

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ELEKTROMAGNETICKÉ DĚLO

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTOR

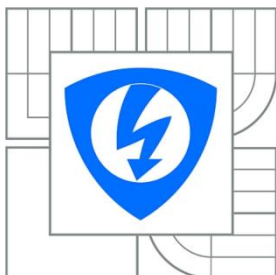
MARTIN KOVAŘÍK

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ELEKTROMAGNETICKÉ DĚLO

COILGUN

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTOR

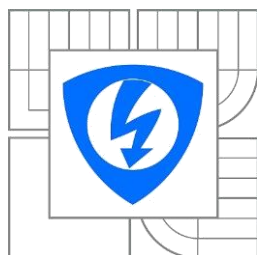
MARTIN KOVAŘÍK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PAVEL ŠTEFFAN, Ph.D.

BRNO 2015



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Mikroelektronika a technologie

Student: Martin Kovařík
Ročník: 3

ID: 155182
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Elektromagnetické dělo

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte konstrukce elektromagnetických děl a na základě takto získaných poznatků navrhnete vlastní konstrukci elektromagnetického děla. Při návrhu se zaměřte na optimalizaci účinnosti, možnosti jejího měření a vyhodnocení. Sestavte korektní budič IGBT tranzistorů, ověřte funkčnost ochranných obvodů a proveďte jejich nastavení. Proveďte měření dosažené účinnosti. Zařízení navrhnete tak, aby bylo možné využít různé materiály projektilu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 10. 2. 2015

Termín odevzdání: 4. 6.

Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.
Konzultanti semestrální práce:

doc. Ing. Jiří Háze, Ph.D.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor Bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato Bakalářská práce se zabývá návrhem a realizací elektromagnetického děla pro testování různých projektilů o maximálním výkonu 19 J. Běžné mechanismy pro urychlování projektilů používají stlačený vzduch nebo explozi, zde ovšem zákony termodynamiky limitují maximální teoretickou úst'ovou rychlost. Elektromagnetické dělo představuje využití elektromagnetizmu pro urychlování projektilů, jež nabízí mnohem vyšší teoretické limity úst'ové rychlosti. Navíc oproti klasickým urychlovacím mechanismům lze snadno regulovat výstupní rychlost/energii projektilu a zrychlení působící na projektil v průběhu urychlování.

Abstract

This bachelor's thesis describes the design and construction of electromagnetic gun for testing projectiles from different ferromagnetic materials with maximal power 19 J. Conventional projectile propulsion mechanisms include the use of compressed air or explosion which places theoretical limits on the maximum muzzle velocity limited by laws of thermodynamics. The electromagnetic coil gun, explores the use of electromagnetism in accelerating projectiles which offers a much higher theoretical limit on muzzle velocity. In addition of an electromagnetic acceleration is possible to regulate output velocity/energy of projectile, and acceleration applied on projectile.

Klíčová slova

Elektromagnetické dělo, elektromagnetická indukce, magnetizmus, aerodynamika, IGBT, Hallův senzor, FEMM, integrovaný obvod, feromagnetický materiál, projektil, budič, spínání induktivních zátěží

.

Keywords

Electromagnetic gun, electromagnetic induction, magnetism, aerodynamics, IGBT, Hall sensor, FEMM, integrated circuit, ferromagnetic material, driver, switching of inductive loads

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma „**Elektromagnetické dělo**“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrálního projektu a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 4. června 2014

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlu Šteffanovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování projektu.

Dále bych chtěl poděkovat doc. Dr. Ing. Miroslavovi Patočkovi za velmi užitečné rady při návrhu korektního budiče IGBT tranzistorů.

V Brně dne 4. června 2015

.....
podpis autora

Bibliografická citace práce: KOVAŘÍK, M. Elektromagnetické dělo. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 53s.
Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Pavel Šteffan, Ph.D.

Obsah

Seznam obrázků.....	8
Seznam použitých symbolů a zkratk	9
Úvod	10
1. Teoretický základ	11
Kolejnicové dělo neboli „railgun“	11
Cívkové dělo neboli „coilgun“	12
1.1 Funkce budiče IGBT.....	12
Galvanické oddělení	13
Oddělení optočlenem.....	13
Oddělení impulzním transformátorem.....	14
Komparátorové ochrany	14
1.2 Magnetické pole solenoidu	15
1.3 Princip funkce cívkového děla.....	18
2. Návrh jednotlivých komponent	20
2.1 Analýza projektilu.....	20
Magnetizmus projektilu.....	20
Rozměry projektilu	21
Materiál projektilu	22
Vodivost materiálu	22
Shrnutí	22
2.2 Výběr kondenzátorů.....	23
2.3 Návrh cívky.....	24
Magnetické stínění cívky.....	24
Kompromis návrhu cívky	26
Onderdonkova rovnice	27
Shrnutí	27
2.4 Návrh nabíječky kondenzátorů	27
2.5 Návrh obvodu pro jeden urychlovací segment	27
Volba výkonového spínacího prvku: Tyristor	27
Volba výkonového spínacího prvku: IGBT nebo výkonový MOSFET	28
Problém při spínání induktivních zátěží	28
2.6 Návrh zapojení.....	28

Schéma zapojení výkonové části	29
Schéma řídicího obvodu děla	29
Proudová regulace	30
Schéma zapojení budiče IGBT	31
Návrh galvanicky odděleného napájení budiče IGBT	32
Návrh počtu závitů transformátoru	32
3. Praktická realizace	34
3.1 První prototyp	34
3.2 Finální verze	35
Hlaveň cívka projektil	35
Návrh DPS budiče IGBT	35
Ovládací DPS	35
Oživování	35
3.3 Měření	36
Závěr	40
Seznam použitých zdrojů	41
Seznam příloh	44

Seznam obrázků

Obrázek 1: Princip kolejnicového děla [15]	11
Obrázek 2: Náčrty cívkového děla [14]	12
Obrázek 3: Blokové schéma budiče tranzistorů	13
Obrázek 4: Vnitřní zapojení optočlenu [2]	14
Obrázek 5: Blokové schéma korektního budiče tranzistorů [5]	15
Obrázek 6: Magnetické siločáry solenoidu [17]	16
Obrázek 7: Princip cívkového děla [16]	18
Obrázek 8: Síla působící na projektil v závislosti na poloze [10] Chyba! Záložka není definována.	
Obrázek 9: Hysterezní smyčka	20
Obrázek 10: Projektil se špatnou aerodynamikou [12]	21
Obrázek 11: Projektil s dobrou aerodynamikou	22
Obrázek 12: Rozložení magnetické indukce na délku cívky	24
Obrázek 13: Vyobrazení rozptylové indukčnosti cívky [11]	25
Obrázek 14: Rozložení indukčnosti na délce cívky s magnetickým stíněním	25
Obrázek 15: Indukčnost cívky s magnetickým stíněním	26
Obrázek 16: Blokové schéma obvodu	28
Obrázek 17: Topologie zapojení výkonové části	29
Obrázek 18: Proudová regulace [13]	30
Obrázek 19: Schéma řídicího obvodu děla	29
Obrázek 20: Schéma budiče IGBT	31
Obrázek 21: Zapojení galvanicky oddělného napájení budiče	32
Obrázek 22: Zapojení testovacího vzorku děla	34
Obrázek 23: Závislost napětí kondenzátoru na ústřední rychlosti elektromagnetického děla ...	36
Obrázek 24: Závislost účinnosti elektromagnetického děla na napětí kondenzátoru	37
Obrázek 25: Závislost účinnosti děla na počáteční poloze projektilu vůči cílce	38
Obrázek 26: Zbytkové napětí v kondenzátoru po výstřelu	39

Seznam použitých symbolů a zkratek

Rail-gun	Kolejnicové dělo
Coil-gun	Cívkové dělo
Suck-back	Zpětné vtahování projektilu do cívky u coilgunu
IGBT	Insulated gate bipolar tranzistor – tranzistor s izolovaným hradlem
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor – tranzistor s nevodivým kanálem
MJ	Mega joule
Gate	Hradlo tranzistoru
Half bridge	Topologie zapojení měniče- poloviční most
SSR	Polovodičové relé
NAND	Logický člen negovaného součinu
HDPE	High density polyethylene
SMD	Surface mount device- součástka pro povrchovou montáž
DPS	Deska plošných spojů

Úvod

Vývoj klasických zbraní se postupně zpomaluje, za poslední roky se většina vylepšení týkala aerodynamiky a kinetiky. Moderní zbraně, jako Barreta M82, dokážou vystřelovat projektily rychlostmi až 2,5x rychleji než rychlost zvuku. Nicméně postupem času budeme hledat technologii na urychlování projektilů na ještě vyšší rychlosti. Elektromagnetické urychlovače, jako kolejnicové děla a cívkové děla, nejsou limitované vlastnostmi rozpínání plynů a teoreticky nemají limity v dosažitelné rychlosti. V současné době však elektromagnetické urychlovače nemůžou konkurovat přenosným zbraním z hlediska výkonnosti a váhy.

Tato práce se bude zabývat především cívkovým dělem, protože je z elektronického hlediska mnohem sofistikovanější. Cívkové dělo funguje jako lineární motor, který je tvořen jednou nebo více cívkami, jimiž protéká přesně načasovaný proud. Pro správnou funkci je extrémně důležité časování jednotlivých proudových impulzů. Jakmile je totiž cívka spuštěna, dříve nebo později dochází k brždění projektilu a výraznému snížení efektivity. Aby se mohlo zajistit takto precizní časování, je třeba kontrolovat polohu projektilu a protékající proud.

Samotný princip cívkového děla je známý od roku 1901 [26], kdy Kristian Birkeland na univerzitě v Oslu postavil cívkové dělo dlouhé 4 m. Celé zařízení se však při veřejném testu z důvodu zkratu zničilo. Za druhé světové války se Japonsko pokusilo vyrobit cívkové dělo urychlující projektil o váze 2 kg na rychlost 2 km/s, ovšem výsledné zařízení dosáhlo rychlosti jenom 335 m/s.

Protože mají cívková děla teoreticky neomezenou ústřevnou rychlost, můžeme uvažovat o použití pro vystřelování projektilů na orbitu. Americká armáda také plánuje nahradit klasické parní katapulty na stíhačky elektromagnetickými. V současné době se instaluje první elektromagnetický katapult na letadlovou loď třídy U. S. Gerald R. Ford. Dále bylo provedeno několik pokusů při odpalování raket Tomahawk. Pro nevojenské použití se dá cívkové dělo použít například pro nastřelovací pistoli na hřebíky.

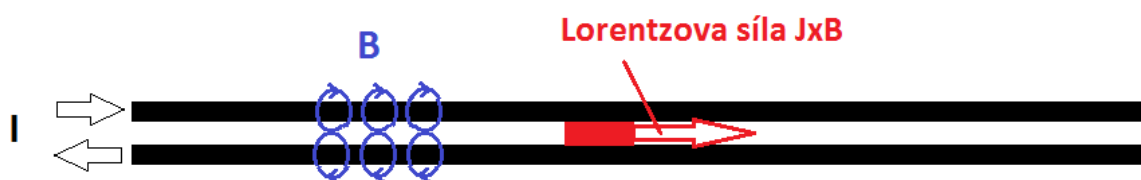
Od praktického využití cívkových děl nás ovšem dělí jejich velmi malá účinnost, která se pohybuje mezi 1-2 %. Částečným řešením tohoto problému v současnosti může být použití moderních výkonových součástek, které nebyly před 15 lety prakticky dostupné. S precizním řízením pomocí moderních součástek by se mohlo podařit zvýšit efektivitu cívkového děla. Dalšími předpoklady pro zvýšení efektivity jsou rekuperace zbytkové energie v cívkách děla a použití děla s více urychlovacími cívkami. Cívkové děla s větším počtem urychlovacích cívek totiž vykazují mnohem vyšší účinnost. Agentura DARPA [14] ve spolupráci s Americkou armádou vytvořila prototyp cívkového děla s využitím 45 cívek a výslednou účinností 22%.

1. Teoretický základ

Kolejnicové dělo neboli „railgun“

Je to elektricky napájená elektromagnetická zbraň, která urychluje vodivý projektil. Mezi dvěma paralelními kolejnicemi se přes projektil uzavře elektrický obvod a projektil je pak urychlován pomocí Lorentzovy síly. Projektil může být jakýkoli vodivý materiál a nemusí být nutně pevného charakteru. Existují kolejnicová děla vystřelující plazmu ve vakuu rychlostí stovek kilometrů za sekundu. Pro použití v atmosféře se uvažuje o tzv. hybridním kolejnicovém děle, kdy velmi rychle se rozpínající plazma má před sebou tlačit projektil z nevodivého materiálu.

Americké námořnictvo ve spolupráci s firmou General electric vytvořilo „railgun“ schopný vystřelovat projektily rychlostí 5 Mach (pětinásobek rychlosti zvuku) silou 33MJ a s dostřelem 200km. Také se uvažovalo o použití kolejnicového děla pro vystřelování satelitů do kosmu, ovšem urychlovací dráha by musela být velmi dlouhá, proto bylo od tohoto konceptu upuštěno.



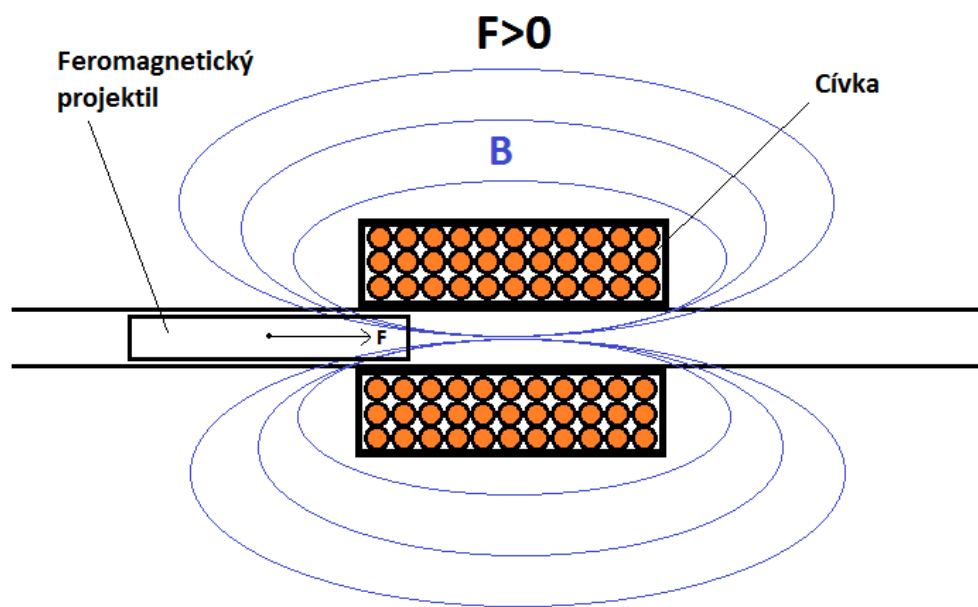
Obrázek 1: Princip kolejnicového děla [15]

I přes jednoduchý princip máme několik technických problémů:

- „Railgun“ potřebuje obrovské množství energie pro provoz
- Při výstřelu se tvoří plazma a ta následně poškozuje kolejnice (musí se po několika výstřelech měnit)
- Síly působící na kolejnice jsou příliš velké, což klade vysoké nároky na technické provedení

Cívkové dělo neboli „coilgun“

Je to zařízení, které urychluje feromagnetický projektil [18] [20] [23] pomocí cívky a pulzního zdroje proudu. Velký proudový impulz procházející přes cívku vytváří silné magnetické pole, které přitahuje feromagnetický projektil. Jakmile je projektil v cívce, proud je vypnut a projektil pokračuje v udaném směru daném počátečním zrychlením. Pokud by se proud nevypnul, tak by docházelo k následnému brždění projektilu (známé jako „suckback“).



Obrázek 2: Nákres cívkového děla [14]

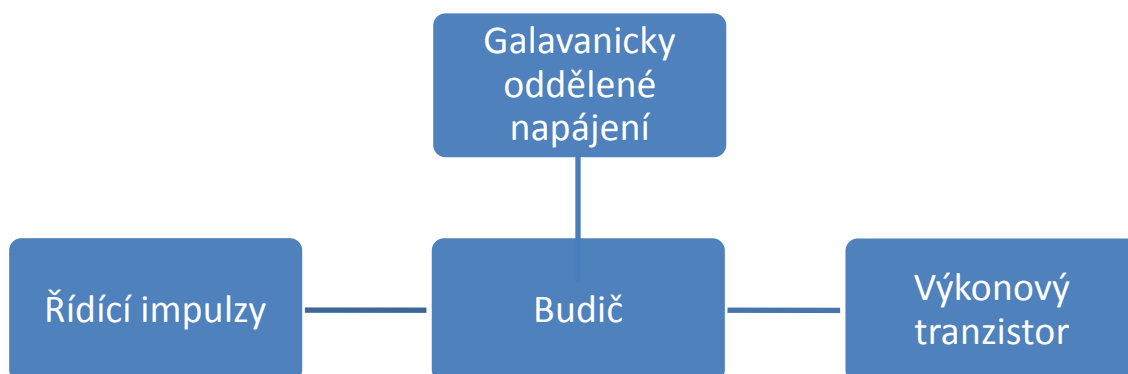
I zde existuje poměrně dost technických problémů:

- Vysoké spínací ztráty (odpor cívky, vodičů)
- Vířivé proudy v projektilu (způsobují ztráty zahříváním vodivého projektilu)
- Nelze okamžitě vybit energii magnetického pole cívky
- „suckback“ efekt je nepřímo spojen s nemožností okamžitě vypínat proud cívkou, pokud je špatné časování a proud se vypíná pozdě, dochází k výraznému brždění projektilu a tím ke snižování účinnosti
- Při příliš vysokém proudu může docházet k saturaci projektilu, kdy při dalším zvyšování proudové špičky nedochází ke zvýšení výstupní rychlosti, z toho důvodu jsou vhodnější vícestupňové děla.

