednou rychlostí projektilu snižovat přírůstek rychlosti v každém stupni. K ověření této hypotézy by bylo zapotřebí provést podrobnější měření a ideálně přidat více cívek. Ačkoliv byla aparatura konstruována s pěti cívkami, pro měření mohly být využity pouze čtyři, protože délka aparatury neumožňovala posun pátého stupně coilgunu.

Pro provedení podrobnějšího měření by bylo vhodné nalézt optimální polohu nejprve ve větším rozptylu (například ± 10 mm) a následně provést podrobnější měření v tomto intervalu od naměřené přibližné optimální polohy. Vzhledem k aktuální konstrukci a odchylce aparatury by bylo vhodné provádět podrobné experimenty po jednom milimetru.

Pro přesnější měření času by bylo možné využít externí krystalový oscilátor. Tím se lze vyhnout odchylkám způsobených při práci procesoru Arduina.

Pro ideální časovou návaznost jednotlivých stupňů by bylo možné provést další experiment za pomoci Hallova senzoru, kterým aparatura již disponuje. Magnetické pole v okolí cívky totiž nevznikne okamžitě po sepnutí MOSFETu, a zároveň nezanikne ihned po uzavření MOSFETu či vybití kondenzátoru. Tento časový rozdíl by bylo možné pomocí Hallova senzoru změřit a spínání cívek nastavit tak, aby ihned po zaniknutí magnetického pole v okolí jedné cívky vzniklo magnetické pole v okolí druhé cívky. Aparatura disponuje potřebným hardwarem pro provedení experimentu, bylo by však zapotřebí upravit řídicí software i firmware hlavního Arduina.

V systému pro nastavení polohy cívek by bylo ideální nahradit závitové tyče M6 za závitové tyče s větším stoupáním. M6 mají stoupání jednu otáčku na milimetr, kvůli čemuž trvá nastavení polohy cívek příliš dlouho.

Zároveň by bylo vhodné nastavit při kalibraci polohy cívek ofset 13 mm. Tato hodnota je minimální vzdáleností mezi vinutími jednotlivých cívek. To by vyžadovalo pouze drobnou softwarovou úpravu.

Pro vylepšení způsobu měření a snížení odchylky výsledné rychlosti by bylo vhodnou alternativou využít kombinaci 3D tisku a CNC laserového řezání ocelových plechů. Konstrukce by mohla vypadat tak, že by nad plošným spojem osazeným dvěma fotorezistory byl umístěn plech s miniaturní šterbinou, kterou by mohl alespoň částečně procházet laserový paprsek a zbytek konstrukce by mohl být tištěný. Tato metoda by teoreticky dosahovala mnohem větší přesnosti, protože CNC řezání dosahuje při výrobě výrazně menších odchylek než FDM 3D tisk a zároveň by bylo možno do velmi tenkého plechu vyřezat menší díry, než jaké dokáže vyrobit FDM 3D tisk.

Princip dalších experimentů, které tato aparatura umožňuje, by mohl spočívat ve změnách geometrie projektilu či využití jiného feromagnetického materiálu. Dále by bylo možné přidat další cívky. Díky modulárnímu systému by tento upgrade vyžadoval pouze úpravu základní desky a úpravu firmwaru a softwaru.

Aparatura zároveň umožňuje rychlou výměnu cívek. Díky použití 3D tisku a CNC navíječky popsané v této práci by bylo možné relativně rychle měnit geometrii cívek a jejich vinutí.

Bibliografie

Internet

cez.cz. 2022. cez.cz. *ELEKTŘINA A MAGNETISMUS*. [Online] 2022. [Citace: 16. březen 2022.] https://www.cez.cz/edee/content/file/static/encyklopedie/encyklopedie-energetiky/05/magnet_1.html.

Čada, Bc. Jakub. 2017. theses.cz. *Gaussovo dělo*. [Online] 2017. [Citace: 13. září 2020.] <https://theses.cz/id/514ha9/>.

electronicsforu.com. 2019. www.electronicsforu.com. *What is a MOSFET?* [Online] EFY Group, 4. Duben 2019. [Citace: 19. Září 2020.] <https://www.electronicsforu.com/resources/learn-electronics/mosfet-basics-working-applications>.

FYZMATIK. 2022. fyzmatik.pise.cz. *Magnetický urychlovač - Gaussovo dělo*. [Online] 2022. [Citace: 16. března 2022.] <https://fyzmatik.pise.cz/169-magneticky-urychlovac-gaussovo-delo.html>.

J. Horňák, F. Hložek, T. Kerepecký, M. Matys. 2012. <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Zima11/proc/gauss.pdf>. *Gaussova zbraň aneb využití magnetismu ve zbrojním průmyslu*. [Online] 2012. [Citace: 14. Září 2020.] <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Zima11/proc/gauss.pdf>.

kar. 2021. ct24.ceskatelevize.cz. *ct24.ceskatelevize*. [Online] 14. 11 2021. <https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/3399294-ameriane-testuji-obri-prak-ktery-bude-vrhat-dokosmu-druzice-v-prvni-zkousce-uspel>.

Palme, Mathias. 2020. *Měření účinků Gaussova děla pomocí programu Audacity*. [Projekt] Turnov : Mathias Palme, 2020.

Svoboda, Bc. Pavel. 2014. dspace5.zcu.cz. *Návrh dvoustupňového magnetického děla*. [Online] 2. Květen 2014. [Citace: 13. Září 2020.] <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/15374/1/DP.pdf>.

Tom Welch, Andrew Yock. 2020. <http://asr.menloschool.org/>. *Building a Cyclic Gauss Gun*. [Online] 2020. [Citace: 18. Září 2020.] <http://asr.menloschool.org/wp-content/uploads/CoilGunWelchYock.pdf>.

Přílohy

Seznam použitých zkratk

CNC - Computer Numerical Control

CAD - Computer Aided Design

FDM - Fused Deposition Modeling

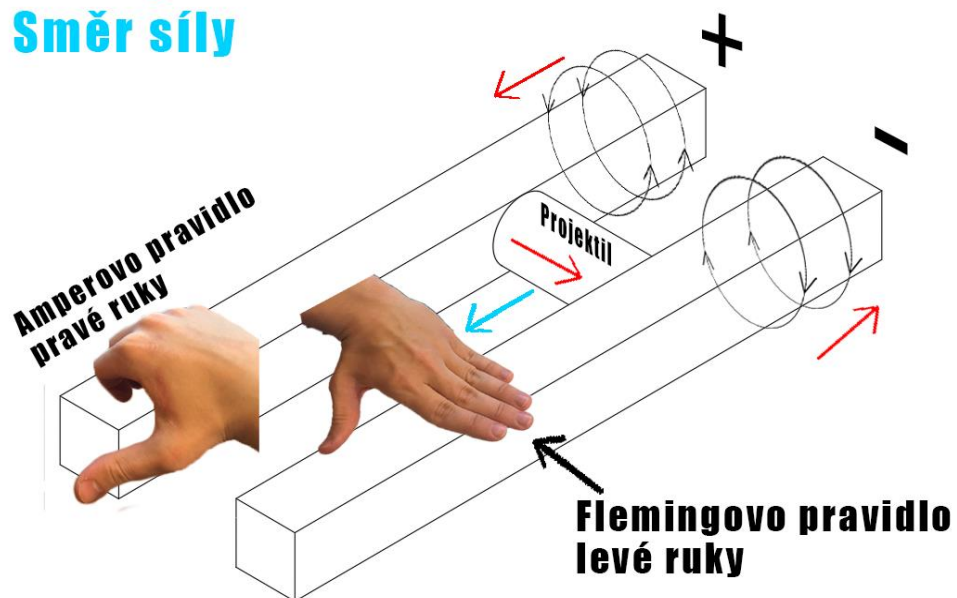
MDF – Medium Density Fibreboard

Seznam elektronických příloh

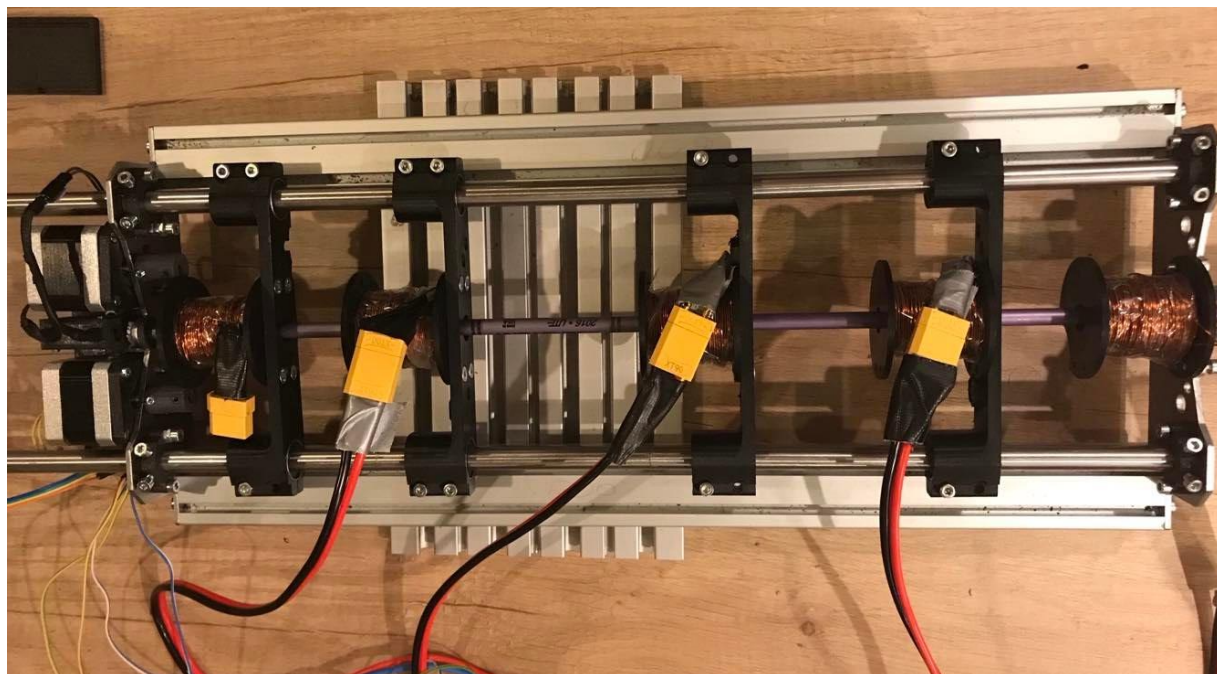
1. Coil_gun.f3z
2. Celá aparatura.pdf
3. Coil_gun_corner_view.pdf
4. front_plate.pdf
5. Back_plate.pdf
6. connector.pdf
7. coil_socket.pdf
8. front_plate-nema_17_reduction.pdf
9. back_plate-nema_17-reduction.pdf
10. first_stage_adjustment_mechanism.pdf
11. coil_gun_front.back_view.pdf
12. mother_board_uno
13. modul_pcb
14. Coi_gun_master_uno.ino
15. axis_control.ino
16. Coil_gun_gui_bluetooth
17. coil_winding_machine-rotary_axis.pdf
18. coil_winding_machine-linear_axis.pdf
19. Coil_Winding_Machine.f3z
20. coil_winding_machine-wire_positioning_system.pdf
21. coil_winding_machine-base_plate.pdf
22. coil_winding_machine-whole_assembly.pdf
23. CWM_gui
24. optická brána
25. optical_speed_measurement_system.pdf
26. optical_speed_measurement_system-bottom+PCB.pdf

