

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A
INFORMATIKY

BAKALÁŘSKA PRÁCE

2017

Jakub Čada

Univerzita Pardubice

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Gaussovo dělo

Jakub Čada

Bakalářská práce

2017

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Jakub Čada**
Osobní číslo: **I13006**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komunikační a mikroprocesorová technika**
Název tématu: **Gaussovo dělo**
Zadávací katedra: **Katedra elektrotechniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Různé elektromagnetické principy urychlování projektilu namísto střelného prachu jsou součástí nejen mnoha různých sci-fi, ale i reálných aplikací. V reálně využitelné principy jsou v podstatě dva, jeden označovaný jako "rail gun" využívající Lorencových sil, umožňující dosáhnout teoreticky téměř libovolné rychlosti projektilu a druhý nazývaný "gauss gun" využívající pohyblivého magnetického pole pro urychlení ferromagnetického projektilu. Cílem práce bude vytvoření malého vícecívkového Gaussova urychlovače.

Teoretická část práce bude obsahovat popis známých principů elektromagnetického urychlení projektilu, podrobněji bude rozebrána teorie Gaussova urychlovače, hlavně z pohledu dosažitelných limitů rychlosti a tedy energie projektilu, z pohledu magnetických vlastností projektilu, možností spínání cívek, časů nutných pro jejich magnetizaci a demagnetizaci, přechodové jevy na spínacích prvcích atd.

Praktická část pak vzejde z teoretického rozboru a jejím cílem bude konstrukce malého prototypu Gaussova urychlovače s minimálně 4 cívkami, který bude později sloužit pro demonstrační účely.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

- [1] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMELE AVR: popis procesoru a instrukční soubor. Praha: BEN technická literatura, 2003. 336 s. ISBN 978-80-7300-083-0.
[2] VÁŇA, V. Mikrokontroléry ATMELE AVR: programování v jazyce C. Praha: BEN technická literatura, 2003. 216 s. ISBN 978-80-7300-102-0.
[3] VLACH, J. Řízení a vizualizace technologických procesů. Praha: BEN technická literatura, 2002. 160 s. ISBN 978-80-86056-66-X.
[4] BRTNÍK, B. Základní elektronické obvody. Praha: BEN technická literatura, 2011. 156s. ISBN 978-80-7300-408-8
[5] RIPKA, P.; TIPEK, A. Master Book of Sensors. Praha : BEN, 2003. ISBN 0-12-752184

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Pavel Rozsival
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce:

15. prosince 2015

Termín odevzdání bakalářské práce:

13. května 2016



prof. Ing. Simeon Karamazov, Dr.
děkan



L.S.



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. března 2016

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 15. 5. 2017

Jakub Čada

Poděkování

Rád bych poděkoval panu Ing. Pavlu Rozsivalovi, vedoucímu mé bakalářské práce, za odborné vedení a cenné rady a připomínky, které mi pomohly zpracovat tuto bakalářskou práci.

ANOTACE

Práce je věnována principům a možným způsobům urychlování projektilů pomocí elektromagnetismu. Jsou zde rozebrány síly působící na projektil a vlastnosti ovlivňující jeho urychlení. V práci je také popsána praktické zkonstruování jednoho z typů elektromagnetických urychlovačů.

KLÍČOVÁ SLOVA

gaussovo dělo, cívkové dělo, elektromagnetismus, magnetické pole, magnetické síly

TITLE

Gauss gun

ANNOTATION

The work is devoted to principles and possible ways of accelerating projectiles by electromagnetism. Forces acting on the projectile and the properties influencing its acceleration are discussed in this work. The thesis also describes the practical design of one of the types of electromagnetic accelerators.

KEYWORDS

gauss gun, coil gun, electromagnetism, magnetic field, magnetic forces

OBSAH

ÚVOD	9
1 HISTORICKÝ VÝVOJ A SOUČASNOST	10
1.1 POČÁTEK VÝVOJE	10
1.2 SOUČASNOST.....	10
1.2.1 <i>Project Naval</i>	11
1.2.2 <i>Kosmické dělo</i>	11
1.2.3 <i>MagLev (Magnetic Levitation)</i>	11
1.3 VÝHODY OPROTI KLASICKÝM ZBRANÍM	12
2 PRINCIP MAGNETICKÉHO DĚLA	13
2.1 GAUSSOVO DĚLO – MAGNETY A KULIČKY	13
2.2 RAILGUN – KOLEJNICOVÉ DĚLO	14
2.2.1 <i>Princip kolejnicového urychlovače</i>	14
2.3 COILGUN – CÍVKOVÉ DĚLO	15
2.3.1 <i>Princip cívkového děla</i>	16
2.3.2 <i>Vznik magnetického pole</i>	17
2.3.2.1 Ve vodiči.....	17
2.3.2.2 V cívce	17
2.4 VLASTNOSTI PROJEKTILU	18
2.4.1 <i>Rozměry</i>	18
2.4.2 <i>Materiál</i>	19
2.4.2.1 Diamagnetismus	19
2.4.2.2 Paramagnetismus	19
2.4.2.3 Feromagnetismus	19
2.4.2.4 Vodivost	20
2.4.3 <i>Hysterezní smyčka</i>	20
2.4.4 <i>Saturace</i>	21
2.5 SPÍNÁNÍ CÍVEK.....	21
2.5.1 <i>Tyristor</i>	21
2.5.2 <i>MOSFET tranzistory</i>	22
2.5.3 <i>IGBT tranzistory</i>	23
2.6 SKLADOVÁNÍ ENERGIE.....	23
2.6.1 <i>Baterie</i>	23
2.6.2 <i>Kondenzátory</i>	24

2.7	HLAVENĚ.....	24
2.8	CÍVKA.....	25
2.8.1	Počet závitů.....	25
2.8.2	Odpor cívky.....	25
2.9	INDUKOVANÉ NAPĚTÍ.....	26
3	PRAKTICKÁ REALIZACE DĚLA	27
3.1	CÍVKY.....	27
3.2	KONDENZÁTORY.....	27
3.3	SPÍNÁNÍ CÍVEK.....	28
3.3.1	LED a fototranzistory.....	29
3.3.2	Budiče MOSFET/IGBT.....	29
3.3.3	CY8CIT-059.....	30
3.3.4	IGBT.....	31
3.4	MOSFET.....	32
3.5	NABÍJEČKA KONDENZÁTORŮ	32
3.5.1	Teorie měničů napětí DC/DC.....	32
3.5.2	Snižující měnič (STEP-DOWN).....	32
3.5.3	Zvyšující měnič (STEP-UP).....	33
3.5.4	Použitý zdroj.....	34
3.6	OVLÁDACÍ PRVEK.....	35
4	KONSTRUKCE.....	39
4.1	ELEKTRICKÁ	39
4.2	MECHANICKÁ	41
4.3	NAVRHOVANÝ VÝVOJ.....	42
4.4	OBSLUHA DĚLA	42
	ZHODNOCENÍ A ZÁVĚR	43
	ZDROJE.....	44
	PŘÍLOHY	47

SEZNAM ILUSTRACÍ

OBRÁZEK 1 - GAUSSOVO DĚLO [8].....	13
OBRÁZEK 2 - PRINCIP KOLEJNICOVÉHO DĚLA – LORENTZOVA SÍLA [9].....	14
OBRÁZEK 3 - PRINCIP CÍVKOVÉHO DĚLA [15].....	16
OBRÁZEK 4 - MAGNETICKÉ POLE KOLEM VODIČE [16]	17
OBRÁZEK 5 - MAGNETICKÉ POLE V CÍVCE [17]	18
OBRÁZEK 6 - HYSTERZNÍ SMYČKA [20].....	20
OBRÁZEK 7 - TYRISTOR [22]	22
OBRÁZEK 8 - PARAMETRY CÍVKY A PRŮŘEZ VODIČE [26]	26
OBRÁZEK 9 - ZHÁŠECÍ OBVOD – DIODA D1	26
OBRÁZEK 10 - HLAVEŇ A CÍVKA	27
OBRÁZEK 11 - KONDENZÁTOROVÁ BANKA.....	28
OBRÁZEK 12 - VÝVOJOVÝ KIT S POPSANÝMI PINY [29]	30
OBRÁZEK 13 - PLOŠNÝ SPOJ S TRANZISTOREM MOSFET	31
OBRÁZEK 14 - STEP-UP MĚNIČ [33].....	33
OBRÁZEK 15 - NABÍJEČKA KONDENZÁTORŮ	34
OBRÁZEK 16 - GENERÁTOR PWM	35
OBRÁZEK 17 - DIALOGOVÉ OKNO PWM	35
OBRÁZEK 18 - DIALOGOVÉ OKNO PRO PINY	36
OBRÁZEK 19 - VYHODNOCOVACÍ ČÁST	37
OBRÁZEK 20 - DIAGRAM ZAPOJENÍ.....	39
OBRÁZEK 21 - HLAVNÍ DPS	40
OBRÁZEK 22 - DPS S IGBT TRANZISTORY.....	41

SEZNAM ZKRATEK A ZNAČEK

ESR – Equivalent series resistance

Scramjet – Supersonic combusting ramjet

IGBT – Insulated-gate bipolar transistor

DPS – Deska plošných spojů

MOSFET – Metal–oxide–semiconductor field-effect transistor

GPS – Global Positioning System

HARP – High Altitude Research Project

EPF – Expeditionary Fast Transport

JHSV – Joint High Speed Vessel

NASA – National Aeronautics and Space Administration

LED – Light emitting diode

PSoC – Programmable System-on-Chip

PWM – Pulse Width Modulation

USB – Universal Serial Bus

ÚVOD

Vývoj zbraní na bázi elektrické energie začal již na začátku 20. století. Znovu oživení tohoto nápadu nastalo až v období Druhé světové války. Zbraň byla navržena, ale zhotovení se nikdy nedočkala. Většího rozmachu se elektrické zbraně dočkaly až v dnešní době, v důsledku stále rozvíjejících se technologií, jak v oblasti materiálů, tak elektronických součástek.

Nové technologie se historicky vyvíjely převážně k válečným účelům, ať už ve zdravotnictví, strojírenství či elektronice. Příkladem mohou být mnohé zařízení a systémy z nich můžeme uvést pár příkladu: atomová energie, mobilní telefony, GPS, internet a mnoho dalších. A toto se týká i principu takzvaného elektromagnetického děla, neboli elektromagnetických urychlovačů. Jejich princip je založen na přeměně elektromagnetické energie na energii kinetickou, odpadá tedy použití střelného prachu a expanze plynu pro urychlení projektilu.

Elektronické zbraně fungují na principu, kdy se velké množství energie nashromážděné například v kondenzátoru, uvolní nejčastěji do cívky. Při uvolnění této energie se vytváří teplo v důsledku průchodu proudu nenulovým odporem cívky. Dále vzniká magnetická síla, touto silou je projektil uváděn do pohybu, zároveň však tato mechanická síla „deformuje“ cívku.

Rozdělení urychlovačů:

- 1) Mechanické (Gaussovo dělo – magnety a kuličky)
- 2) Elektrické
 - a) Railgun – kolejnicové dělo
 - b) Coilgun – cívkové dělo
- 3) Indukční (na bázi vířivých proudů) – u toho typu je mnoho různých řešení.

1 Historický vývoj a současnost

Ve filmech, hrách, komiksech obecně tedy v science fiction se elektromagnetické pušky používají velmi často. V praxi je však jejich použití a vývoj teprve v začátcích. Klasické palebné zbraně stále převládají, i když pokrok jde kupředu a plánují se první použití.

1.1 Počátek vývoje

První kdo objevil, že při průchodu elektrického proudu vodičem vzniká magnetické pole ovlivňující stříčku kompasu, byl dánský fyzik Hans Christian Oersted, to bylo v první polovině 19. století.

Vývoj elektromagnetických děl nastal až začátkem 20. století. První „railgun“ vyvinul a nechal patentovat francouzský vynálezce Louis Octave Fauchon-Villeplee, byl založen na principu lineárního motoru. První „coilgun“ sestrojil norský vědec Kristian Birkeland, dalšího vývoje se však nedočkal, z důvodu nepodařené prezentace u investorů.

Další pokusy o vytvoření zbraní na bázi elektromagnetismu, přišly v období 2. světové války, kdy Joachim Hänsler navrhl protiletadlovou zbraň pro potřeby Luftwaffe, nebyla však sestrojena. Po válce proběhla studie této zbraně, která zjistila teoretickou funkčnost, ale k napájení by bylo potřeba stejné množství energie, jako k osvětlení půlky Chicaga.

1.2 Současnost

V současnosti se vývoj zaměřil na variantu „railgun“, která je vhodnější k použití ve větších velikostech. Jejich použití je například pro vystřelování družic do vesmíru nebo jako zbraň na lodích amerického námořnictva. Varianta „coilgun“ je vhodná pro použití v menších měřítkách, a tak je oblíbená u kutilů takzvaných „bastlířů“. Mnoho konstrukcí můžeme najít na internetu. Většinou jsou tyto konstrukce složené pouze z jedné cívky a spínání probíhá pomocí tyristorů, bez jakéhokoli sledování pozice projektilu v hlavni, respektive v cívce. Tyristor je sepnutý do doby, kdy projektil již vychází ven z cívky, což snižuje jeho rychlost, toto bude vysvětleno níže.

1.2.1 Project Naval

Railgun vyvíjený americkým námořnictvem, umožňuje vypálit projektil rychlostí sedmkrát vyšší než rychlost zvuku. Jeho výhodou jsou malé a levné projektily, těch může být na palubě lodí tisíce a také vysoká ničivá síla, bez nutnosti použití konvenčních náloží. V roce 2014 byly zveřejněny záběry z testů tohoto děla. Dělo by mělo být testováno na torpédoborci USS Zumwalt. Poslední informace však naznačují použití této zbraně na rychlých transportních lodích JHSV (Joint High Speed Vessel) nebo lodích nového designu (EPF – expeditionary fast transport) opatřených dočasnou instalací pro demonstraci projektu. Demonstrace by však mohla zpomalit vývoj děla.

1.2.2 Kosmické dělo

Myšlenku vystřelovat tělesa do vesmíru, zmínil už Jules Verne. Praktickým zkonstruováním byl projekt HARP (High Altitude Research Project – není elektromagnetický urychlovač) konstruktéra Geralda Bulla. V roce 1999 byl vypracován projekt pro vystřelování nanosatelitů o hmotnosti až 10Kg, rychlost vystřelení 6 km/s. Požadavky na odpalovací výkon a energie by byly zhruba 2MW a 2000MJ. Využití elektromagnetického urychlovače uvažuje NASA pro urychlení kosmického letounů s pohonem scramjet (náporový motor se spalováním v nadzvukovém režimu). Tato využití však prozatím nebyla prakticky zrealizována, byla by potřeba velmi dlouhá dráha pro urychlení.

1.2.3 MagLev (Magnetic Levitation)

S praktickým a komerčním využitím se můžeme setkat u supermoderní, nejrychlejší a nejdražší kolejové dopravy, ve své podstatě se nejedná o dělo jako takové. Dokazuje však, že principy a vlastnosti elektromagnetismu jsou a v budoucnu budou využívány.