1.1 Funkce budiče IGBT

Budič IGBT je obvod, který zesiluje řídicí signály na napěťové a proudové úrovni potřebné ke spínání tranzistoru. Výstup budiče je připojen na gate a emitor buzeného tranzistoru. Základní úlohou budiče IGBT je zajistit galvanické oddělení na rozhraní mezi řídicími a výkonovými obvody měniče.

Pro návrh budiče je tedy třeba zohlednit galvanické oddělení signálové a výkonové části, použité napájení a minimální kapacitu mezi vstupem a výstupem z důvodu minimalizace kapacitního proudu přes optočleny.



Obrázek 3: Blokové schéma budiče tranzistorů

Galvanické oddělení

Při návrhu budiče je nejdůležitější oddělení řídicího signálu od výkonové části měniče. Pro elektrickou izolaci se využívá optočlenů nebo transformátorů. Galvanické oddělení by mělo mít co nejmenší parazitní kapacitu. V silovém obvodu při spínání mohou strmosti napětí dosahovat až $100\text{kV}/\mu\text{s}$.

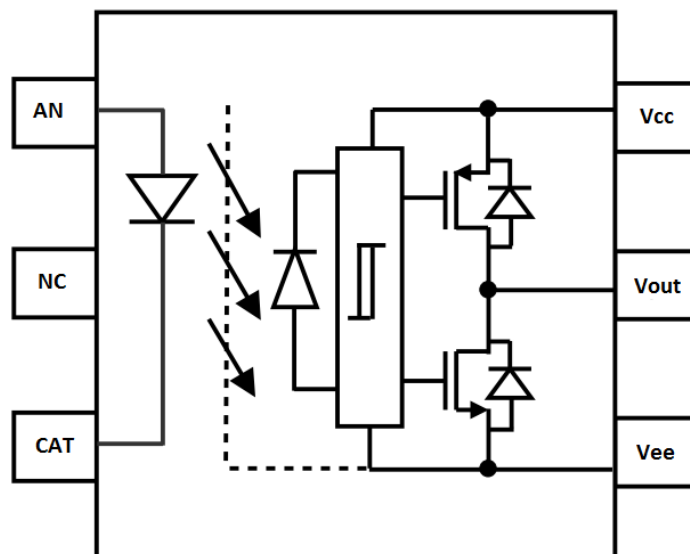
Různé možnosti realizace galvanického oddělení [4]:

- Transformátorová vazba (oddělovací transformátory, měřící transformátory)
- Optická vazba (většinou optočlen, jako přijímač se používá fotodioda a je vhodný pro obvody s velkou strmostí du/dt)
- Mechanické vazby (Elektromechanické - relé, hydraulické, pneumatické)

Oddělení optočlenem

Optočleny se vyznačují nižší parazitní kapacitou a širokým frekvenčním spektrem využití. Pro větší izolační napětí se využívá optických kabelů.

Nejpoužívanějšími typy jsou v dnešní době tranzistorové optočleny, určené pro stejnosměrné napětí. Pro střídavé napětí se pak nejčastěji používají takzvaná SSR (Solid State Relay), které jsou určeny pro velké výkony řádu několika desítek ampérů.



Obrázek 4: Vnitřní zapojení optočlenu [2]

Na obrázku je vyznačeno zapojení konkrétního optočlenu ACPL-P349 od firmy Avago technologies. Výstupní tranzistory upravují signály fotodiody pro řízení tranzistoru. Důležitá kapacita je mezi vysílací a přijímací diodou, kdy u optočlenů se tuto kapacitu daří snížit až na 1pF. Je-li tato kapacita namáhaná napěťovou strmostí du/dt , protéká jí impulzní kapacitní proud.

$$i(t) = C \frac{du(t)}{dt} \quad (1.1)$$

Při kapacitě 1pF a strmosti 20kV/ μ s je tento proud 20mA. Pro redukci vlivu této nežádoucí kapacity se využívá u optočlenů stínící mřížky, která snižuje velikost tohoto proudu na minimum.

Oddělení impulzním transformátorem

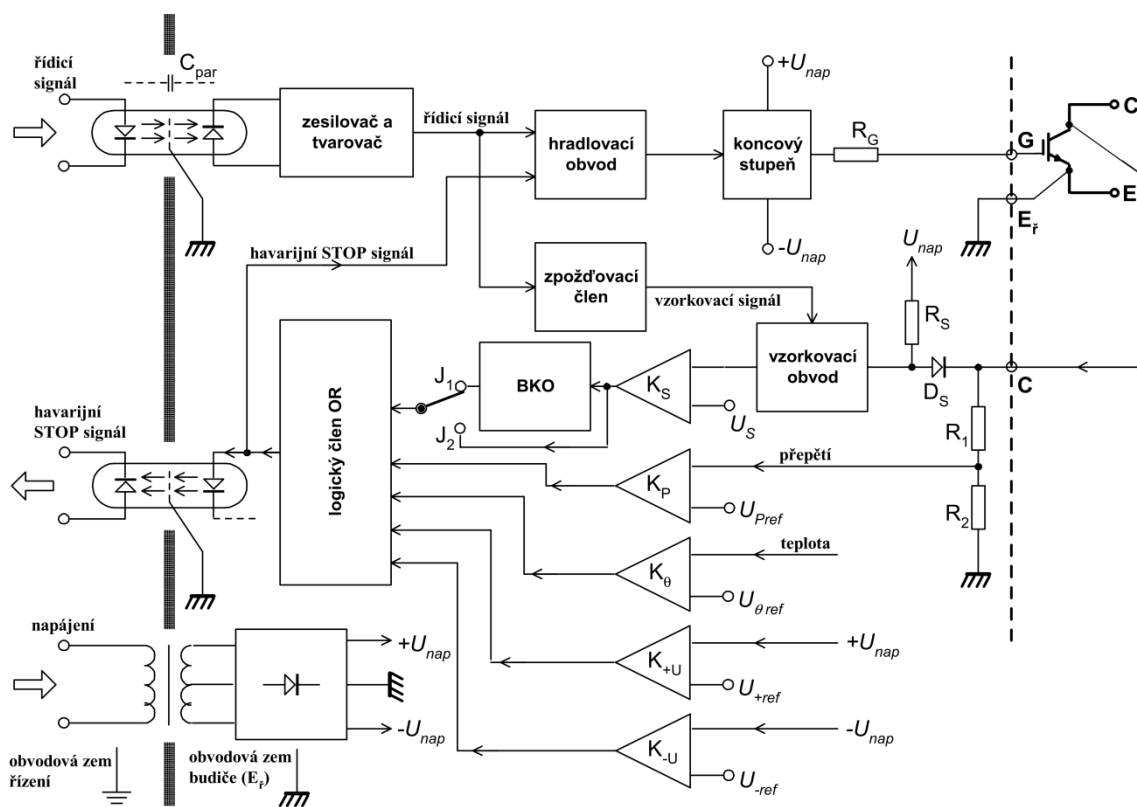
Transformátor může převádět řídicí impulzy do obvodu budiče a také se využívá pro realizaci galvanicky odděleného napájení pro budiče ovládané přes optočleny. U transformátoru je také třeba hlídat parazitní kapacitu mezi primárním a sekundárním vinutím, kdy kapacita začíná být problematická při přesáhnutí hodnoty 5-10 pF.

Komparátorové ochrany

Budič výkonových tranzistorů [1] se ve většině případů nepoužívá pouze pro jednoduché spínání, ale také plní ochranou funkci většinou mnohonásobně dražšího spínacího prvku. Kontrolují většinou 4 základní parametry pro správné sepnutí tranzistoru. Při vybavení jakékoli z ochran dochází k okamžitému vypnutí tranzistoru.

Typy ochran:

- Hlídaní vlastního napájecího napětí budiče – většinou se pomocí dvou komparátorů kontroluje přítomnost a správná velikost kladného a záporného napájecího napětí.
- Hlídaní teploty – u této ochrany je předpoklad, že čidlo teploty bude co nejbližší čipu tranzistoru (uvnitř bezpotenciálového modulu), toto umístění je schopno reagovat i na prudké změny teploty.
- Hlídaní přepětí – při překročení maximálního dovoleného napětí komparátor nesmí dovolit sepnutí tranzistoru
- Saturační ochrana – jedna z nejdůležitějších ochran pro snímání nadproudu přímo na tranzistoru. Je založená na snímání napěťového úbytku na tranzistoru. Díky této metodě nemusíme pro měření využívat bočník a řešení je také prakticky bezindukční, čímž se toto řešení stává velmi rychlým (reakční doba jednotky μs) a levným především pro velké proudy. Komparátor se připojuje na tranzistor přes vysokonapěťovou ultrarychlou diodu, protože při vypnutí tranzistoru je na něm plné napětí zdroje, které by zničilo komparátor.

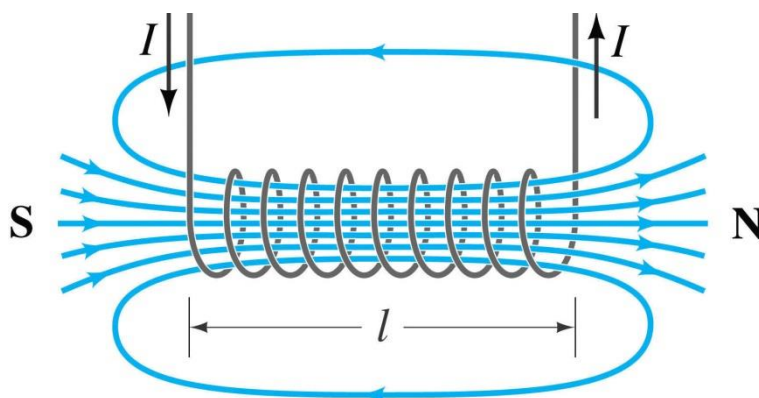


Obrázek 5: Blokové schéma korektního budiče tranzistorů [5]

1.2 Magnetické pole solenoidu

Solenoid [24] je tvořen dlouhým vodičem, který je hustě navinut tak, že vytváří závitů kruhového průřezu po celé jeho délce. Délka solenoidu je většinou mnohem větší než jeho průměr, takže můžeme zanedbat rušivý vliv začátku či konce vinutí.

Průběh magnetického pole solenoidu lze určit z průběhu pole jednotlivých závitů. V případě dostatečně dlouhého a hustě vinutého solenoidu se pole od jednotlivých závitů sčítá tak, že uvnitř solenoidu je homogenní magnetické pole.



Obrázek 6: Magnetické siločáry solenoidu [17]

Vektor magnetické indukce popisující pole uvnitř solenoidu směřuje podél jeho osy. Směr se určí pomocí pravidla pravé ruky. Magnetické pole vně solenoidu lze považovat za přibližně nulové a uvnitř solenoidu bude pole homogenní. Velikost magnetické indukce se určí pomocí Ampérova zákona.

$$\int_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_c \quad (1.2)$$

Jako uzavřená Ampérova křivka se volí obdélník abcd se stranami délky L rovnoběžnými s osou solenoidu.

Integrál na levé straně Ampérova zákona lze rozdělit na součet čtyř integrálů, každý pro jeden ze čtyř úseků pravoúhlé křivky

$$\int_{abcd} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_a^b \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_b^c \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_c^d \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_d^a \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (1.3)$$

Pro celou pravoúhlou křivku po úpravě získáme

$$\int_l \vec{B} \cdot d\vec{l} = Bh \quad (1.4)$$

Výsledný proud I_c je proud pro všechny závity solenoidu. Pro počet závitů na jednotku délky n , je

$$I_c = nhI \quad (1.5)$$

pro velikost magnetické indukce platí

$$Bh = \mu_0 n h I \quad (1.6)$$

Magnetická indukce

Tvar magnetického pole lze popsat magnetickými indukčními čarami. Magnetická indukce je fyzikální veličina, která vyjadřuje silové účinky magnetického pole na částice s nábojem nebo magnetickým dipólovým momentem. Magnetická indukce je síla, kterou magnetické pole působí na pohybující se elektrický náboj. Velikost magnetické indukce B v určitém místě magnetického pole je definována jako maximální síla F_{max} , kterou působí magnetické pole na náboj Q , který se pohybuje rychlostí v

$$B = \frac{F_{max}}{Qv} \quad (1.7)$$

Velikost mag. indukce cívky (solenoidu) je:

$$B = \mu \frac{NI}{l} \quad (1.8)$$

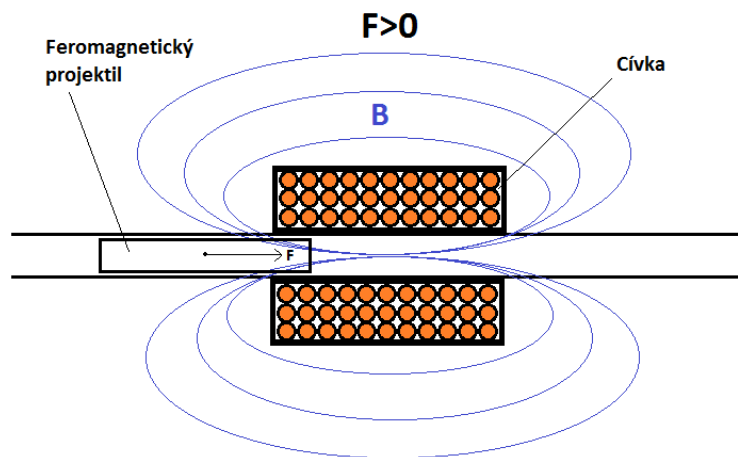
kde N je počet závitů cívky, I je proud procházející cívkou a l délka cívky. Uvnitř cívky je homogenní magnetické pole.

Permeabilita μ se počítá z μ_0 je permeabilita vakua ($1.26 \times 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$) a μ_r je relativní permeabilita.

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (1.9)$$

1.3 Princip funkce cívkového děla

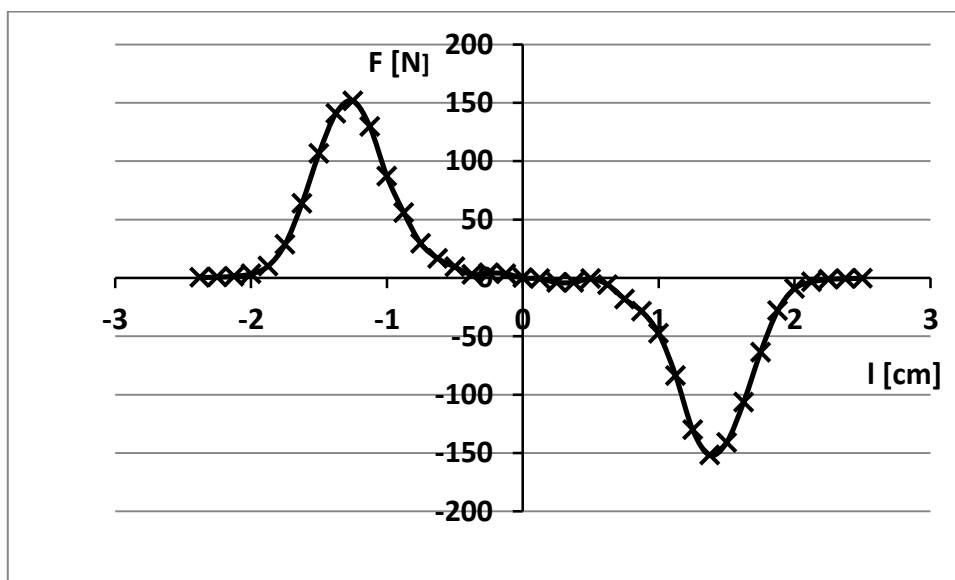
Proud procházející cívkou vytvoří kolem cívky silné magnetické pole. Ve feromagnetickém materiálu se natočí magnetické dipóly a začne být vtahován do cívky.



Obrázek 7: Princip cívkového děla [16]

Toto urychlování se děje doté doby, dokud se nepotká magnetický střed cívky a magnetický střed projektilu. Pokud bude cívkou procházet proud dodávaný z kondenzátoru, i po té co magnetický střed projektilu přesáhne magnetický střed cívky, dojde k otočení magnetických dipólů projektilu a bude docházet naopak k brždění projektilu.