Obrázky

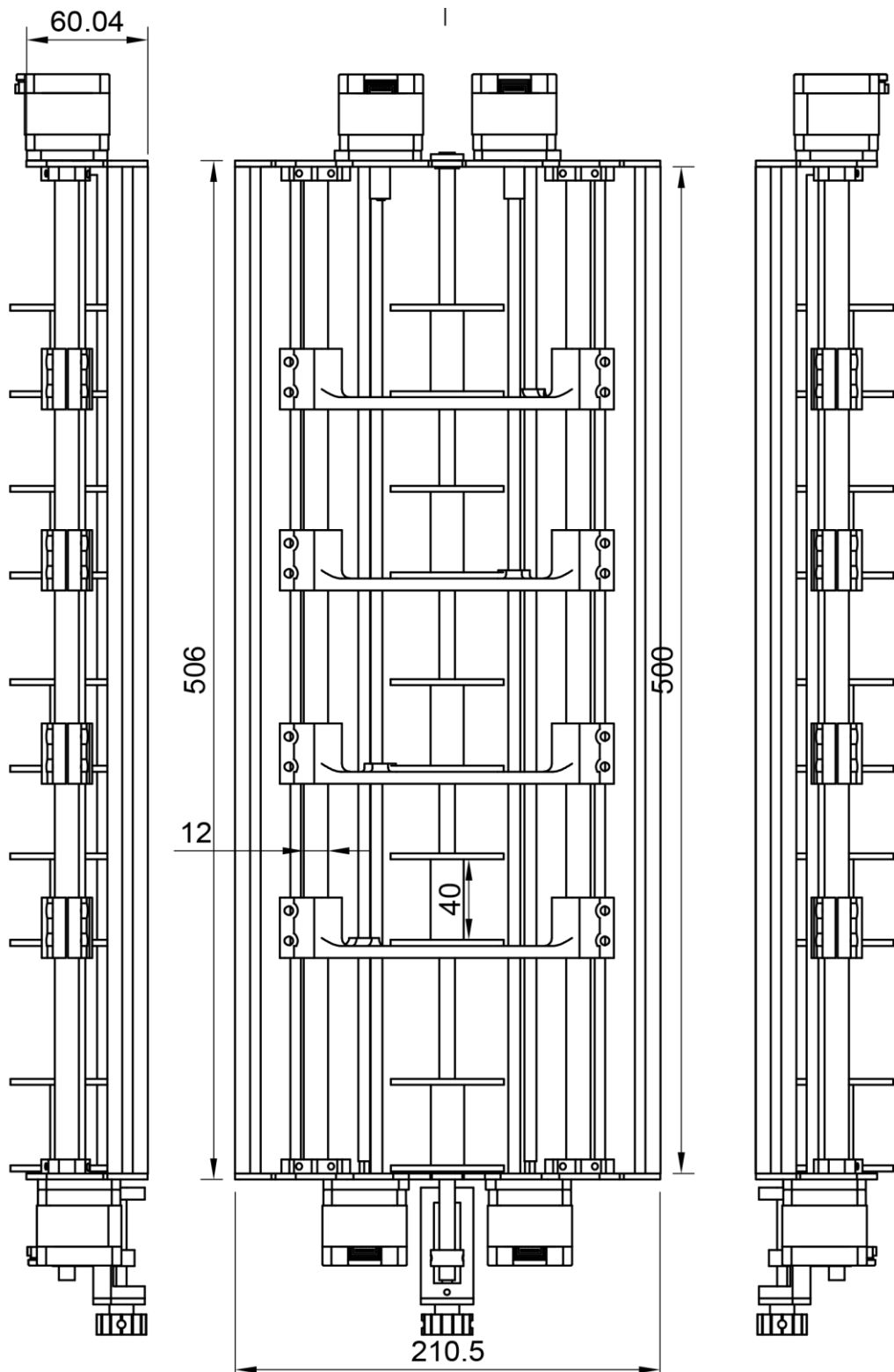
Směr proudu
Směr síly



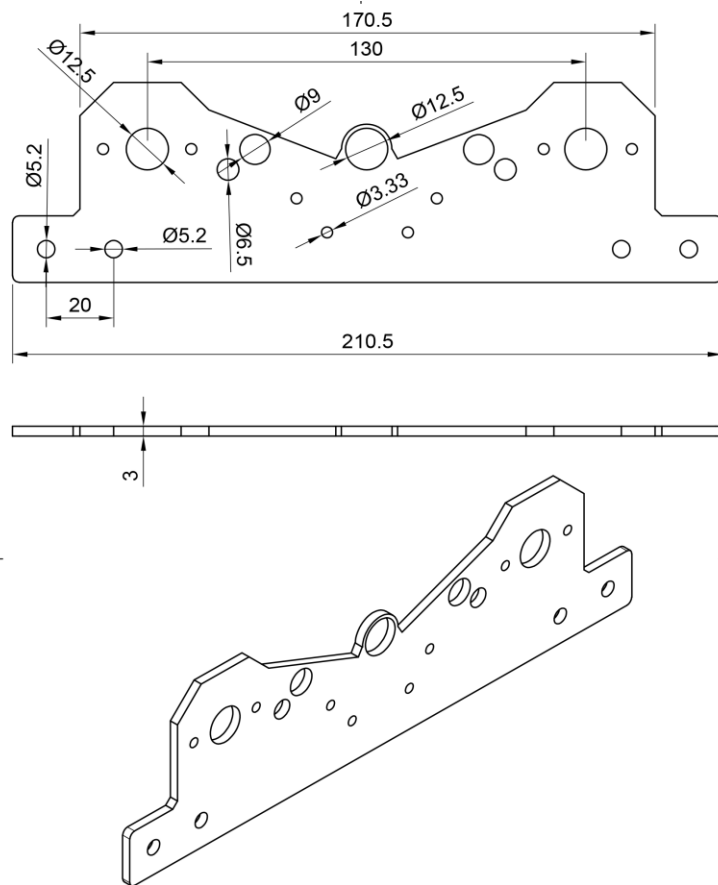
Obrázek 1: Fyzikální princip railgunu



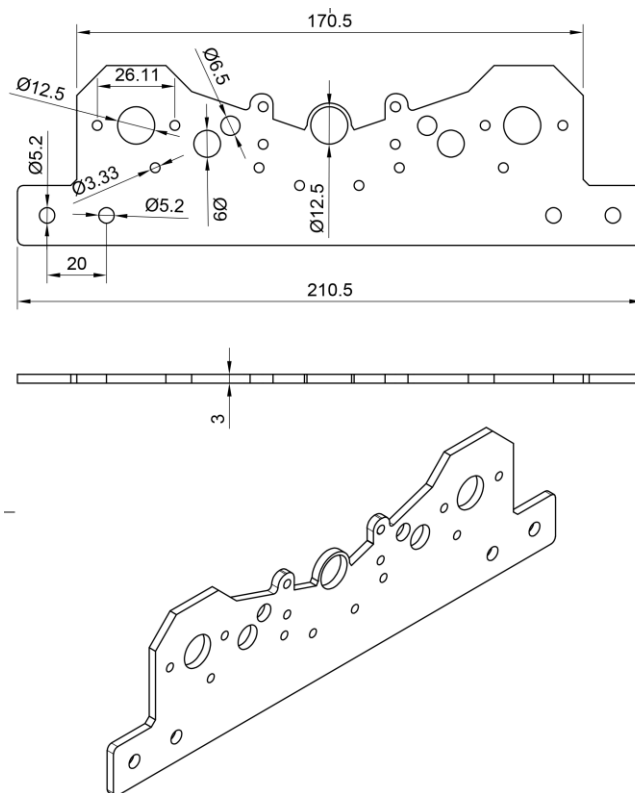
Obrázek 2: Sestavená aparatura coilgunu (na fotografii chybí řídicí závitové tyče)



