

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Napájecí zdroj pro elektromagnetické dělo

**vedoucí práce: Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.
autor: Bc. Lukáš Horký**

2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš HORKÝ**
Osobní číslo: **E12N0062P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Zdroj pro elektromagnetické dělo**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Specifikujte požadavky kladené na výkonový obvod pro napájení cívky elektromagnetického děla.
2. Proveďte základní výpočty a simulace.
3. Dimenzujte použité součástky a vytipujte jejich druhy i dodavatele.
4. Zapojení realizujte, odladte, vyzkoušejte a proveďte verifikační měření.
5. Shrňte dosažené výsledky, porovnejte simulace a měření.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická
Seznam odborné literatury:


1. internet
2. datové listy součástek
3. skripta Výkonová elektronika

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Bohumil Skala, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2013
Termín odevzdání diplomové práce: 12. května 2014


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Anotace

Cílem práce je seznámit čtenáře a ostatní zájemce se zajímavou aplikací týkající se poznatků z elektřiny a magnetismu. Práce shrnuje teoretický základ a možnost využití elektromagnetického děla na principu vtahování magneticky vodivého tělesa do středu vzduchové cívky, kterou prochází elektrický proud (cívkové dělo). Především se zaměřuje na požadavky napájecích a ovládacích obvodů celé aplikace. Dále prezentuje model zařízení, výsledky měření a simulací při výstřelu.

Klíčová slova

Elektromagnetické dělo, cívkové dělo, Gaussovo dělo, magnetický urychlovač, napájecí zdroj, kondenzátorová baterie, kapacitor, ovládací prvky, elektromagnetismus

Abstract

The objective of this diploma thesis is to introduce readers to an interesting application of electromagnetism. This work summarises theory and application of coilgun which works on a principal of interaction between electrical current passing through the coil and ferromagnetic projectile. It is mainly focused on the supply and control logic circuits. Model of coilgun, results of simulation and measurement of shot are also included.

Key words

Electromagnetic gun, coil gun, Gauss cannon, magnetic accelerator, power supply, capacitor batteries, capacitors, controls, electromagnetism

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11.5.2014

Lukáš Horký

.....

Poděkování

Na tomto místě je mou milou povinností poděkovat všem, kteří mě podporovali v průběhu studia a ve vytváření této práce. Především pak svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Bohumilu Skalovi, Ph.D. za předané znalosti, cenné rady, poskytnuté materiály a měřící vzorky.

Dále bych chtěl poděkovat všem, kteří spolupracovali na projektu elektromagnetického děla.

Obsah

OBSAH	8
ÚVOD	10
SEZNAM SYMBOLŮ	11
SEZNAM ZKRATEK	12
1 ELEKTROMAGNETICKÉ DĚLO - DEFINICE	13
1.1 ZÁKLADNÍ ZNALOSTI ELEKTROMAGNETISMU	13
1.1.1 <i>Vzájemné působení vodiče a magnetického pole</i>	13
1.1.2 <i>Feromagnetické materiály</i>	14
1.2 ELEKTROMAGNETICKÉ CÍVKOVÉ DĚLO	15
1.2.1 <i>Konstrukce</i>	16
1.2.2 <i>Cívková děla pro feromagnetické projektily</i>	16
1.2.3 <i>Spínání</i>	17
1.2.4 <i>Magnetický obvod</i>	17
1.2.5 <i>Saturace feromagnetického projektilu</i>	17
1.3 INDUKČNÍ DĚLO	18
1.3.1 <i>Konstrukce</i>	19
1.4 ELEKTROMAGNETICKÉ KOLEJNICOVÉ DĚLO	20
1.4.1 <i>Konstrukce</i>	20
1.5 POTENCIÁLNÍ VYUŽITÍ	21
2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ	21
2.1 FUNKČNOST OVLÁDÁNÍ	22
2.2 PRVNÍ STUPEŇ ELEKTROMAGNETICKÉHO DĚLA	23
2.2.1 <i>Napájecí zdroje</i>	23
2.2.2 <i>Simulace nabíjení</i>	28
2.2.3 <i>Simulace výstřelu</i>	29
2.2.4 <i>Ovládací logika prvního stupně</i>	30
2.2.5 <i>Kondenzátorová baterie prvního stupně</i>	31
2.2.6 <i>Dimenzování spínacích prvků</i>	32
2.2.7 <i>Indikátor napětí</i>	34
2.3 DRUHÝ STUPEŇ ELEKTROMAGNETICKÉHO DĚLA	36
2.3.1 <i>Kondenzátorová baterie druhého stupně</i>	37
2.3.2 <i>Dimenzování spínacích prvků</i>	39
2.3.3 <i>Zdroj pro spínací tranzistory</i>	41
2.3.4 <i>Ovládací logika druhého stupně</i>	43
2.3.5 <i>Buzení výkonových tranzistorů</i>	46
2.3.6 <i>Zapojení budičů pro výkonové tranzistory</i>	49
2.3.7 <i>Ochranné prvky</i>	51
3 NAVRHOVANÝ VÝVOJ	53
3.1 VELIKOST PROJEKTILU	54
3.2 OPTICKÁ ZÁVORA	54
3.2.1 <i>Vysílač světelné závory</i>	55
3.2.2 <i>Přijímač světelné závory</i>	55
3.3 ŘÍZENÍ MIKROPOČÍTAČEM	56
ZÁVĚR	58
POUŽITÁ LITERATURA	60

SEZNAM PŘÍLOH.....	62
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná práce je součástí společného projektu elektromagnetického děla, je zaměřena na ukázkou využitelnosti elektromagnetických zákonů v praktickém životě. Konečný produkt se pokouší přiblížit široké veřejnosti vědecké poznatky zábavnou formou.

V současné době není snad fyzikálního jevu, který by ovlivnil život moderního člověka více než propojenost elektřiny a magnetismu. Kdysi, když si Hans Christian Oersted všiml, že v okolí vodiče, jímž prochází proud, se vychyluje magnetická střílka kompasu určitým směrem, si nedokázal jistě představit důsledek svého objevu. Po něm přišla spousta dalších vynikajících vědců, díky nimž je dnes náš život o mnoho snazší a pro mnohé z nás i zajímavější. Občas se mezi všemi těmi aplikacemi najde i nápad starý téměř sto let. Takový nápad může být uskutečnitelný až nyní, protože v době jeho objevu nebyly k dispozici vhodné materiály. Jedním z takových nápadů je i cívkové magnetické dělo, které si v následujících odstavcích představíme. [1]

Téma diplomové práce jsem si vybral zejména proto, že v celé konstrukci magnetického děla se využívá znalostí z oborů fyziky, elektromechaniky i výkonové elektroniky. Doufám, že se mi v předkládané práci povede zúročit a zkombinovat znalosti z mou vybraného studijního oboru. Dalším důvodem k výběru byla aktuálnost tématu. V současné době se na světlo veřejnosti dostávají články vědců s danou problematikou. Velice tomu přispívá prudký rozvoj technologií uchování elektrické energie, díky čemuž bychom se mohli v blízké budoucnosti dočkat komerčního využití elektromagnetického děla.