Výpočet síly působící na projektil je poměrně složitý, proto je vhodnější provést simulaci.



Obrázek 8: Síla působící na projektil v závislosti na poloze [10]

Z obrázku vyplívá, že za středem cívky na projektil působí síla v opačném směru stejné velikosti, jako jej urychlila. Proto při konstantním proudu obvodem projektil ani neopustí cívku. Pro konstrukci cívkového děla je kritické tento jev odstranit, jinak by dělo nemohlo být nikdy funkční.

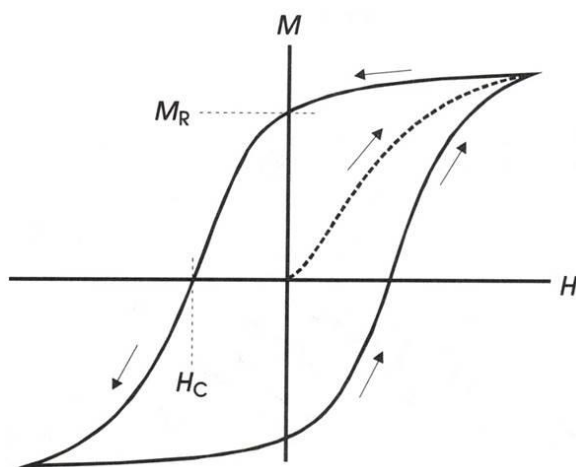
2. Návrh jednotlivých komponent

V této části bude popisován samotný návrh komponent děla [7] ze stránky mechanické, materiálové a elektronické.

2.1 Analýza projektilu

V prvním kroku analýzy bude zvolen vhodný materiál pro projektil. Pro snazší určování polohy projektilu vůči cívce je vhodné, aby byl projektil stejně dlouhý jako cívka.

Magnetizmus projektilu



Obrázek 9: Hysterezní smyčka

Uvažujme hysterezní smyčku na obrázku. Pro projektil je vhodné, aby měl materiál, ze kterého bude vyroben velmi úzkou a vysokou hysterezní smyčku. To znamená, že se bude schopen magnetizovat a demagnetizovat velmi rychle při přiložení magnetického pole. Nevhodné materiály pro projektil se širokou a nízkou hysterezní smyčkou jsou používány v magnetických pamětech nebo v permanentních magnetech. S použitím těchto materiálů by projektil dosahoval menší možné magnetizace a velkých ztrát vlivem hystereze. Takový projektil by dosahoval nižší výstupní rychlosti a efektivity.

Váha projektilu

Lehčí projektily budou potřebovat méně energie na urychlení na vyšší rychlosti (vychází z teoremu o kinetické energii).

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

Ovšem pokud bude projektil příliš malý, přejde rychle do saturace, působící pole již nebude moci dále zvětšovat magnetizaci a indukce bude vzrůstat pomaleji. Naskýtá se zde kompromis, pokud bude projektil příliš těžký, riskujeme, že se zcela nezmagnetizuje.

Projektil bude jen částečně zmagnetován a potáhne za sebou nezmagnetizovanou pravou polovinu bez užitku.

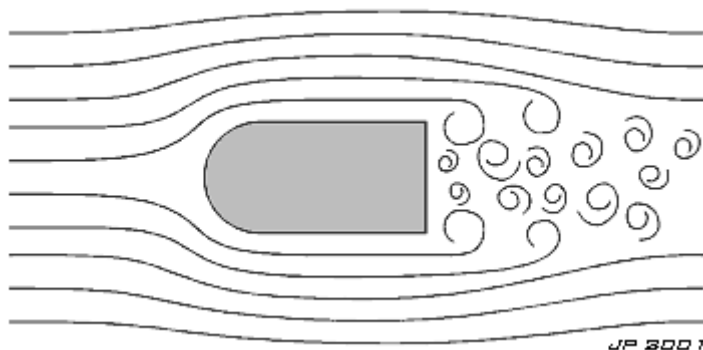
Rozměry projektilu

Projektil musí být velmi blízko cívice, aby se co nejvíc zesílil magnetický tok, jinak bude energie uložená více ve vzduchu kolem projektilu, než v projektilu samotném. To znamená, že průměr projektilu by měl být co nejbližší průměru otvoru v cívce. Projektil by neměl, být delší než cívka, protože by se pak nemusel celý zmagnetovat nebo by mohl být vtahován zpět do cívky.

Aerodynamika projektilu

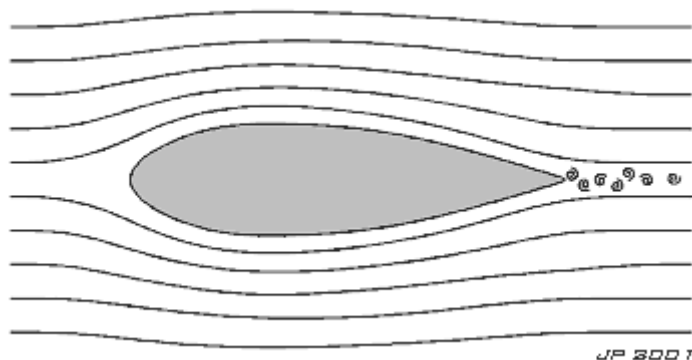
Tvar projektilu má výrazný vliv na jeho výsledné aerodynamické vlastnosti [25]. Základní aerodynamické tvary projektilů lze rozdělit na jednoduchý válec se špičkou nebo zaoblením a projektil kapkovitého tvaru.

Pro testování děla bude použit projektil válcovitého tvaru se špičkou. Takovýto tvar vytváří při letu za sebou turbulence, které brzdí a vychylují projektil z dráhy. Tento tvar byl zvolen, protože je jednoduché ho vyrobit a aerodynamika projektilu tak výrazně neovlivňuje úst'ovou rychlost, což bude hlavní parametr výkonosti děla.



Obrázek 10: Projektil se špatnou aerodynamikou [12]

Projektil kapkovitého tvaru výrazně snižuje turbulence vytvářené za letu a s použitím křidélek lze provádět ještě přesnější stabilizaci. Pro elektromagnetické dělo však není příliš vhodný z důvodu nerovnoměrného rozložení materiálu na jeho délce. To by mělo za následek posunutí jeho magnetického středu a nebylo by možné přesně určit polohu pro vypnutí proudu do cívky a hrozil by „suckback“ efekt.



Obrázek 11: Projektil s dobrou aerodynamikou

Materiál projektilu

Projektil musí být feromagnetický. Diamagnetický je nevhodný, protože magnetické pole je oslabováno magnetizací materiálu a paramagnetický materiál má malou magnetickou susceptibilitu. Feromagnetický materiál má velkou magnetickou susceptibilitu a tak je ideální pro tuto aplikaci.

Permeabilita se určí jako podíl indukce a intenzity magnetického pole:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (2. 2)$$

Z rovnice vyplývá, že permeabilita bude mít velký vliv pro výběr materiálu pro projektil. Nejvhodnější bude materiál s co nejvyšší permeabilitou za účelem maximálního zvýšení indukce.

Vodivost materiálu

Materiál by neměl být vodivý, popřípadě by měl mít co nejnižší konduktivitu. Ve vodivých materiálech totiž vznikají vířivé proudy, které se při výstřelu chovají jako odpor. Indukované proudy vytvářejí svoje vlastní magnetické pole, které působí opačným směrem než magnetické pole působící na projektil (Lenzův zákon), výsledkem je převod kinetické energie na ztráty - teplo.

Shrnutí

Zkoumáním byl zvolen jako nejvhodnější nevodivý projektil. Jeho délka je stejná jako délka cívky. Průměr je více než třikrát menší než jeho délka a je přibližně tak velký jako průměr otvoru v cívce. Vybírání materiálu projektilu je tedy podobné jako vybírat materiál na transformátor.

Použitelné materiály jsou tedy: měkká ocel, ocel pro transformátorové plechy a ferrit. Nejlepší možností je měkká ocel (vysoce koncentrované magnetické pole, malé hysterezní ztráty, bohužel má vysokou vodivost a tím i větší ztráty vířivými proudy) nebo ferritový materiál (malé ztráty vířivými proudy, malá hystereze, středně velká permeabilita). Pro testování bude však použit projektil ze standartní oceli z důvodu snadné dostupnosti a jednoduchému opracování na požadovaný tvar.

2.2 Výběr kondenzátorů

Pro naši aplikaci bude nejvhodnější zvolit kondenzátor s co nejvyšším napětím, jelikož podle rovnice bude mít uloženo nejvíc energie.

$$W = \frac{1}{2} C * U^2 \quad (2.3)$$

Indukčnost cívky a odpor celého obvodu limitují strmost nabíhání proudu do jeho maximální hodnoty. Toto ovlivňuje velikost integrálu, která odpovídá síle a akceleraci udělené projektilu. Musíme tedy zvolit takový kondenzátor, aby byla plocha pod vybíjecí křivkou co největší. Čas nelze prodloužit, protože proud cívku může téct jenom do doby, než projektil dosáhne středu, jinak by se vtahoval zpět do cívky. Jediná možnost jak zvýšit dodanou energii je navýšení proudu. Toho lze dosáhnout zvýšením napětí na kondenzátorech a snížením odporu obvodu.

Potřebujeme tedy, aby se kondenzátor rychle nabíjel a vybíjel. Vybereme tedy vysokonapěťový kondenzátor s vysokou kapacitou pro uložení co největšího množství energie. Také je vhodné zvolit model s co nejnižším ESR. Z finančních důvodů byl zvolen darovaný kondenzátor 4700 μ F/400 V od firmy CornellDublier.

Kapacita	4700 μ F
Napětí	400 V
ESR	37 m Ω
Výška	20 cm
Průměr	8 cm

Tabulka 1: Charakteristiky kondenzátoru

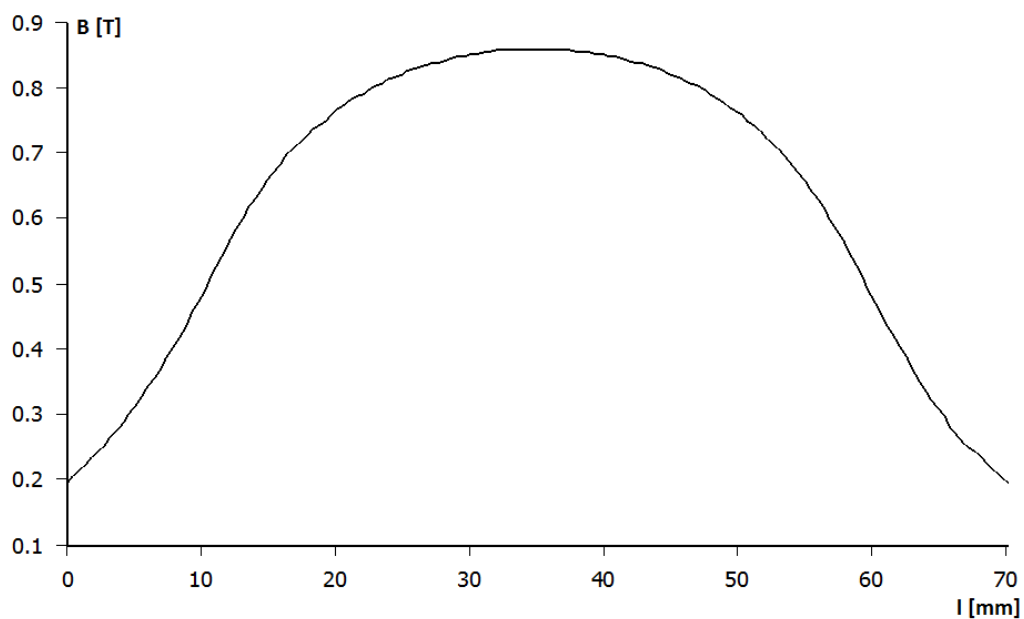
Hliníkové elektrolytické kondenzátory jsou pro elektromagnetické dělo vhodné. Existují také polypropylénové, které jsou na vyšší napětí a mají ESR v jednotkách m Ω . Nevýhodou u nich je však poměrně vysoká cena. Elektrolytický kondenzátor nabízí nejlepší parametry vzhledem k jeho ceně.

2.3 Návrh cívky

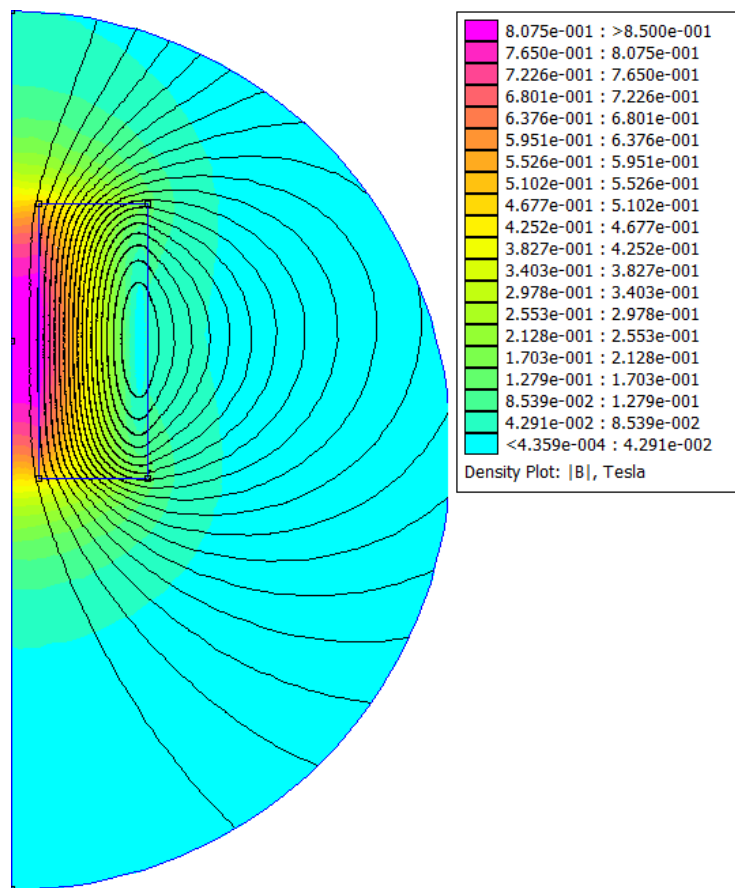
Délka cívky je již předem dána velikostí projektilu. Ovšem stále jsou zde ostatní parametry, jako je počet závitů a počet vrstev.

Magnetické stínění cívky

Vzduchová cívka bez jádra má poměrně velké ztráty magnetického toku vyzařováním do okolí. Tyto ztráty mají za následek nehomogenní pole uvnitř cívky a celkové snížení účinnosti.

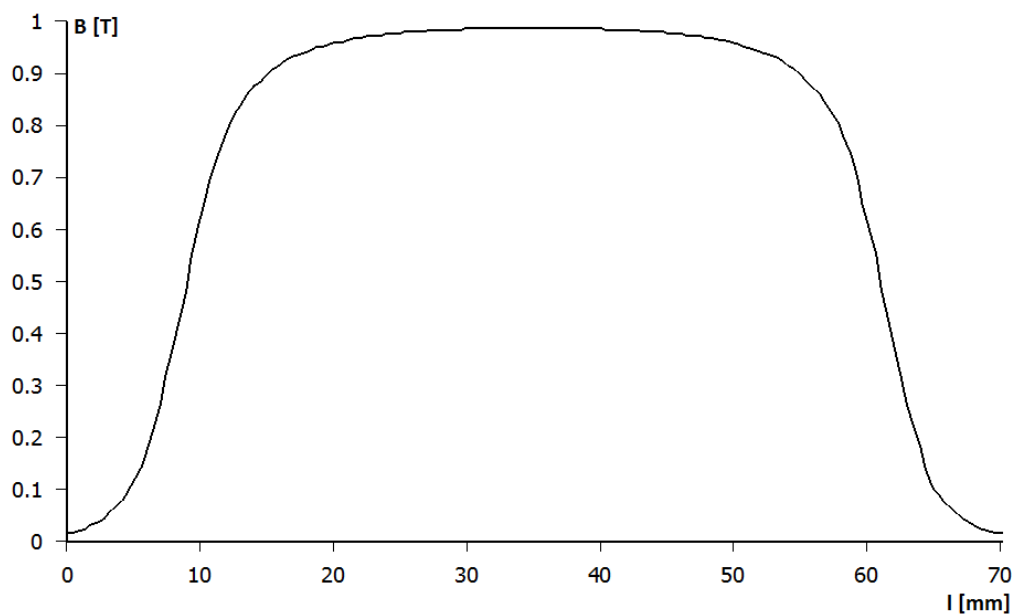


Obrázek 12: Rozložení magnetické indukce na délku cívky

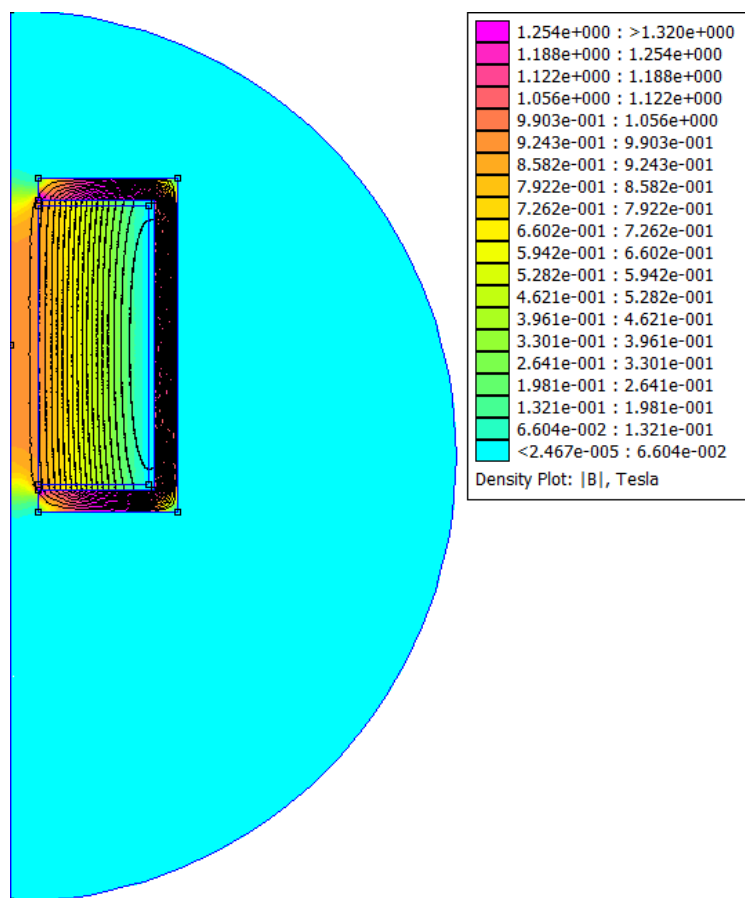


Obrázek 13: Vyobrazení rozptylové indukčnosti cívky[11]

Z provedených simulací je patrné zvětšení magnetické indukce a podstatná redukce vyzařování magnetického pole do okolí. Navíc pole uvnitř cívky je se stíněním mnohem více homogenní a to především u okrajů cívky.