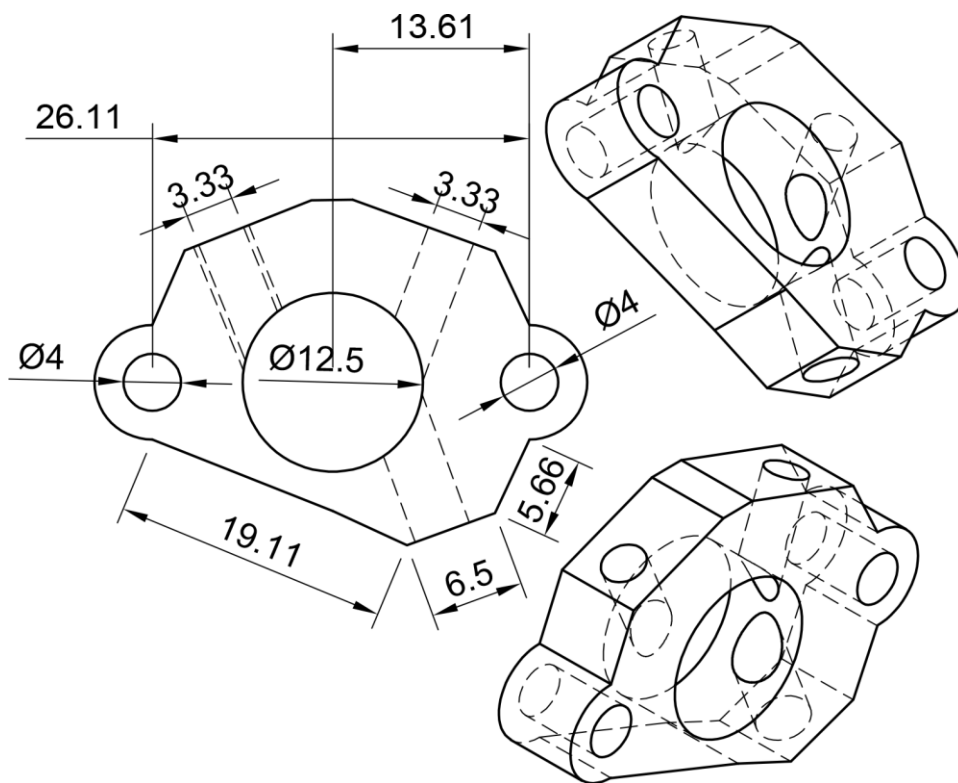
Obrázek 3: Celá aparatura coilgunu



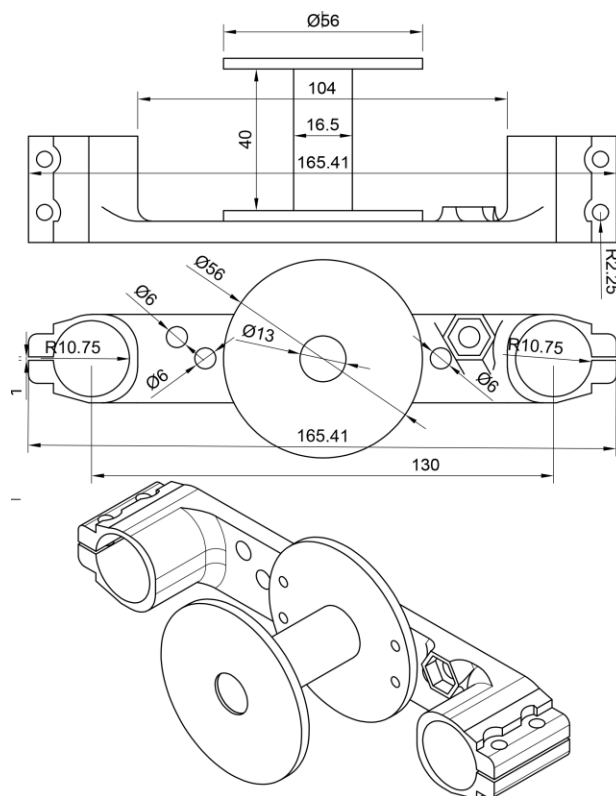
Obrázek 4: Přední ocelový plech



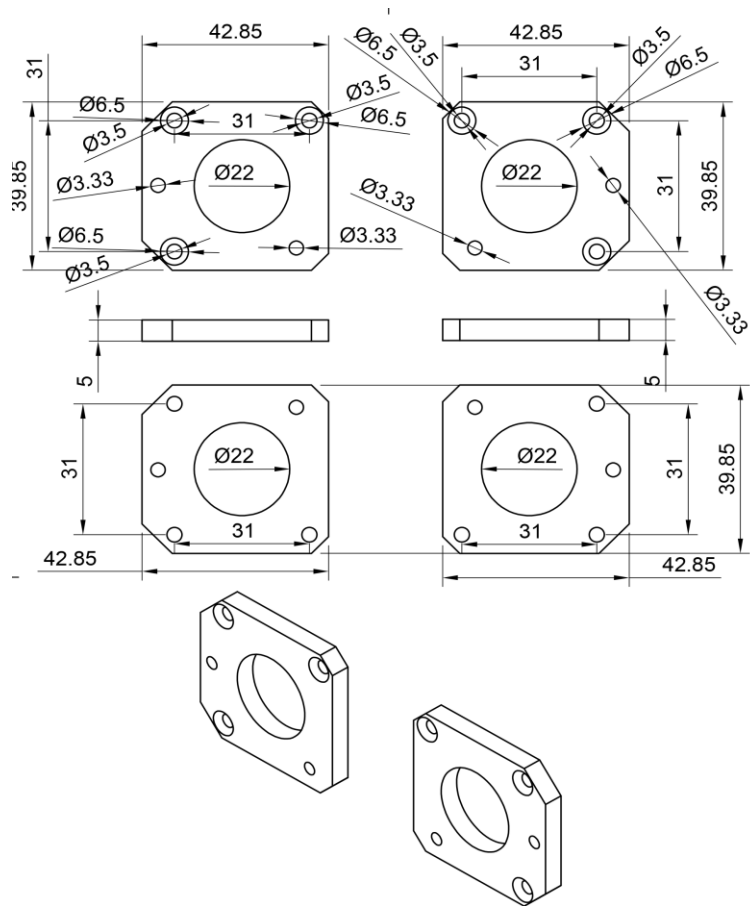
Obrázek 5: Zadní ocelový plech



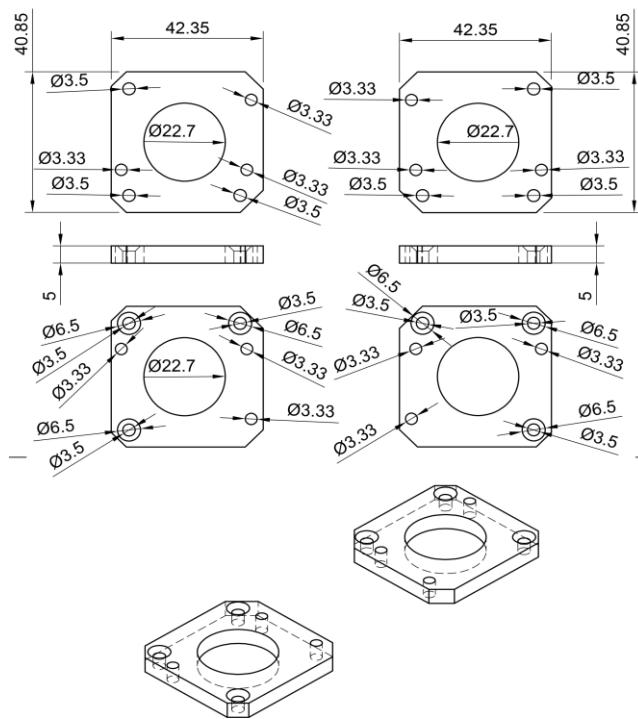
Obrázek 6: Spojka na vodící tyče 12



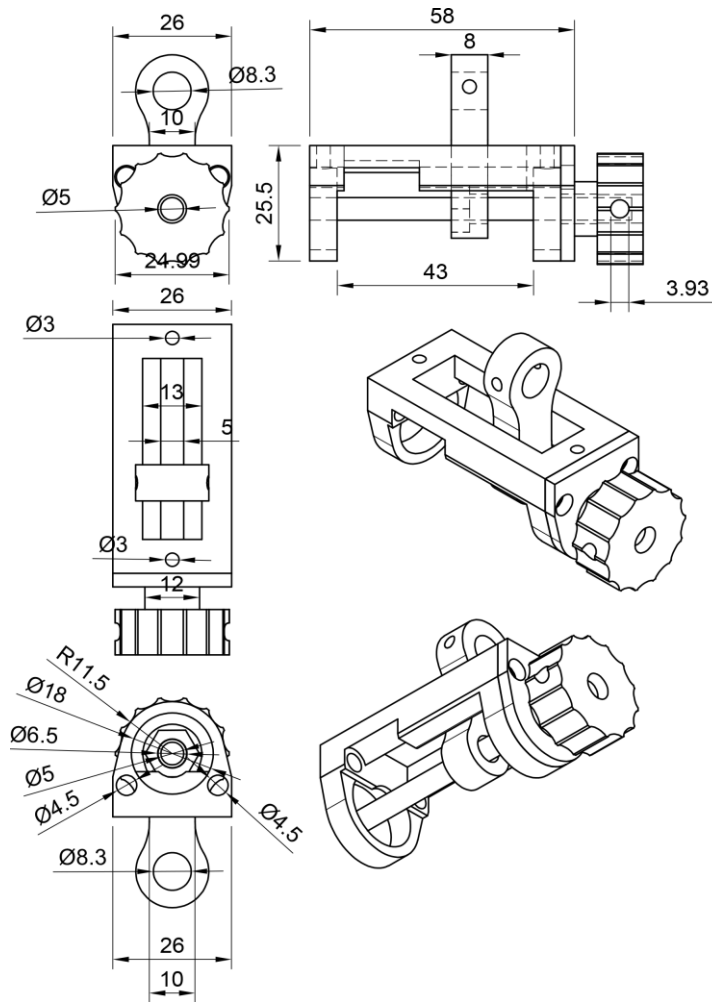
Obrázek 7: Modul s cívkou



Obrázek 8: Redukce pro NEMA 17 na přeni plech