Hlavní cíl společného projektu elektromagnetického děla je sestavit funkční vzorek, který ověřuje fyzikální zákonitosti, představí princip činnosti široké veřejnosti a je možné na něm provádět měření, která by vedla k další vývojové činnosti a zkvalitnění vzorku. Mými dílčími cíli na projektu je vytvoření vhodné napájecí soustavy a návrh ovládací logiky.

Obecná struktura práce je následující. V teoretické části popisuje funkci elektromagnetického děla a vysvětluje některé elektromagnetické zákonitosti. V praktické části se zabývá samotným návrhem zdrojů pro napájení a jejich měřením. V závěrečné části se pokouší zhodnotit úspěšnost projektu a navrhuje případný budoucí vývoj nebo vhodnost změn v projektu.

Seznam symbolů

značka veličiny	značka jednotky	veličina	jednotka
B	[T]	magnetická indukce	tesla
C	[F]	elektrická kapacita	farad
d (l,h)	[m]	délka	metr
E	[J]	energie	joule
F	[N]	síla	newton
f	[Hz]	frekvence, kmitočet	herz
H	[A/m]	intenzita magnetického pole	ampér na metr
I	[A]	proud	ampér
L	[H]	indukčnost	henry
Q	[C]	elektrický náboj	coulomb
R	[Ω]	elektrický odpor	ohm
t	[s]	čas	sekunda
T	[$^{\circ}$ C]	teplota	stupeň Celsia
T	[s]	perioda	sekunda
U (V)	[V]	elektrické napětí	volt
v	[m/s]	rychlost	metr za sekundu
ϕ	[m]	průměr (geometrie)	metr

Seznam zkratek

DPS	deska plošných spojů
ESR	ekvivalentní sériový odpor (Equivalent Series Resistance)
FET	unipolární tranzistor (Field-Effect Transistors)
IGBT	bipolární tranzistor s izolovaným hradlem (Insulated Gate Bipolar Transistor)
IR	infračervené (Infrared)
LED	dioda emitující světlo (Light-Emitting Diode)
MKO	monostabilní klopný obvod
MOSFET	polem řízený tranzistor (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)
N	severní pól magnetu
S	jižní pól magnetu
THT	součástka s drátovými vývody (Through-hole technology)
TTL	tranzistorově-tranzistorová logika (Transistor-transistor-logic)

1 Elektromagnetické dělo - definice

Elektromagnetické dělo je elektricky napájená střelná zbraň, která urychluje vodivý projektil hlavní pomocí silného elektrického impulsu namísto tlakových účinků výbuchu klasických střelných zbraní s trhavinami v náboji.

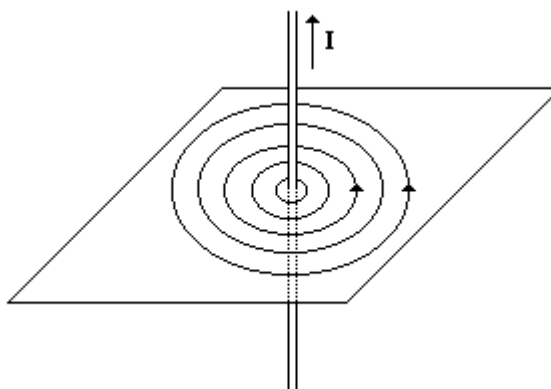
Podle principu jej dále můžeme rozdělit na tři typy. První, námi konstruované, je elektromagnetické cívkové dělo, anglicky též Coilgun. Druhý typ je elektromagnetické kolejnicové dělo, anglicky Railgun. Poslední je indukční dělo na bázi vířivých proudů. [2]

1.1 Základní znalosti elektromagnetismu

Vzhledem k tomu, že v následujících odstavcích práce popisuje elektromagnetické dělo, které vystřeluje projektil z feromagnetické látky, považují za vhodné nejprve vysvětlit podstatné pojmy.

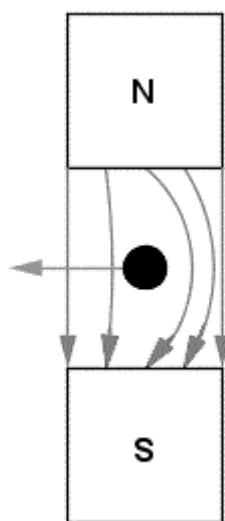
1.1.1 Vzájemné působení vodiče a magnetického pole

Pohybující se náboj vytváří magnetické pole. V okolí každého vodiče, kterým protéká proud, dochází ke vzniku magnetického pole. Je to dáno tím, že průchod proudu je způsoben pohybujícími se elektrony. Magnetické indukční čáry tvoří soustředné kružnice kolem vodiče, což můžeme vidět na *obr. 1.1. Magnetické indukční čáry vodiče*. Jejich směr můžeme určit pomocí pravidla pravé ruky, kde palec ukazuje směr průtoku proudu, a ostatní prsty sevřené do dlaně ukazují směr magnetických indukčních čar. Pro cívku lze použít Ampérovo pravidlo pravé ruky, které říká, že pokud palec ukazuje dohodnutý směr proudu v závitech, pak prsty ukazují orientaci magnetických indukčních čar.



Obr. 1.1. Magnetické indukční čáry vodiče [2]

Pokud vodič vložíme do homogenního magnetického pole, dochází k vzájemnému působení, jehož výsledkem jsou silové účinky mezi magnetickým polem a vodičem, pomocí nichž dochází k vychýlení vodiče. Směr působení síly závisí na tom, jak je orientován proud ve vodiči a vektor indukce vnějšího pole. Vnější pole je na jedné straně oslabováno polem vznikajícím kolem vodiče a na druhé straně posilováno. Není-li tedy vodič připevněn, začne se pohybovat do prostoru se zředěným magnetickým polem, znázorněno na *obr. 1.2. Pohyb vodiče v magnetickém poli*. Síla působící na vodič je přímo úměrná magnetické indukci vnějšího pole, proudu ve vodiči, délce vodiče v poli a sinu úhlu, který svírají indukční čáry vnějšího pole a vodič. [3]



Obr. 1.2. Pohyb vodiče v magnetickém poli [2]

1.1.2 Feromagnetické materiály

1.1.2.1 Feromagnetismus

Feromagnetismus je jev, při kterém materiál vykazuje spontánní magnetizaci, a patří mezi nejsilnější formu magnetismu. Je odpovědný za většinu magnetických reakcí a je základem pro všechny permanentní magnety, stejně jako pro kovy, které jsou k nim přitahovány.