Obrázek 14: Rozložení indukčnosti na délce cívky s magnetickým stíněním



Obrázek 15: Indukčnost cívky s magnetickým stíněním

Kompromis návrhu cívky

Magnetické pole cívky je přímo úměrné počtu závitů na cívce a protékajícím proudem. Použití tenčích vodičů dovoluje namotat více závitů, což má za následek silnější magnetické pole. Ovšem s počtem závitů se zvyšuje odpor a při vyšší indukčnosti se snižuje strmota nabíhání proudu na maximální hodnotu. Z toho vyplývá, že pro vícestupňový „coilgun“ je vhodné pro první urychlovací cívku namotat více závitů z důvodu maximalizace prvotního urychlení, které trvá nejdéle. Další cívky budou sepnuty po kratší dobu a velká indukčnost by mohla zapříčinit nepříznivou limitaci proudu. Z tohoto důvodu se bude na dalších cívkách počet závitů snižovat.

Musí být také použit vodič s dostatečným průměrem, aby zvládl přenést velké proudy. Při použití malého průměru by hrozilo roztavení vodiče.

Onderdonkova rovnice

I.M. Onderdonk vytvořil rovnici, která odhaduje proud, při němž se za danou dobu roztaví měděný vodič:

$$I = 343,5 * S \sqrt{\frac{\text{Log} \left(\frac{234+T_m}{234+T_a} \right)}{\tau}} \quad (2.4)$$

Kde T_m = Maximální dovolená teplota vodiče, T_a = Okolní teplota (pro průmysl obvykle 40°C), τ = Doba trvání proudového impulsu [s], S = Plocha vodiče [mm²]

Shrnutí

Na základě Onderdonkovy rovnice vyplynulo, že použitý vodič s průřezem 1,5 mm² je více než dostačující. Proud procházející skrz vodič bude procházet ve velmi krátkých impulzech. Pro roztavení vodiče při 5 ms impulsu je potřeba přibližně 6 kA. U konstruovaného děla je maximální navržený proud 400 A. Z toho vyplývá, že rezerva je více než dostačující.

2.4 Návrh nabíječky kondenzátorů

V současné době není realizována žádná speciální nabíječka [19] pro účely elektromagnetického děla. Pro nabíjení se používá regulovatelný síťový transformátor Křížík RAT10 a zdvojovač napětí. Kondenzátor je nabíjen přes žárovku, která funguje jako proudová regulace nabíjení. Současně použitý způsob nabíjení je pouze pro laboratorní účely.

Pro další vývoj je plánována nabíječka kondenzátorů o výkonu ~300 W. S tímto výkonem dokáže nabít nabíječka kondenzátor na 400 V za méně než 1 s. Nabíječka by měla být schopna nabít nezávisle 3 kondenzátory na různé napětí. Ideálně by byla řízená mikroprocesorem a na displeji by zobrazovala přímo hodnoty napětí/energie uložené v kondenzátorech. K mikroprocesoru by měla být připojena optická brána pro měření rychlosti projektilu. Z hodnot spotřebované energie a výsledné rychlosti projektilu by mikroprocesor na displeji zobrazoval hodnotu účinnosti výstřelu.

2.5 Návrh obvodu pro jeden urychlovací segment

Volba výkonového spínacího prvku: Tyristor

Nejčastěji se pro spínání „coilgunů“ používají tyristory. Dokážou spínat velké proudy, aniž by došlo k jejich zničení, jsou cenově dostupné a snadno se řídí. Nevýhoda tyristorů spočívá v nemožnosti jejich vypnutí, dokud proud procházející přes tyristor nedosáhne nuly. Pokud odpojíme řídicí napětí, nemá to na tyristor žádný účinek, protože pomocí hradla můžeme tyristor jenom zapnout. Pokud projektil pohybující se cívkou projde za její střed a obvodem bude stále protékat proud, na projektil začne působit síla, která ho bude brzdit, což značně sníží výslednou efektivitu.

Volba výkonového spínacího prvku: IGBT nebo výkonový MOSFET

Pro spínání elektromagnetického děla je tedy vhodný prvek, který se dokáže vypnout a vydržet velké napětí a proudy. Tyto požadavky splňují IGBT tranzistory a výkonové tranzistor MOSFET.

Pro spínání byl zvolen IGBT tranzistor, protože výkonový MOSFET je vhodný pro velká napětí, ale už není vhodný pro velké proudy, které se vyskytují v „coilgunu“. IGBT je bipolární tranzistor řízený tranzistorem MOSFET a má podobné parametry jako tyristor. Tranzistor IGBT je schopen zvládnout velké napěťové špičky a zároveň přenášet velké proudy. Pro aplikaci byl zvolen bezpotenciálový modul Toshiba MG400Q1US41 [21], který je dimenzován na průrazné napětí 1200V a 400A trvalého proudu, ztrátový výkon 2400W.

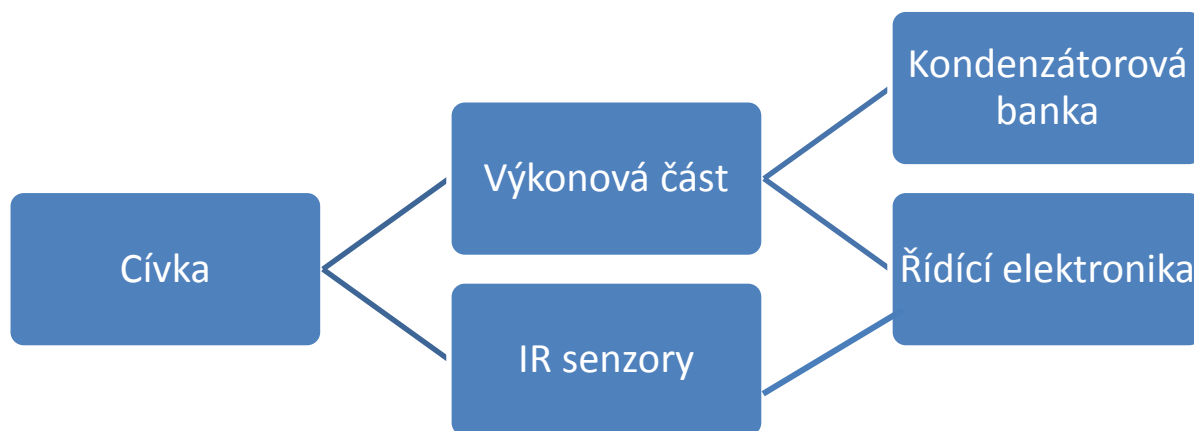
Problém při spínání induktivních zátěží

U induktivních zátěží musí být spínací prvek dimenzován na velké závěrné napětí. Cívka vzdoruje jakékoli změně proudu, což má za následek velkou změnu napětí při vypnutí proudu:

$$U_L = L \frac{di}{dt} \quad (2.5)$$

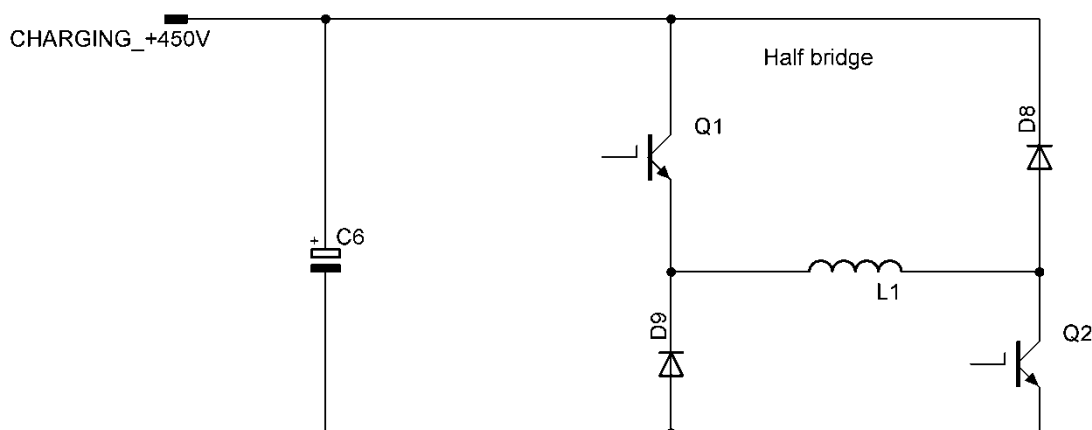
Napětí při průchodu proudu je poměrně neškodné, jakmile se ale spínací prvek vypne, napětí na cívce se okamžitě přepóluje a vytvoří velký záporný impulz (o velikosti až 1,2 kV). Tento jev blíže popisuje Lenzův zákon. Magnetické pole se snaží udržet a indukuje proud, který působí proti poli, které ho vytvořilo. Ochranou proti těmto napěťovým špičkám jsou nulové diody, které energii z cívky předají do kondenzátoru.

2.6 Návrh zapojení



Obrázek 16: Blokové schéma obvodu

Schéma zapojení výkonové části

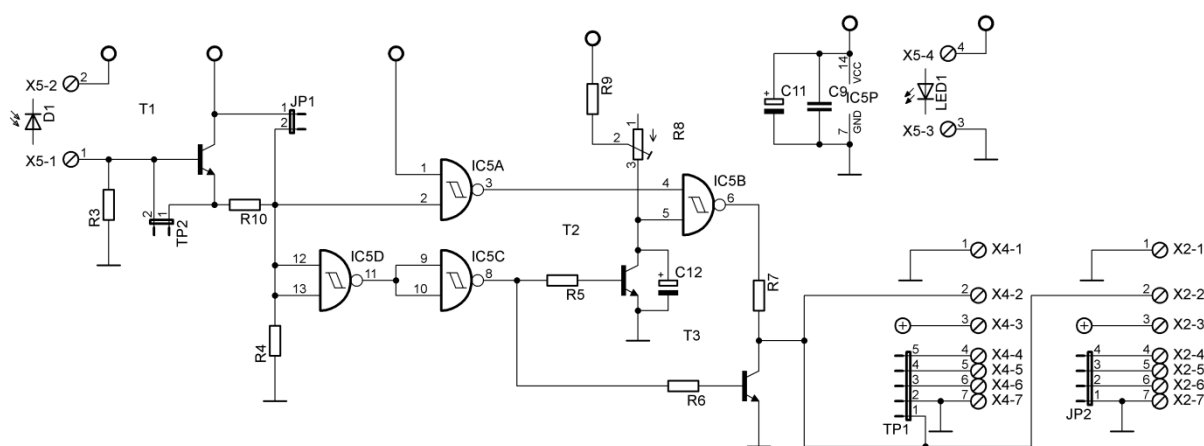


Obrázek 17: Topologie zapojení výkonové části

Obrázek 17 ukazuje výkonový obvod, který bude použit u každého dalšího stupně pouze s drobnou změnou indukčnosti či kapacity kondenzátoru. Na pin CHARGING_+450V se přivádí napětí z nabíječky, které nabíjí hlavní kondenzátor – zdroj proudu pro cívku. Jako topologie zapojení je použit jednočinný propustný měnič o jednom směru proudu a dvou polaritách napětí. Díky této topologii zde lze snadno provádět regulaci proudu. Regulace proudu pomůže linearizovat proud, který poteče přes cívku a také ochrání IGBT tranzistory před přetížením.

Pro ochranu před napěťovými špičkami na přívodních kabelech při spínání tranzistorů jsou řazeny paralelně RC členy s vysokonapěťovým fóliovým kondenzátorem.

Schéma řídicího obvodu děla



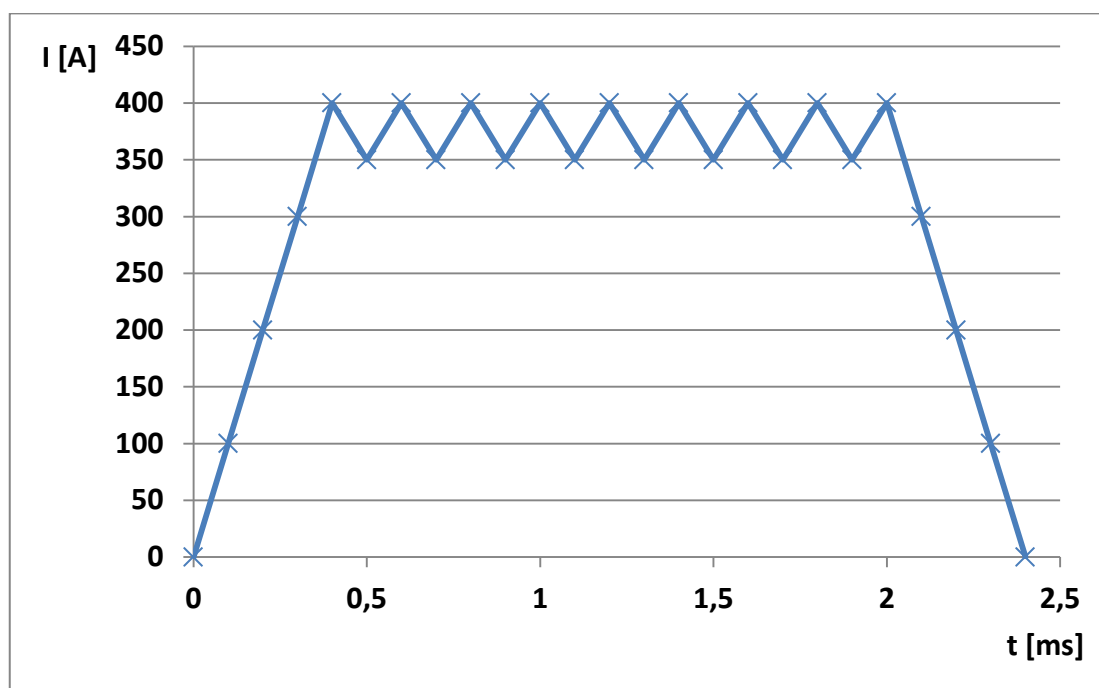
Obrázek 18: Schéma řídicího obvodu děla

Na obrázku 19 je zapojení řídicího obvodu děla. Obvod slouží k napájení signálové části budiče IGBT a zároveň generuje řídicí impulzy pro výstřel. Řídicí impuls je vygenerován, jakmile projektil zastíní optickou bránu. V obvodu je zakomponovaná ochrana,

kdy maximální délka impulzu je omezená na 5 ms, aby nedošlo poškození tranzistorů. Při zastínění optické brány dojde k uzavření tranzistoru T2 a kondenzátor C12 se začne nabíjet. Jakmile kondenzátor dosáhne napětí potřebné pro překlopení hradla NAND, výstup přejde do hodnoty LOG0.

Proudová regulace

Díky vhodné zvolené topologii zapojení výkonové části je snadné realizovat proudovou regulaci v urychlovací cívce. Proud se snímá pomocí proudového transformátoru s Hallovým senzorem a přes komparátor je vyhodnocován protékající proud.