Vlak se pohybuje na polštáři magnetického pole vytvářeného supravodivými magnety, ty jsou zabudovány ve vlaku spolu s lineárními motory a vlak se pohybuje několik centimetrů nad kolejemi. Tento princip dává vlaku možnost se teoreticky pohybovat neomezenou rychlostí, stejně jako může být neomezená úst'ová rychlost elektromagnetických děl.

1.3 Výhody oproti klasickým zbraním

Omezením klasických střelných zbraní používajících rozpínavost plynu, u nichž můžeme dosáhnout pouze omezené úst'ové rychlosti, dané zákony termodynamiky. V tomto ohledu mohou elektromagnetické urychlovače dosáhnout teoreticky mnohem větší úst'ové rychlosti, na kterou lze urychlit projektil. Je možné ho urychlit i na více místech, tak jak prochází hlavní, u konvenčních zbraní je urychlen pouze na začátku, jedním výbuchem. Odpadá zde potřeba nálože uvnitř projektilu, díky obrovské kinetické energii a v důsledku toho velké ničivé síle.

Za předpokladu, že se veškerá potenciální energie, přemění na energii kinetickou, je pak teoretická rychlost projektilu vyletujícího z cívky:

$$V_{exit} = \sqrt{\frac{2}{m} V \mu_0 x_m n^2 I^2} \text{ [m/s]} \quad (1)$$

Kde V – objem, m – hmotnost projektilu, μ_0 – permeabilita vakua (vzduchu), x_m – magnetická susceptibilita, n – počet závitů, I – proud.

Tento vztah je ovšem pouze teoretický a výsledná rychlost bude ovlivněna mnoha faktory, které budou mít za následek menší úst'ovou rychlost.

2 Princip magnetického děla

V této kapitole se podíváme na principiální funkci jednotlivých druhů magnetických děl. Jednotlivé druhy se liší konstrukcí, ale i z hlediska fyzikálního. Jedno mají však všechny typy společné, a tím je přeměna elektromagnetické energie na kinetickou.

2.1 Gaussovo dělo – magnety a kuličky

Tato verze magnetického urychlovače je nejjednodušší, nepotřebuje elektrickou energii k vytvoření magnetického pole a slouží jako prezentační či učební pomůcka. Používá se jen v malých měřítkách. Jako urychlovač se prakticky použít nedá z důvodů tření, mechanických rázů a drahé výroby permanentních magnetů. Přenos energie je podobný jako u Newtonovy houpačky. Jak vidíme na obrázku 1, zadní ocelová kulička se vlivem magnetického pole, které působí na kuličku silou F , zrychlí dle vzorce $F = ma$, z druhého Newtonova zákona, získá kinetickou energii, tu nárazem předá přes magnet i na zbylé kuličky. Tím dojde k vymrštění poslední ocelové kuličky, se skoro totožnou kinetickou energií jako měla kulička první, minus ztráty vniklé při nárazu.



Obrázek 1 - Gaussovo dělo [8]

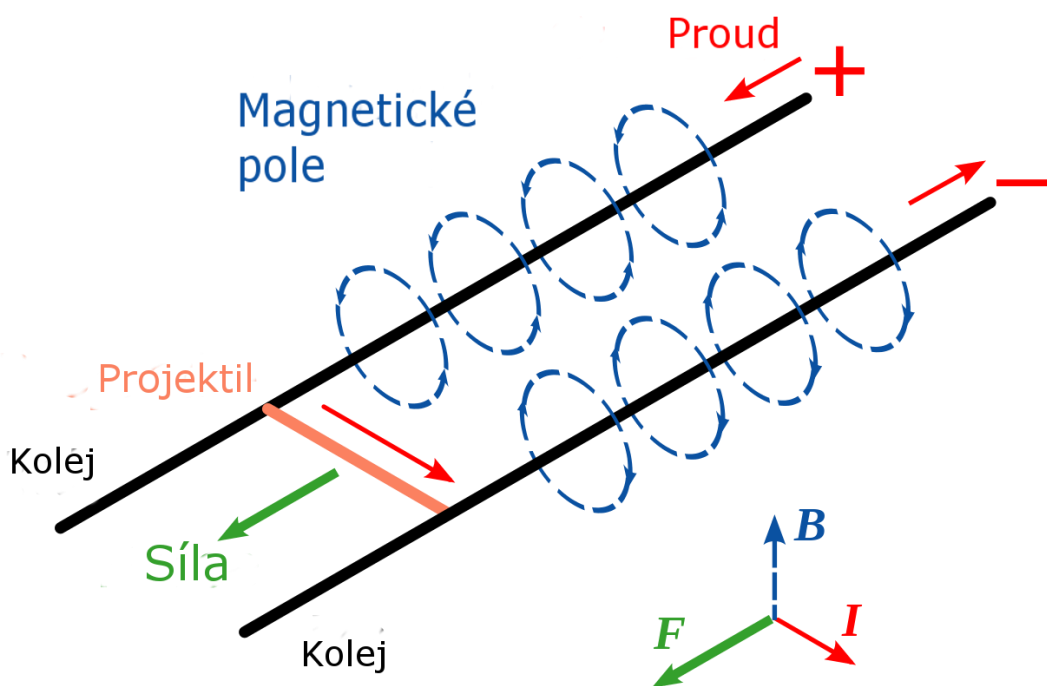
2.2 Railgun – kolejnicové dělo

Jak už bylo uvedeno v úvodu, princip byl vyvinut a patentován na začátku 20. století, je však používán dodnes. Tento typ je konstrukčně nejjednodušší, avšak nejvíce zdokonalený urychlovač, viz Projekt Naval.

Kolejnicové dělo neboli anglicky railgun, jak už název napovídá, využívá dvě vodivé koleje připojené na zdroj stejnosměrného napětí, mezi nimiž je vložen projektil, přes který se uzavírá elektrický obvod. Tímto na něj působí Lorentzova síla uvádějící tento pohyblivý vodivý materiál do pohybu. Problémem u kolejnicových děl je opotřebovávání kolejnic vlivem tření a průchodem vysokých proudů obvodem za vzniku plazmy z roztaveného železa.

2.2.1 Princip kolejnicového urychlovače

Z fyzikálního hlediska je kolejnicové dělo založené na průtoku proudu vodičem způsobujícím vznik magnetického pole kolem vodiče a vznik Lorentzovy síly. Tato síla je přímo úměrná magnetické indukci B , velikosti proudu I a délce vodiče l .



Obrázek 2 - Princip kolejnicového děla – Lorentzova síla [9]

Lorentzova rovnice vychází z rovnic Maxwellových a popisuje působení této síly na náboj (resp. vodič) v elektromagnetickém poli. Rovnice vypadá takto:

$$F = q(E + v \times B) \text{ [N]} \quad (2)$$

V této rovnici F je Lorentzova síla, v je vektor rychlosti náboje, E vektor intenzity elektrického pole, q je elektrický náboj a B intenzita magnetického pole.

Pro zjednodušení používáme pouze část této rovnice, protože Lorentzova síla je součtem síly elektrostatické a magnetické, a sílu elektrostatickou můžeme oproti síle magnetické zanedbat.

Proto:

$$F_m = qv \times B \text{ [N]} \quad (3)$$

Tu dále upravíme až na tvar použitelný pro naše výpočty:

$$F = Bil \text{ [N]} \quad (4)$$

Z důvodu, že magnetické pole za projektilem má intenzitu B a před projektilem je nulové dostaneme průměr $\frac{B}{2}$ a tedy:

$$F = \frac{1}{2} Bil \text{ [N]} \quad (5)$$

B je intenzita magnetického pole mezi kolejnicemi, I je proud, l je velikost vzduchové mezery mezi kolejemi.

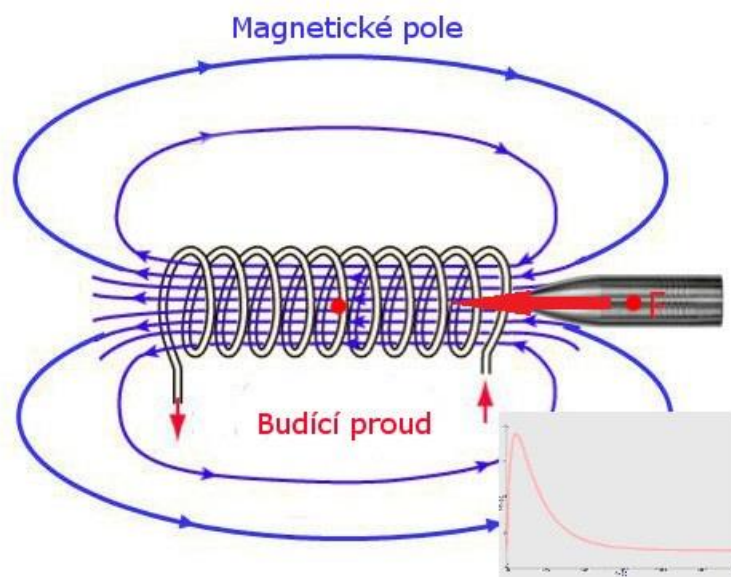
2.3 Coilgun – cívkové dělo

Tento druh urychlovače urychluje projektil pomocí cívky nebo několika cívek za sebou, takzvané vícestupňové cívkové dělo (multistage coilgun). Při průchodu proudu cívkou se z cívky stává elektromagnet, jehož magnetické pole prochází středem cívky. Tohoto jevu využíváme při konstruování cívkového děla, kdy feromagnetické materiály jsou vtahovány do cívky. Jako projektily lze dokonce použít i permanentní magnety. Oproti kolejnicovému dělu, odpadá nutnost dotyku mezi projektilem a cívkami pro průchod proudu, tím se snižuje opotřebení, což je nesporná výhoda cívkového děla.

2.3.1 Princip cívkového děla

Pro fungování tohoto typu nám teoreticky stačí cívka, zdroj proudu, spínač a projektil. Projektil umístíme za cívku, do které pro výstřel pustíme impuls budícího proudu, tímto vznikne magnetické pole, jež vtahuje projektil do cívky silou F . Důležité je, aby magnetické pole zaniklo v okamžiku, kdy projektil dosáhne středu cívky nebo ještě o něco dříve, aby mohl vlastní setrvačností vylétnout ven. Musíme vzít v potaz také, že magnetické pole v cívce zaniká pomalu. Pokud nedojde k zániku magnetického pole, projektil je vtahován zpět do cívky, vzniká takzvaný suck-back effect. Tento princip a proudový impuls je zachycen na obrázku 3.

Energie pro vybuzení magnetického pole je uschována v kondenzátoru z důvodů jejich relativně rychlého vybíjení a zpětného nabíjení. Ke spínání teoreticky potřebujeme pouze spínač. V praxi však používáme polovodičové součástky, ty dokáží spínat mnohem rychleji, a lze je řídit elektrickými impulzy, v přesných časových intervalech.



Obrázek 3 - Princip cívkového děla [15]

2.3.2 Vznik magnetického pole

Magnetické pole je způsobeno pohybujícím se elektrickým nábojem (elektrickým proudem). Můžeme jej pozorovat kolem vodičů, kde jej způsobuje volný elektrický proud (náboje mohou vykonávat makroskopické pohyby), ale také kolem tzv. permanentních magnetů, u nichž je zdrojem vázaný elektrický proud (náboj je vázaný na mikroskopickou strukturu látky). Lze jej též vyvolat změnami pole elektrického.

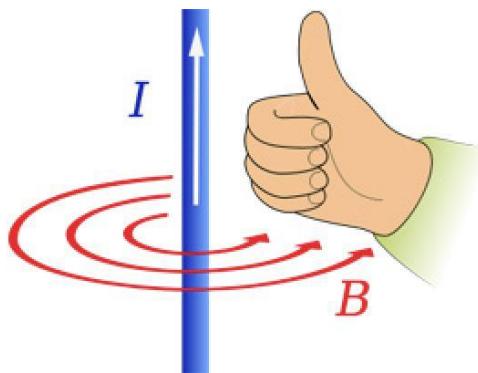
2.3.2.1 Ve vodiči

Začneme od začátku. Při průtoku proudu vodičem vzniká kolem vodiče magnetické pole o intenzitě B , způsobené pohybem nositelů elektrického náboje (elektronů). Pole, respektive jeho magnetické indukční čáry, tvořící kružnice, mají orientaci podle směru protékajícího proudu a platí pro ně pravidlo pravé ruky tak, že palec ukazuje směr proudu a prsty sevřené do dlaně orientaci indukčních čar, jak můžeme vidět na obrázku 4.

Magnetická indukce v bodě A od středu nekonečného vodiče:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi d} [T] \quad (6)$$

I – proud vodičem, d – vzdálenost od středu vodiče, μ – permeabilita prostředí

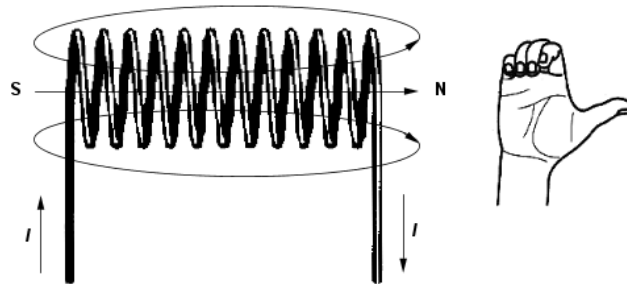


Obrázek 4 - Magnetické pole kolem vodiče [16]

2.3.2.2 V cívce

U cívky platí podobné pravidlo pravé ruky, a to ve znění, kdy sevřené prsty ukazují směr průtoku proudu jejími zavity a palec ukazuje severní pól, protože se cívka chová jako magnet, má severní (N) a jižní (S) pól, názorně to vidíme na obrázku 5.

Magnetické pole solenoidu, který má délku l větší než průměr d , lze považovat uvnitř za homogenní, protože se indukční čáry sčítají a jsou přibližně nulové mimo cívku z důvodu malé hustoty indukčních čar.



Obrázek 5 - Magnetické pole v cívce [17]

Vztah pro magnetickou indukci ve středu cívky tvaru solenoidu je:

$$B = \mu \frac{NI}{l} \text{ [T]} \quad (7)$$

N – počet závitů, I – proud procházející cívku, l – délka cívky, $\mu = \mu_0\mu_r$ – permeabilita, μ_0 – permeabilita vakua ($4\pi * 10^{-7} \text{H} * \text{m}^{-1}$) a μ_r – relativní permeabilita

2.4 Vlastnosti projektilu

Pro výrobu projektilu je důležité vybrat správný materiál a rozměry, tak abychom získali co nejvhodnější vlastnosti pro nejefektivnější fungování děla

2.4.1 Rozměry

Abychom mohli projektil co nejefektivněji urychlit, musíme zvolit správné rozměry korespondujícími s délkou cívky. Velikost by měla být větší než polovina délky cívky, ale nesmí ji přesahovat. Pokud by byl projektil větší, než cívka nesl by s sebou „mrtvou“ zátěž, která by ho zpomalovala. Jeho průměr musí být odpovídající průměru vzduchové mezery v cívce. Pokud je průměr příliš malý, magnetické pole by procházelo více vzduchem nežli projektil, a tím bychom snižovali efektivitu.