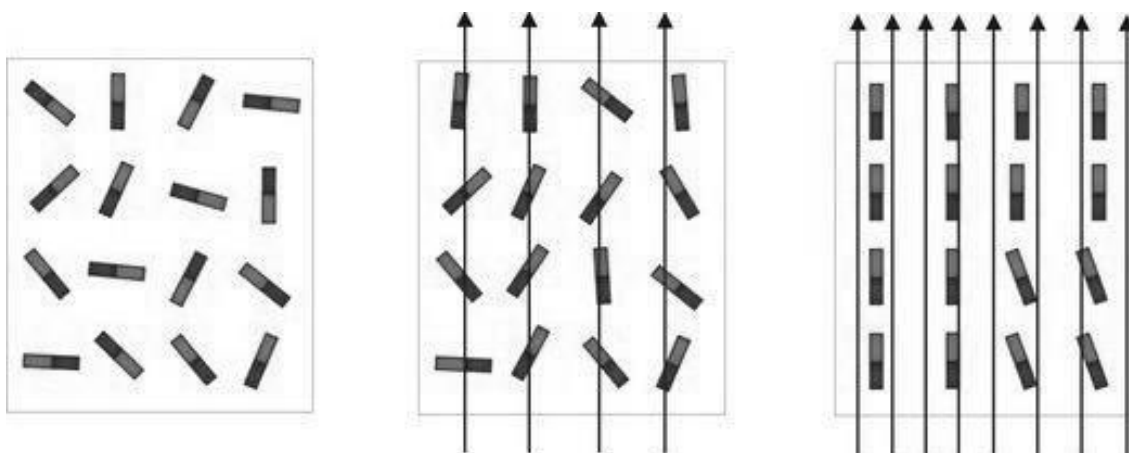
Látky vykazující feromagnetické vlastnosti se označují též jako feromagnetika. [4]

1.1.2.2 Podstata feromagnetismu

Ve feromagnetických látkách vznikají magnetické domény – tzv. Weissovy domény, což jsou oblasti, v nichž jsou magnetické dipóly shodně orientovány. V nepřítomnosti vnějšího pole je směr magnetických momentů jednotlivých domén různý, tím i magnetický moment látky nulový. Ve slabém poli dochází k rozšíření hranic domén a jejich moment je orientován

ve směru vnějšího pole, což způsobuje poměrně značné zesílení vnějšího magnetického pole. Při vysoké intenzitě vnějšího pole se magnetické dipólové momenty domén natočí do směru, který je nejbližší směru vnějšího magnetického pole (krystalografický směr). Při velmi silných vnějších polích se magnetické momenty domén postupně natočí do směru vnějšího magnetického pole a další jeho zvyšování vede již pouze k zesílení vnějšího pole.

Všechny výše popsané situace jsou postupně znázorněny na *obr. 1.3. Působení magnetického pole na feromagnetika*.

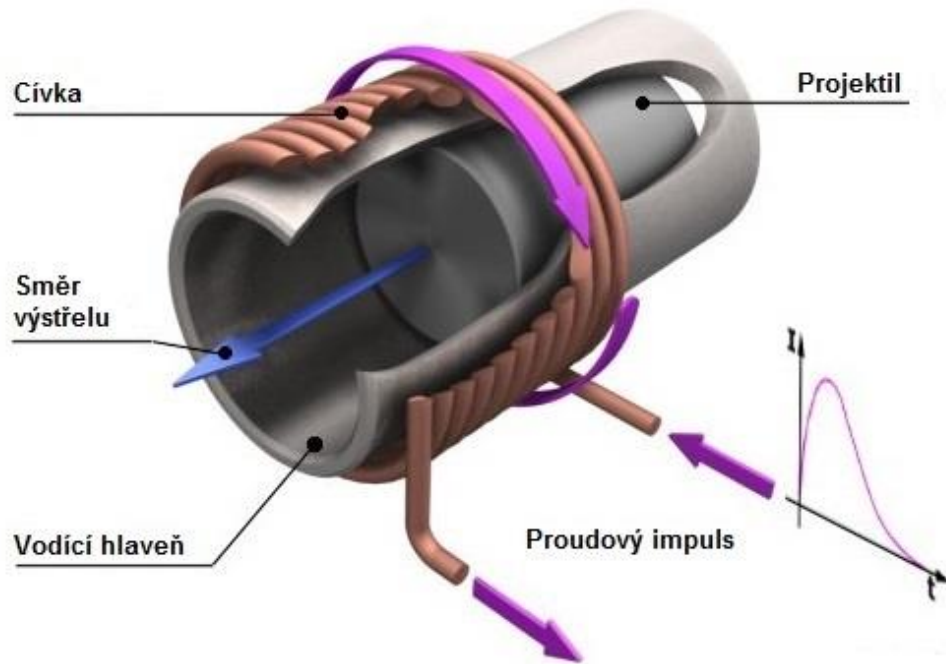


Obr. 1.3. Působení magnetického pole na feromagnetika [5]

1.2 Elektromagnetické cívkové dělo

Cívkové dělo je druh urychlovače projektilu, který obsahuje jednu nebo více elektromagnetických cívek uspořádaných jako lineární motor, jež feromagnetický projektil urychluje nebo jej přivádí na vysokou rychlost. [6] Princip je zobrazen na *obr. 1.4. Princip elektromagnetického cívkového děla*. Téměř ve všech konfiguracích cívkového děla bývá cívka a hlaveň na jedné společné ose. Název Gaussovo dělo je občas používán pro toto zařízení ve vztahu ke Carlu Friedrichu Gaussovi, který formuloval matematický popis magnetického efektu využívaného u magnetických akceleratorů.

Cívková děla obvykle sestávají z jedné nebo více cívek uspořádaných podél hlavní trubky, takže cesta urychlující střely leží podél středové osy cívek. Cívky se zapínají a vypínají v přesné časové sekvenci, což projektil urychlí podél hlavně prostřednictvím magnetických sil. [7] Zatímco jednoduchá cívková děla používají feromagnetické projektily nebo dokonce projektily s permanentními magnety, ve většině návrhů pro vysoké rychlosti je součástí projektilu cívka.



Obr. 1.4. Princip elektromagnetického cívkového děla [10]

První funkční cívkové dělo vyvinul a patentoval norský fyzik Kristian Birkeland. V roce 1934 vyvinul americký vynálezce kulomet na podobném principu cívkového děla, avšak až na několik málo fotografií a publikací je o něm velice málo známo. [8]

1.2.1 Konstrukce

Existují dva hlavní typy sestavení cívkových děl, jednostupňová a vícestupňová. Jdstupňová děla používají jeden elektromagnet k vystřelení projektilu. Vícestupňová používají několik elektromagnetů v řadě s postupným zvyšováním rychlosti projektilu.

1.2.2 Cívková děla pro feromagnetické projektily

Pro feromagnetické projektily jednostupňového cívkového děla se používá cívka jako elektromagnet, která má na jednom ze svých konců umístěný feromagnetický projektil. Pracuje na stejném principu jako elektromagnetické relé, tj. s proudovou cívkou, která vtahuje elektromagnetický objekt do svého středu. Velký proudový impuls přes vinutí cívky vytvoří silné magnetické pole, které vtahuje střelu do středu cívky. V okamžiku přiblížení tohoto bodu musí být elektromagnet vypnut, aby se zabránilo zadržení projektilu ve středu cívky.

Ve vícestupňovém provedení další elektromagnety tento proces opakují a postupně zrychlují projektil. V běžném provedení se hlaveň skládá z dráhy, ve které jezdí projektil. Ovladačem jsou tranzistory, které postupně připojují napětí k cívkám na dráze letu. Napájení

elektromagnetu je možné z rychle vybíjených zařízení, typicky baterií nebo vysokonapěťových kondenzátorů, vždy jedna skupina na jednu cívku. Do obvodu je vhodné vložit diodu pro ochranu součástek, které jsou citlivé na polaritu napětí.