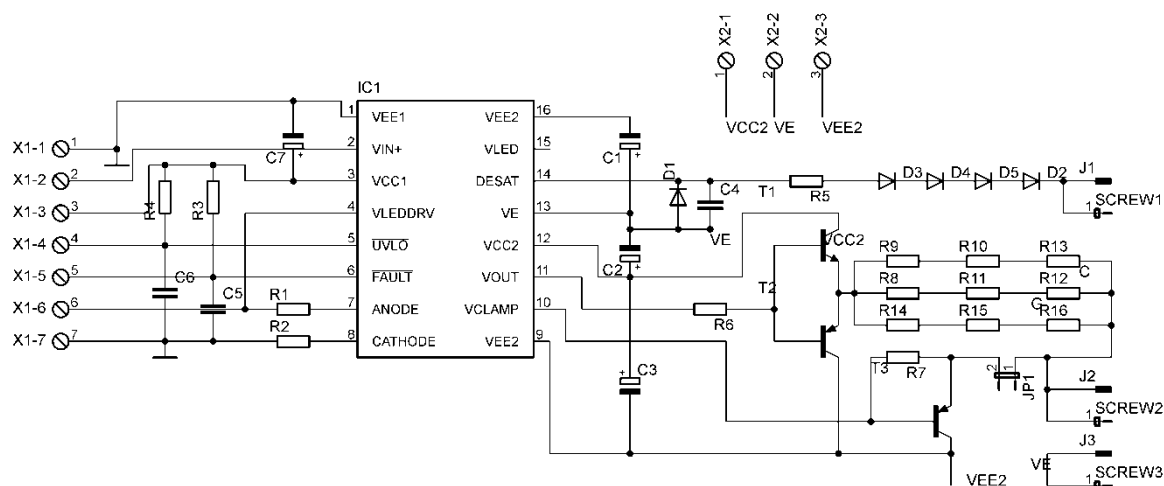
Obrázek 19: Proudová regulace [13]

Na obrázku 18 je znázorněn proudový průběh na cívce při vybavování proudové regulace. Nejprve je vidět jak proud stoupá strmostí:

$$S_i = \frac{U_L}{L} = \frac{400}{L} = 18,18 \text{ A}/\mu\text{s} \quad (2.6)$$

Při vypnutí obou tranzistorů začne proud klesat stejnou strmostí, jako stoupal. Napětí na cívce opět musí vystoupat na 400 V, aby se energie mohla dodávat do zdroje. Pokud se ovšem vypne pouze jeden tranzistor, proud se bude točit ve smyčce. Strmost klesání prouduse sníží 10x, což má navíc pozitivní vliv na nutný počet sepnutí tranzistorů při jenom proudovém impulzu.

Schéma zapojení budiče IGBT

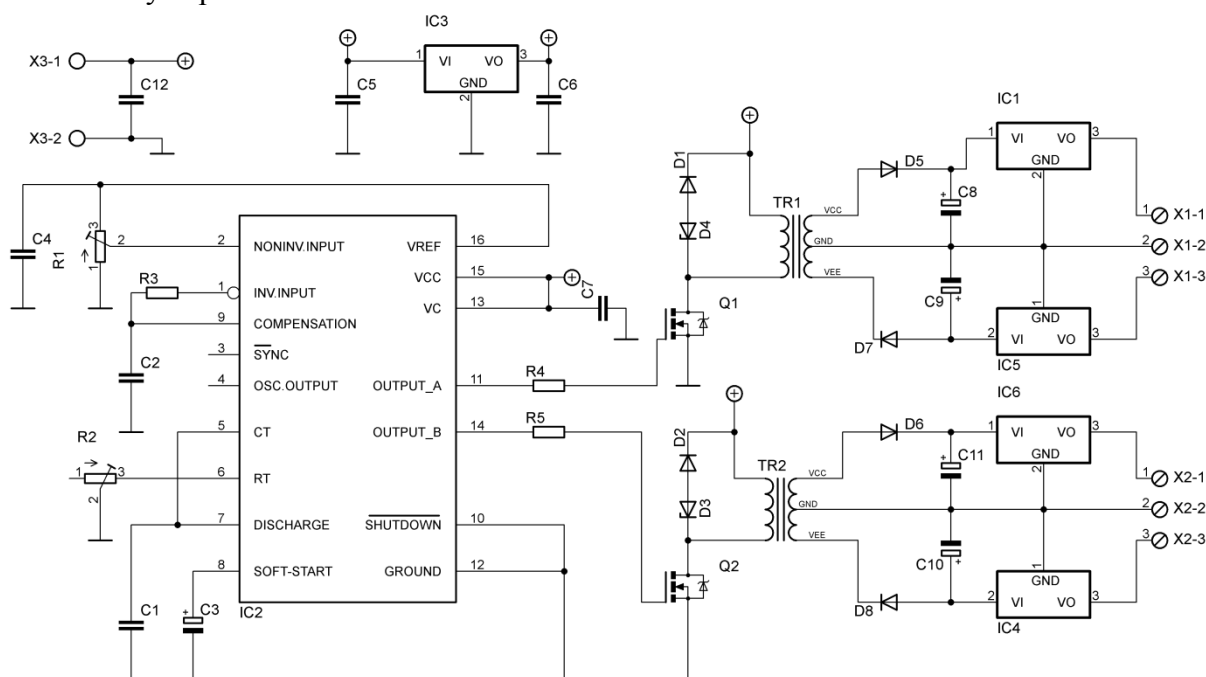


Obrázek 20: Schéma budiče IGBT

Obrázek 20 ukazuje zapojení obvodu pro řízení IGBT tranzistorů. Je zde použitý integrovaný obvod ACPL 337J. Jedná se o speciální optočlen pro řízení IGBT tranzistorů s vestavěnou saturační ochranou. Zapojení je použito z katalogového listu s upravenou výstupní částí pro posílení proudového výstupu k řízení IGBT tranzistorů na 400 A. Saturační ochrana funguje tak, že přes sepnutý tranzistor protéká konstantní proud a měří se úbytek napětí na tranzistoru. Pokud bude na tranzistoru příliš velký úbytek napětí – nadproud ACPL 337J automaticky vypne IGBT tranzistor a pin FAULT přejde na dobu 8ms na log0. Vypínání IGBT tranzistoru při chybě, se provede pomocí tzv. soft turnoff metody, kdy se tranzistor vypíná velmi pomalu, aby se zabránilo velkým napětovým špičkám při rychlém vypínání při kritické chybě. Tento IO má také základní ochranu proti nízkému napájecímu UVLO.

Návrh galvanicky odděleného napájení budiče IGBT

Protože je třeba galvanicky oddělit výkonovou část od signálové, byl navržen zdroj pro galvanicky oddělné napájení budičů IGBT tranzistorů. Jako zdroj řídicího signálu pro měnič byl použit integrovaný obvod SG 3525AN. Pomocí trimrů je nastaven na frekvenci 100 kHz a efektivní střidu 0,43. Budicí obvod primárního vinutí transformátoru je zapojen jako jednočinný blokující měnič s demagnetizací do zenerovy diody. Toto zapojení bylo zvoleno pro svou jednoduchost, přestože není pro tuto aplikaci běžné. Na sekundární straně jsou zapojeny rychlé usměrňovací diody, jako špičkové detektory, které nabíjejí kondenzátory. Z důvodu co nejlepšího galvanického oddělení nesplňuje transformátor úplně ideálně podmínku magnetické vazby a dochází ke zvýšení výstupního napětí vlivem větší rozptylové indukčnosti vinutí. Toto vyšší napětí je stabilizováno stabilizátory napětí na +15 V a -15 V.



Obrázek 21: Zapojení galvanicky oddělného napájení budiče

Návrh počtu závitů transformátoru

Počet závitů primárního [6] transformátoru N_1 se navrhuje podle vztahu:

$$N_1 = \frac{U_{CC} \cdot T \cdot S_{max}}{B_m \cdot 10^3} \quad (2.7)$$

T je perioda spínání určená z převrácené hodnoty frekvence měniče 100 kHz.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100 \cdot 10^3} s = 10 \cdot 10^{-6} s = 10 \mu s \quad (2.8)$$

Maximální střida se v praxi volí $S_{max}=0,45$.

B_m se v praxi volí v rozsahu 0,2 T – 0,3 T, byla zvolena hodnota $B_m=0,25$ T.

S_{Fe} Toroidu z dokumentace $S_{Fe}=15 \text{ mm}^2$, protože pro jedno jádro by vyšel příliš velký počet závitů, použijí se 3 jádra a pak $S_{Fe}=45 \text{ mm}^2$.

$$N_1 = \frac{U_{CC} \cdot T \cdot S_{max}}{B_m \cdot 10^3} = \frac{15 \cdot 10 \cdot 10^{-6} \cdot 0.45}{0,25 \cdot 45 \cdot 10^{-6}} = 6 \quad (2.9)$$

Budič je napájen napětím $U_{CC}=15,5 \text{ V}$, pro kompenzaci úbytku napětí na budícím tranzistoru. Na sekundárním vinutí transformátoru je požadováno napětí 30 V , které se bude dělit mezi kondenzátor C_1 a C_2 na obrázku 21. Převod transformátoru [3] je tedy:

$$p = \frac{U_1}{2} = \frac{30}{15} = 2 \quad (2.10)$$

Pro počet závitů sekundárního vinutí potom platí:

$$N_2 = N_1 \cdot p = 6 \cdot 2 = 12 \quad (2.11)$$

Navržené závity jsou potom $N_1=6$ a $N_2=12$.

pro snímání polohy projektilu. Následně byly prováděny pokusy s délkou a průměrem projektilu a měnily se různé tvary a počty závitů cívky.

3.2 Finální verze

S využitím poznatků získaných v konstrukci testovacího vzorku děla byla vytvořena finální verze děla. Pro konstrukci byly vytyčeny požadavky, které přímo ovlivňovaly finální podobu. Důležitým požadavkem byla modulárnost celého elektromagnetického děla z hlediska výstupního výkonu. Snížení výkonu lze dosáhnout poměrně snadno. Buď omezením maximální šířky proudového impulsu, nebo zmenšením napětí na kondenzátoru. Pro zvýšení výkonu je nutné zasáhnout do konstrukce děla. Jak je totiž známo z teorie cívkových děl, je pro větší výstupní energie nejvýhodnější použít vícestupňové urychlování. Při dalším zvyšování proudu cívkou se dostaneme do meze, kdy je projektil plně magneticky satureován a urychlování bude velmi neúčinné. Přidání dalšího urychlovacího stupně je snadné, protože urychlovací stupně nejsou na sobě nijak závislé. Vytvoří se tedy naprosto identické zapojení jako pro první urychlovací stupeň.

Hlaveň cívka projektil

Jako hlaveň je použita průhledná HDPE trubička o průměru 10 mm a vnitřním průměru 6 mm. Cívka je navinuta lakovaným drátem o průřezu 1 mm². Vnitřní průměr cívky je 10 mm a má délku 5 cm. Počet závitů je 100 a indukčnost je 23 μH, po vložení projektilu je indukčnost 157 μH. Jako druhá cívka byla navinuta cívka s větší indukčností 600 μH. Projektil je ocelový válec se špičkou o délce 5 cm a průměru 5,8 mm. Alternativně lze použít i projektily různých materiálů, jako je ferit popřípadě magnet.

Návrh DPS budiče IGBT

Na tuto DPS je kladen výrazný důraz z hlediska galvanického oddělení, pod optočlenem nesmí být veden žádný vodič. Dále byla DPS navržena na přímou montáž na IGBT tranzistor pro minimalizaci rušení a parazitních vlivů. Tento způsob montáže alespoň částečně pomáhá zmenšit rozměry celého zařízení.

Ovládací DPS

Tato DPS byla navržena z části pro montáž SMD z důvodu minimalizace. Vývodové součástky jsou zde použity pro snazší výměnu v případě poruchy.

Oživování

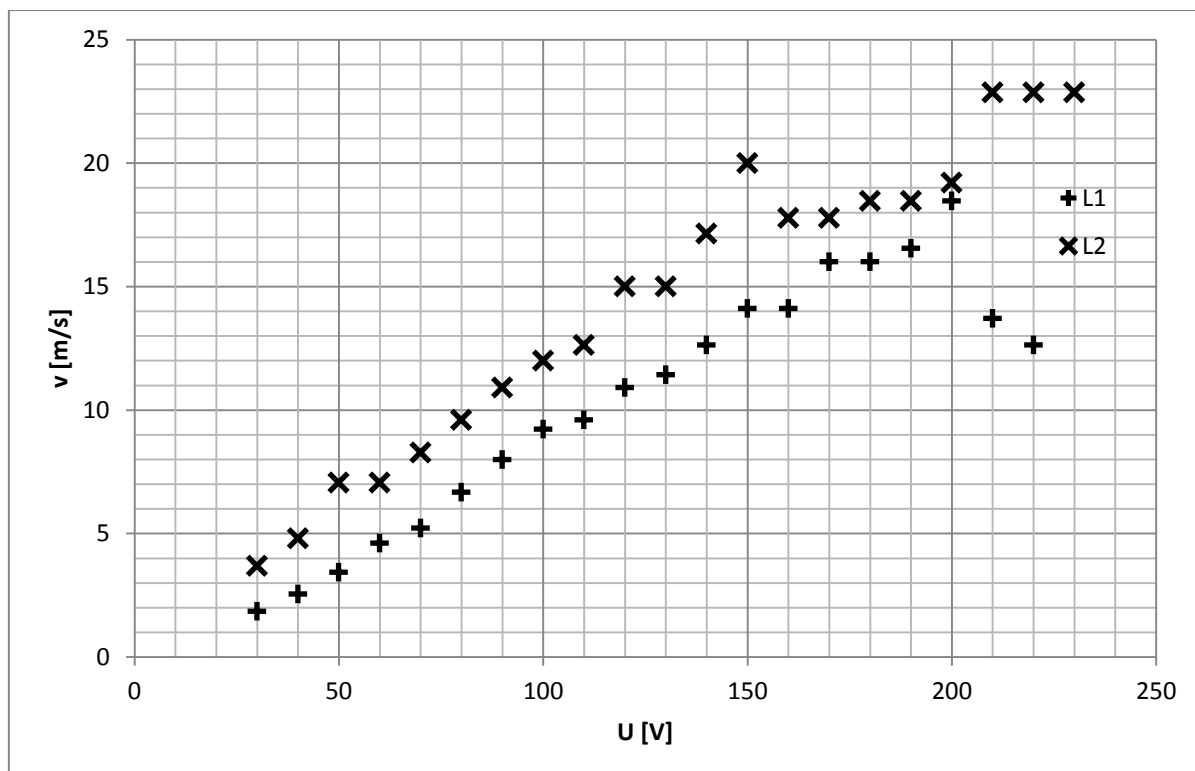
DPS budiče se po odstranění několika chyb při návrhu, jako špatné pouzdra součástek a chybné označení konektorů, povedlo oživit. Úpravami musela projít i ovládací deska, nikoli však kvůli chybnému návrhu, ale protože DPS budiče IGBT má nižší hodnotu LOG 0 než má výstup NAND hradla 74LS132.

Při oživování výkonové části se vyskytlo mnohem více problémů, které měly původ v nezkušenosti při tvorbě podobných zařízení. Jako první problém se ukázaly přírodní

kabely od hlavního kondenzátoru. Jejich indukčnost, přestože je malá, při velkém proudu vedla k proražení poměrně drahých IGBT tranzistorů. Tento jev byl redukován zkrácením přívodů na minimum a přidáním paralelních RC členů pro pokrývání napěťových špiček. Další problém byl v použitém kondenzátoru, který nezvládl rázové proudové zatížení a vevnitř se mu utavil přívodní kontakt. Vyřešeno zvolením kondenzátorů pro vyšší proudy.

3.3 Měření

Po vyřešení konstrukčních problémů a sestavení děla se mohlo přistoupit k měření. Jako základní výstup je závislost napájecího napětí na výstupní rychlosti projektilu.