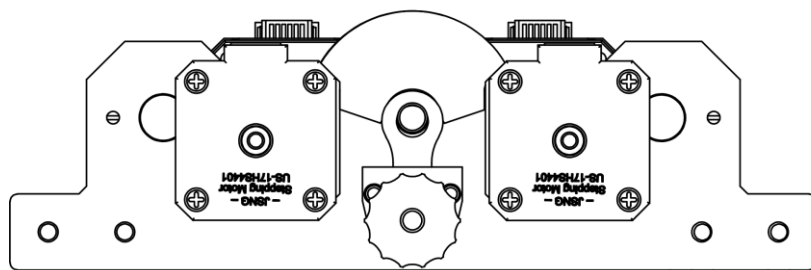


Obrázek 9: Redukce pro NEMA 17 na zadní plech

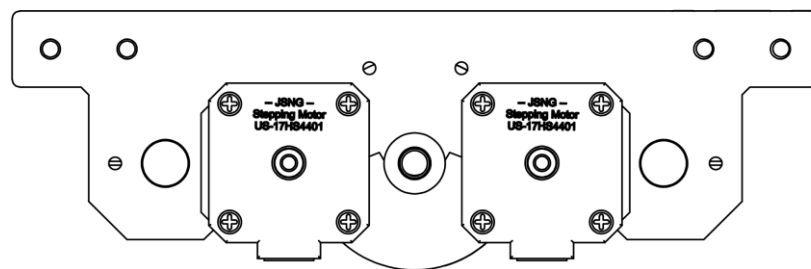


Obrázek 10: Systém pro nastavení polohy hlavně

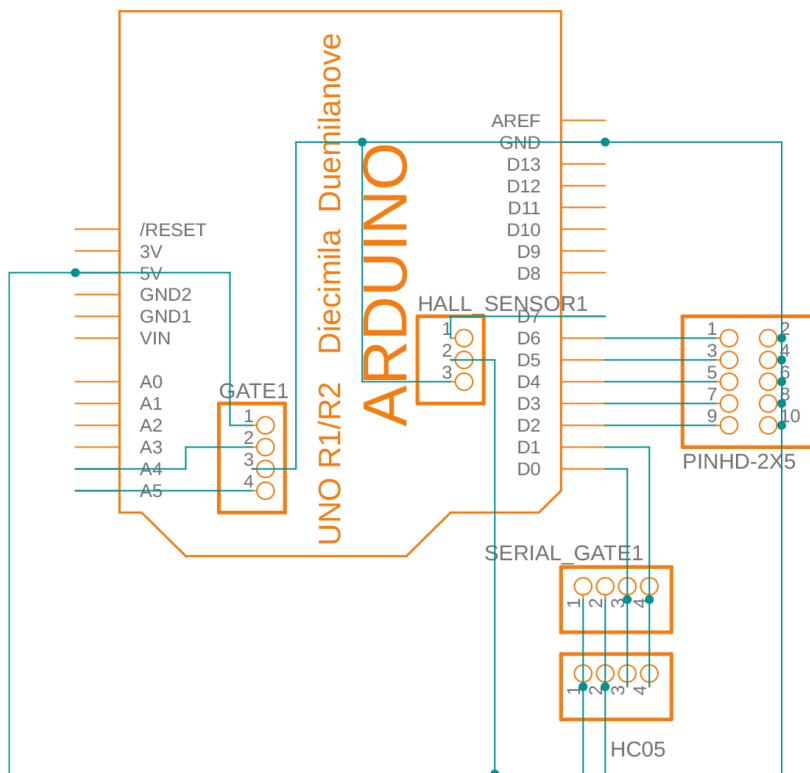
Coil gun back view



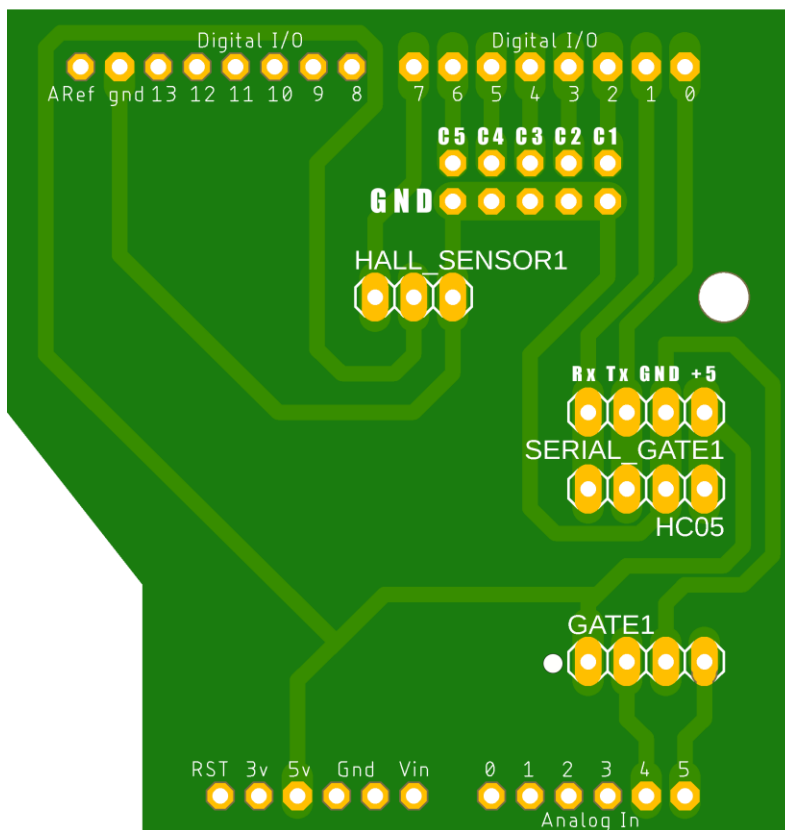
Coil gun front view



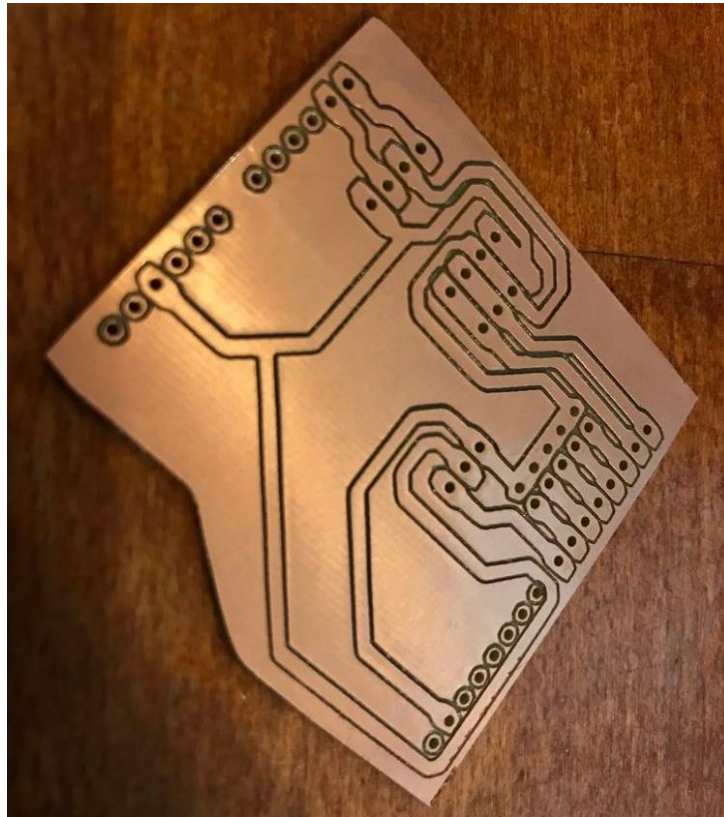
Obrázek 11: Coilgun – zadní a přední strana