Některé konstrukce mají ne-feromagnetické projektily, jako je hliník nebo měď, ve kterých se indukují proudy a fungují opět jako elektromagnet. V poslední době se objevují i experimenty se supravodivými materiály. [10,11]

1.2.3 Spínání

Jednou z hlavních překážek konstrukce elektromagnetického cívkového děla je spínání napájení elektromagnetické cívky. Existuje několik řešení, nejjednodušší a pravděpodobně nejméně účinné je použití jiskření, kdy se energie uvolňuje přes cívku po dosažení určité prahové hodnoty napětí. Lepší možnost je použít polovodičové spínače, mezi něž patří IGBT a MOSFET tranzistory, které mohou proudový impuls nejen sepnout, ale i ukončit. [12]

1.2.4 Magnetický obvod

V ideálním případě veškerý magnetický tok generovaný cívkou bude působit na projektil, ale často tomu tak vlivem konstrukce a vzduchových mezer není. Díky vzduchovému jádru cívky většina magnetického toku není spojena přes projektil z důvodu vysoké reluktance magnetického obvodu. Okolní tok vytváří magnetické pole, které vyzařuje energii do okolního vzduchového prostředí. Vzhledem k tomu je elektrický obvod elektromagnetického děla v podstatě analogií LC oscilátoru, kde by se nevyužitá energie měla vrátit zpět do kondenzátorů, ale to není možné z důvodu jedné polarizace elektrolytických kondenzátorů.

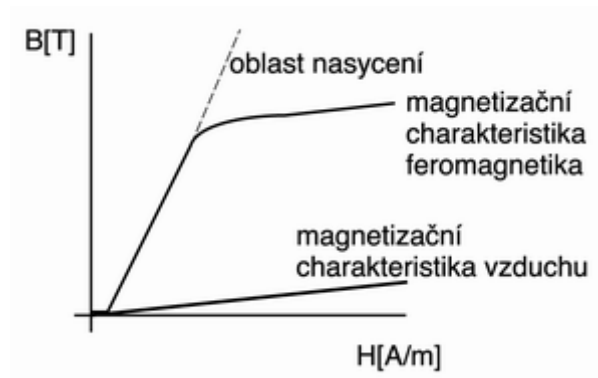
Ochrana proti reverznímu nabíjení bývá zajištěna pomocí diody připojené paralelně ke kondenzátoru, ale vyžaduje další vysokonapěťové diody a dobrou schopnost odvodu tepla.

Některé návrhy se pokoušejí získat zpět energii uloženou v magnetickém poli pomocí dvojice diod. Místo nuceného rozptýlení zbývající energie diody dobíjejí opět kondenzátory na správnou polaritu. Tím se také vyhneme potřebě plně nabít kondenzátory, což výrazně zkracuje dobu nabíjení. Nicméně praktičnost tohoto řešení je také omezena v důsledku vysokého dobíjecího proudu a tím zkrácení životnosti kondenzátorů. [12]

1.2.5 Saturace feromagnetického projektilu

Dalším významným omezením elektromagnetického cívkového děla je výskyt magnetického nasycení feromagnetického projektilu. Když tok v projektilu spočívá v lineární části magnetizační křivky materiálu, viz *obr. 1.5. Magnetizační charakteristika feromagnetického materiálu*, síla působící na jádro je úměrná druhé mocnině proudu

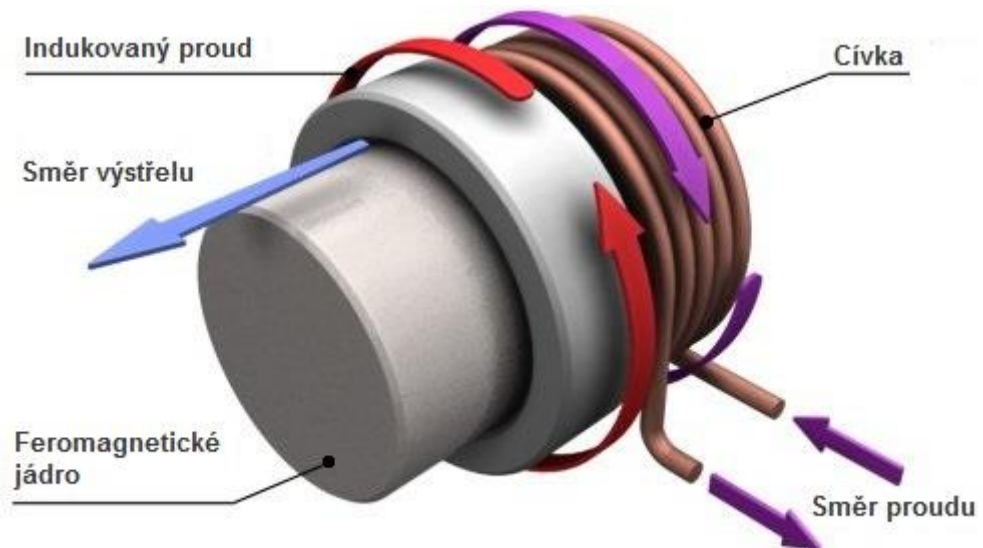
procházejícího cívkou, intenzita pole je lineárně závislá na proudu, indukce je lineárně závislá na intenzitě a síla je tudíž lineárně závislá na násobku indukce a intenzity. Tento vztah platí do okamžiku nasycení materiálu, jakmile se to stane, indukce se zvyšuje pouze nepatrně v závislosti na intenzitě, která roste v závislosti na proudu, ztráty jsou úměrné druhé mocnině proudu a tím klesá účinnost systému. Tím je dán limit, jakou silou může na projektil působit jedna cívka. [1]



Obr. 1.5. Magnetizační charakteristika feromagnetického materiálu

1.3 Indukční dělo

Indukční dělo, též Thompsonův odpalovač podle amerického vědce Elihua Thompsona, je opět pulsní usměrňovač stejně jako cívkové dělo. Projektil je principiálně uzavřený závit cívkou umístěný nad cívkou. Při výstřelu projde cívkou proudový pulz, který naindukuje opačný proud do cívkového závitu projektilu a vyvolá tak odpudivou sílu mezi projektilem a cívkou.[3] Princip je znázorněn na *obr. 1.6. Princip indukčního děla*. Opět je možné použít více cívek k urychlení projektilu.