Energie pro dosažení dané rychlosti se vypočítá ze vzorce:

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 [J] \quad (8)$$

E – energie, m – hmotnost projektilu, v – rychlost

Zde vidíme, že snáze urychlíme lehčí projektily, avšak velikost a váha také ovlivňují rychlost a úplnost saturace projektilu.

2.4.2 Materiál

Důležitým faktorem pro výrobu projektilu je materiál, ze kterého jej vytvoříme. Různé materiály mají různé vlastnosti, které jsou pro projektil více či méně vhodné.

2.4.2.1 Diamagnetismus

Atomy a molekuly těchto látek bez přítomnosti vnějšího magnetického pole nevykazují magnetický moment, ten se objeví po vložení látky do vnějšího magnetického pole a výsledné magnetické pole zeslabuje a má opačný směr než pole původní. Tyto materiály mají relativní permeabilitu μ_r nepatrně menší než jedna. Nejsou vhodné pro vytvoření projektilu ani hlavně „coilgunu“. Příkladem může být zlato, uhlík, měď.

2.4.2.2 Paramagnetismus

Jejich atomy a molekuly mají bez vnějšího magnetického pole stálý magnetický moment. Avšak celkový moment je nulový. Po vložení do magnetického pole zesilují dané pole, relativní permeabilitu mají nepatrně větší než jedna. A mohou se hodit pro vytvoření hlavně „coilgunu“, například mosaz či hliník.

2.4.2.3 Feromagnetismus

Tento typ látek bude nejvhodnější k vytvoření projektilů, po vložení do magnetického pole mají potenciál zůstat zmagnetizované. Jsou základem pro permanentní magnety. Bez vnějšího magnetického pole je jejich celkový magnetický moment nulový. Zesilují magnetické pole a jsou do něj silně vtahovány, relativní permeabilita je mnohem větší než jedna. Příkladem je železo, nikl, kobalt.

2.4.2.4 Vodivost

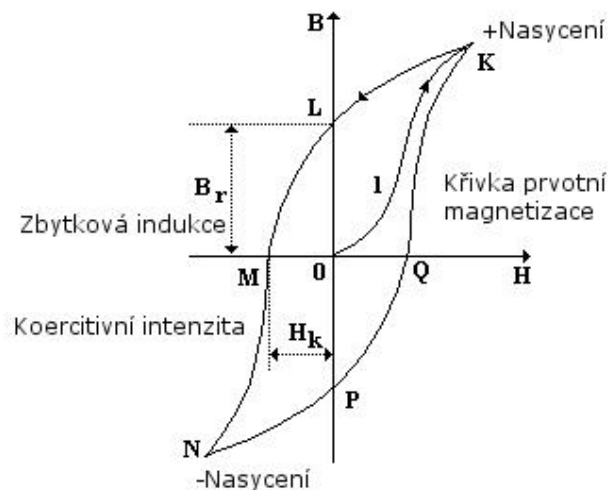
Z Lenzova zákona vyplývá, že by měl být projektil vyrobený z materiálu, který bude mít velkou rezistivitu, ideálně bude nevodivý, aby se zamezilo vzniku indukovaných proudů, vytvářejících magnetické pole s opačným směrem než pole solenoidu, čímž je projektil zpomalován. Ztráty vířivými proudy se dají vypočítat vztahem:

$$P_v = \frac{4}{3} d^2 B^2 f^2 \frac{V}{\rho} [W] \quad (9)$$

d – průměr materiálu, B – indukce magnetického pole, f – frekvence magnetického pole, V – objem materiálu, ρ – rezistivita materiálu

2.4.3 Hysterezní smyčka

Křivka vyjadřující závislost magnetické indukce B na magnetickém toku H při plynulých, pomalých změnách magnetického toku od $+H$ do $-H$. Jde o graf zobrazující účinek vnějšího magnetického pole na magnetické vlastnosti materiálu. Materiál chceme feromagnetický tedy s vysokou permeabilitou, rychlou magnetizací a demagnetizací, ze vztahu $\mu = \frac{B}{H}$ vychází, že má být hysterezní smyčka úzká a vysoká. Tedy z magneticky měkkého materiálu. Křivku vidíme na obrázku 6.



Obrázek 6 - Hysterezní smyčka [20]

Při cyklickém magnetování vznikají ztráty v důsledku hystereze:

$$P_h = f \cdot S_s \cdot V [W] \quad (10)$$

f – frekvence magnetického pole, S_s – plocha hysterezní smyčky, V – objem materiálu.

2.4.4 Saturace

Budeme vycházet z magnetické hysterezní křivky, která je popsána výše. Při nízkém až středně velkém magnetickém poli bude magnetická indukce B růst téměř lineárně se zvyšováním magnetického pole H , toto platí pro feromagnetické materiály. Avšak při dalším zvětšování magnetického pole, jsou již skoro všechny magnetické domény zarovnané. V této chvíli nastává saturace, projektil je v bodu, kdy zvyšování proudu v cívkách nebude zvyšovat sílu působící na projektil. Zvyšováním proudu dosáhneme dalšího zvýšení přitažlivé síly, avšak budeme potřebovat více a více proudu, abychom dosáhli stejného zvýšení síly, větší část se přemění na ztrátové teplo. Naštěstí tato mez je velmi velká, ovšem určité omezení může přinášet.

2.5 Spínání cívek

Jednou z nejdůležitějších věcí u cívkového děla, je přesnost spínání proudu vyvolávajícího magnetické pole, které urychlí projektil. Spínače pro dělo musí vydržet velké špičkové proudy a měly by spínat co nejpřesněji a nejrychleji.

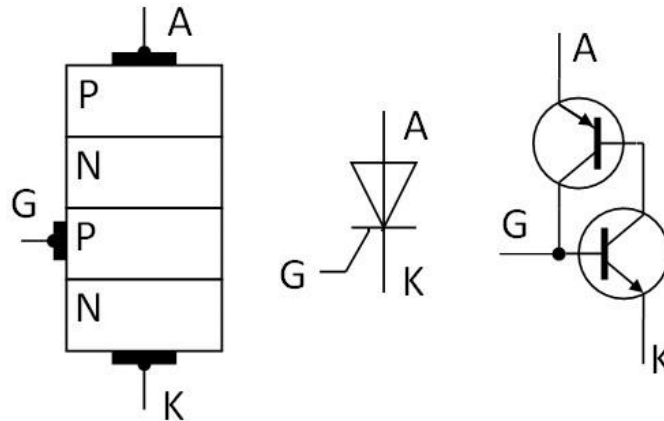
Pro spínání můžeme použít:

- Tyristory
- MOSFET tranzistory
- IGBT tranzistory

2.5.1 Tyristor

Tyristor je polovodičová součástka sloužící ke spínání elektrického proudu, nejčastěji u výkonových obvodů. Byl by tedy vhodný pro spínání proudových impulzů do cívky. Je složen ze tří PN přechodů a čtyř vrstev. Náhradní schéma jsou dva spojené tranzistory PNP a NPN. Má čtyři elektrody A – anoda, K – katoda a řídicí elektroda G – gate.

Sepnutí tyristoru zajišťuje přivedení proudového impulsu do řídicí elektrody G. Po sepnutí však nelze jednoduše tyristor rozepnout, pouhé odpojení proudu do elektrody G nevyvolá žádný účinek. Rozepnutí můžeme zajistit odpojením anodového proudu, prepólováním napětí anoda-katoda a zkratem mezi anodou a katodou.



Obrázek 7 - Tyristor [22]

Nemožnost libovolného rozeznutí není jediná nevýhoda tyristoru, to je i pomalé rozeznání v řádech stovek μs . Spínání se pohybuje v jednotkách μs . Existují však rychlé tyristory s rozeznacím časem desítek mikrosekund. Výhodou je možnost spínání vysokých proudů v řádech od jednotek ampér do několika kiloampér, napětí se pohybuje od stovek voltů do několika kilovoltů.

2.5.2 MOSFET tranzistory

Jsou to unipolární tranzistory řízené elektrickým polem, na rozdíl od bipolárních tranzistorů řízených proudem do báze, jsou tyto tranzistory řízeny napětím mezi G a S (Gate a Source). Pro použití v cívkovém děle je nutno použít výkonové MOSFET, ty však byly do nedávna omezeny křemíkovou technologií napětím 600 V. V současnosti je možno použít MOSFET i pro vyšší napětí a frekvence, stále nicméně spínají vysoké proudy pouze pro menší napětí. Spínací a rozeznací časy se pohybují v řádech nanosekund. MOSFET tranzistory jsou dvojího druhu, s N kanálem a P kanálem, liší se složením N a P vrstev. Hlavním rozdílem je, že tranzistory s P kanálem jsou pro záporné napětí a proud. Oproti tomu tranzistory s N kanálem jsou pro kladné napětí a proud.

2.5.3 IGBT tranzistory

Jsou kombinací unipolárního tranzistoru (vstup) a bipolárního tranzistoru (výstup), tím mohou spínat značné proudy a pracovat při velkých napětích. Lze je použít pro aplikace nad 5kW. Tyto tranzistory se pro naše účely hodí nejvíce, jejich nevýhodou je však cena. Spínání a rozpínání probíhá v řádech desítek až stovek nanosekund.

Tabulka 1 - Porovnání tranzistorů [24]

Charakteristika zařízení	Výkonový MOSFET	IGBT
Jmenovité napětí	Velké <1kV	Velmi velké >1kV
Jmenovitý proud	Nízký <200 A	Vysoký >500 A
Spínání	Napětím V_{GS} 3–10 V	Napětím V_{GE} 4–8 V
Vstupní impedance	Vysoká	Vysoká
Výstupní impedance	Střední	Malá
Rychlost spínání	Rychlé (ns)	Střední
Cena	Střední	Vysoká

2.6 Skladování energie

Pro skladování energie můžeme využít několik možností, těmi jsou například použití baterií a kondenzátorů. Obě možnosti mají své klady a zápory, ať už jde o cenu, kapacitu, velikost, či technické parametry, které mohou ovlivňovat vhodnost jednoho nebo druhého řešení.

2.6.1 Baterie

Pro využití baterií jako zdroje energie pro „coilgun“ vyžadujeme, aby měly malý vnitřní odpor, ten klade omezení na maximální přenesenou energii z baterie. Při výstřelech bude napětí víceméně konstantní na rozdíl od kondenzátů. Takovéto baterie nicméně musí snášet a vydržet velké odběry proudu při výstřelu, což může snižovat jejich životnost. Cena takovýchto baterií bude určitě vyšší.

2.6.2 Kondenzátory

Toto řešení je mnohem oblíbenější. Kondenzátory mohou skladovat velké množství (několik kilojoulů) energie, která může být uvolněna za několik milisekund. energii lze vypočítat ze vzorce:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 [J] \quad (11)$$

Kde E – energie uložená v kondenzátorech, C – kapacita kondenzátorů, U – napětí na kondenzátorech.

Důležitým parametrem je ESR – ekvivalent vnitřního odporu baterie, které také klade omezení na maximální energii čerpanou z kondenzátorů, proto chceme, aby byl co nejmenší. Nejvhodnější kondenzátory jsou elektrolytické, mají velice velkou kapacitu, ale nesnesou velká napětí, vyrábí se však speciální kondenzátory až na cca 600 V.

2.7 Hlaveň

Hlaveň pro cívkové dělo by měla být vyrobena z nevodivého materiálu, indukovaly by se v ní vířivé proudy zpomalující projektil. Dále nesmí být magnetická, to by mělo také za následek zpomalování projektilu. Dalším parametrem je síla stěny a celková pevnost hlavně. Pevnost je nutná z důvodů sil, které působí nejen na projektil, ale způsobují také „smršťování“ cívky vyvíjející tlak na hlavě. Sílu stěny je potřeba zvolit co možná nejmenší, proto aby byl projektil co možná nejbližší cívce a nejvíce magnetického pole procházelo projektilem.

Jako vhodné materiály se jeví plastové, kompozitové, mosazné či hliníkové trubky. Plastové trubky jsou levné, snadno se shánějí, avšak tloušťka jejich stěny nemůže být natolik malá z důvodů pevnosti. Karbonové trubky by byly výborným řešením, mají velký odpor, jsou pevné, mohou mít velmi úzké stěny, problémem je však křehkost a cena tohoto materiálu. Poté tu jsou kovové trubky, a to zejména hliník a mosaz, vhodné svými magnetickými vlastnostmi, jsou to paramagnetické materiály, vhodnější bude spíše než hliník mosaz, a to svou pevností, a tloušťkou stěny, problém nastává ve vodivosti tohoto materiálu a následném vzniku vířivých proudů v hlavni a brždění projektilu. Toto jde částečně omezit vyfrézováním drážky v části, kde se nachází cívka, tím přerušíme uzavřený obvod (jeden závit), který hlavě tvoří.

2.8 Cívka

Při návrhu cívkového děla máme mnoho důležitých parametrů a jedním z nejdůležitějších je návrh cívky, respektive cívek. Cívku musíme, navrhnu s ohledem na její velikost, průměr drátu, počet závitů a s tím související odpor a indukčnost. Cívku navijíme ze speciálního drátu, který je určen na výrobu cívek, má na sobě speciální lak tvořící izolaci. Je vyráběn v mnoha průměrech a může mít i více vrstev laku.

2.8.1 Počet závitů

Počet závitů bude mít přímý vliv na odpor cívky. Při velkém odporu by proud cívku při stejném zdroji klesl, proto je vhodné se zabývat první cívku a projektem a až poté vyřešit napětí zdroje. Počet závitů a proud bude přímo úměrný magnetickému poli, je lehčí udělat více závitů a zvýšit proud než vyrobit velký zdroj napětí. S počtem závitů také roste indukčnost cívky a roste mnohem rychleji než odpor, je vhodné vytvořit více závitů. S velkou indukčností vznikají velké napěťové špičky. Z toho také vyplývá, že je vhodné zvolit drát s malým průměrem, ale nesmí být moc malý, aby se neroztavil teplotou vznikající z důvodu relativně vysokého proudu/napětí na cívku přiváděného. Na průměru drátu také závisí, jak velký proudový impuls můžeme na cívku přivést. Závity musí být navinuté blízko u sebe a dostatečně pevně.