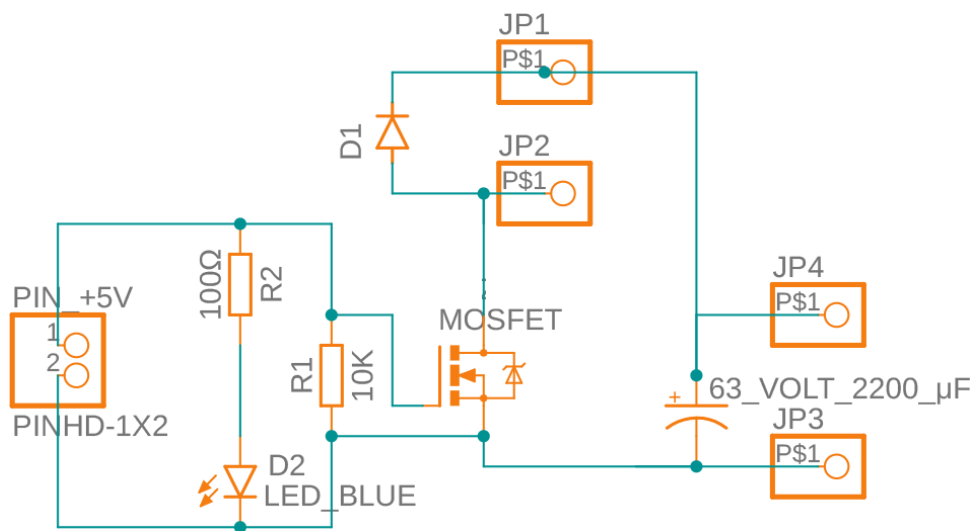
Obrázek 12: Základní deska – schéma



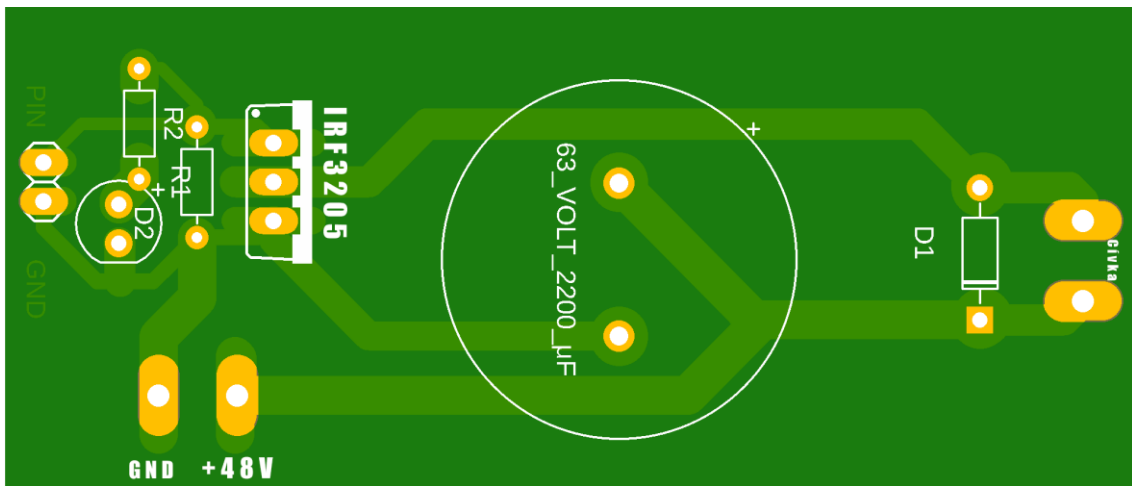
Obrázek 13: Základní deska – shield



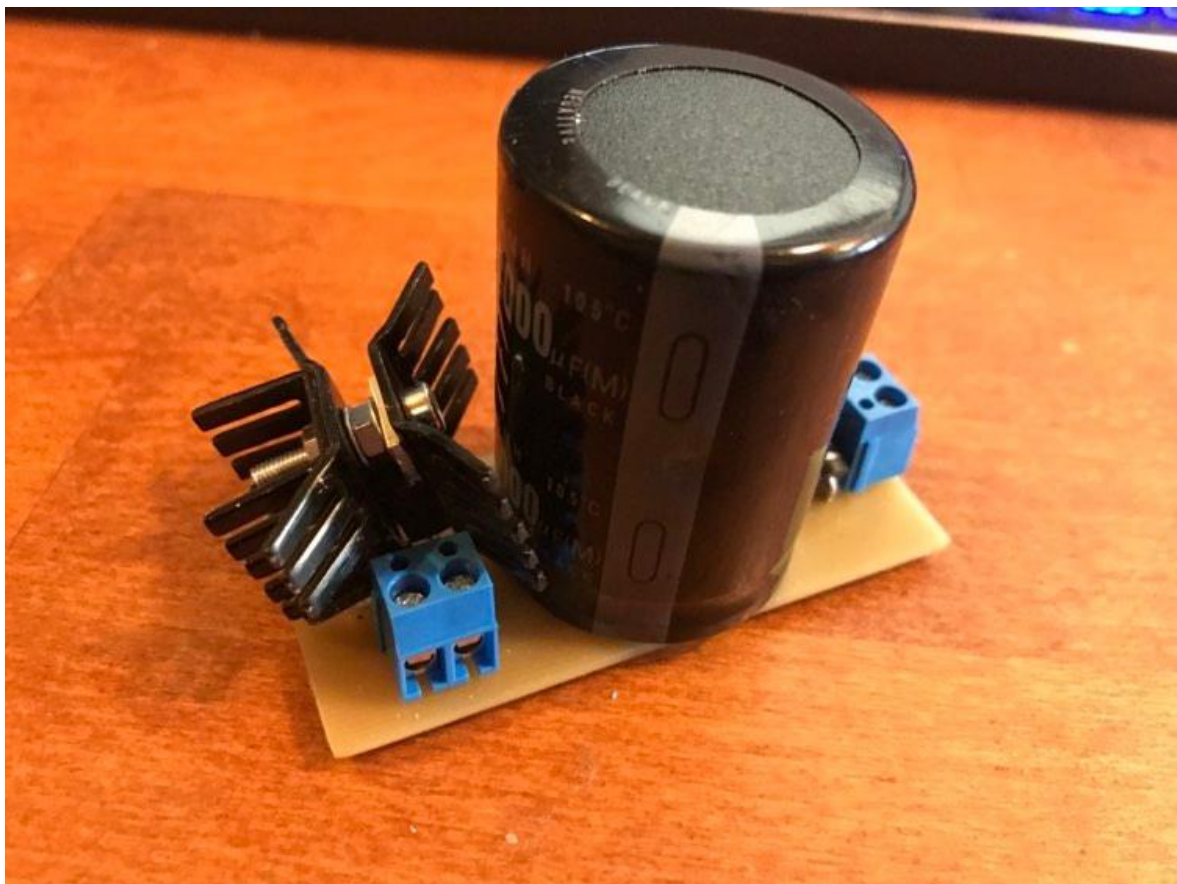
Obrázek 14: Vyfrézovaná základní deska



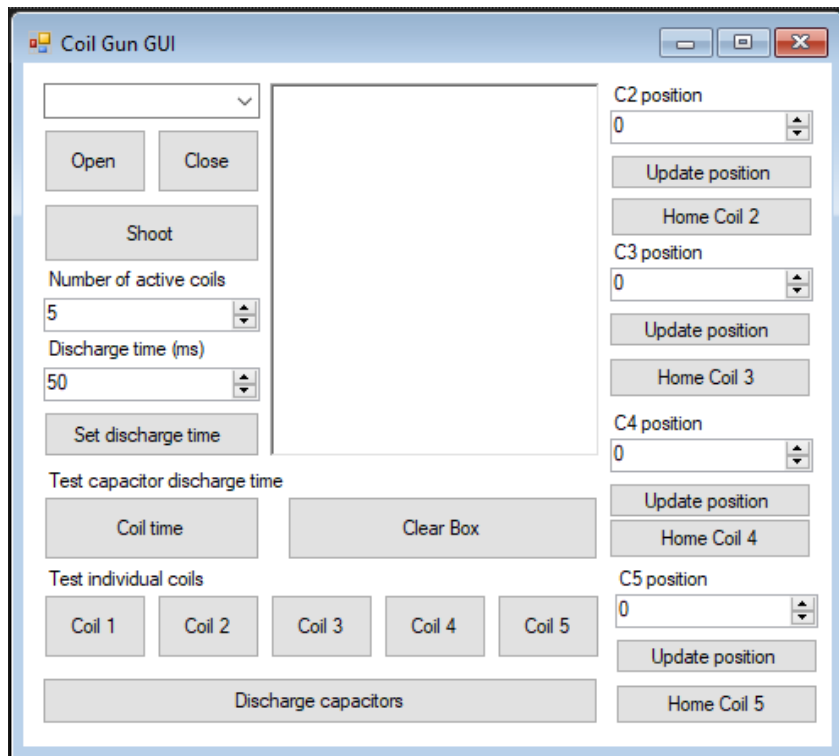
Obrázek 15: Modul – schéma



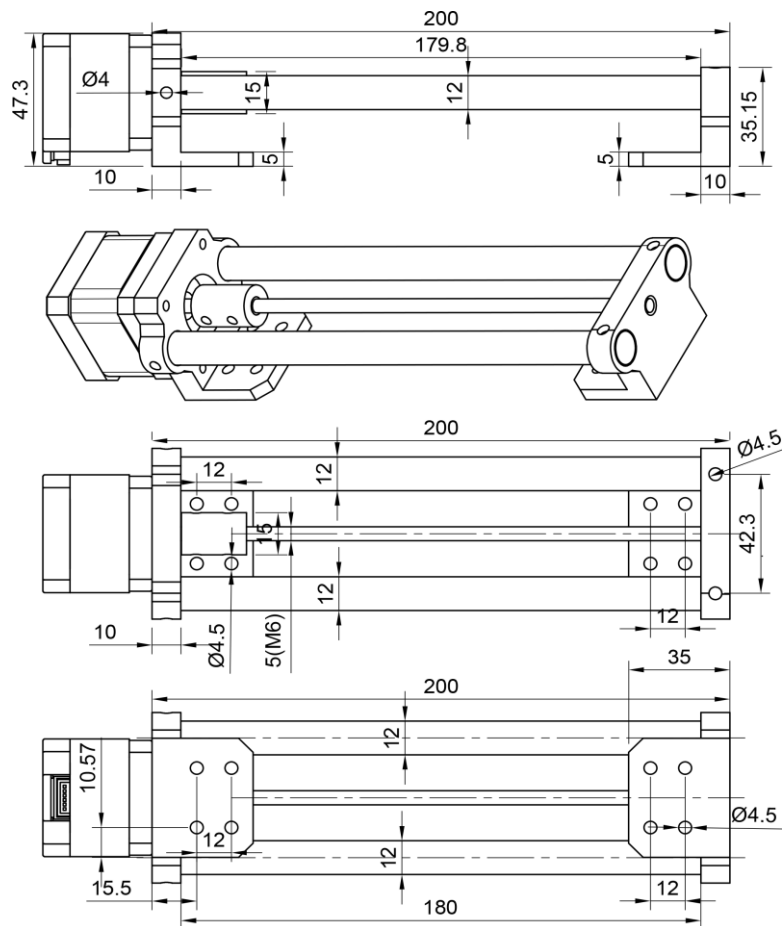
Obrázek 16: Modul – deska plošných spojů



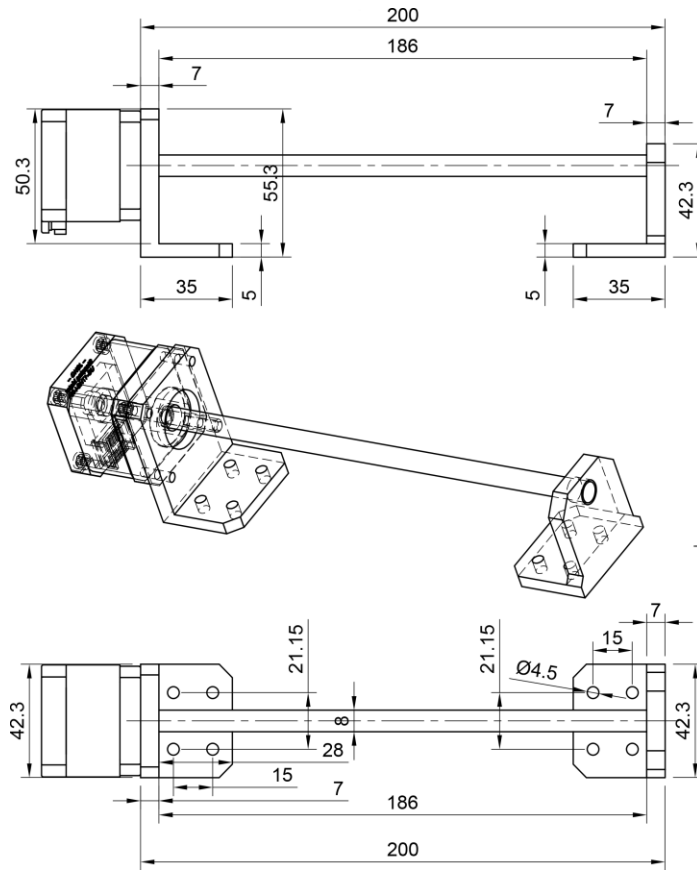
Obrázek 17: Osazený modul



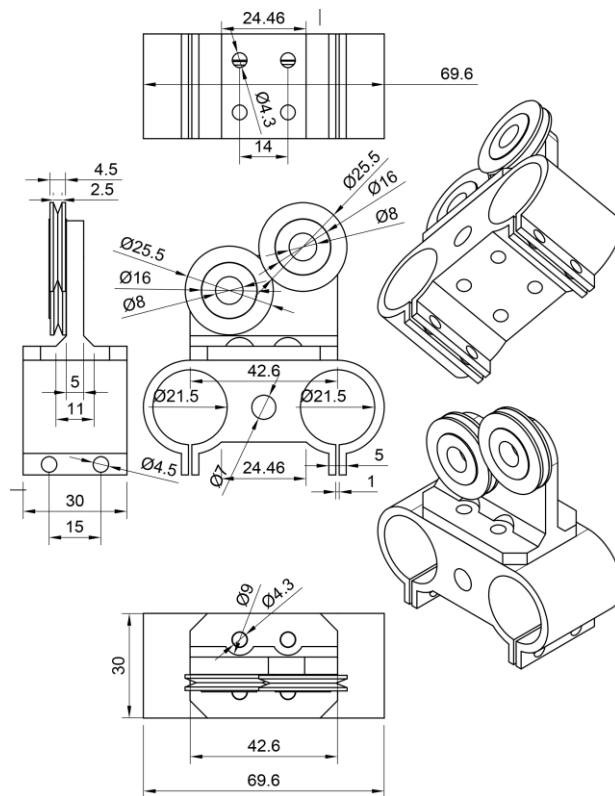
Obrázek 18: Coilgun GUI



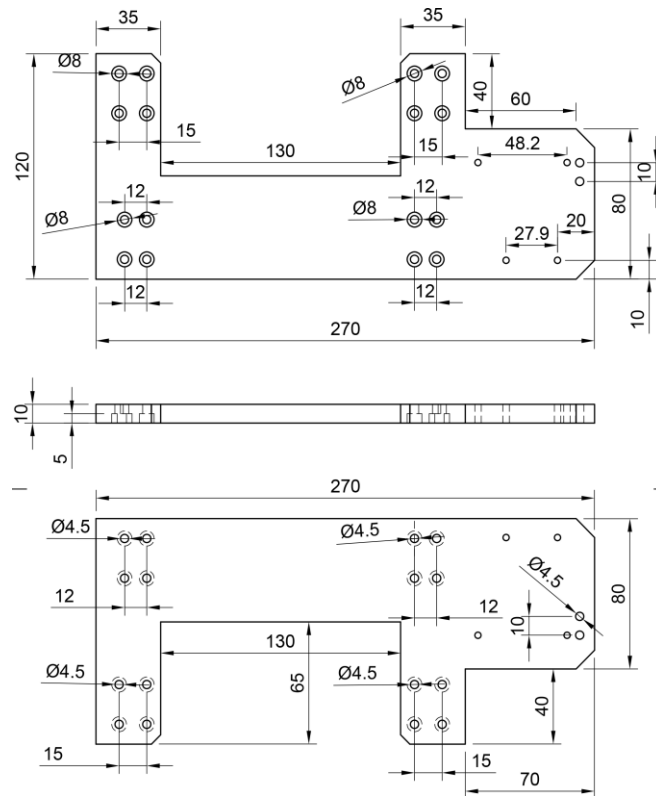
Obrázek 19: CNC naviječka – lineární osa