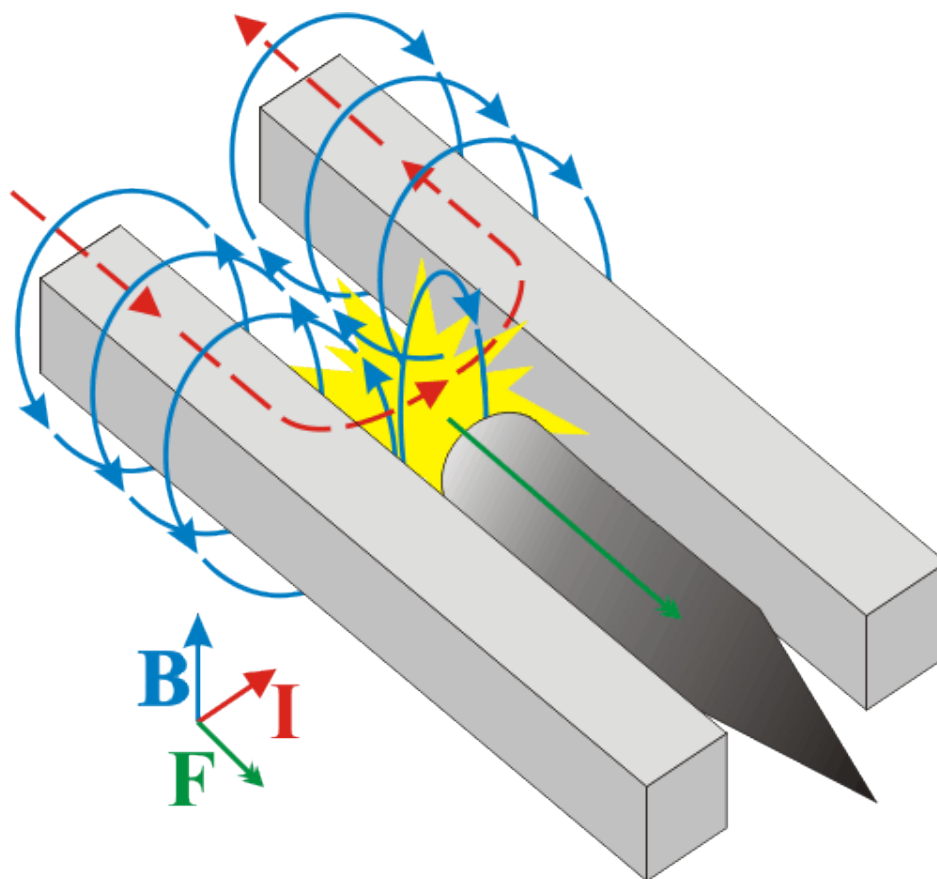


Obr. 1.6. Princip indukčního děla [10]

V prvním okamžiku potřebujeme velký a rychlý náběh magnetického pole, tím se v projektilu naindukují největší proud a bude působit největší síla. Na rozdíl od cívkového děla by v indukčním dělu mělo magnetické pole zanikat pomaleji, aby se v projektilu neindukoval proud opačné polarity. Z toho vyplývá výhoda nižších nároků na spínací obvody, oproti předchozímu případu, protože zde pozdní sepnutí příliš neuškodí.

1.3.1 Konstrukce

V této verzi existuje více druhů konceptu. Mezi nejzajímavější patří koncept s jádrem, na kterém je projektil navlečen. Vykazuje vysokou účinnost, ale pouze pro malé měřítko. Ve velkém měřítku je nepoužitelný, kvůli silným polím ztrácí jádro smysl a představuje konstrukční zátěž. Klasická hlavňová verze s řadou cívek kolem trasy projektilu je nevhodná pro malé měřítko. Do projektilu nelze naindukovat velký proud a ten navíc rychle zaniká, zato ve velkém měřítku přináší teoreticky výhodu. Masivní projektil by výrazně zmenšil svůj vlastní odpor a umožnil by uchovat naindukovaný proud do další sekce, čímž by se zvýšila účinnost. Obecně je optimalizace tohoto typu urychlovače pomocí výpočtu nebo modelováním velmi obtížná kvůli vysokému počtu vazeb v systému. [9]



Obr. 1.7. Princip elektromagnetického kolejnicového děla [10]

1.4 Elektromagnetické kolejnicové dělo

Elektromagnetické kolejnicové dělo, anglicky též Railgun, je lineární urychlovač. Princip je zobrazen na *obr. 1.7. Princip elektromagnetického kolejnicového děla*. Projektil se uzavírá elektrický obvod. Stejně jako drátem, jímž protéká proud v magnetickém poli a působí na něj Lorenzova síla. Z nákresu je též zřejmé, že napájení musí být na jednom konci kolejnic a záleží i na směru proudu, odtud pochází i název.

1.4.1 Konstrukce

Jediný konstrukční problém představuje nutnost tření projektilu o hlaveň – kolejnici, což má za následek velké opotřebování a s tím související kratší životnost. V praxi je tento urychlovač nejčastěji používán pro výrobu kinetických zbraní, což znamená, že kinetická energie je hlavní účinná energie projektilu a většinou nenese ani nálož, z toho vyplývá i větší velikost projektilu. Praktická konstrukce je možná až od větších měřítek, při malých rozměrech se projevuje odpor obvodu a projektil se připéká. [15]

1.5 Potenciální využití

Všechny výše popsané principy mají své výhody i nevýhody, největší rozdíl je ve vhodnosti vystřelovaného projektilu a na něm závislé účinnosti celého systému.

Malá cívková děla jsou často vyráběna elektrotechnickými nadšenci, obvykle dosahují střelné energie jednotek až desítek joulů, což je srovnatelné se vzduchovými pistolemi nebo malými střelnými zbraněmi, a dosahují obvykle účinnosti kolem procent. [13]

Mnohem vyšší účinnosti a energie dosahují návrhy s většími náklady na výzkum, které jsou financovány vládami velkých států. Nejúčinnější moderní návrhy zařazují mnoho stupňů. Na více než 90% účinnost se odhadují koncepty ze supravodivých materiálů, které budou odpalovat kosmické rakety.

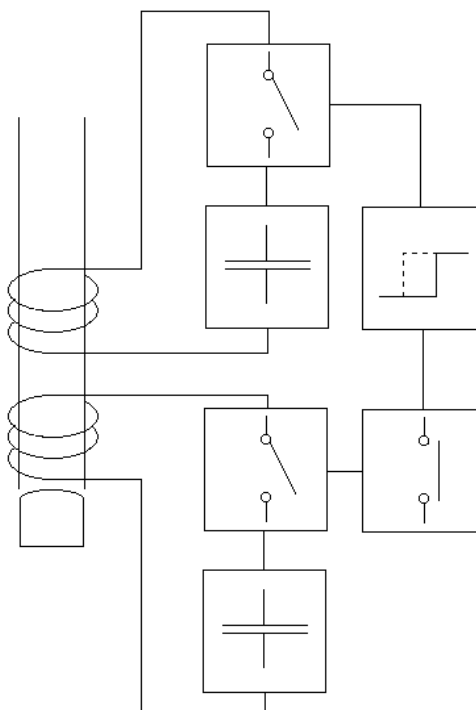
Americké letectvo již dnes používá elektromagnetická děla jako katapult letadel na svých letadlových lodích. Ve výzkumu je projekt, který bude vystřelovat na oběžnou dráhu družice a rakety bez lidské posádky. Náklady na výstřel by se měly po dokončení projektu mnohonásobně snížit oproti dnes používaným technologiím. [14]

Velice často bývají elektromagnetická děla zkoumána pro účely střelných zbraní, avšak již dnes se jejich principu využívá i v ostatních oblastech, např. v dopravě Maglev, který je indukčního typu.

Elektromagnetická děla kolejnicového typu jsou zkoumána pro prakticky stejné účely, je jenom otázkou času, který z principů dostane větší podporu při vývojích a bude vhodnější pro další praktické rozšíření. [2]

2 Konstrukční uspořádání

Cílem projektu je vytvořit funkční elektromagnetické cívkové dělo druhého stupně, které je principiálně zobrazené pomocí bloků na *obr. 2.1. Blokové schéma konstrukčního uspořádání.*



Obr 2.1. Blokové schéma konstrukčního uspořádání

První stupeň se skládá z cívky, z kondenzátorové baterie o kapacitě 0,1 F a o maximálním výstupním napětí 63 V, z příslušných napájecích a ovládacích obvodů. Druhý stupeň obsahuje totožnou cívku, která je napájena z kondenzátorové baterie o kapacitě 10 mF a maximálním výstupním napětí 400 V, ze zpožďovacího členu, který reaguje na první stupeň, a příslušných ovládacích obvodů.