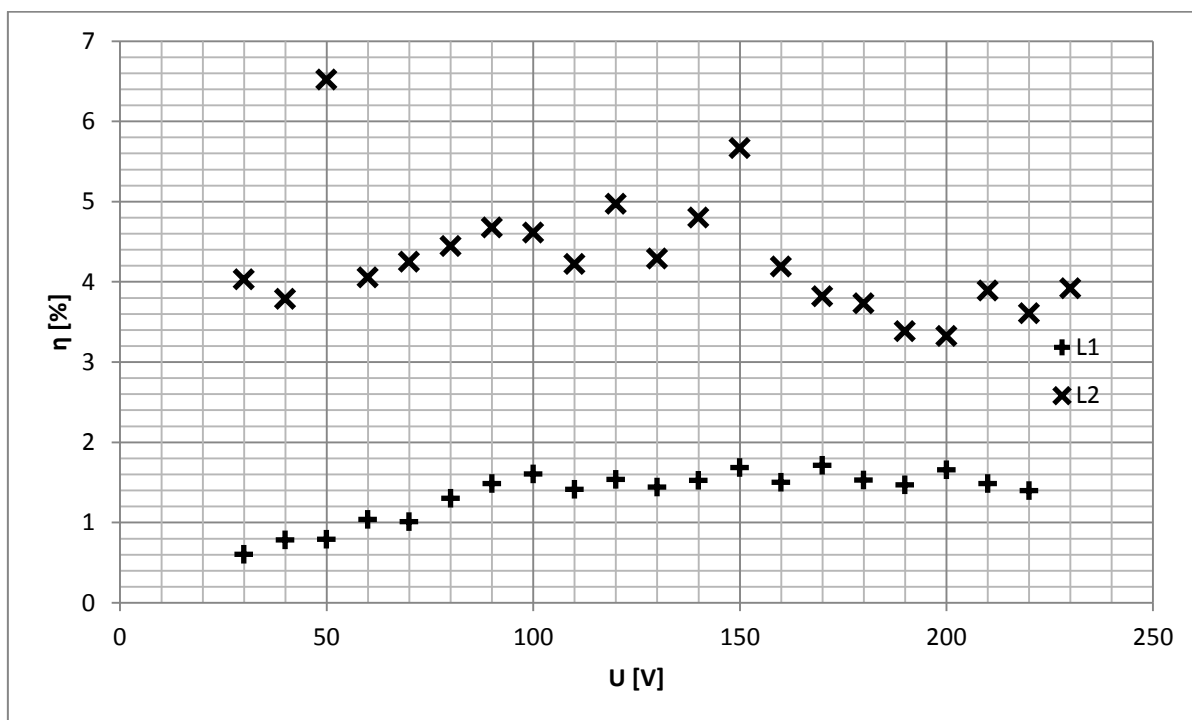


Obrázek 23: Závislost napětí kondenzátoru na úst'ové rychlosti elektromagnetického děla

Z grafu na obrázku 23 je patrné, že výstupní rychlost dat s cívkou L1 se téměř lineárně zvyšuje se zvyšujícím se napájením napětím. Toto zvyšování je možné až do hodnoty 200 V, kdy proud přesáhne 300 A a zareaguje havarijní ochrana v budiči IGBT, která tranzistor vypne. Pro docílení dalšího zrychlování s použitím jedné urychlovací cívky by bylo potřeba do obvodu zakomponovat proudovou regulaci. Problém je však v tom, že proudový transformátor vhodný pro tuto aplikaci je poměrně velký, protože výrobce nepředpokládá, že by se pro vedení proudu 300 A používaly malé kabely. Další nevýhodou tohoto proudového transformátoru je jeho cena, která převyšuje výrobní náklady jednoho budiče IGBT.

Po změně cívky na L2 došlo ke zvýšení úst'ové rychlosti a také přestalo docházet k vybavování nadproudové ochrany, protože větší indukčnost omezila strmost proudu v cívce.

Další významnou veličinou pro určení kvality postaveného děla je jeho účinnost. V tomto případě je účinnost chápána jako poměr kinetické energie projektilu ke spotřebované energii z kondenzátoru.

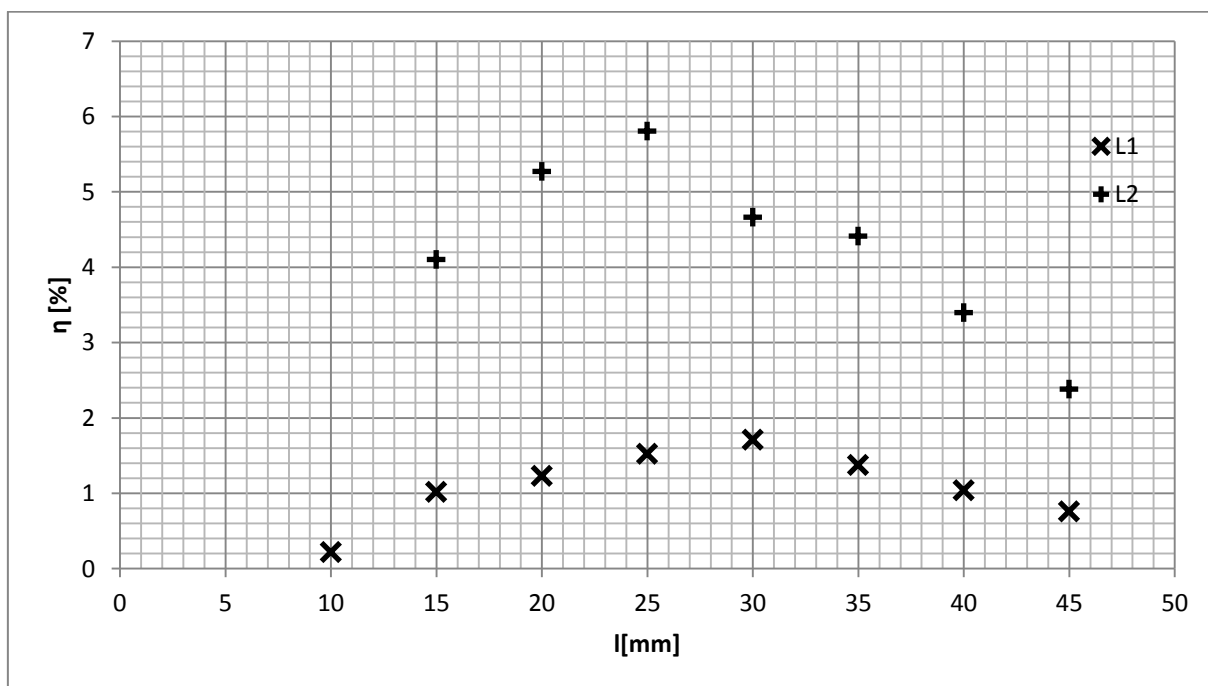


Obrázek 24: Závislost účinnosti elektromagnetického děla na napětí kondenzátoru

Z grafu na obrázku 24 je vidět závislost výstupní účinnosti děla na napájecím napětí. Se vzrůstajícím napětím pro cívku L1 účinnost zpočátku stoupá. Po dosažení napětí 100 V, je účinnost víceméně stejná. Tato stagnace růstu účinnosti se dá nejspíš vysvětlit magnetickou saturací projektilu a po saturaci je výstupní rychlost určována hlavně zvyšujícím se magnetickým polem cívky. Zvýšení efektivity pro jeden urychlovací stupeň je komplikované, protože do systému přichází projektil bez jakékoli magnetické polarizace a urychlování probíhá z nulové rychlosti. Při urychlování projektilu z nulové rychlosti je potřeba delší proudový impuls (řádově jednotky ms) než projektil opustí cívku. U delších proudových impulsů jsou ztráty vedením takto velkého proudu na tranzistorech už znatelné. Pokud by se sestavil ještě jeden urychlovací stupeň, tak by do něj vstupoval už magnetizovaný projektil a většina energie by se využila právě pro urychlení projektilu.

Změnou cívky na větší indukčnost L2 došlo k výraznému zlepšení efektivity a špičková hodnota byla až 6,8%. S větší indukčností se proud protékající cívkou více časově rozloží a nedochází k saturaci projektilu hned na začátku urychlování.

Důležitým parametrem, který ovlivňuje výslednou efektivitu děla, je počáteční poloha projektilu. Je zde kompromis dráhy, po kterou se bude urychlovat projektil s množstvím materiálu projektilu, který se zmagnetuje v počáteční fázi výstřelu.

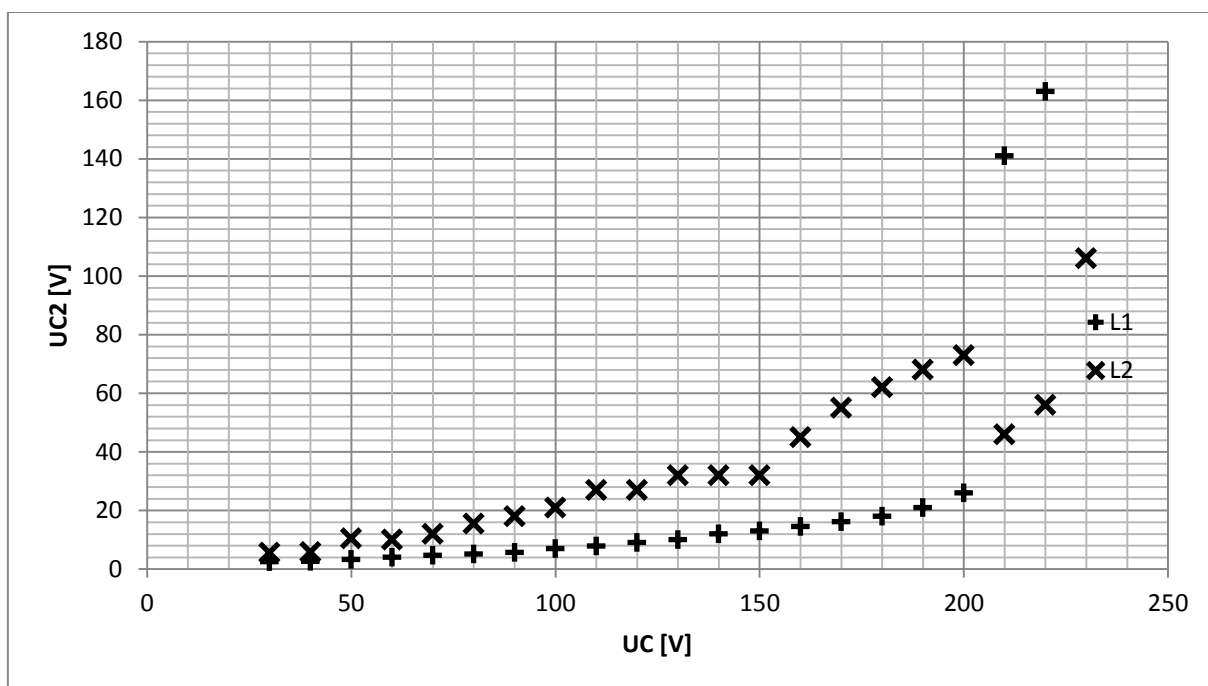


Obrázek 25: Závislost účinnosti děla na počáteční poloze projektilu vůči cívce

Z grafu na obrázku 25 je patrné že účinnost děla s použitím cívky indukčnosti L1 je nejvyšší, pokud je projektil zasunut 30 mm do cívky. Měření probíhalo při zasunutí od 10 mm do 45 mm, protože pro výstřel je potřeba, aby byla zatemněná optická brána. Při dalším zasouvání se účinnost snižuje, protože se snižuje vzdálenost, po kterou může být projektil urychlován. Měření probíhalo při napětí 150 V a při špičkové účinnosti dosáhl projektil rychlosti 14 m/s.

Při použití cívky L2 se účinnost zvětšila a při počáteční poloze projektilu zasunutí 25 mm bylo dosaženo efektivitu 5,8 % a úst'ové rychlosti 20 m/s.

Dále bylo třeba ověřit funkčnost rekuperace zbytkové energie v cívce.



Obrázek 26: Zbytkové napětí UC2 v kondenzátoru po výstřelu

Na obrázku 26 je vidět, že zbytkové napětí UC2 vzrůstá s postupným zvyšováním napětí na kondenzátoru. Energie navracená zpátky do kondenzátoru je zanedbatelná, protože tranzistory se vypínají v době, kdy cívkou neprochází skoro žádný proud. Rekuperace by byla nejspíš mnohem výraznější u dalších urychlovacích stupňů, kde by se tranzistory vypínaly při plném proudu cívkou. V grafu na obrázku 26 je vidět výrazné zvětšení zbytkového napětí na kondenzátoru. To je způsobeno vybavením havarijní saturační ochrany, kdy se tranzistory velmi pomalu vypínají a došlo tak spíše ke spotřebě energie než k rekuperaci. V grafu lze také sledovat, že při použití větší indukčnosti L2 je i míra rekuperované energie větší, což svědčí o správné funkci obvodu.

Závěr

Při řešení této bakalářské práce byla probrána problematika elektromagnetického urychlování feromagnetických projektilů. Blíže byl především popsán princip cívkového děla, které je předmětem řešení práce. Teoreticky se rozebralo korektní řízení IGBT tranzistorů, které jsou použity jako spínače pro dělo. Byla provedena komplexní analýza komponent děla s cílem dosažení co největší účinnosti a provedeny simulace pro ověření správnosti teoretických podkladů a návrhů na vylepšení účinnosti děla. Při návrhu korektního budiče IGBT tranzistorů byly vybrány ochrany, které mají pro aplikaci elektromagnetického děla význam.

Ještě před sestavením děla s korektním budičem byl v rámci semestrálního projektu 2 sestaven předběžný prototyp na nižší napětí bez galvanického oddělení. Tento prototyp měl především výhodu v ceně, protože při oživování vlivem parazitních indukčností, popřípadě kvůli nekvalitním součástkám ve výkonové části obvodu, byl několikrát zničen. Při oživování obvodu s použitím korektního budiče IGBT se vycházelo s poznatků získaných z předešlých pokusů. Po vyřešení nedostatků ve formě opět nekvalitních součástek ve výkonové části obvodu funguje naprosto bezchybně na plné napájecí napětí.

Při porovnání výsledků naměřených z předběžného prototypu, který měl maximální ústřovou rychlost 20 m/s, nová konfigurace elektromagnetického děla dosahuje maximální ústřové rychlosti 22,8 m/s při efektivitě 6,5 %. Při srovnání s podobnými konstrukcemi elektromagnetických děl, které dosahují účinnosti kolem 3 %, se práce ukazuje jako úspěšná

a je vhodná pro další postup. Další zvyšování účinnosti děla je nyní závislé především na sestavení dalších urychlovacích stupňů, ovšem jejich konstrukce je velmi finančně nákladná. Použité výkonové součástky jako jsou IGBT tranzistory stojí průměrně 4000 Kč/kus. Pro stavbu tohoto děla byly použity levnější tranzistory z bazaru za přibližně poloviční cenu, bohužel většinou se jedná o kusy, které jsou už výrazně nespolehlivé nebo poškozené.

Vzhledem k dobrým výsledkům bude na práci navázáno v dalším výzkumu, ve kterém budou dostavěny další urychlovací stupně. Dále bude třeba zakomponovat proudovou regulaci, aby se mohl využít první urychlovací stupeň na plný potenciál.

Seznam použitých zdrojů

- [1] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice*. Vysoké učení technické v Brně: Vutium, 2011. ISBN 8021440031, 9788021440036.
- [2] Datasheet. In: *Single Channel, High Speed Optocouplers* [online]. 2004 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-4747EN>
- [3] Transformátor. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001- [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Transform%C3%A1tor>
- [4] Galvanické oddělení. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001- [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Galvanick%C3%A9_odd%C4%9Blen%C3%AD
- [5] PATOČKA, Miroslav a Pavel VOREL. *Budiče výkonových tranzistorů MOSFET a IGBT* [online]. VUT Brno, 2004 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04030/index.html>. Článek. VUT Brno.
- [6] *BUDICÍ OBVODY VÝKONOVÉHO TRANZISTORU SIC MOSFET* [online]. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68991. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VUT Brno.
- [7] CHAN, CLARK, Daniel HELMLINGER a NG. *ElectromagneticCoilGun* [online]. Capstone Design, 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.ece.rutgers.edu/sites/default/files/capstone13/CoilGun-FinalReport.pdf>. Final Report. Rutgerschoolofengineering.
- [8] Datasheet. In: *ACPL-337J* [online]. 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-4390EN>
- [9] Magneticfield. In: *Solenoid* [online]. 2004 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <https://basharspacetimeantenna.files.wordpress.com/2011/03/magnetic-field-in-a-straight-coil-of-wire.gif?w=455&h=257>
- [10] CoilAnalysis 1. *FEMM* [online]. 2003, č. 1 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20030527095042/http://web2.airmail.net/jd4usa/guncoil5.htm>
- [11] FEMM. In: *Finite Element Magnetics* [online]. 2004 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.coilgun.info/femm/home.htm>

- [12] Projectile aerodynamics. In: *Projectile Design* [online]. 2001 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.coilgun.eclipse.co.uk/projectile_design.html
- [13] Gauss. In: *DB6L* [online]. 2012 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://future-weapons.ru/forum/viewtopic.php?p=123522#p123522>
- [14] Coilgun. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Coilgun>
- [15] Railguns, WeaponsOfTheFuture. In: *Weapons* [online]. 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://beforeitsnews.com/science-and-technology/2013/06/railguns-weapons-of-the-future-2611908.html>
- [16] CoilgunKnowledgebase. In: *Coilgun* [online]. 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://duljiz.blogspot.cz/2013/07/coilgun-knowledgebase.html>
- [17] Magnetic Materials. *Magnetism* [online]. 2012, č. 1 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://www.alpcentauri.info/20_26.jpg
- [18] KAYE, R.J. Operational requirements and issues for coilgun electromagnetic launchers. In: *Coilgun* [online]. 2005 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp=&arnumber=1381536&url=http%3A%2F%2Fieeexplore.ieee.org%2Fxppls%2Fabs_all.jsp%3Farnumber%3D1381536
- [19] KANG. *High Power Density Front-End Converter for High Voltage Capacitor Charger* [online]. Virginia, 2005 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-04282005-003644/unrestricted/YonghanKang_Thesis.pdf. Master thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute.
- [20] WONG. *Asynchronous Linear Induction Motors* [online]. California, Santa Cruz, 2010 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: http://dave.ucsc.edu/physics195/thesis_2010/wong_thesis.pdf. Bachelors thesis. University of California.
- [21] Toshiba. In: *Datasheet* [online]. 2003 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/31060/TOSHIBA/MG400Q1US41.html>
- [22] IR2113. In: *Datasheet* [online]. 2006 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z: <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2110.pdf>