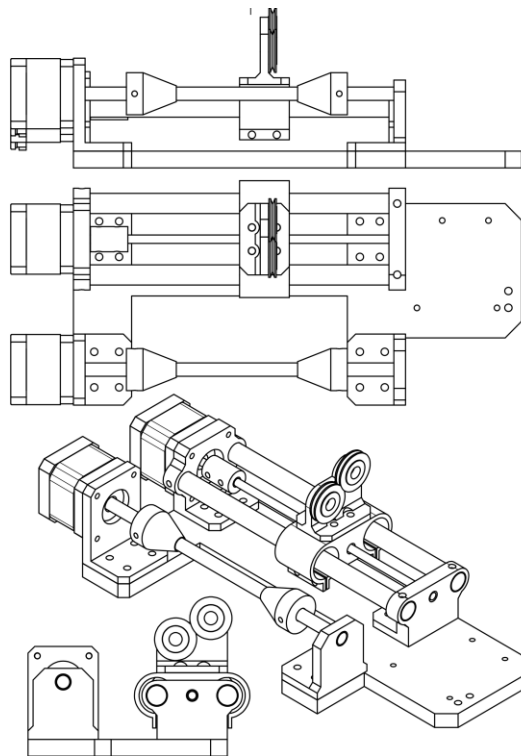
Obrázek 20: CNC navíječka – rotační osa



Obrázek 21: CNC navíječka – polohovací systém



Obrázek 22: CNC naviječka – podstava



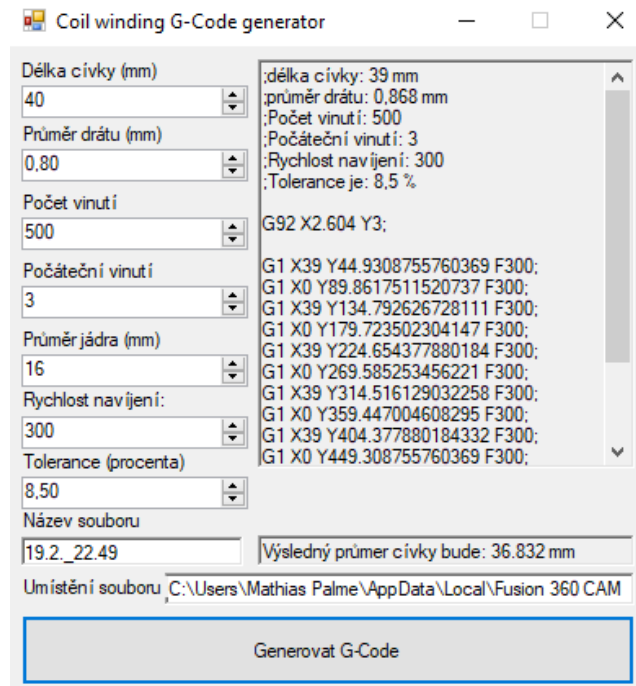
Obrázek 23: CNC naviječka – celá sestava

```

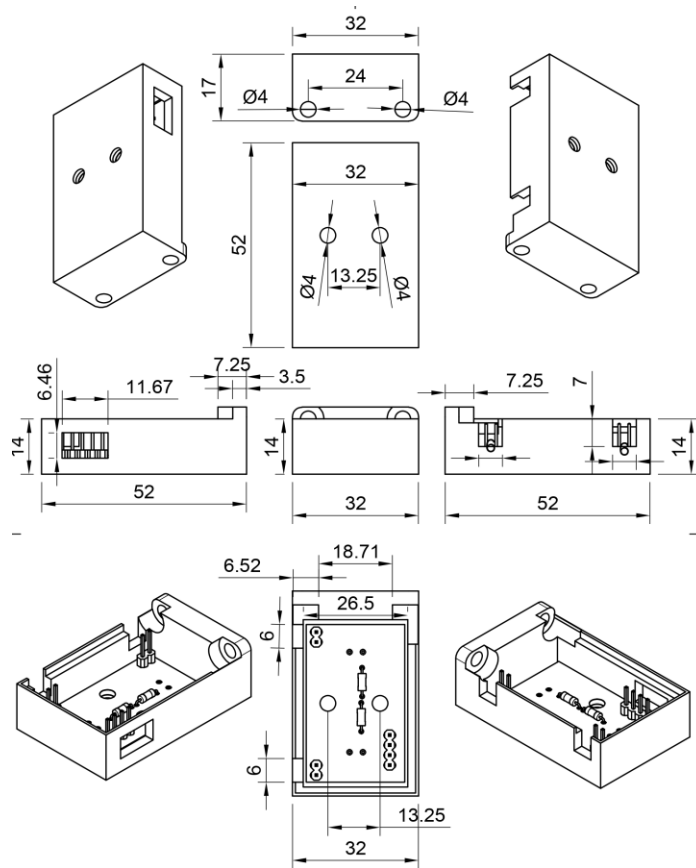
$0=10 (step pulse, usec)
$1=25 (step idle delay, msec)
$2=0 (step port invert mask:00000000)
$3=0 (dir port invert mask:00000000)
$4=0 (step enable invert, bool)
$5=0 (limit pins invert, bool)
$6=0 (probe pin invert, bool)
$10=3 (status report mask:00000011)
$11=0.010 (junction deviation, mm)
$12=0.002 (arc tolerance, mm)
$13=0 (report inches, bool)
$20=0 (soft limits, bool)
$21=0 (hard limits, bool)
$22=0 (homing cycle, bool)
$23=0 (homing dir invert mask:00000000)
$24=25.000 (homing feed, mm/min)
$25=500.000 (homing seek, mm/min)
$26=250 (homing debounce, msec)
$27=1.000 (homing pull-off, mm)
$100=200.000 (x, step/mm)
$101=200.000 (y, step/mm)
$102=250.000 (z, step/mm)
$110=250.000 (x max rate, mm/min)
$111=200.000 (y max rate, mm/min)
$112=500.000 (z max rate, mm/min)
$120=500.000 (x accel, mm/sec^2)
$121=20.000 (y accel, mm/sec^2)
$122=10.000 (z accel, mm/sec^2)
$130=200.000 (x max travel, mm)
$131=200.000 (y max travel, mm)
$132=200.000 (z max travel, mm)

```

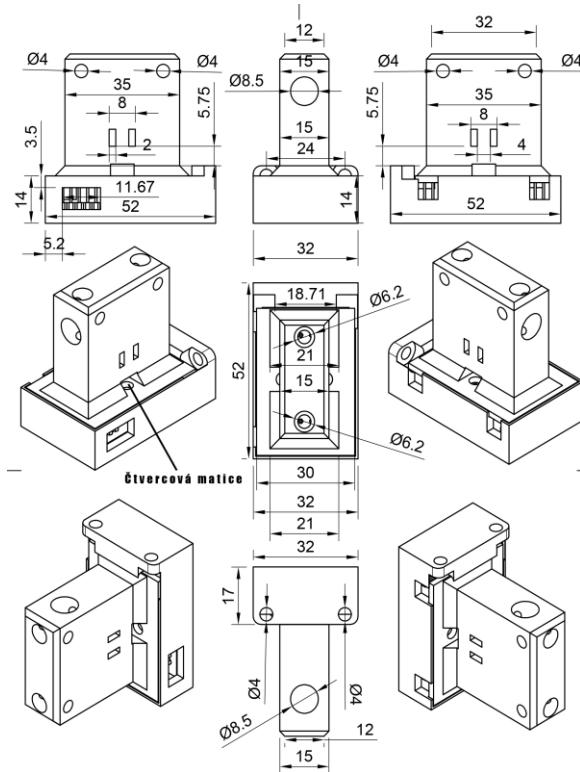
Obrázek 24: GRBL – konfigurace firmwaru



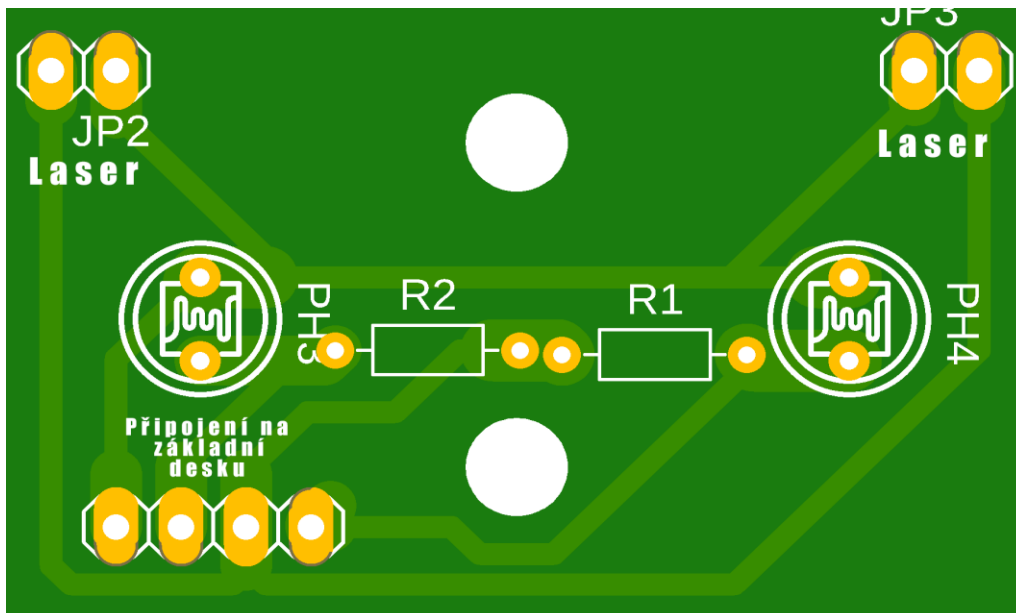
Obrázek 25: Generátor g-codu pro CNC navíjení