2.1 Funkčnost ovládání

Dělo reaguje na stisk jediného ovládacího tlačítka. Při jeho stisku dojde k nabíjení kondenzátorových baterií, stav jejich nabíjení je zobrazen na indikátoru napětí umístěném podél hlavně. Po nabití kondenzátorových baterií na požadovanou úroveň dochází k uvolnění energie do cívek, které uvádí do pohybu projektil. Designové řešení je zobrazeno na *obr. 2.2. Design elektromagnetického děla.*



Obr. 2.2. Design elektromagnetického děla

2.2 První stupeň elektromagnetického děla

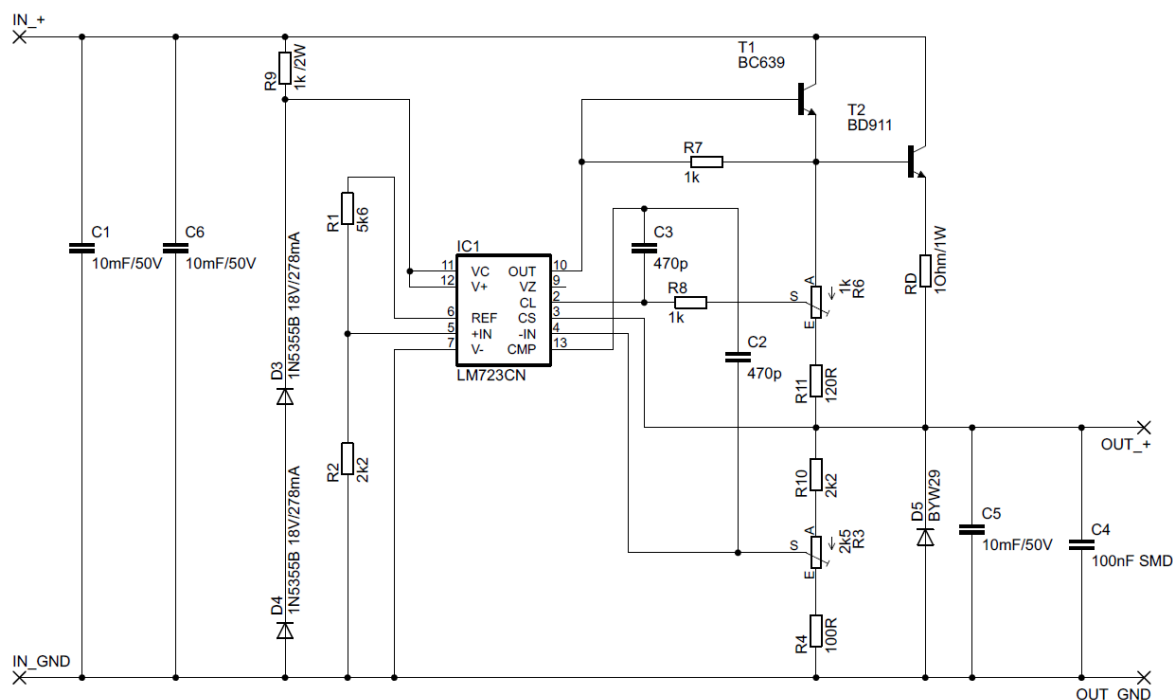
K prvnímu stupni bylo mým úkolem na projektu vytvořit napájecí zdroje, kondenzátorovou baterii a ovládací obvody.

2.2.1 Napájecí zdroje

Celý první stupeň elektromagnetického děla je napájen třemi různými zdroji. První zajišťuje nabíjení kondenzátorové baterie se sendvičovým uspořádáním o celkové kapacitě 0,1 F. Tato baterie poskytuje energii pro proudový impuls samotné cívky elektromagnetického děla. Druhý zdroj je pro elektroniku ovládaní celé konstrukce elektromagnetického děla. Třetí a poslední napájecí zdroj zajišťuje napájení pro bargraf s LED diodami, který zobrazuje stav nabití kondenzátorové baterie před výstřelem děla.

Z ekonomických důvodů se rozhodlo pro vytvoření univerzálního zdroje a tudíž i použití podobných součástek na shodné desce plošných spojů, kdy se vytvoření jedné šablony, následné zhotovení tří kusů desek plošných spojů a nákup stejných součástek ukazuje pro naše požadavky nejvhodnější. Z potřeby zdrojů pro elektroniku a pro LED vyplývá nutnost regulace napětí s nezávislým proudovým omezením, obojí nastavitelné plynule. Bylo

zvoleno zapojení s monolitickým stabilizátorem LM 723CN, které je posíleno vnějšími tranzistory. Zapojení univerzálního schématu je vyobrazeno na obr. 2.3. Schéma napájecího zdroje.



Obr. 2.3. Schéma napájecího zdroje

V příloze A. Napájecí zdroj prvního stupně je doplněna fotografií s rozmístěním součástek, jejich seznam s hodnotami a pouzdry. [17]

2.2.1.1 Zdroj pro nabíjení baterie

Nabíjení kapacit pro impuls magnetického děla probíhá s napětím maximálně 40 V. V budoucnu se počítá s napětím 63 V, které jsou schopny kondenzátory zvládnout. Proto je zapojení osazeno stabilizačními Zenerovými diodami (ve schématu D3 a D4) pro snížení napětí na stabilizátoru LM 723CN, který je na maximální vstupní napětí 40 V. Ve zdroji naopak nejsou využity kapacity C5 a C6, které jsou zastoupeny zvýšením hodnot kapacit C1 a C4 schopnými zvládnout napětí 63 V. Ve zdroji se nachází proudové omezení, které je plynule nastavitelné proměnným odporem R6 až do hodnoty 6 A.

2.2.1.2 Zdroj pro napájení elektroniky

Napájecí zdroj elektroniky je nastaven na výstupní napětí 13 V. Odpadá tedy nutnost zapojení Zenerových diod pro ochranu stabilizátoru LM 723CN. R9 je nahrazen vodivou cestou. Naopak jsou zde využity všechny sloty pro kondenzátory zobrazené ve schématu.