2.8.2 Odpor cívky

Odpor cívky nelze změřit multimetrem, poněvadž při měření tak malých odporů jsou multimetry velmi nepřesné. Pro zjištění je lepší odpor vypočítat, a to s přesností větší jak $\pm 10\%$, dostaneme lepší výsledek než při použití multimetru. Rovnice pro tento výpočet je odvozena z klasické rovnice pro výpočet odporu:

$$R = \rho * \frac{l}{S} [\Omega] \quad (12)$$

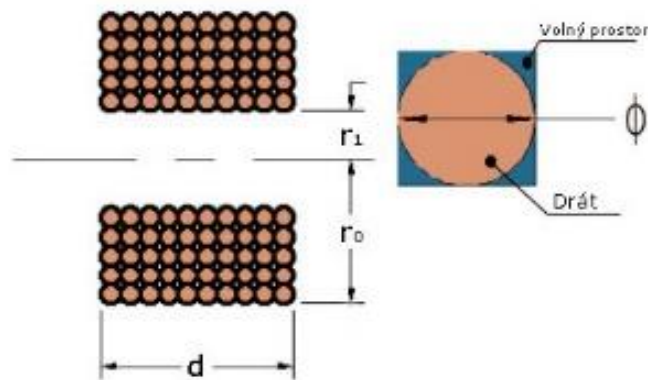
Pro výslednou rovnici musíme odvodit délku vodiče cívky l , a za S dosadit výraz $\frac{1}{4}\pi\phi^2$:

$$l = \frac{\pi(r_0^2 - r_1^2)d}{\phi^2} [mm] \quad (13)$$

Po dosazení dostaneme vztah pro výpočet odporu cívky:

$$R_c = \frac{4\rho(r_0^2 - r_1^2)d}{\phi^4} [\Omega] \quad (14)$$

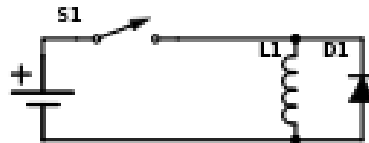
Kde R – odpor, ρ – rezistivita drátu ($\rho_{cu} = 1,7 \times 10^{-5} \Omega mm$), l – délka drátu, S – obsah, r_1 – vnitřní poloměr, r_0 – vnější poloměr d – velikost cívky, ϕ – průměr vodiče.



Obrázek 8 - Parametry cívky a průřez vodiče [26]

2.9 Indukované napětí

V obvodech kde se vyskytuje cívka, vznikají při spínání a rozpínání efekty vlivem elektromagnetické indukce.



Obrázek 9 - Zhášecí obvod – dioda D1

Při sepnutí se v cívce naindukuje napětí, které vytváří proud opačného směru, než je proud v obvodu (aplikace Lenzova zákona). Při rozepnutí se indukuje napětí opačné polarity a proud bude mít stejný směr jako proud v obvodu. Proud v obvodu tedy neklesne skokově, nýbrž postupně. Napěťové špičky mohou dosahovat až šestinásobku napájecího napětí, toto indukované napětí by mohlo zničit elektronický obvod. Proto je nutné dát do obvodu prvek, který tuto vlastnost dokáže eliminovat. Je to takzvaný zhášecí obvod, součástka sloužící jako tento obvod může být polovodičová dioda připojena paralelně k cívce závěrně ke směru napájení.

3 Praktická realizace děla

3.1 Cívky

Mým úkolem bylo sestavit dělo s nejméně čtyřmi cívkami, které jsem navinul na laminátovou trubičku o vnějším průměru 6 milimetrů a vnitřním 4 milimetrů, cívky jsou přibližně 40 milimetrů dlouhé, a každá z nich má cca 750 závitů. Jsou odděleny pomocí plastových nevodivých „oddělovačů“, které jsou provrtané tak, aby bylo možné do nich vložit optické senzory, tedy fototranzistory a infračervené LED diody. Na vinutí byl použit drát s jednou vrstvou polyamidoimidového laku o průměru 0,8 milimetru, tak aby výsledný odpor cívky byl co nejmenší, ale zároveň aby vydržela špičkové proudy, které cívkou při sepnutí budou protékat. Cívky jsou navinuty ručně, proto nejsou úplně dokonalé. Pro získání větší účinnosti, musí být cívky navinuty naprosto přesně, se závity navinutými co možná nejtěsněji u sebe. Avšak dělo funguje i bez přesného navinutí. Cívky by podle výpočtů měly mít přibližně 1Ω , tato skutečnost je jen těžko ověřitelná, běžným multimetrem takto malé hodnoty přesně nezměříme, výpočet by však měl mít dostačující přesnost. Cívky byly navíjeny na tuto hodnotu, tak aby špičkový proud protékající cívkou a také spínacími tranzistory byl přibližně 200 A.



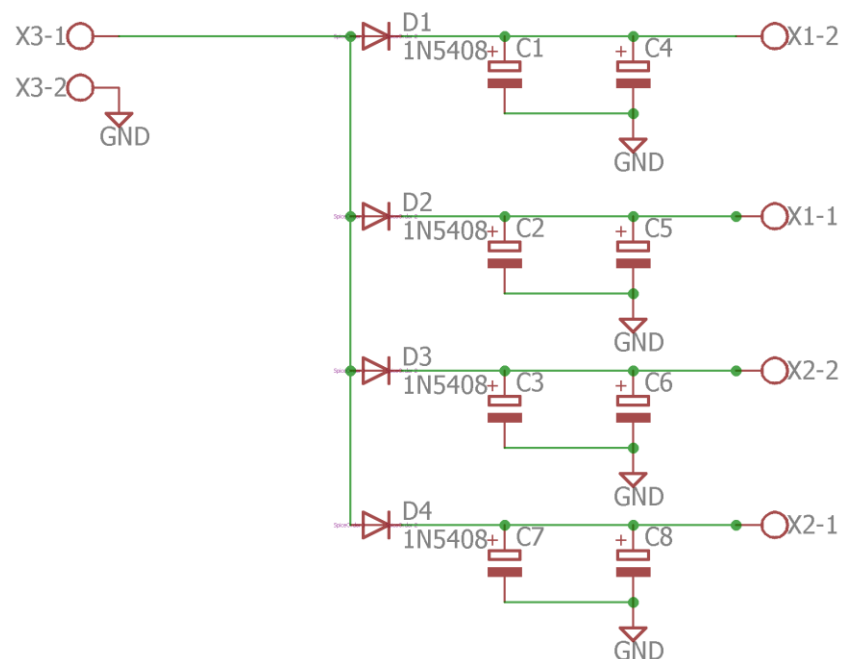
Obrázek 10 - Hlaveň a cívka

3.2 Kondenzátory

Jak už bylo řečeno, dělo má 4 cívky, proto potřebuje 4 kondenzátorové banky. Kondenzátory na ně použité by měly mít velkou kapacitu, být na velké napětí a mít malé ESR, tedy ekvivalentní sériový odpor. Takovéto kondenzátory jsou však drahé a jejich kapacita se snižuje s velikostí napětí na které je můžeme nabít. Proto se kondenzátory spojují paralelně do kondenzátorových bank tak, abychom získali větší kapacitu, platí $C = \sum C_i$. Jiná varianta je zvyšování napětí, které můžeme na kondenzátory připojit. Tím bychom dosáhli většího

zvyšování energie uložené v kondenzátorech ze vztahu $E = \frac{1}{2}CU^2$, toho lze dosáhnout sériovým spojováním, zde platí $U = \sum U_i$, které je však nebezpečné. Pokud kondenzátory nejsou stejné, může dojít u některých k přebíjení a k jejich následnému poškození, nebo úplnému zničení, napětí na nich se může rozdělit v různých poměrech.

Pro tuto práci jsem použil osm 470 μ F kondenzátorů se jmenovitým napětím 250 V. Dva kondenzátory pro jednu cívku, pokud bychom chtěli palebnou sílu v budoucnu zvětšit, je možné vytvořit větší banky a tím zvětšit možnou uskladněnou energii. Energie uložená v kondenzátorech je tedy přibližně $8 \cdot 470 \cdot 10^{-6} \cdot 200^2 / 2 = 75,2$ J. Pokud budeme počítat s účinností kolem 2 %, bude výsledná palebná síla přibližně 1,5 J.



Obrázek 11 - Kondenzátorová banka

3.3 Spínání cívek

Pro spínání cívek jsem použil vývojový kit od firmy Cypress a další čtyři podstatné součástky jsou IGBT/MOSFET tranzistory, infračervené LED, fototranzistory a budiče IGBT/MOSFET. Spínání cívek je jedna z nejdůležitějších věcí, na které je potřeba se zaměřit. Jak již bylo řečeno výše, cívka by měla být sepnutá jen do doby, než se projektil dostane do poloviny její délky. V tomto okamžiku by mělo okamžitě „zmizet“ její magnetické pole pohánějící projektil, což jak víme, v reálném světě není možné. Je více možností, jak snímat polohu projektilu, a tím určovat dobu sepnutí cívky, každá z nich má své plusy a mínusy. Dalším bodem jsou spínací

obvody, které musí pracovat co možná nejrychleji, a přitom zvládat velké zátěže v podobě vysokého napětí a špičkového proudu.

3.3.1 LED a fototranzistory

Pro snímání polohy projektilu v hlavni, jsem použil infračervené LED a fototranzistory vysílající, respektive přijímající záření o vlnové délce $\lambda = 940\text{nm}$. Pro každou cívku je jeden pár diody a fototranzistoru, uprostřed oddělovačů, vždy na začátku cívky. Tento druh snímání polohy je nejjednodušší a velmi přesný. Problémové je jen umístění diod a tranzistorů. Jednou možností je použití průhledné hlavně. Druhým způsob je provrtání hlavně a umístění diod tak aby nevadily projektilu v letu, toto řešení jsem použil ve své práci. Má hlavěň je vyrobena ze sklolaminátového materiálu a není průhledná, tudíž bylo potřeba provrtat díry do hlavně, vrtání muselo být velmi opatrné, protože trubička je celkem tenká a mohla by být poškozena. Diody a tranzistory mají průměr 3 mm, proto byl použit vrták o průměru 2 mm. Tato velikost je dostačující, je totiž nežádoucí, aby součástky do hlavně „zapadli“ celé. Další problémem je vrtání přesně uprostřed hlavně, vrtání příliš u kraje by mohlo mít podobné destruktivní účinky jako vrtání příliš velkým vrtákem. Po jednom pokusném a jednom neúspěšném vrtání se však díry podařilo vyvrtat. Další možností je snímání pomocí cívek, na nichž se při průchodu projektilu daným místem indukuje napětí, které bychom vyhodnocovali a pracovali s nimi. Problém bývá v určení začátku a konce pulzu, ten totiž nemá přesný průběh. Proto by se muselo pracovat na časování snímání a pomocí metody pokus omyl určit nejvhodnější možnou variantu. Také musí být kladen důraz na navinutí cívky a tím se zvětšuje náročnost výroby.

3.3.2 Budiče MOSFET/IGBT

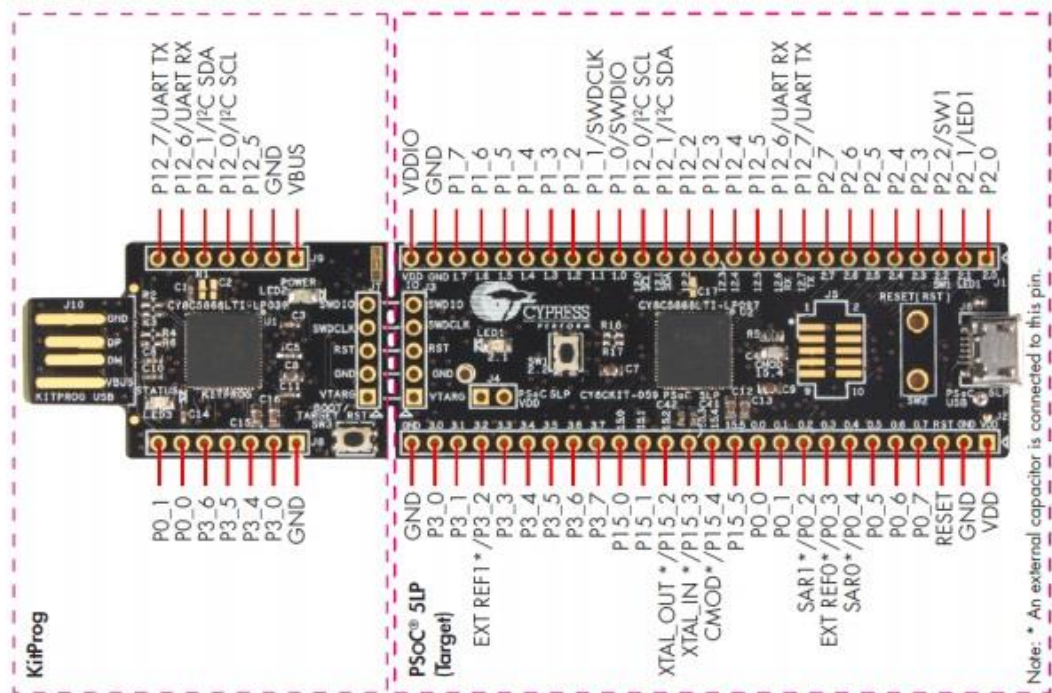
Pro buzení tranzistorů jsem použil duální vysokorychlostní budič výkonových MOSFET tranzistorů: MCP1404 (anglicky driver Dual High-Speed Power MOSFET Drivers), od výrobce MICROCHIP TECHNOLOGY, na jehož výstupu se může objevit špičkově až 4,5A pro rychlé sepnutí tranzistoru. Gate tranzistoru IGBT/MOSFET je tvořen kondenzátorem, proto je nutné na něj přivést vyšší hodnotu proudu tak, aby nabití kondenzátoru, respektive sepnutí tranzistoru proběhlo co nejrychleji. Tento driver dokáže nabít a vybit „gatový“ kondenzátor o velikosti 2200 pF za 15 ns při napájení z jednoho zdroje o velikosti napětí 4,5 až 18 voltů. Vstupy mohou být napájeny přímo z TTL nebo CMOS logiky. Výstupy mají dostatečně malou impedanci (kolem 3 Ω) jak v sepnutém, tak rozepnutém stavu, aby i při větších přechodových jevech nebyl

ovlivněn stav IGBT. Jelikož spínání bude probíhat v řádech desítek sekund, není nutné se zabývat ztrátovým výkonem, jenž by zahříval budič.

3.3.3 CY8CIT-059

Jako „mozek“ ovládající spínání cívek jsem použil vývojový kit od firmy Cypress, CY8CKIT – 059. Tento kit kombinuje precizní, programovatelné analogové a digitální vstupy/výstupy s procesorem ARM® Cortex®-M3 v jediném čipu. Na destičce je obsažen programátor, ten je možné v případě potřeby odlomit. Programování tohoto kitu probíhá přes program PSoC creator. PSoC (Programmable System on Chip) neboli programovatelný systém na čipu, lze zde používat jak programování, zahrnující účast ARM procesoru, tak také jedinečnou vlastnost, kterou lze najít pouze u Cypress PSoC umožňující vnitřní propojení bez jakéhokoli zásahu procesoru.