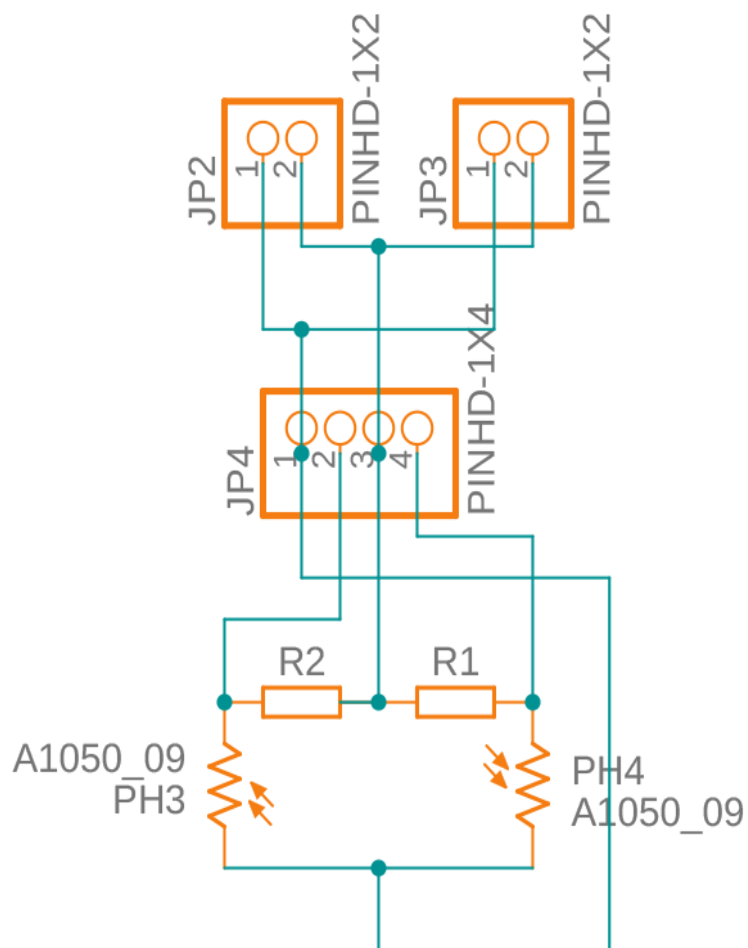
Obrázek 26: Optická brána - spodní díl + plošný spoj



Obrázek 27: Optická brána – celá sestava



Obrázek 28: Optická brána – deska plošných spojů



Obrázek 29: Optická brána – deska plošných spojů, schéma

Tabulky

Měření číslo	Čas (ms)	Odchylka (ms)
1	111,00	1,23
2	110,00	0,23
3	111,00	1,23
4	121,00	11,23
5	108,00	1,77
6	109,00	0,77
7	111,00	1,23
8	109,00	0,77
9	109,00	0,77
10	108,00	1,77
11	108,00	1,77
12	106,00	3,77
13	110,00	0,23
14	109,00	0,77
15	109,00	0,77
16	109,00	0,77
17	107,00	2,77
18	109,00	0,77
19	110,00	0,23
20	111,00	1,23
21	108,00	1,77
22	107,00	2,77
23	111,00	1,23
24	110,00	0,23
25	112,00	2,23
26	109,00	0,77
27	111,00	1,23
28	109,00	0,77
29	110,00	0,23
30	111,00	1,23
Průměr	109,77	1,55

Tabulka 1: Měření maximální doby sepnutí první cívky

Číslo měření (rychlost m/s)	t = 20 ms	Odchylka	t = 18 ms	Odchylka	t = 16 ms	Odchylka	t = 15 ms	Odchylka	t = 14 ms	Odchylka	t = 12 ms	Odchylka
1	2,0	0,0	3,1	0,0	3,3	0,1	3,7	0,0	3,1	0,1	2,7	0,0
2	1,7	0,2	3,2	0,1	3,6	0,1	3,5	0,1	3,2	0,0	2,5	0,1
3	1,9	0,1	3,2	0,1	3,7	0,2	3,7	0,0	3,2	0,1	2,8	0,2
4	1,9	0,0	3,1	0,0	3,3	0,1	3,9	0,3	3,1	0,0	2,8	0,2
5	2,0	0,0	3,1	0,0	3,4	0,1	3,7	0,1	3,1	0,0	2,6	0,1
6	2,2	0,3	3,1	0,0	3,3	0,1	3,7	0,0	3,1	0,1	2,7	0,0
7	1,7	0,3	3,1	0,0	3,5	0,1	3,6	0,0	3,1	0,0	2,7	0,0
8	2,2	0,2	2,9	0,2	3,5	0,0	3,5	0,1	3,2	0,1	2,8	0,1
9	1,9	0,1	3,2	0,1	3,5	0,1	3,6	0,0	3,1	0,1	2,4	0,2
10	2,1	0,1	3,1	0,0	3,3	0,1	3,5	0,1	3,2	0,1	2,5	0,1
Průměr	2,0	0,1	3,1	0,1	3,5	0,1	3,6	0,1	3,1	0,1	2,6	0,1

Tabulka 2: Optimální načasování prvního stupně

Číslo měření (rychlost m/s)	13 mm	odchylka	20 mm	odchylka	25 mm	odchylka	30 mm	odchylka	40 mm	odchylka	50 mm	odchylka	60 mm	odchylka	70 mm	odchylka
1	2,2	0,0	2,8	0,1	3,1	0,0	3,2	0,2	3,8	0,1	4,5	0,1	4,3	0,1	3,8	0,1
2	2,3	0,1	2,9	0,1	3,1	0,0	3,5	0,1	3,9	0,0	4,7	0,1	4,2	0,0	3,7	0,1
3	2,3	0,1	2,9	0,1	3,1	0,0	3,3	0,1	4,0	0,1	4,5	0,1	4,3	0,1	3,8	0,1
4	2,4	0,2	2,9	0,1	3,1	0,1	3,5	0,1	4,0	0,1	4,6	0,0	4,3	0,1	3,5	0,2
5	2,2	0,0	2,9	0,1	3,2	0,1	3,6	0,2	3,8	0,1	4,4	0,2	4,1	0,1	3,8	0,1
6	2,3	0,0	2,7	0,1	3,2	0,1	3,4	0,0	3,8	0,1	4,5	0,1	4,1	0,1	3,9	0,2
7	2,1	0,1	2,7	0,1	3,0	0,1	3,4	0,0	4,0	0,1	4,7	0,1	4,1	0,1	3,6	0,1
8	2,1	0,1	2,9	0,1	3,1	0,0	3,3	0,1	3,9	0,0	4,7	0,1	4,0	0,1	3,7	0,0
9	2,2	0,0	2,8	0,1	3,1	0,1	3,4	0,0	3,9	0,0	4,7	0,2	4,3	0,1	3,7	0,0
10	2,1	0,1	2,7	0,1	3,1	0,1	3,5	0,0	3,9	0,0	4,7	0,2	4,1	0,1	3,7	0,0
Průměr	2,2	0,1	2,8	0,1	3,1	0,1	3,4	0,1	3,9	0,1	4,6	0,1	4,2	0,1	3,7	0,1

Tabulka 3: Měření optimální vzdálenosti mezi první a druhou cívkou

Číslo měření (rychlost m/s)	13 mm	odchyl ka	20 mm	odchyl ka	30 mm	odchyl ka	40 mm	odchyl ka	50 mm	odchyl ka	60 mm	odchyl ka	70 mm	odchyl ka	80 mm	odchyl ka
1	3,3	0,0	3,4	0,0	3,6	0,1	3,6	0,1	3,7	0,0	4,0	0,0	5,4	0,0	3,8	0,1
2	3,4	0,0	3,5	0,1	3,6	0,1	3,5	0,2	3,8	0,1	4,0	0,0	5,3	0,1	4,0	0,2
3	3,3	0,0	3,3	0,1	3,3	0,2	4,0	0,3	3,7	0,1	3,9	0,0	5,6	0,2	3,7	0,1
4	3,4	0,0	3,3	0,1	3,7	0,2	3,7	0,0	3,6	0,1	3,7	0,2	5,6	0,2	3,7	0,1
5	3,3	0,0	3,3	0,1	3,3	0,2	3,7	0,0	3,6	0,1	4,0	0,0	4,7	0,7	3,8	0,1
6	3,3	0,0	3,3	0,1	3,5	0,1	3,5	0,1	3,8	0,1	4,0	0,0	5,7	0,3	3,8	0,0
7	3,4	0,0	3,5	0,1	3,3	0,2	3,8	0,1	3,7	0,1	4,1	0,1	5,4	0,0	3,7	0,0
8	3,3	0,0	3,6	0,2	3,6	0,2	3,7	0,0	3,9	0,2	3,8	0,1	5,4	0,0	3,7	0,1
9	3,4	0,1	3,4	0,0	3,3	0,2	3,7	0,0	3,6	0,1	4,0	0,0	5,3	0,1	3,7	0,1
10	3,4	0,0	3,3	0,1	3,5	0,1	3,7	0,1	3,9	0,2	4,1	0,1	5,6	0,2	3,7	0,1
Průměr	3,4	0,1	3,4	0,1	3,5	0,1	3,7	0,1	3,7	0,1	4,0	0,1	5,4	0,2	3,8	0,1

Tabulka 4: Měření optimální vzdálenosti mezi druhou a třetí cívkou

Číslo měření (rychlost m/s)	13 mm	Odchylka	20 mm	Odchylka	30 mm	Odchylka	40 mm	Odchylka	50 mm	Odchylka	60 mm	Odchylka	70 mm	Odchylka	80 mm	Odchylka	90 mm	Odchylka	100 mm	Odchylka	110 mm	Odchylka
1	2,7	0,0	3,0	0,1	3,1	0,0	3,4	0,1	3,4	0,1	3,6	0,0	4,2	0,0	4,5	0,0	6,4	0,1	7,7	0,1	7,0	0,1
2	2,6	0,1	2,9	0,0	3,1	0,0	3,3	0,1	3,5	0,0	3,5	0,1	4,5	0,2	4,4	0,1	6,2	0,1	7,7	0,1	7,0	0,1
3	2,8	0,0	2,9	0,0	3,1	0,0	3,4	0,0	3,4	0,1	3,8	0,1	4,4	0,1	4,5	0,0	6,2	0,1	7,7	0,1	6,8	0,1
4	2,8	0,0	2,8	0,1	3,1	0,0	3,3	0,0	3,4	0,1	3,5	0,1	4,2	0,0	4,5	0,0	6,4	0,1	7,7	0,1	7,0	0,1
5	2,7	0,1	2,9	0,0	3,1	0,1	3,5	0,1	3,5	0,0	3,7	0,0	4,1	0,1	4,7	0,2	6,2	0,1	7,4	0,2	6,9	0,0
6	2,8	0,1	3,0	0,1	3,1	0,0	3,3	0,1	3,5	0,0	3,6	0,0	4,2	0,0	4,6	0,1	6,4	0,1	7,7	0,1	6,8	0,0
7	2,9	0,1	2,8	0,1	3,1	0,0	3,3	0,0	3,5	0,0	3,6	0,0	4,2	0,1	4,4	0,0	6,4	0,1	7,4	0,2	6,8	0,0
8	2,8	0,0	2,8	0,1	3,1	0,1	3,3	0,1	3,5	0,0	3,7	0,1	4,1	0,1	4,4	0,0	6,2	0,1	7,4	0,2	6,8	0,1
9	2,7	0,1	2,8	0,1	3,1	0,0	3,3	0,0	3,5	0,0	3,6	0,0	4,2	0,0	4,4	0,0	6,2	0,1	7,7	0,1	6,8	0,1
10	2,9	0,1	3,0	0,1	3,1	0,0	3,3	0,1	3,5	0,0	3,7	0,1	4,4	0,1	4,4	0,0	6,4	0,1	7,4	0,2	6,8	0,1
Průměr	2,8	0,1	2,9	0,1	3,1	0,1	3,3	0,1	3,5	0,1	3,6	0,1	4,2	0,1	4,5	0,1	6,3	0,1	7,6	0,1	6,9	0,1