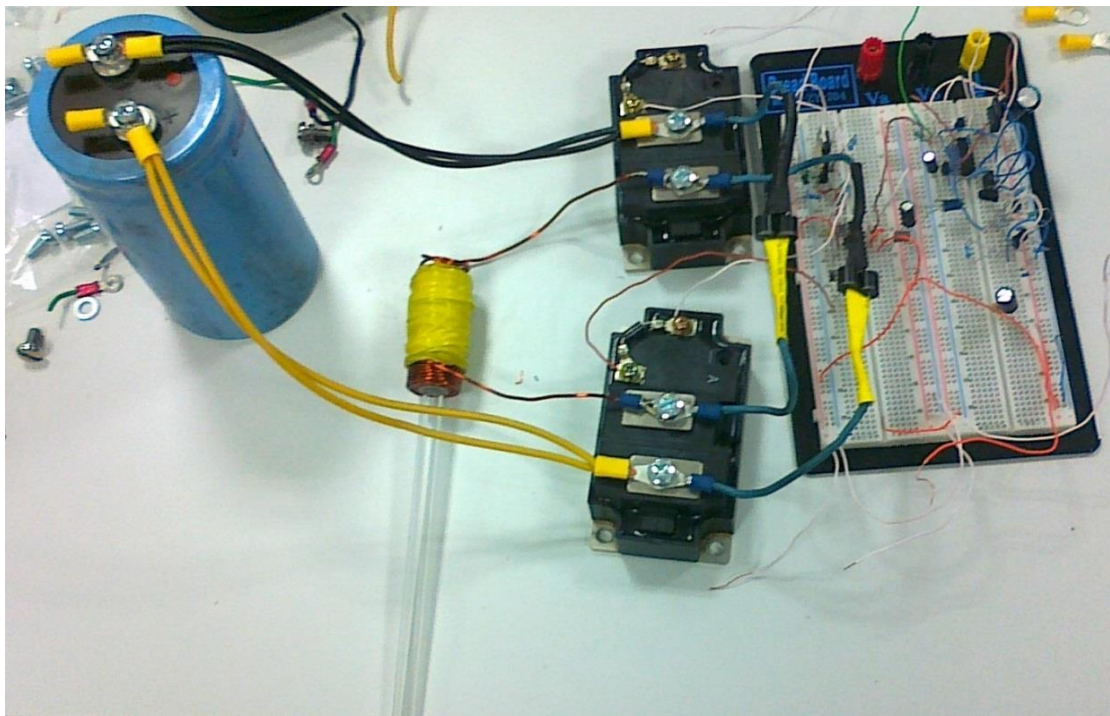
- [23] ABOUELJOUND, Omar, Alberto BIRD, Wesley LIMA a Eric SHIELDS. *MagneticAcceleratorCannon* [online]. Florida, 2014 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z:
http://www.eecs.ucf.edu/seniordesign/sp2014su2014/g10/Magnetic_Accelerator_Cannon_Final_Group_TEN.pdf. Senior desing. University ofCentral Florida.
- [24] KOLEK. *ELEKTROMAGNETICKÝ POHON JEDNODUCHÝCH OBJEKTŮ* [online]. Brno, 2013 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z:
https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=68369.
Bakalářská. VUT Brno.
- [25] .50 calCoilGun. In: *Coilgun* [online]. 2011 [cit. 2014-12-16]. Dostupné z:
<http://www.instructables.com/id/50-cal-Coil-Gun/?ALLSTEPS>
- [26] For Love of a Gun. *He tumultuousehistoryofelectromagneticlaunch* [online]. 2007, (1) [cit. 2015-06-02]. Dostupné z: <http://spectrum.ieee.org/consumer-electronics/gadgets/for-love-of-a-gun/0>

Seznam příloh

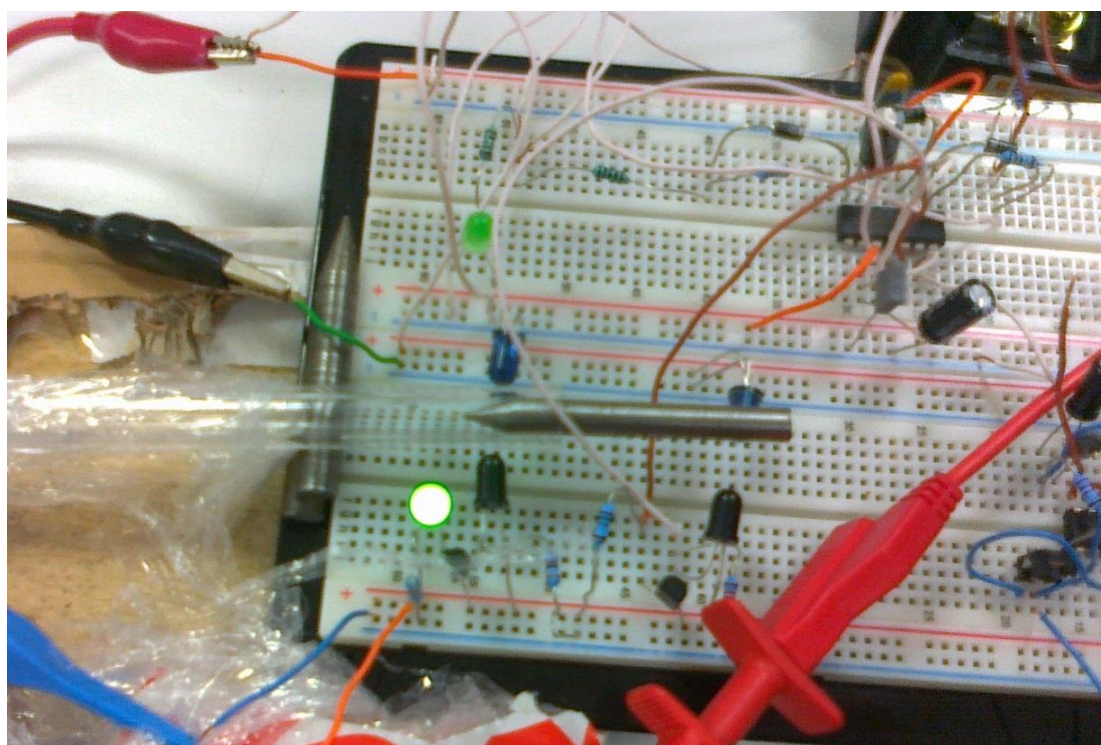
Příloha A Fotodokumentace	44
A.1. Testovací prototyp	45
A.2. Optická brána.....	45
A.3. Osazená ovládací DPS	46
A.4. Osazená DPS budiče IGBT	46
A.5. Kompletní dělo	47
A.6. Kompletní dělo detail	47
Příloha B Návrhy DPS.....	48
B.1. Návrh DPS Budiče IGBT vrstva bottom	48
B.2. Návrh DPS budiče IGBT vrstva top	48
B.3. Návrh DPS ovládacího obvodu.....	49
Příloha C Seznamy použitých součástek	50
C.1. Součástky pro ovládací DPS	50
C.2. Součástky pro DPS budiče IGBT	51
C.3. Součástky pro zdroj galvanicky odděleného napájení	52