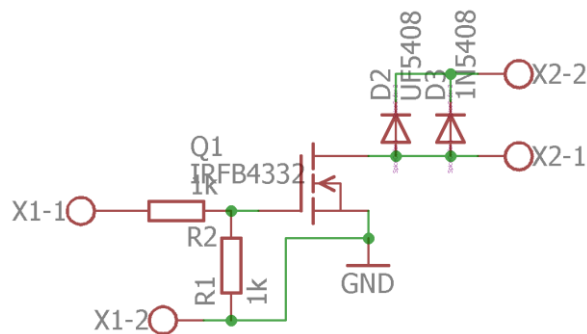
Figure 4-1. PSoC 5LP Prototyping Kit Pin Details



Obrázek 12 - Vývojový kit s popsanými piny [29]

3.3.4 IGBT

Součástky použité pro spínání cívek jsou IGBT tranzistory s N – kanálem HGTP20N60A4 od výrobce Fairchild Semiconductor. Napětí mezi kolektorem a emitorem může dosahovat až 600 V, což je pro naše účely dostatečné. Používané kondenzátory jsou do 250 V a nabíjíme je na maximálně 200 V, takže máme dostatečnou rezervu. Důležitějším parametrem je proud, který může protékat kolektorem, a to 70 A nepřetržitě při 25 °C a pro nás hlavně 280 A pulzně. Typický čas nutný k rozepnutí tranzistoru při 125 °C je 55ns. Tyto tranzistory mají vysokou vstupní impedanci MOSFET tranzistorů a nízké ztráty při sepnutí, jaké mají bipolární tranzistory. Jsou vhodné pro vysokofrekvenční spínání velkých napětí. Pro zapojení v „coilgunu“ je důležité, že dokáží vydržet vysoký pulzní proud, který je nutný pro správné fungování.



Obrázek 13 - Plošný spoj s tranzistorem MOSFET

Na obrázku číslo 13 je schéma s tranzistorem MOSFET (jehož vývody jsou umístěny jako u IGBT tranzistoru), kterým jsou spínány cívky. Každá cívka má identický plošný spoj, je k němu připojena pomocí šroubovací svorkovnice. Tranzistor je spínán napětím a na jeho vstupu jsou vloženy odpory zapojené jako dělič. První odpor omezuje proud do gate a druhý je zapojen proti zemi, abychom dostali napětí mezi gatem a emitorem nutné k sepnutí. Dvě paralelní diody jsou v zapojení, na omezení opačného napětí, které se vytvoří na cívce poté, co do ní přestane proudit proud, jak bylo popsáno výše. Tyto diody prodlužují „demagnetizaci“ cívky, prodlužují tedy dobu, kdy cívka působí na projektil. Jsou však v obvodu pro jeho ochranu před naindukovaným proudem. Dvě diody jsou v obvodu pro rychlejší „vybití“ cívky a zkrácení času kdy cívka působí na projektil. Anglicky se tomuto obvodu říká „snubber“.

3.4 MOSFET

Při testování se podařilo zničit tři IGBT tranzistory, proto byly nahrazeny MOSFET tranzistory IRFB4332, jejichž použití bylo také zvažováno. Tyto tranzistory jsou od výrobce International Rectifier. Napětí mezi piny drain a source může dosahovat až 250 V, proud může pulzně dosahovat až 230 A. Tyto hodnoty jsou nižší než u IGBT tranzistorů, měly by však být dostatečné. Pouze u druhé cívky byly použity dva tranzistory spojené paralelně. Tato cívka, je o jednu řadu menší, a tak jí protéká větší proud. U třetí a poslední cívky byl použit pouze jeden tranzistor, řešení s MOSFET tranzistorem u těchto cívek by mohlo přinést i výhodu, kterou by mělo být rychlejší spínání tranzistorů MOSFET.

3.5 Nabíječka kondenzátorů

Jelikož potřebujeme kondenzátory nabít na přibližně 200 V, bylo potřeba vytvořit zařízení, které z napájecího napětí 12 V udělá 200 V. K tomuto účelu slouží takzvaný DC-DC boost converter (česky zvyšovač napětí). K jeho výrobě byl použit CY8CKIT jako generátor PWM. V podkapitolách jsou stručně popsány funkce zvyšujících a snižujících měničů.

3.5.1 Teorie měničů napětí DC/DC

DC/DC měniče napětí jsou obvody, které mění hodnotu napětí přiváděnou na vstup. Můžeme mezi ně zařadit i lineární stabilizátory, jako je například LM7805, ty však dokáží napětí pouze snižovat. DC/DC měniče dokáží napětí jak snižovat, tak i zvyšovat. Používají se například v elektronice napájené z baterie. Existuje mnoho druhů měničů, většinou však pracují na bázi elektromagnetismu, tedy uchování energie v cívce, či transformátoru. Nebo měniče kapacitní, ukládající energii do kondenzátoru, jako jsou nábojové a napěťové pumpy nebo zdvojovače napětí. Snižující a zvyšující měniče se řadí do kategorie spínaných zdrojů. Tyto obvody svou činností mění napětí a nazývají se impulzní měniče, mají mnohem větší účinnost než lineární stabilizátory.

3.5.2 Snižující měnič (STEP-DOWN)

Při sepnutí spínače dojde v obvodu k exponenciálnímu nárůstu proudu a napětí na cívce. Po rozepnutí dochází ke změně polaritě napětí na cívce, což je způsobeno tím, že se magnetické pole cívky snaží udržet velikost a směr proudu (to vysvětluje Lenzův zákon). Proud zátěží začne klesat, uzavírá se přes diodu a zachovává si původní směr. Při neměnných hodnotách L a C je

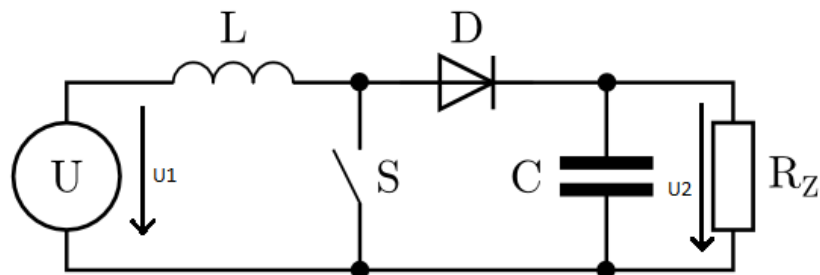
hodnota napětí na zátěži, dána střídou spínání a rozpínání spínače. Velikost výstupního napětí je maximálně stejná jako velikost napětí vstupního, většinou však menší, proto se tento měnič nazývá STEP-DOWN. Pokud je zajištěn dostatečný kmitočet spínání, bude na výstupu stejné zvlnění jako na vstupu, lze jej dodatečně filtrovat, proto je zvlnění tohoto zapojení nejmenší ze všech typů zapojení měničů. Změnou střídy měníme výstupní napětí (princip pulzně šířkové modulace), pokud chceme menší napětí, zkracujeme dobu sepnutí a prodlužujeme dobu rozepnutí.

3.5.3 Zvyšující měnič (STEP-UP)

Zvyšující měnič má v principu 2 stavy, první stav, kdy je spínač vypnutý a druhý stav, když je zapnutý. Ve stavu, kdy je spínač sepnutý, teče proud ze zdroje do cívky, levý konec cívky tím pádem bude kladný. Ve chvíli kdy se spínač rozezne, se polarita cívky změní a kladný bude pravý konec. V první fázi se hromadí energie v cívce, ve druhé fázi se nabíjí kondenzátor na napětí rovnající se součtu napětí na cívce a zdroji. Z cívky se vlastně stává jakýsi druhý zdroj, získáváme tedy dva zdroje v sérii. Toto napětí se poté objeví i na zátěži. Pokud budeme považovat všechny součástky za ideální, bude výstupní napětí závislé na době, po kterou je spínač sepnut a rozeznut. Pokud nastavíme konstantní frekvenci spínání, řádově stovky kHz až jednotky MHz, napětí je poté závislé na střídě. Čím větší bude střída, tím vyšší bude napětí, takto bychom mohli napětí zvyšovat až do nekonečna, to jde však pouze teoreticky.

$$U_2 = \frac{T}{t_1} U_1 [V] \quad (15)$$

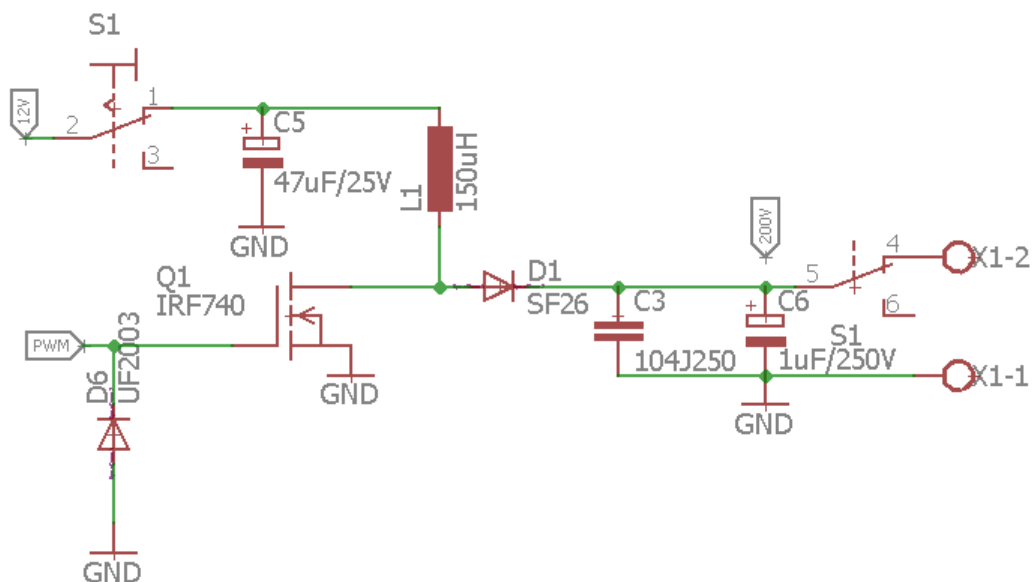
Tento vztah platí jen pro ideální součástky, v praxi se také zavádí zpětná vazba, aby bylo možné při kolísajícím napětí na vstupu (např.: napájení z baterie), udržovat konstantní napětí na výstupu, toho se dosahuje změnou střídy. Zkracováním doby sepnutí spínače zvětšujeme napětí na výstupu.



Obrázek 14 - Step-Up měnič [33]

3.5.4 Použitý zdroj

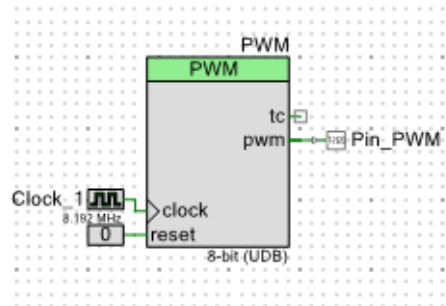
Moje nabíječka kondenzátorů pracuje na principu zvyšujícího (step-up) měniče napětí. Ze zdroje, kterým na vstup přivádím 12 V, vytváří přibližně 200 V na výstupu, jimiž nabívám kondenzátory. Jak již název napovídá, spínané zdroje mají v obvodu spínač, který spíná a rozeplná určitou frekvencí. Jako spínač v obvodu nabíječky je použit výkonový MOSFET IRF740, který spíná velmi rychle (řádově nanosekundy), maximální napětí mezi vývody drain a source je 400 V, pro tento obvod dostačující parametry. PWM signál pro spínání tranzistoru je tvořen kitem CY8CKIT jeho frekvence je 32 KHz se střídou 98 %. Cívka má hodnotu 150 μ H, a výstupní kondenzátor 1 μ F/250 V. Elektrolytický kondenzátor 47 μ F/25 V na vstupu a kondenzátor 100nF/250 V na výstupu mají filtrační funkci. Dioda SF26 je součástí zdroje, zabraňuje vybíjení kondenzátoru přes sepnutý „spínač“, v našem případě tranzistor, přitom umožňuje protékání proudu v čase, kdy je „spínač“ rozeplnutý, oproti tomu dioda UF2003 na vstupu chrání CY8KIT. Toto zapojení není určeno k přesnému zvýšení napětí, ale pouze vytvoření nabíjecího napětí pro kondenzátory. Jak již vyplývá z funkce zvyšujícího měniče, výstupní proud, tedy proud, který nabívá kondenzátory je snížený, a proto se kondenzátory nabívají pomaleji. Lepším řešením by bylo použití usměrněného síťového napětí. Jelikož nepotřebujeme, aby se kondenzátory nabíjely rychle, je řešení se zvyšujícím měničem dostačující.



Obrázek 15 - Nabíječka kondenzátorů

3.6 Ovládací prvek

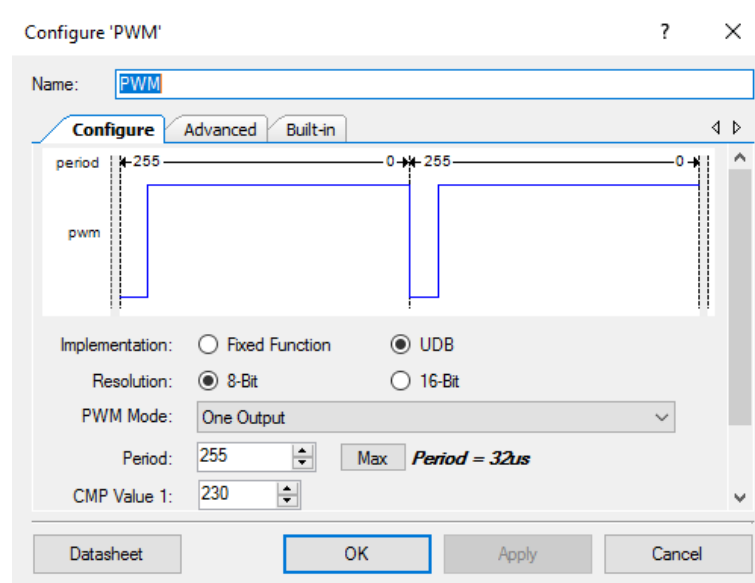
„Mozkem“ děla, jak již bylo řečeno je vývojový kit CY8CKIT. K němuž jsou připojeny na pinech P12[3] až P12[6] fototranzistory. Na pinech P1[7] až P1[4] připojeny budiče tranzistorů. K pinu P12[2] je připojen výstup PWM signálu pro nabíječku kondenzátorů. A v neposlední řadě na pinu P15[4] pro spínač, který bude fungovat jako spoušť.



Obrázek 16 - Generátor PWM

Na obrázku 16 je blok PWM v programu PSoC creator, který generuje signál pro zdroj nabíjející kondenzátory. Kde na vstup je připojen signál *clock*, určující frekvenci PWM signálu. Signál *reset*, na němž je připojena logická „0“, protože chceme, aby signál PWM běžel stále. A na výstupu již máme připojen pin s PWM signálem.

Tento blok se nastavuje v dialogovém okně, jež je vidět na obrázku 17. Lze zde nastavit *Jméno* bloku (pokud bychom potřebovali více bloků generujících PWM), *Rozlišení* PWM, *PWM mode* udávající funkčnost PWM (lze zde nastavit jeden či dva výstupy, DUAL EDGE, jež spojí výstup PWM1 a PWM2 do jedné jako bychom použili funkci AND a další),



Obrázek 17 - Dialogové okno PWM

CMP (compare value parametr) hodnotu udávající dobu, kdy je signál v logické „1“ a také *Periodu*. Hodnota periody děleno hodnotou *CMP* vynásobená 100 udává střidu v procentech.