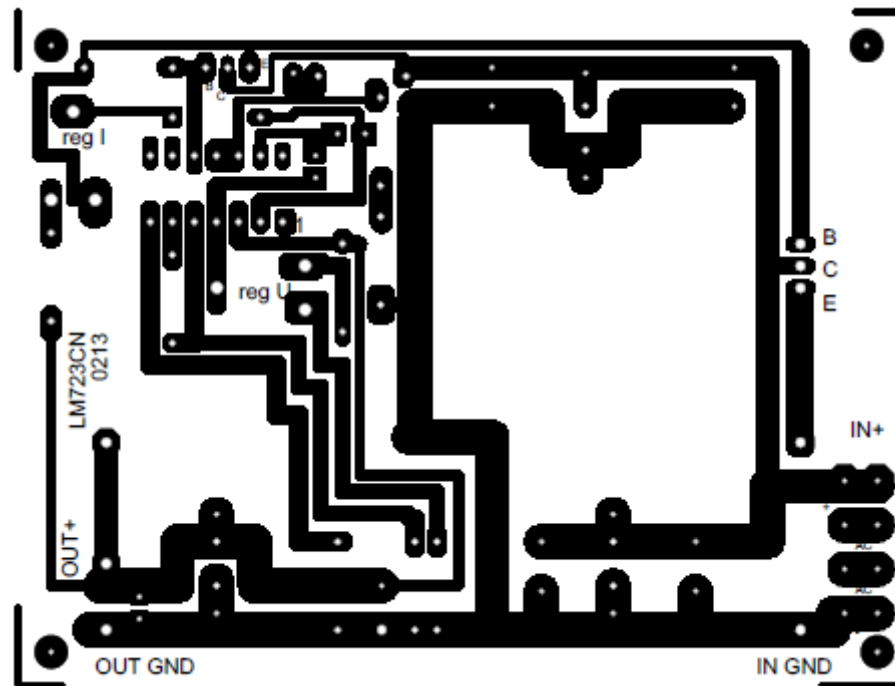
Maximální povolené napětí na použitých kondenzátorech je 16 V a není zde nutné použít dražší kondenzátory na 63 V jako v předchozím případě. Zařazení proudového omezení místo původně plánované LM 7812 pustí do zdroje proud maximálně 3 A při zkratu a tím ochrání větší část součástek. Nežvyklých 13 V na výstupu zde vyplývá z potřeby otevření FET tranzistoru, protože driver má podpěťovou ochranu. Je otevřen při napětích 12,6 až 24 V. Driver dodává do FET tranzistoru minimálně 30 A, což vyplývá z potřeby nabití hradla. Při menší hodnotě dochází k velkému průchodu proudu na rozhraní drain a source, který by způsobil nadměrné tepelné namáhání a následné zničení tranzistoru. V těsné blízkosti driveru FET tranzistoru jsou použity tři kondenzátory v pořadí elektrolytický, tantalový a keramický. Udrží napětí na driveru FET tranzistoru s použitím zdroje s proudovým omezením a umožňujícím nastavit proud na limitní hodnotu.

2.2.1.3 Zdroj pro napájení bargafu

Zapojení pro napájení LED diod je stejné jako v předchozím případě. Není zde potřeba proudového omezení. Z praktických poznatků se ukázalo vhodné snížit výstupní napětí na 8 V, kvůli velké svítivosti LED diodových pásků použitých pro konstrukci bargrafu, které jsou sice na 12 V, ale při plném výkonu lidské oko oslňovaly. Zde by postačilo jednodušší zapojení s LM 317, ale v rámci jednoty výroby bylo zvoleno opět zapojení se stabilizátorem LM 723CN. Řídící zdroj pro bargraf je doplněn o kapacitu, která po výstřelu děla zpomalí úbytek napětí na diodách. Tohoto jevu je využito pouze pro názornost vybíjení kondenzátorové baterie.

2.2.1.4 Řešení rozmístění součástek a vodivých cest na DPS

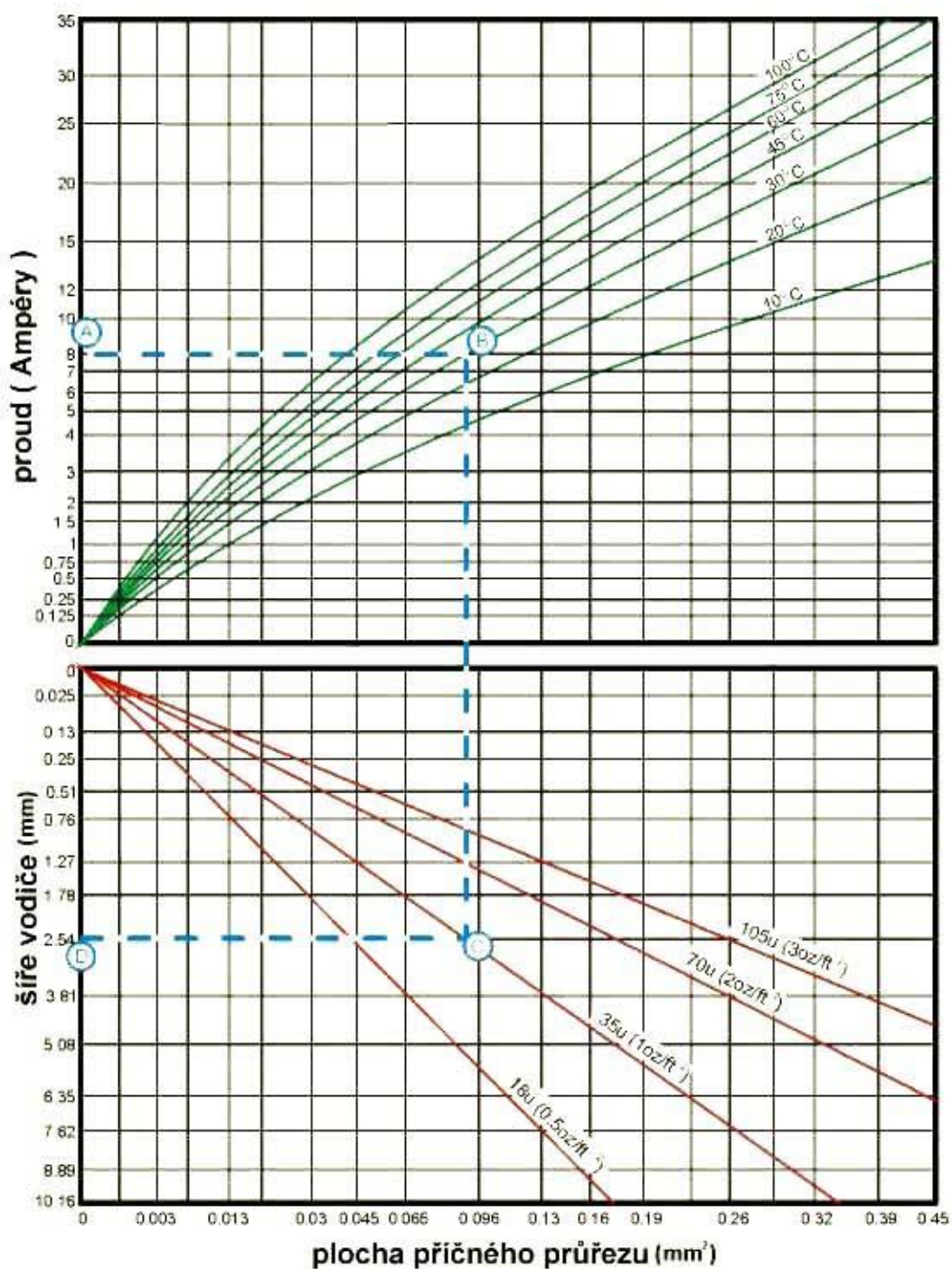
Z nutnosti přenášet špičkově proudy až 5 A v určitých částech zdrojů je nutné provést výpočet minimální šíře cesty na DPS a zmíněné cesty zesílit. Podklad pro výrobu desky je znázorněn na obr. 2.4. *DPS napájecího zdroje.*



Obr. 2.4. DPS napájecího zdroje.

V příloze A je doplněna fotografie hotového výrobku napájecího zdroje.