Tabulka 5: Měření optimální vzdálenosti mezi třetí a čtvrtou cívkou

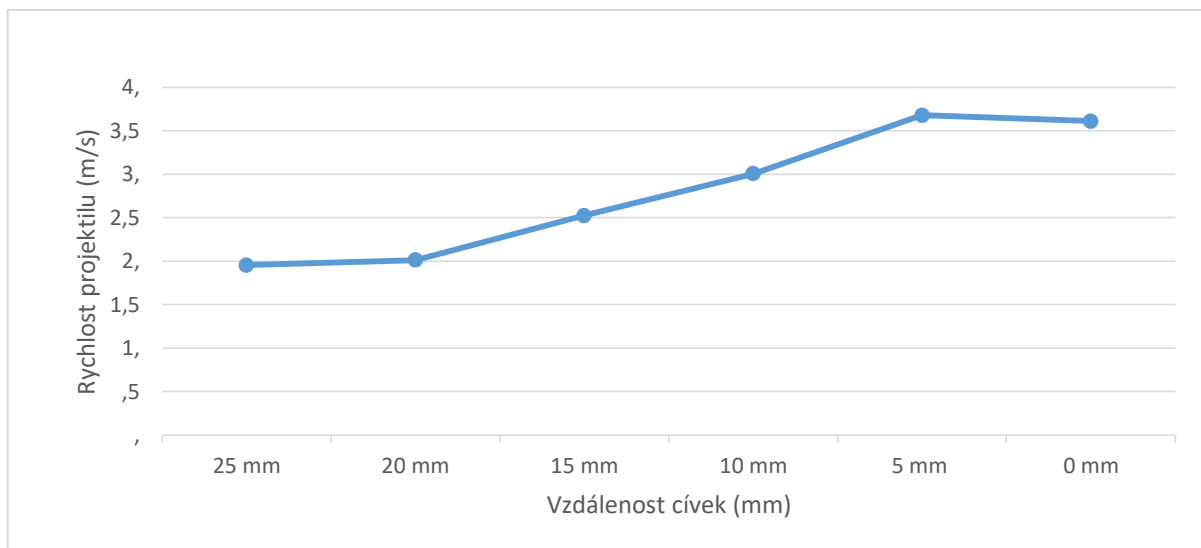
Cívka	1	Odchylka	2	Odchylka	3	Odchylka	4	Odchylka
Výsledná rychlost (m/s)	3,6	0,1	4,6	0,1	5,4	0,1	7,6	0,1
Nárůst rychlosti (m/s)			0,9		0,8		2,1	

Tabulka 6: Nárůst rychlosti s každým stupněm coilgunu

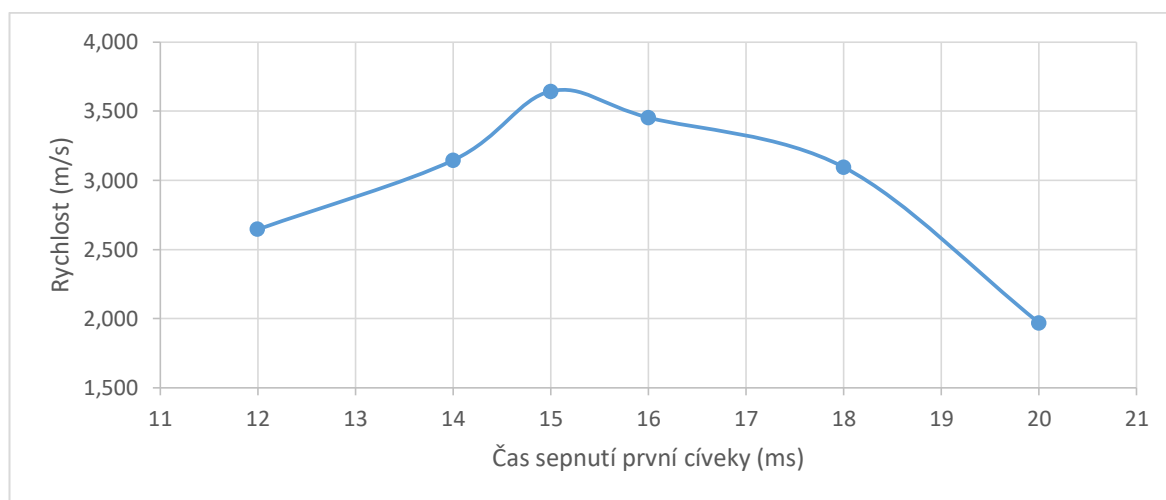
Cívka	1	2	3	4
Optimální poloha (mm)	0	50	70	100

Tabulka 7: Optimální vzdálenost cívek stupněm coilgunu

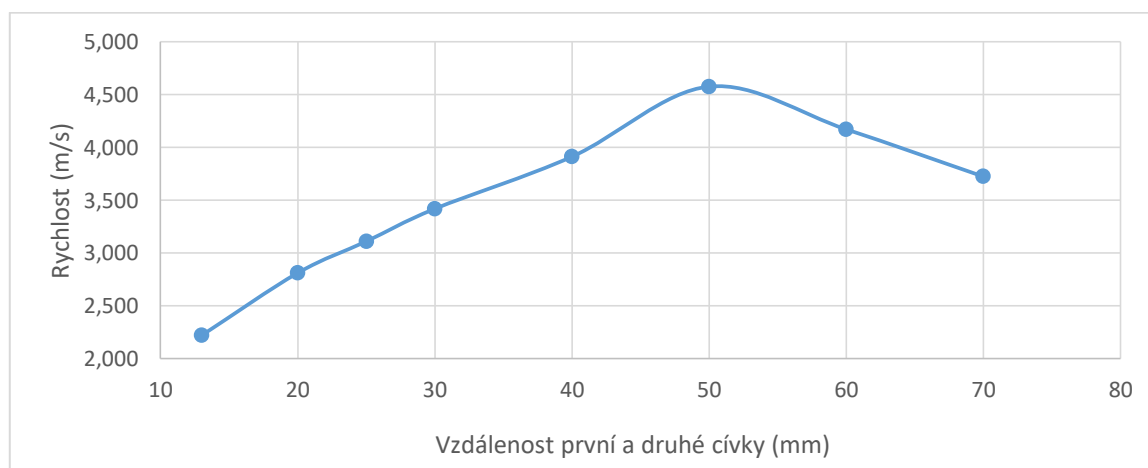
Grafy



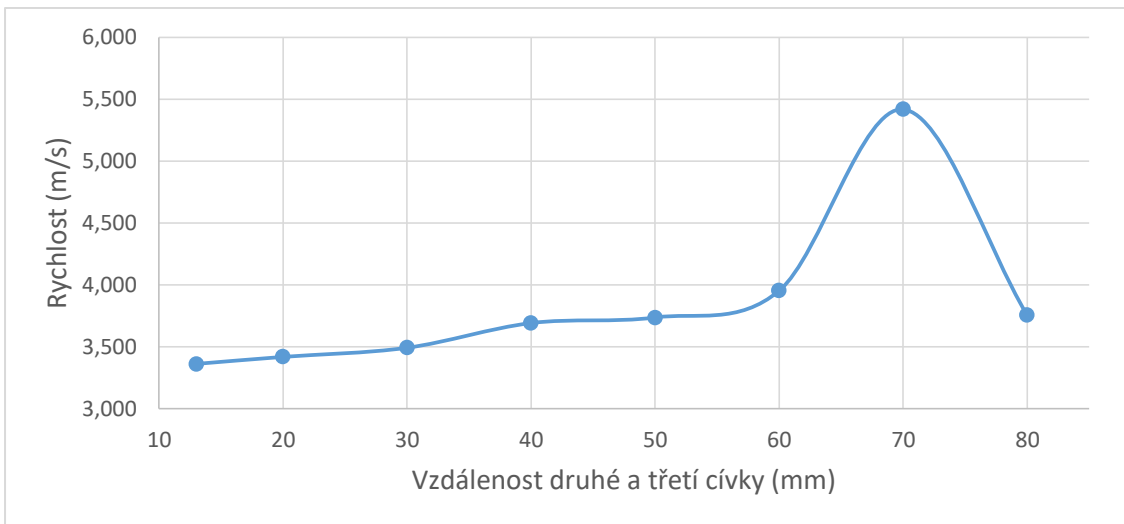
Graf 1: Výsledek měření z předchozího projektu (Palme, 2020)



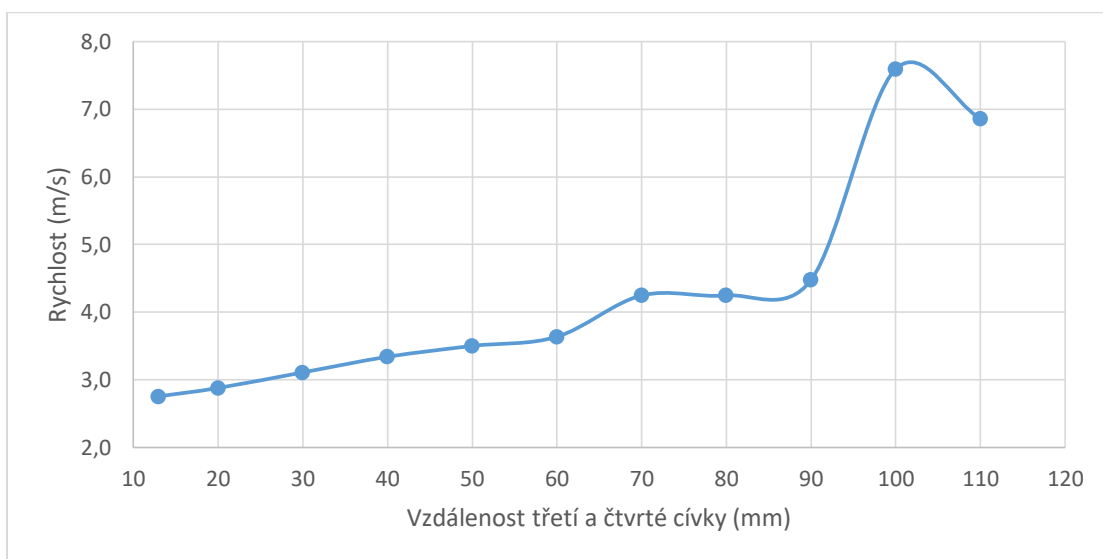
Graf 2: Měření optimálního načasování první cívky



Graf 3: Měření optimální vzdálenosti mezi první a druhou cívkou



Graf 4: Měření optimální vzdálenosti mezi druhou a třetí cívkou



Graf 5: Měření optimální vzdálenosti mezi třetí a čtvrtou cívkou