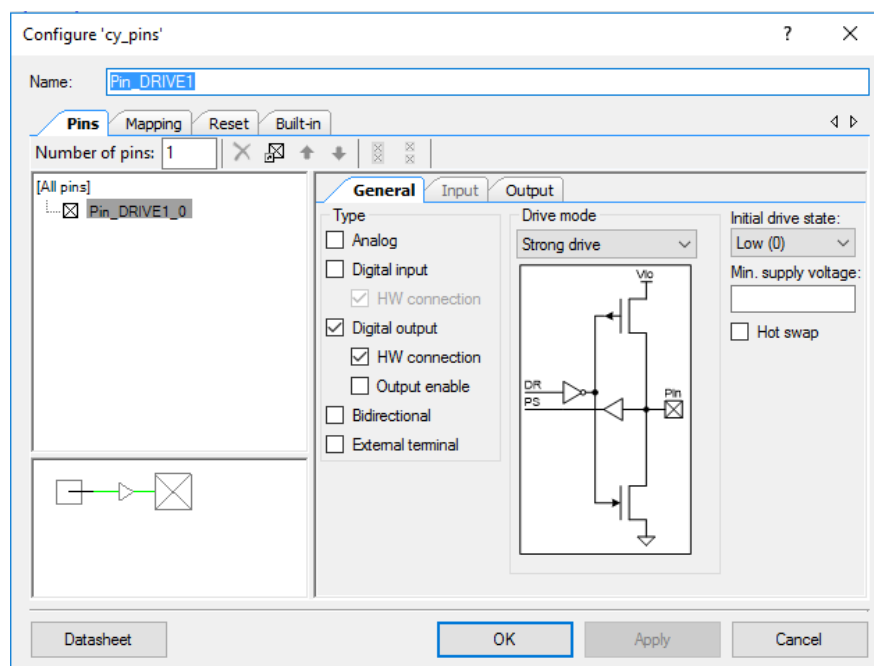
Pro spuštění PWM generátoru je nutné napsat také kód, který je velmi jednoduchý. Většina kódu je již předepsaná programem, stačí jen spustit funkci pomocí `PWM_Start()`;

```
#include "project.h"

int main(void)
{
    CyGlobalIntEnable; /* Povolení globálních přerušení. */

    /* Místo pro kód inicializace/spuštění (např. MyInst_Start()) */
    PWM_Start(); /* Spuštění PWM */
    for(;;)
    {
        Pin_1_Write(1); /* Rozsvícení led CY8CKITu */
    }
}
/* [] Konec souboru */
```

Velmi důležité je nastavování pinu, jež probíhá také přes dialogové okno, ukázané na obrázku 18.



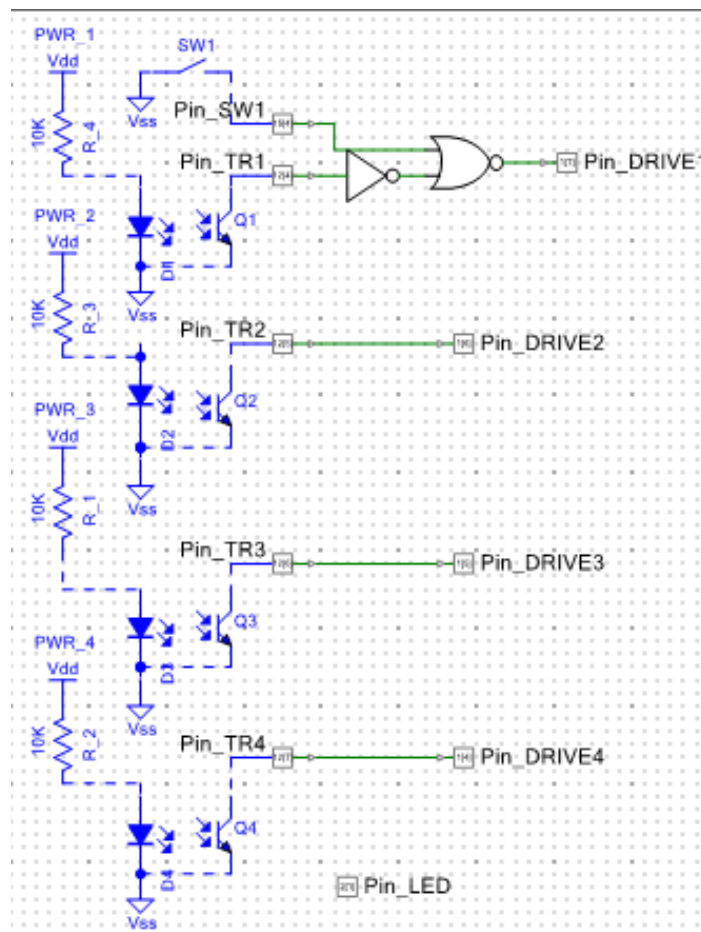
Obrázek 18 - Dialogové okno pro Piny

Dialogové okno pro vstupní i výstupní pin zůstává v podstatě stejné. Lze zde opět nastavit jméno pinu, abychom dokázali jednotlivé piny jednoduše rozpoznat.

V sekci *TYPE* lze nastavit, zda bude pin analogový, digitální vstup/výstup (Digital input/output) nebo obousměrný (Bidirectional), můžeme mu taky přidat externí „svorku“ (External terminal), na kterou se připojují součástky, které budou ve skutečnosti připojeny mimo kit, při zakreslení nedávají žádnou funkci pinu, slouží jen pro dokumentaci. U digitálních vstupů/výstupů lze použít také hardwarové připojení (HW connection) pro propojení pinů mezi sebou bez zásahu procesoru (bez použití kódu).

Sekce *DRIVE MODE* nastavuje 8 možností buzení pinů, ovlivněných možnostmi ze sekce *TYPE*. Například je zde Resistive Pull Up (pin je primárně připojen k logické „1“ přes pull up rezistor), Resistive Pull Down (pin je primárně připojen k logické „0“ přes pull down rezistor).

A spousta dalších možností nastavení, popsanych v dokumentaci (datasheet), jež je součástí PSoC creatoru, pro každý komponent.



Obrázek 19 - Vyhodnocovací část

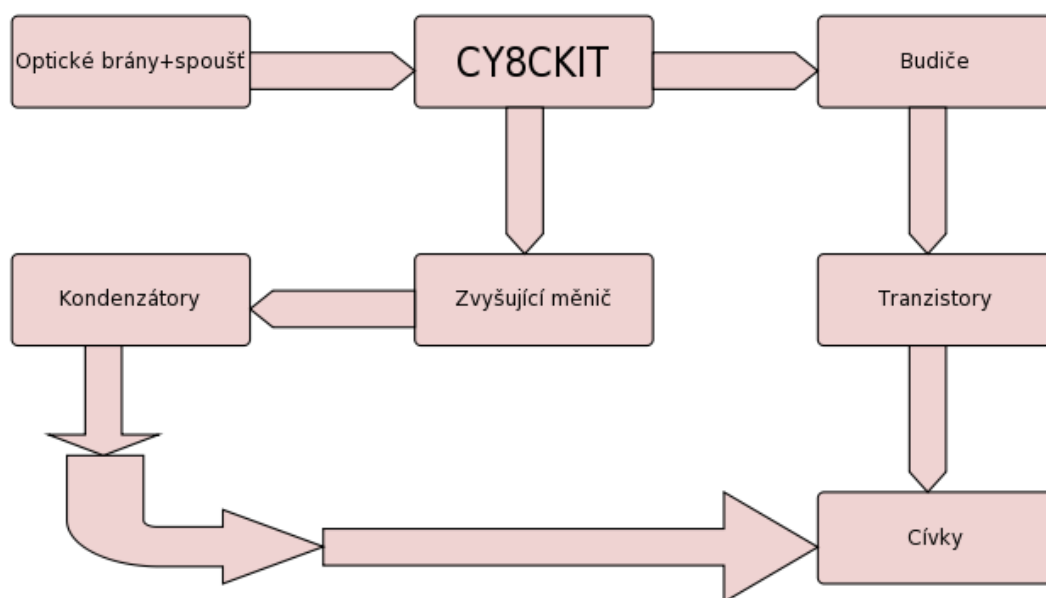
Na obrázku 19 je vnitřní zapojení vyhodnocovací části, která je součástí CY8KITu a je naprogramovaná v PSoC Creatoru. Modré součástky slouží jen jako dokumentace, nemají žádný vliv na funkci vstupních a výstupních pinů kitu. Zbylé součástky, jakou jsou piny a logické funkce, jsou již součástí programu a udávají, jak se bude kit chovat.

Pro vyhodnocování jsem zvolil jednoduchou variantu s hardwarovým propojením a základními logickými operacemi, bez použití kódu. Je zde devět pinů, 5 je vstupních, na nichž jsou připojeny fototranzistory se spínačem a 4 výstupní vedoucí do budičů tranzistorů. Vyhodnocování pro první cívku probíhá přes hradla, poněvadž je potřeba zpracovat signál z fototranzistoru a zároveň ze spouště. Při stisknutí spouště a zároveň při přerušení paprsku se sepne tranzistor. Ostatní piny jsou již připojeny přímo mezi sebou a při přerušení paprsku se na výstupních pinech objeví logická „1“, to znamená, že se tranzistor sepne. Poté co projektil opustí prostor mezi fototranzistorem a LED, se na výstupních pinech objeví logická „0“ to zapříčiní rozepnutí tranzistor.

4 Konstrukce

4.1 Elektrická

Na obrázku číslo 20 je diagram zjednodušeného zapojení celého elektromagnetického děla. Nejdůležitější částí je samozřejmě vývojový kit od firmy Cypress, ovládající spínání cívek a tvořící PWM signál pro zvyšující měnič, nabíjecí kondenzátory. Aby kit dokázal spínat cívky, potřebuje signál z optických bran, popřípadě ze spouště. Optické brány snímají polohu projektilu, podle něj je pak vysílán signál do budičů tranzistorů. Poté co se tranzistor vybudí do sepnutého stavu, proteče jím proud a projektil je vtažen dovnitř. Jakmile projektil opustí prostor, optické brány budič přeruší napětí na tranzistor a tranzistor se rozepne. Tím se zajistí vylétnutí projektilu z prostoru cívky. V diagramu není zakresleno napájení a snímání napětí na kondenzátorech, jde pouze o informativní diagram, ukazující zjednodušeně zapojení děla.



Obrázek 20 - Diagram zapojení

Dále si popíšeme detailnější zapojení hlavní desky děla, která je vidět na obrátku 21. Tento plošný spoj obsahuje napájecí část pro logické obvody, vyhodnocovací, budící a nabíjecí část.

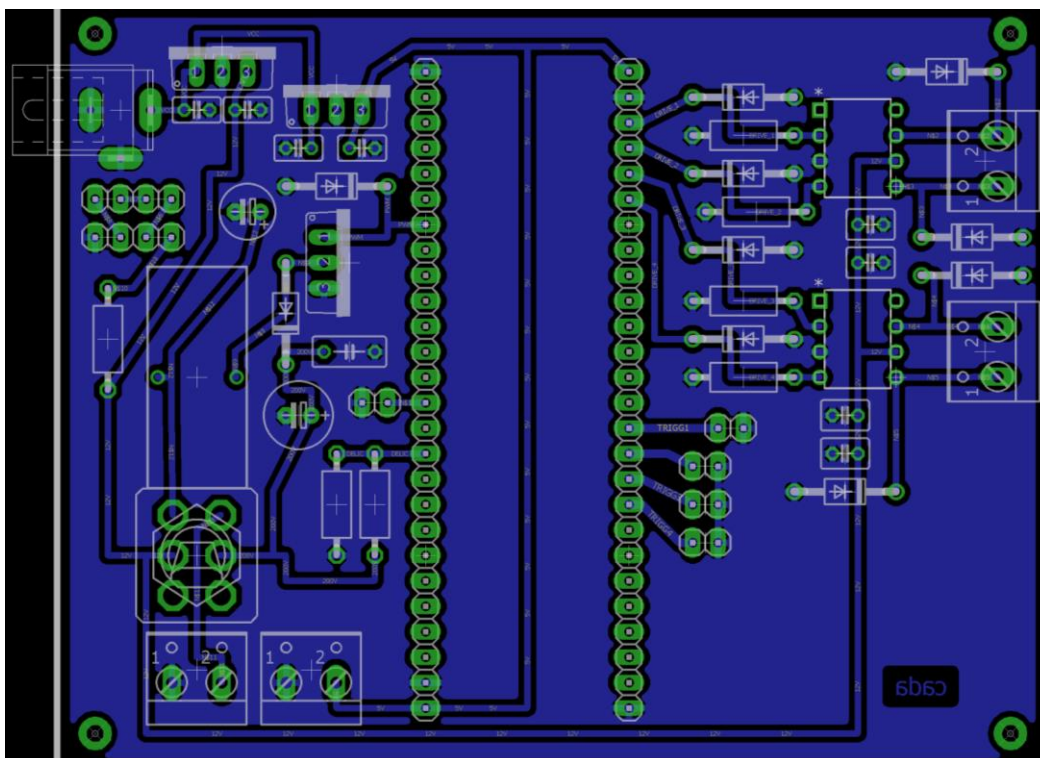
Napájení celého děla probíhá ze síťového zdroje, jež má na výstupu 12 V stejnoměrného napětí a dokáže vyprodukovat až 1,5 A. Je připojen na lineární stabilizátory LM7812 a LM7805, tyto stabilizátory zajišťují konstantní napětí 12 V a 5 V. Napětí 5 V je použito pro

napájení CY8CKIT a voltmetru ukazujícího napětí na kondenzátorech, napětí 12 V je použito pro napájení budící části a také pro vstup zvyšujícího měniče.

Vyhodnocovací část se skládá z CY8CKITu, fototranzistorů (LED diod) a spouště. Fototranzistory vyhodnocují polohu projektilu a podle toho je ovlivňován výstup kitu, detailně je funkce vyhodnocovací části popsána v oddílu 3.5.

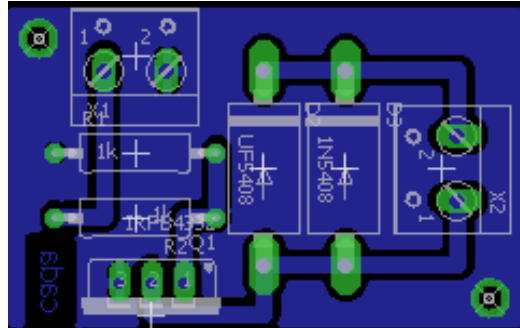
Budící část se skládá z budičů MCP1404 popsaných v pododdílu 3.3.2, tyto budiče slouží k rychlému sepnutí/rozepnutí cívek. Signál přicházející z vyhodnocovací části má 5 V, které nejsou dostatečné pro sepnutí tranzistorů, proto jsou napájeny 12 V, toto napětí je přiváděno na „gaty“ tranzistorů. Tyto tranzistory jsou na samostatných DPS pro lepší umístění, toto bude popsáno v oddílu 4.2.