Příloha A Fotodokumentace

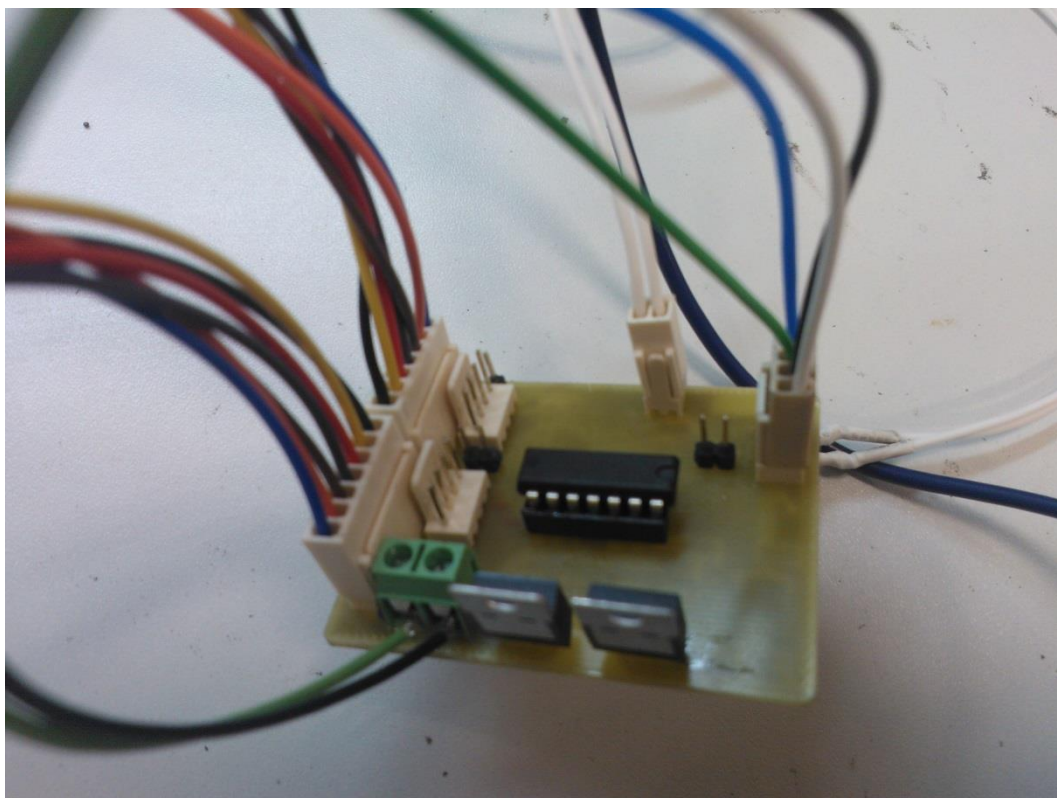
A.1. Testovací prototyp



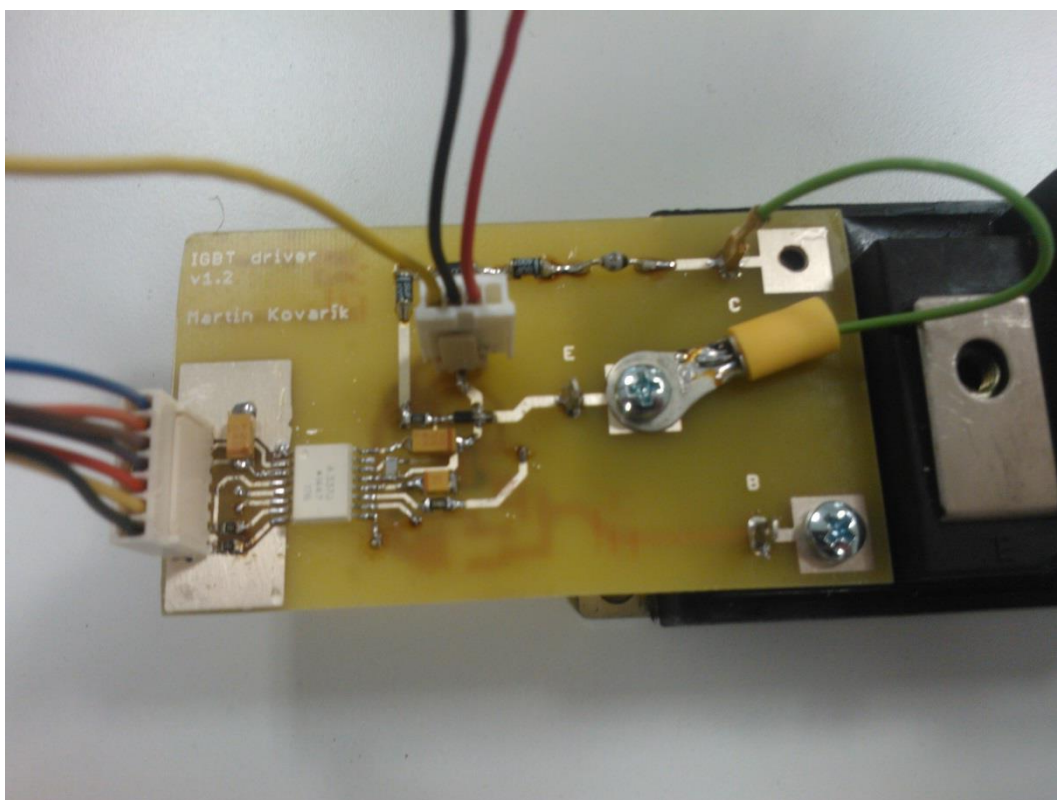
A.2 Optická brána



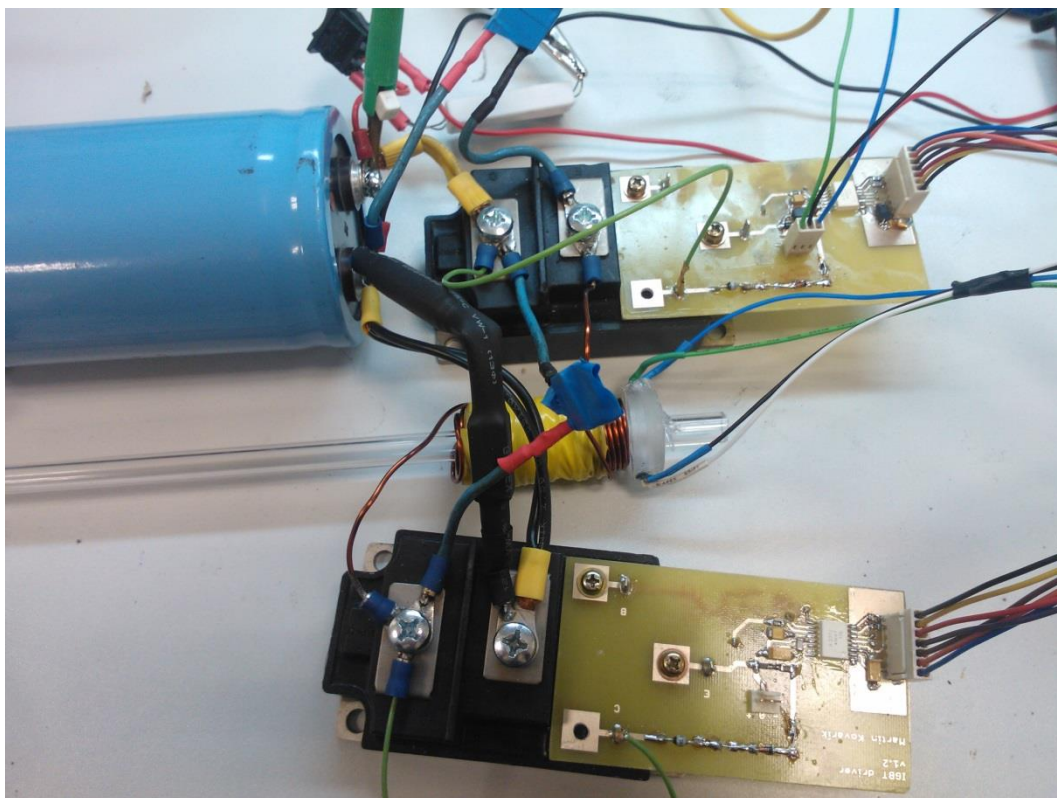
A.3 Osazená ovládací DPS



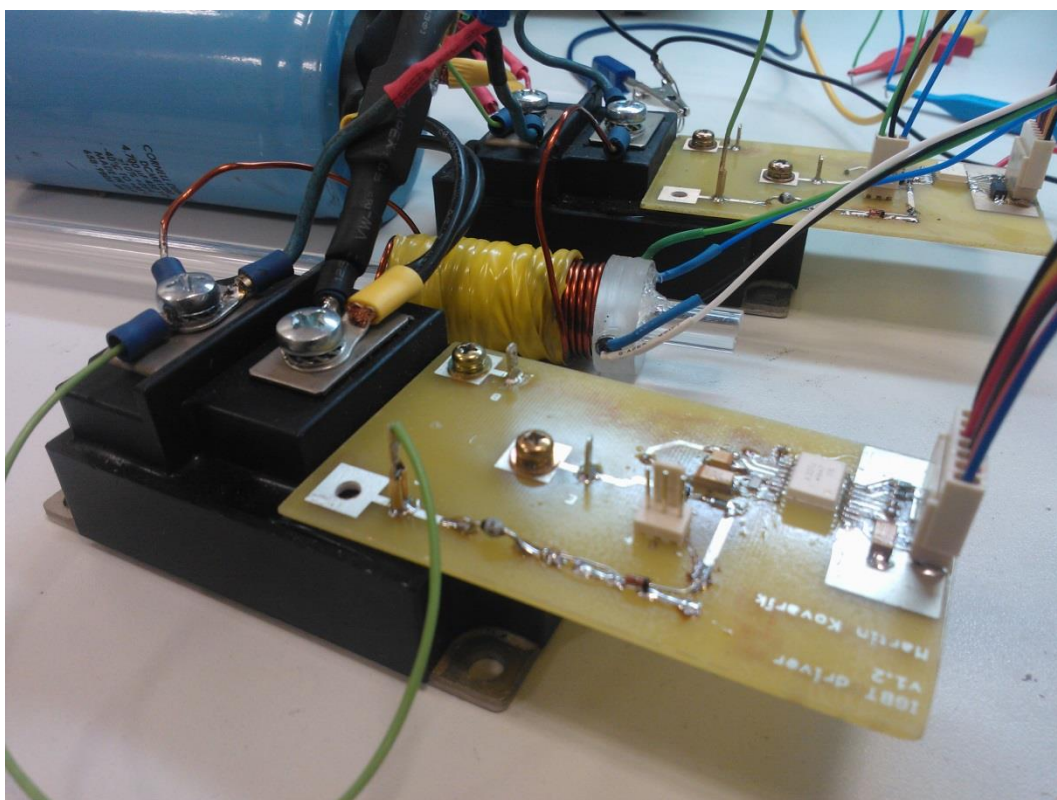
A.4 Osazená DPS budiče IGBT



A.5 Kompletní dělo

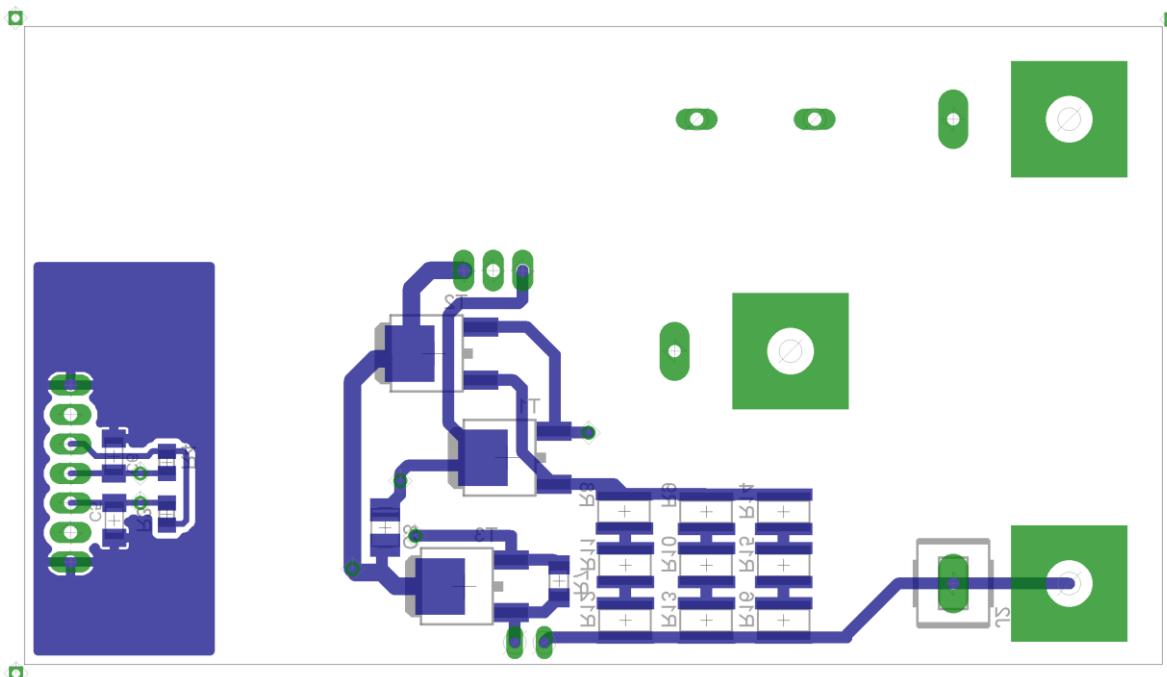


A.6 Kompletní dělo detail

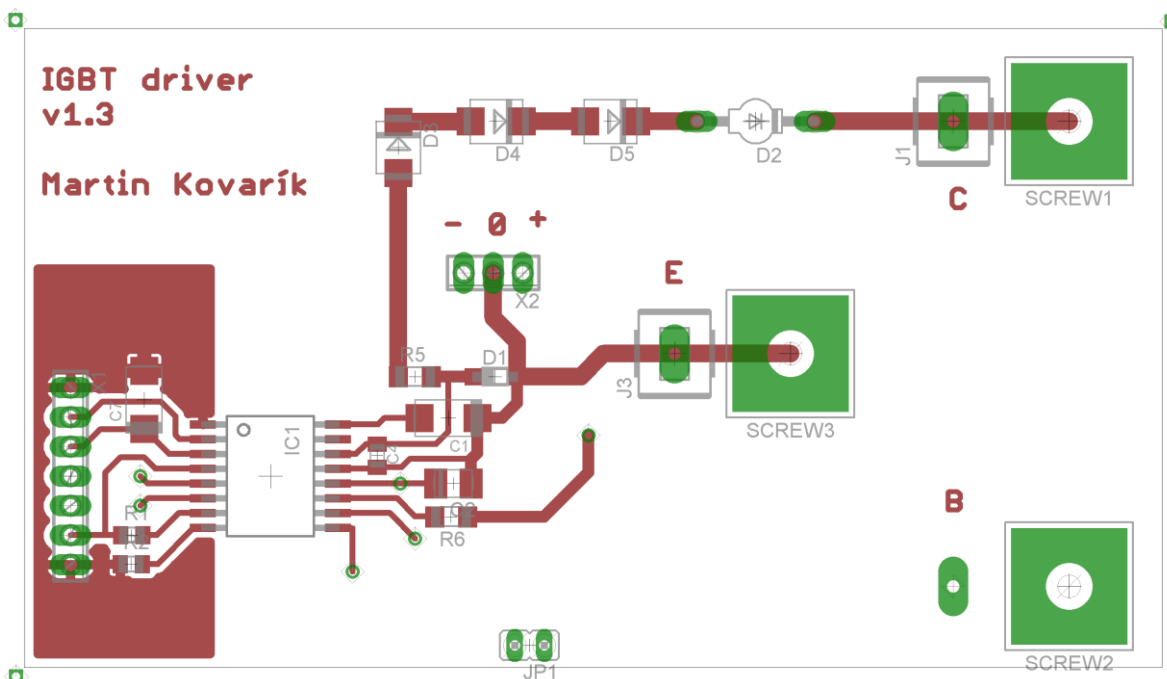


Příloha B Návrhy DPS

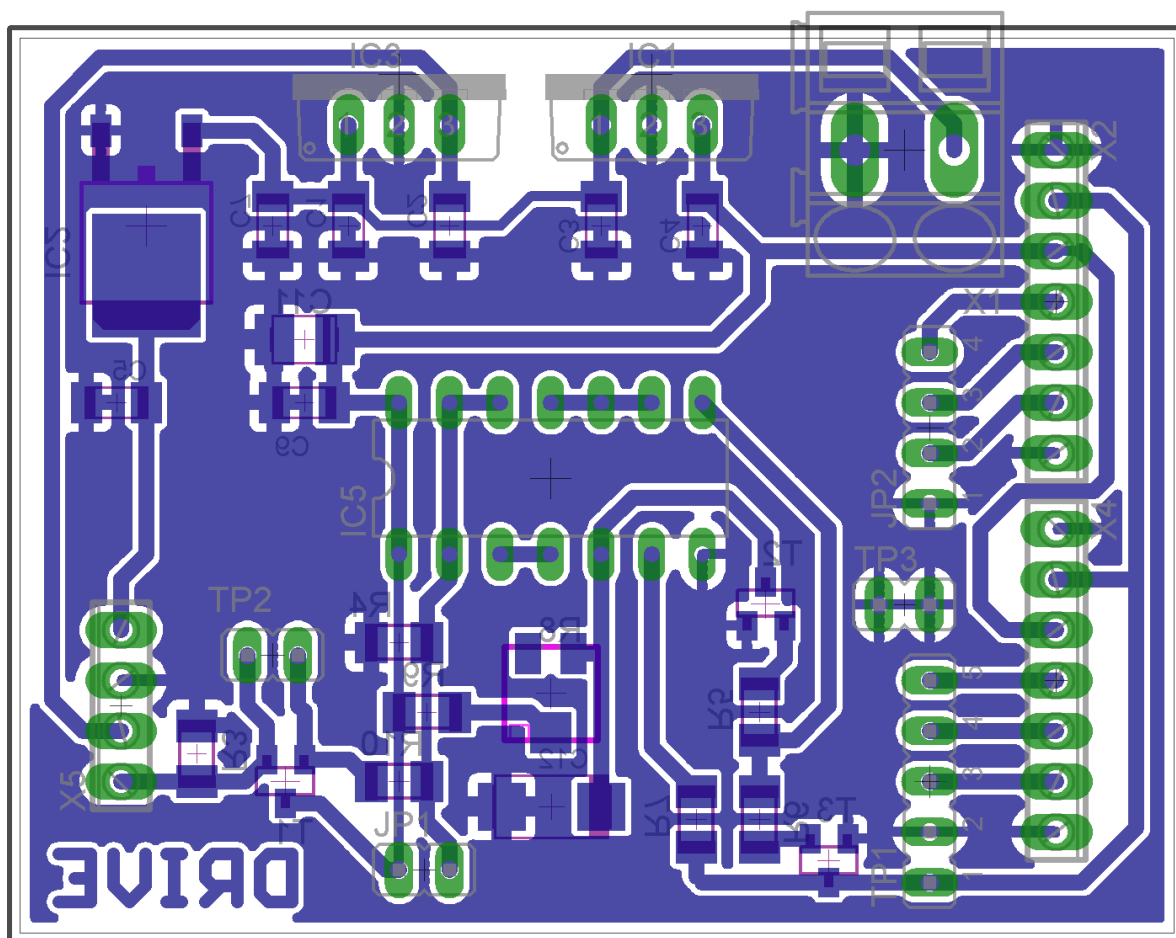
B.1 Návrh DPS Budiče IGBT vrstva bottom



B.2 Návrh DPS budiče IGBT vrstva top



B.3 Návrh DPS ovládacího obvodu



Příloha C Seznamy použitých součástek

C.1 Součástky pro ovládací DPS

Součástka	Hodnota	Typ	Pouzdro
C1	100n	C-EUC1206K	C1206K
C2	100n	C-EUC1206K	C1206K
C3	100n	C-EUC1206K	C1206K
C4	100n	C-EUC1206K	C1206K
C5	100n	C-EUC1206K	C1206K
C7	100n	C-EUC1206K	C1206K
C9	100n	C-EUC1206K	C1206K
C11	22M/25V	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R
C12	1M/16V	CPOL-EUSMCC	SMC_C
IC1	7805TV	7805TV	TO220V
IC2	LD1117AXX	LD1117AXX	DPACK
IC3	7808TV	788TV	TO220V
IC5	M74HC132B1R	74HC132N	DIL14
JP1		JP1E	JP1
JP2		JP4E	JP4
R3	390k	R-EU_M1206	M1206
R4	5k	R-EU_M1206	M1206
R5	1k	R-EU_M1206	M1206
R6	1k	R-EU_M1206	M1206
R7	10k	R-EU_M1206	M1206
R8	5k	R-TRIMM5X	RTRIM5X
R9	220R	R-EU_M1206	M1206
R10	0R	R-EU_M1206	M1206
T1	BC817-40	BC817-40-NPN-SOT23-BEC	SOT23-BEC
T2	BC817-40	BC817-40-NPN-SOT23-BEC	SOT23-BEC
T3	BC817-40	BC817-40-NPN-SOT23-BEC	SOT23-BEC
TP1	JP5E	JP5E	JP5
TP2		JP1E	JP1
TP3		JP1E	JP1
X1	SMKDSP_1,5/2	SMKDSP_1,5/2	SMKDSP_1,5/2
X2		MPT7	7POL254
X4		MPT7	7POL254
X5		MPT4	4POL254

C.2 Součástky pro DPS budiče IGBT

Součástka	Hodnota	Typ	Pouzdro
C1	1uF	CPOL-EUSMCC	SMC_C
C2	1uF	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R
C3	1uF	CPOL-EUB/3528-21R	B/3528-21R
C4	100pF	C-EUC0805K	C0805K
C5	330pF	C-EUC1206K	C1206K
C6	330pF	C-EUC1206K	C1206K
C7	1uF	CPOL-EUSMCC	SMC_C
D1	MBR0520LT	MBR0520LT	SOD123
D2	BYV27	BYV27	SOD57-10
D3		DIODE-SMB	SMB
D4		DIODE-SMB	SMB
D5		DIODE-SMB	SMB
IC1	ACPL-337J	ACPL-337J	SO16W
J1	FASTONMINI	FASTONMINI	MALYFASTON
J2	FASTONMINI	FASTONMINI	MALYFASTON
J3	FASTONMINI	FASTONMINI	MALYFASTON
JP1		JP1E	JP1
R1	150	R-EU_R0805	R0805
R2	150	R-EU_R0805	R0805
R3	10k	R-EU_R0805	R0805
R4	10k	R-EU_R0805	R0805
R5	1k	R-EU_R1206	R1206
R6	10	R-EU_R1206	R1206
R7	47	R-EU_R1206	R1206
R8	4.7	R-EU_R1218	R1218
R9	4.7	R-EU_R1218	R1218
R10	4.7	R-EU_R1218	R1218
R11	4.7	R-EU_R1218	R1218
R12	4.7	R-EU_R1218	R1218
R13	4.7	R-EU_R1218	R1218
R14	4.7	R-EU_R1218	R1218
R15	4.7	R-EU_R1218	R1218
R16	4.7	R-EU_R1218	R1218
SCREW1	SCREWM4	SCREWM4	M4
SCREW2	SCREWM4	SCREWM4	M4
SCREW3	SCREWM4	SCREWM4	M4
T1	MJD31	MJD31	DPAK
T2	MJD32	MJD32	DPAK
T3	MJD32	MJD32	DPAK
X1		MPT7	7POL254
X2		MPT3	3POL254

C.3 Součástky pro zdroj galvanicky odděleného napájení

Součástka	Hodnota	Typ	Pouzdro
C1	1n	C-EU075-032X103	C075-032X103
C2	1n	C-EU075-032X103	C075-032X103
C3	1u	CPOL-EUE2-5	E2-5
C4	100n	C-EU075-032X103	C075-032X103
C5	100n	C-EU075-032X103	C075-032X103
C6	100n	C-EU075-032X103	C075-032X103
C7	100n	C-EU075-032X103	C075-032X103
C8		CPOL-EUE2.5-7	E2,5-7
C9		CPOL-EUE2.5-7	E2,5-7
C10		CPOL-EUE2.5-7	E2,5-7
C11		CPOL-EUE2.5-7	E2,5-7
C12		C-EU102-043X133	C102-043X133
D1	1N4148DO35-7	1N4148DO35-7	DO35-7
D2	1N4148DO35-7	1N4148DO35-7	DO35-7
D3		ZENER-DIODEC1702-15	C1702-15
D4		ZENER-DIODEC1702-15	C1702-15
D5	1N4148DO35-7	1N4148DO35-7	DO35-7
D6	1N4148DO35-7	1N4148DO35-7	DO35-7
D7	1N4148DO35-7	1N4148DO35-7	DO35-7
D8	1N4148DO35-7	1N4148DO35-7	DO35-7
IC1	7815TV	7815TV	TO220V
IC2	SG3525AN	SG3525AN	DIL16
IC3	7815TV	7815TV	TO220V
IC4	LM7915V	LM7915V	TO220V
IC5	LM7915V	LM7915V	TO220V
IC6	7815TV	7815TV	TO220V
Q1	IRF520	IRF520	TO220BV
Q2	IRF520	IRF520	TO220BV
R1	10k	R-TRIMM64Y	RTRIM64Y
R2	100k	R-TRIMM64Y	RTRIM64Y
R3	10k	R-EU_0204/7	0204/7
R4	8	R-EU_0204/7	0204/7
R5	8	R-EU_0204/7	0204/7
TR1	4_LJT2610	4_LJT2610	4_LJT2610
TR2	4_LJT2610	4_LJT2610	4_LJT2610
X1		MPT3	3POL254
X2		MPT3	3POL254
X3	SMKDSP_1,5/2	SMKDSP_1,5/2	SMKDSP_1,5/2