Nabíjecí část se skládá pouze ze zvyšujícího měniče popsaného v pododdílu 3.4.4. Tento zdroj je zapínán a vypínán páčkovým spínačem tak, aby nebyl při výstřelu připojen výstup ke kondenzátorům.



Obrázek 21 - Hlavní DPS

Na obrázku 22 je DPS s tranzistorem spínajícím cívku, tato destička je zvlášť pro každou cívku, pro lepší mechanické umístění, jsou zde dvě svorkovnice, do jedné z nich je připojena cívka, jsou u ní dvě polovodičové diody připojené k cívce paralelně, jejich princip byl popsán v oddílu 2.9.



Obrázek 22 - DPS s IGBT tranzistorem

4.2 Mechanická

Mechanicky bylo dělo umístěno do krabičky o rozměrech cca 25x15x9 cm. Kdy na spodní desku byly umístěny plošné spoje s kapacitními bankami a také řídicí plošný spoj s nabíječkou. Obě desky jsou přišroubovány čtyřmi šrouby a maticemi M2,5. Obrázek s rozmístěním je v příloze B.

Plošné spoje s tranzistorem byly vyrobeny záměrně odděleně tak, aby bylo možné pod každou cívku umístit jednu destičku a přišroubovat vývody cívek do svorkovnic. Přidělány jsou na boční stěně krabičky a připevněny jsou každá dvěma šrouby a maticemi M2,5. Destičky mají 43 mm a cívky přibližně 40 mm, proto jsou mezi nimi mezery pohybující se od 5 mm do 15 mm, DPS nebyly umístěny precizně, ale tak jak to bylo nejvýhodnější pro svorkovnice. V příloze D je detail na umístění DPS.

Na vrchní straně krabičky je umístěn přepínač sloužící pro zapínání nabíjení, spínač sloužící jako spoušť a voltmetr ukazující napětí na kondenzátorech pro druhou cívku (toto napětí je na všech kondenzátorech stejné).

Uvnitř je vložena také hlaveň s cívkami, tak aby vše bylo zakryto a zbytečně se nepohybovalo při přenášení.

Zepředu je umístěn napájecí jack a USB kabel umožňující drobné úpravy v programu CY8CKITu.

4.3 Navrhovaný vývoj

Do budoucna by bylo možné vylepšit fungování děla velkým množstvím úprav. Začněme například s cívkami, ty jsou navinuty ručně, takže nemůžeme mluvit o je jejich přesném navinutí, síle utažení závitů nebo dokonce jejich odporu. Při přesnějším navinutím bychom dosáhli vyšší účinnosti než jaké bylo dosaženo nyní.

Další možnou úpravou je použití fotodiod, jejichž snímání je rychlejší než u fototranzistoru, avšak fototranzistor je citlivější. Citlivost je zajišťována spojováním tranzistorů do tzv. Darlingtonova zapojení. To znemožňuje práci tranzistorů s frekvencemi vyššími než 50kHz. Fotodiody dokáží reagovat na osvětlení řádově 10^{-6} s až 10^{-9} s. U PIN diod je tento náběh ještě rychlejší a probíhá v řádech 10^{-12} s až 10^{-15} s.

Vylepšením bez většího zásahu do celkového výrobku by bylo automatické udržování napětí nabíječky kondenzátorů, které může nyní přesáhnout i 200 V, proto je na krabičce umístěn voltmetr, kterým uživatel sleduje, na jaké napětí jsou kondenzátory nabity a ručně musí nabíjení přerušit. Pokud by nabíjení nepřerušil, mohlo by dojít k poškození výrobku. Tímto se můžeme dostat k dalšímu vylepšení. Tímto vylepšení by bylo zvětšení napětí, to by zapříčinilo větší palebnou sílu, toto vylepšení by však znamenalo předělání celého děla. Jak vyměnění kondenzátorů, tranzistorů i úpravu nabíječky kondenzátorů.

4.4 Obsluha děla

Obsluha děla je velmi jednoduchá, začít můžeme připojením napájecího adaptéru do sítě a poté do napájecího jacku na přední straně děla. Pokračovat můžeme zastrčením projektilu do hlavně, tak aby projektil přerušil světelný tok mezi první optickou branou, to znamená konec projektilu zároveň s počáteční hranou hlavně. Poté zapneme nabíječku kondenzátoru páčkovým přepínačem, směrem ke konci hlavně. Počkáme, než napětí na voltmetru dosáhne zhruba 190 V, to zajišťuje, abychom nepřesáhli napětí 200 V, to by mohlo zapříčinit poškození děla, respektive spínacích tranzistorů. Vypnutí nabíjení probíhá vrácením páčkového přepínače do původní polohy. Pro výstřel stiskneme spoušť nacházející se vedle přepínače. Napětí na kondenzátorech po výstřelu nebude nulové, protože vybíjení kondenzátoru je zastaveno poté co projektil opustí prostor optických brán. Pro další výstřel opakujeme tento postup od vložení projektilu.

Zhodnocení a Závěr

Mým úkolem v této bakalářské práci bylo vytvoření elektromagnetického děla se čtyřmi cívkami. Tak aby jej bylo možné používat pro demonstrační účely.

V první části bakalářské práce jsem rozebíral teoretickou část celé problematiky. Stručně byla probrána historie vývoje elektromagnetických děl, přiblížena byla také současnost případně budoucnost použití elektromagnetických urychlovačů.

Druhá část se věnuje principům jednotlivých typů urychlovačů, jejich výhodám, nevýhodám a dosaženým limitům. Pro zhotovení bylo důležité pochopení principů magnetizmu, proto byl popsán vznik magnetického pole či Lenzův zákon. Objasněny byly možnosti spínání a vlastnosti jednotlivých spínacích prvků a také cívky.

Třetí část je zaměřena na praktickou konstrukci a postup při výrobě Gaussova děla. Jsou v ní popsány jednotlivé součástky: cívky, kondenzátory, tranzistory, optické brány, budiče tranzistorů a v neposlední řadě vývojový kit od firmy Cypress ovládající celé dělo.

Ve čtvrté kapitole je popsána elektronická a mechanická konstrukce, která vyplynula z návrhu celého děla, je zde také navrhnut případný další vývoj.

Tato bakalářská práce byla sestavena za účelem prezentace fyzikálních zákonů v praxi. Po několika neúspěšných pokusech sestavit dělo za použití pouze komparátorů, byl použit pro vyhodnocování vývojový CY8CKIT od firmy Cypress, jež přinesl určitou kontrolu nad spínáním. Podařilo se tedy vytvořit plně funkční čtyřstupňové dělo, které dosahuje 1,34 % účinnosti, jeho úst'ová rychlost je přibližně 31,75 m/s neboli 114,3 km/h odpovídající kinetické energii 0,907 J s projektilem o hmotnosti 1,8 g. Tyto hodnoty byly změřeny pomocí vysokorychlostní kamery, ta zaznamenala pohyb projektilu 2500 snímky za vteřinu. Projektil urazil za 2 snímky vzdáleno 2,54cm. Jak je vidět v příloze F.

Výroba cívkového děla byla poměrně náročná, ač se z počátku zdálo, že to tak nebude díky informacím o tomto typu děl, které se dají získat z internetu. Tato děla však používají řešení s tyristory, nesledují polohu projektilu a většinou používají pouze děla s jednou cívkou připojená na kondenzátory o velkých kapacitách a velkých napětí.

Zacházení s kondenzátory může být nebezpečné, proto se při konstrukci děla musí pracovat velmi obezřetně.

Zdroje

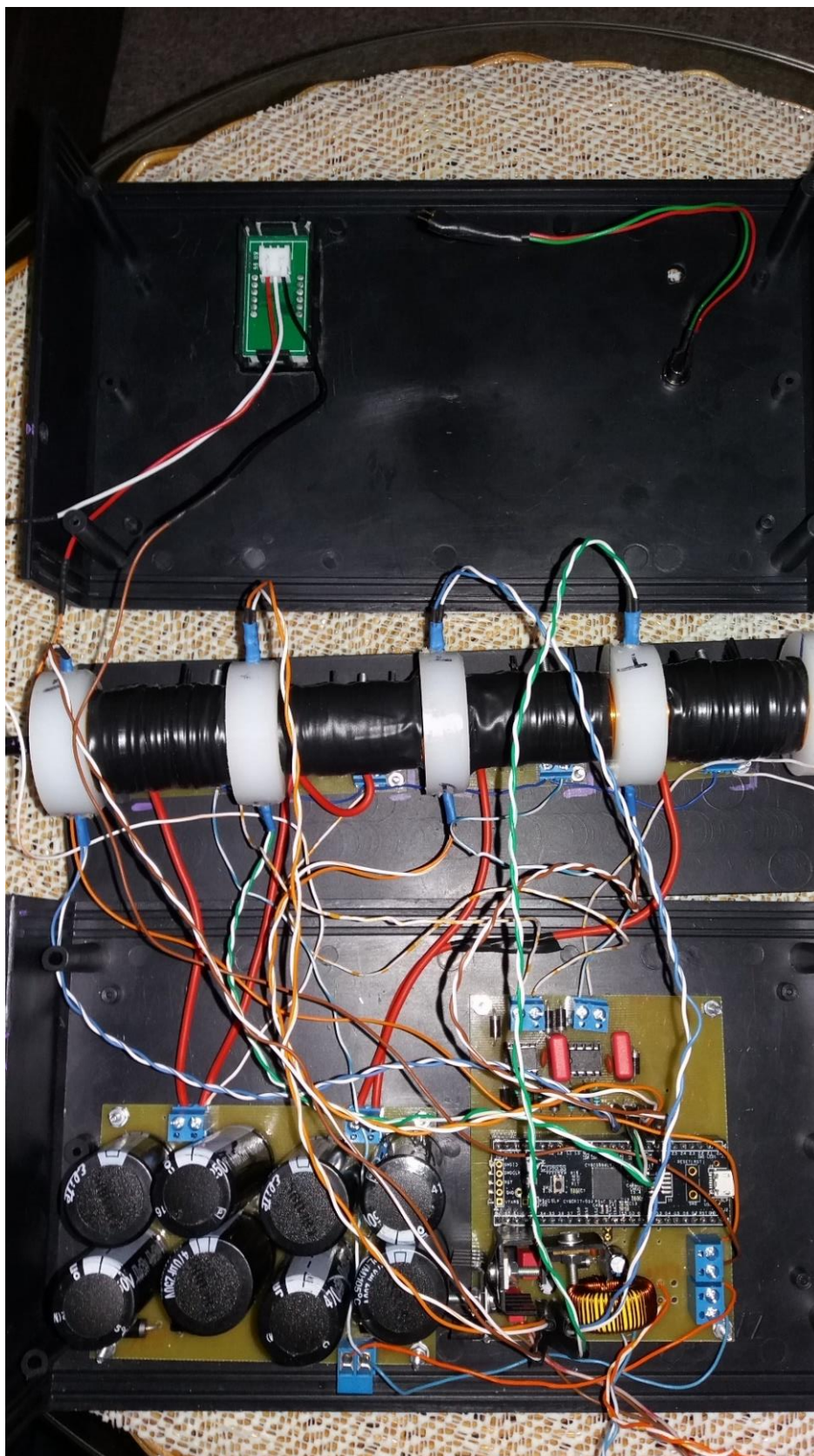
- [1] Hans Christian Ørsted. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Christian_%C3%98rsted
- [2] Kristian Birkeland. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Kristian_Birkeland
- [3] B.N. Turman, „Coilgun Launcher for Nanosatellites,“ 23 03 1999. [Online]. Dostupné z: <http://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/5039>
- [4] Navy's Rail Gun Still Headed to Sea, but on Which Ship? *Defense News* [online]. Christopher P. Cavas, 2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.defensenews.com/story/defense/naval/ships/2016/01/10/railgun-navy-fanta-naval-zumwalt-ddg1000/78443016/>
- [5] Maglev. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [6] *Effect of Projectile Design on Coil Gun Performance* [online]. Needham, 2012 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.nickeyre.com/images/coilgun.pdf>. Franklin W. Olin College of Engineering.
- [7] Gauss Guns: Launch Steel Balls with Magnets!. *K&J Magnetics* [online]. Pipersville (PA): K&J Magnetics [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <https://www.kjmagnetics.com/blog.asp?p=gauss-guns>
- [8] Gaussian gun. In: *Grand illusions* [online]. [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: http://www.grand-illusions.com/acatalog/gaussian_gun.jpg
- [9] Railgun. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Railgun>
- [10] Kolejnicové elektromagnetické dělo. *Aldebaran* [online]. Praha: Aldebaran Group for Astrophysics, 2008 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_10_bum.php
- [11] Railgun-1.png. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/Railgun-1.png>

- [12] How Rail Guns Work. *HowStuffWorks.com* [online]. Atlanta (GA): William Harris, 2005 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/rail-gun1.htm>
- [13] Coilgun. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun>
- [14] *Barry's Coilgun Designs* [online]. Seattle: Barry Hansen, c1998-2017 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <https://www.coilgun.info/about/home.htm>
- [15] Magnetic field of a solenoid. In: *Physics* [online]. 2017 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://physics.stackexchange.com/questions/323326/why-do-magnetic-field-lines-point-towards-the-north-pole-on-the-inside-of-a-sole>
- [16] Manoderecha.svg. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Manoderecha.svg>
- [17] BLAHOVEC, Antonín. *Elektrotechnika I. 5.*, nezměn. vyd. Praha: Informatorium, 2005. ISBN 978-807-3330-439.
- [18] Směr silokřivek cívky. In: *Techmania Science Center* [online]. Plzeň: Magda Králová [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/veda-v-pozadi/999>
- [19] Indukčnost. *Elektřina a magnetismus* [online]. Jaromír Kekule, 2004 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: http://elektross.gjn.cz/aplikace/zhaseci_obvod.html
- [20] Indukovaný proud. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Jaroslav Reichl, c2006-2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/306-indukovany-proud>
- [21] Magnetická hystereze. In: *Encyklopedie fyziky* [online]. Jaroslav Reichl, 2017 [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/296-magneticka-hystereze>
- [22] Thyristor. *Electronics Tutorials* [online]. AspenCore, c2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/power/thyristor.html>
- [23] Tyristor. In: *SPŠE Mohelnice* [online]. Mohelnice [cit. 2017-05-11]. Dostupné z: <http://www.spsemoh.cz/vyuka/zel/vicevrstve.htm>
- [24] MOSFET. *Electronics Tutorials* [online]. AspenCore, c2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: http://www.electronics-tutorials.ws/transistor/tran_6.html
- [25] Insulated Gate Bipolar Transistor. *Electronics Tutorials* [online]. AspenCore, c2017 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/power/insulated-gate-bipolar-transistor.html>

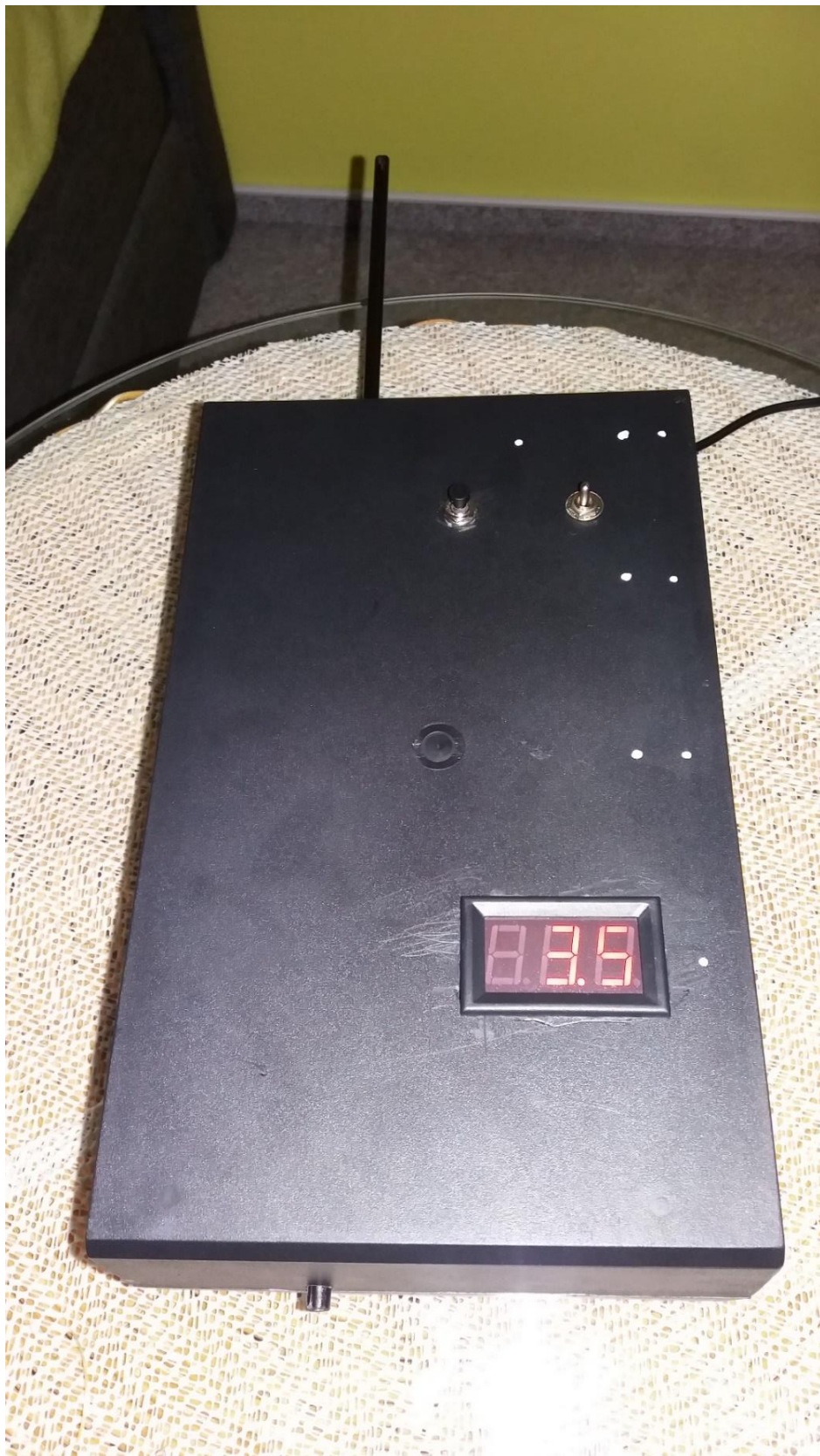
- [26] *Elektronické obvody pro měřicí techniku*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2004, s. 322-325. ISBN 80-01-02966-2.
- [27] *Coilgun Systems* [online]. James Paul, c2001-2006 [cit. 2017-05-08]. Dostupné z: <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/index.html>
- [28] MCP1403/4/5. In: TME Czech republic [online]. Microchip Technology, c2007 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/5b9e008d24cd02a2d99197173daa56bc/mcp1403.pdf>
- [29] PSoC ® 5LP Prototyping Kit Guide. In: Cypress Semiconductor [online]. San Jose: Cypress Semiconductor [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.cypress.com/file/157971/download>
- [30] IRFB4332PbF. In: TME Czech republic [online]. [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/bd266574e39956bf398b63a5cb43a675/irfb4332pbf.pdf>
- [31] HGTG20N60A4, HGTP20N60A4. In: TME Czech republic [online]. Fairchild Semiconductor Corporation, 2001 [cit. 2017-05-15]. Dostupné z: <http://www.tme.eu/cz/Document/4e719120e24ff19d17b7bb509f3daeca/HGTG20N60A4.pdf>
- [32] Měníče napětí a spínané zdroje – teoretická základna. *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, 2007 [cit. 2017-05-09]. Dostupné z: <http://elektro.tzb-info.cz/teorie-elektrotechnika/4263-menice-napeti-a-spinane-zdroje-teoreticka-zakladna>
- [33] DC/DC měniče. *MArt.cz: Elektronika do posledního μA ...* [online]. Vlastimil Slinták, 2013 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://uart.cz/952/dc-dc-menice/>

Přílohy

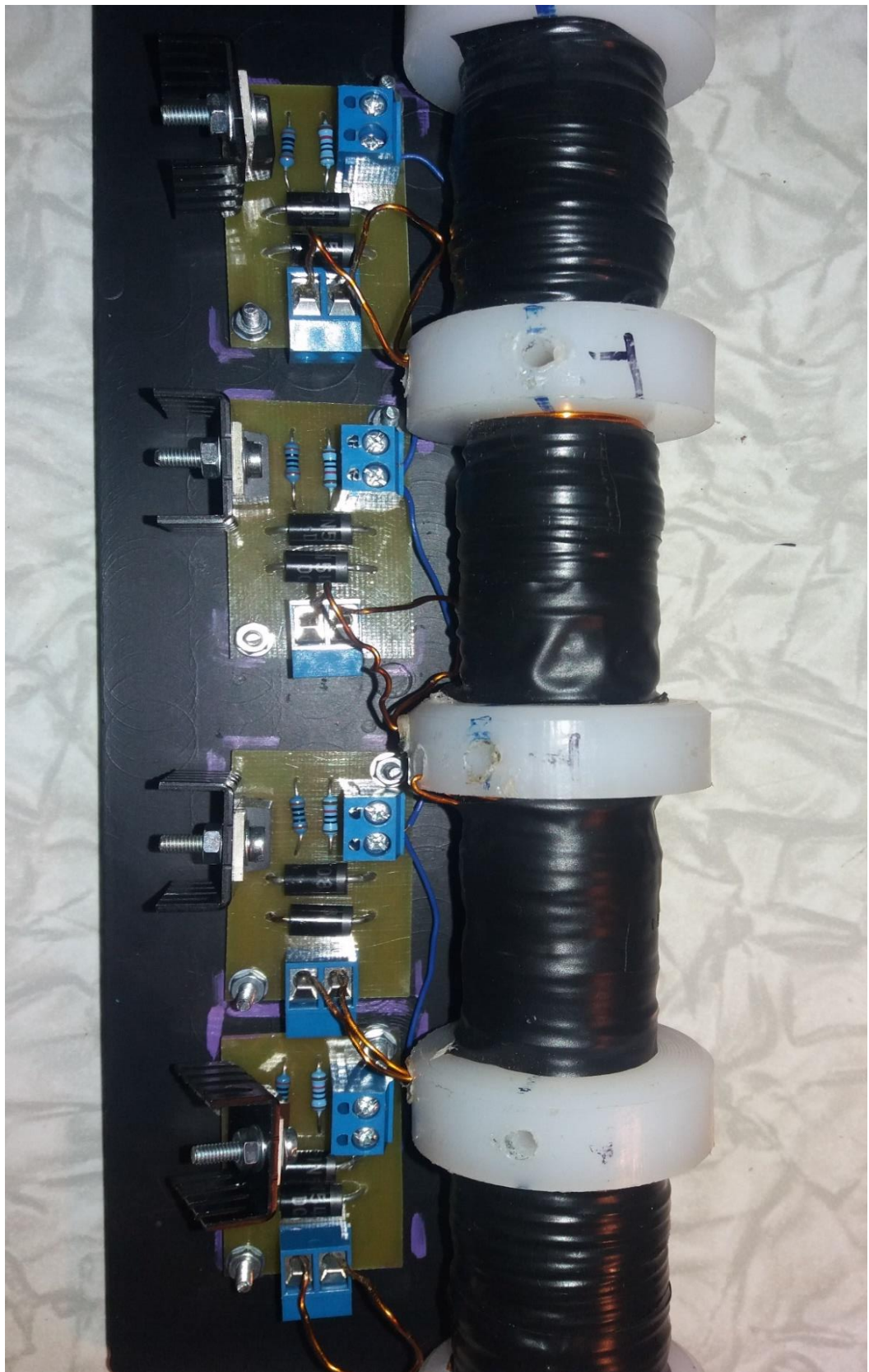
PŘÍLOHA A VNITŘEK DĚLA	48
PŘÍLOHA B UMÍSTĚNÍ OVLÁDACÍHO DPS A DPS S KONDENZÁTORY	49
PŘÍLOHA C CELÉ DĚLO	50
PŘÍLOHA D ROZLOŽENÍ DPS S TRANZISTORY A CÍVKAMI.....	51
PŘÍLOHA E SCHÁMENA ZAPOJENÍ	52
PŘÍLOHA F VÝSTŘEL DĚLA (3 SNÍMKY)	53



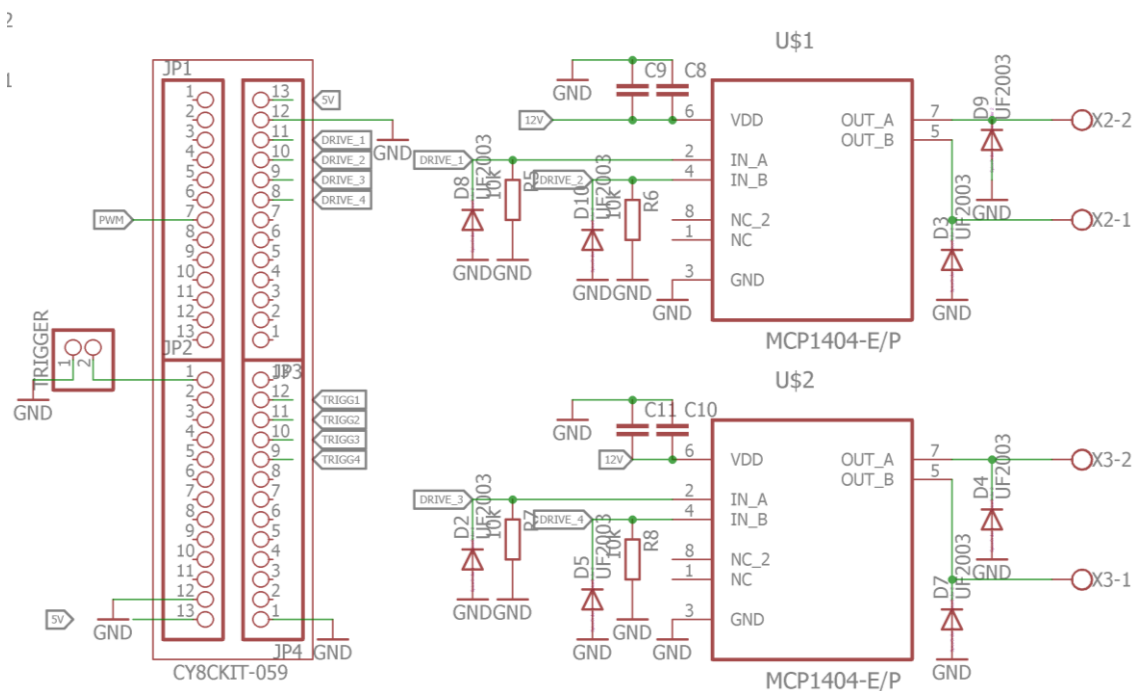
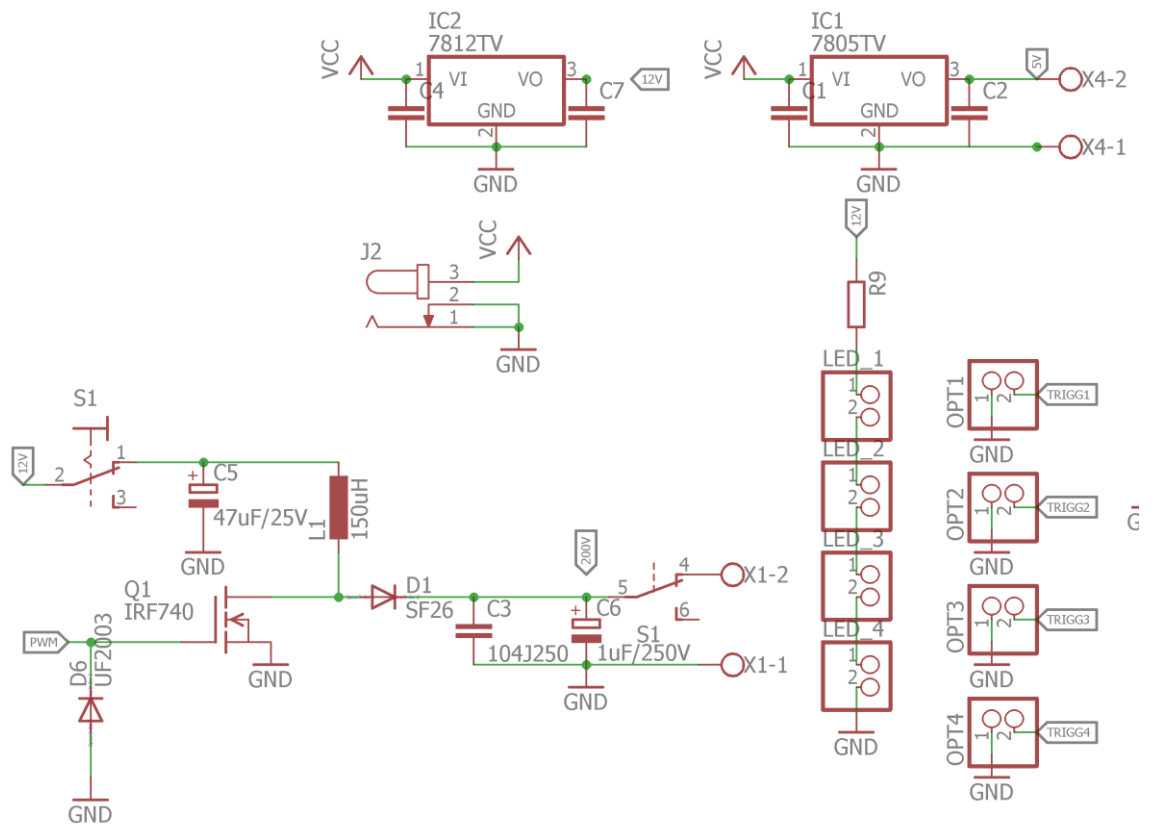




Příloha D *Rozložení DPS s tranzistory a cívkami*



Příloha E Schémata zapojení



Příloha F *Výstřel děla (3 snímky)*