Šířka vodivých cest byla zvolena na základě podkladů od firmy PragoBoard, viz obr. 2.5. *Volba šířky vodivých cest pro DPS*, a dále byla ověřena teoretickým výpočtem. V našem případě byla použita deska s tloušťkou mědi 35 μm . Dále z obrázku vyplývá, že při šíři cesty 2,54 mm může obvodem procházet proud 9 A a obvod se oteplí na maximálně 30 $^{\circ}\text{C}$ při trvalém zatížení. [16]

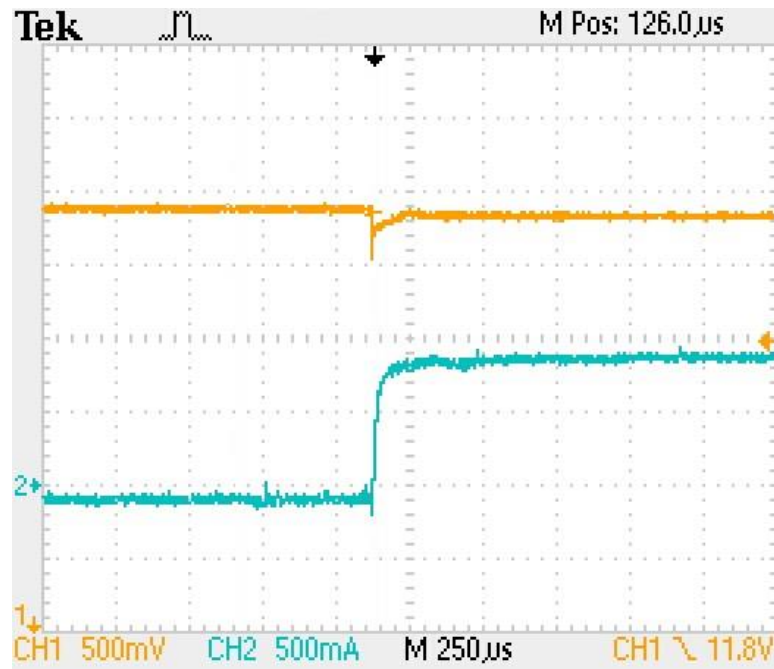


Obr. 2.5. Volba šířky vodivých cest pro DPS [16]

2.2.1.5 Měření kvality zdroje

Kvalitu zdroje lze určit z měření. Při skokové změně zátěže z 0 na 1 A a napájecím napětí 12,7 V byl v okamžiku připojení zátěže na zdroj pokles napětí 340 mV. Hlavní pokles zdroj vyrovnal za 22 μ s, doba plného zotavení na původní hodnotu napájecího napětí proběhla za 94 μ s. Závěrem lze prohlásit, že zdroj je dostatečně tvrdý a pro naši aplikaci kvalitou více

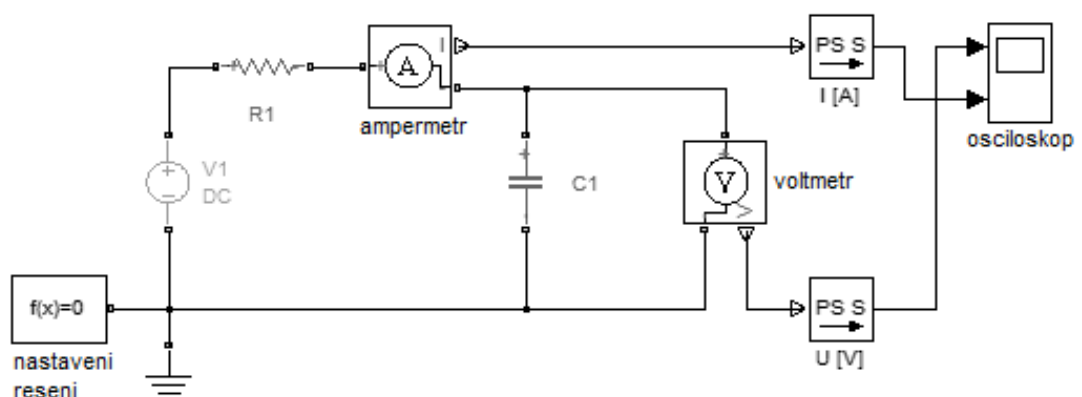
než dostačující. Měření z osciloskopu je zachyceno na *obr. 2.6. Reakce zdroje na skokovou změnu zátěže*. Modrý průběh odpovídá změně odebíraného proudu a oranžový poklesu napětí zdroje.



Obr. 2.6. Reakce zdroje na skokovou změnu zátěže

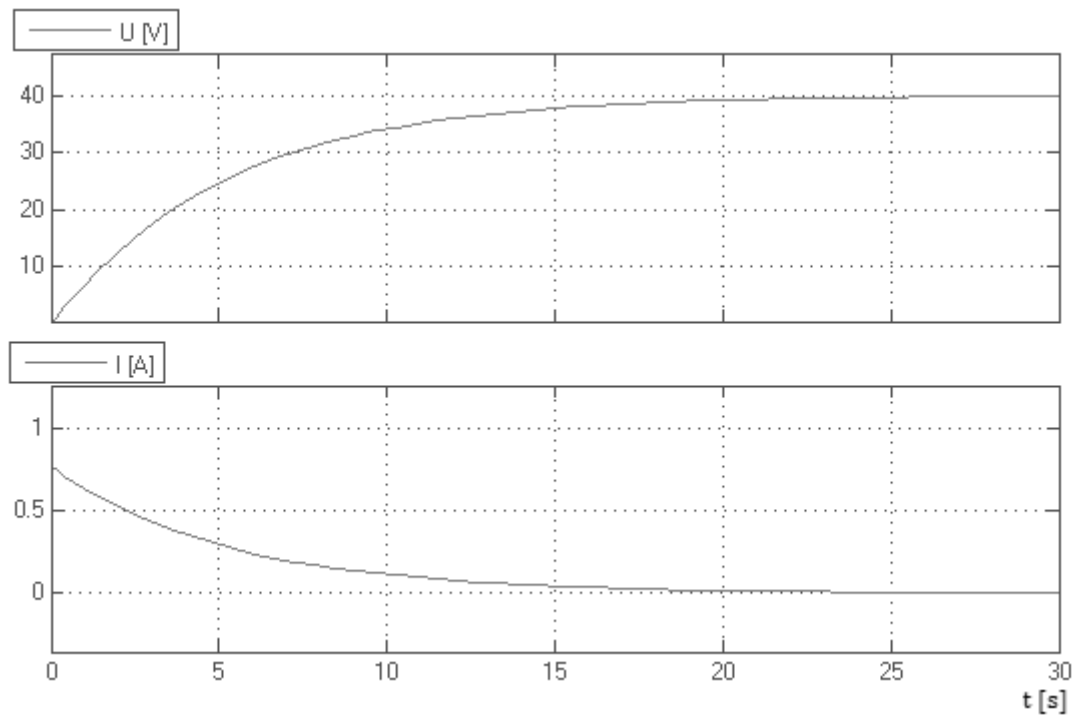
2.2.2 Simulace nabíjení

Pro zjištění rychlosti nabíjení kondenzátorové baterie se sendvičovým uspořádáním se provedla simulace v softwaru Matlab and Simulink. Simulovaný obvod je znázorněn na *obr. 2.7. Simulovaný obvod pro nabíjení kondenzátorové baterie*.



Obr. 2.7. Simulovaný obvod pro nabíjení kondenzátorové baterie

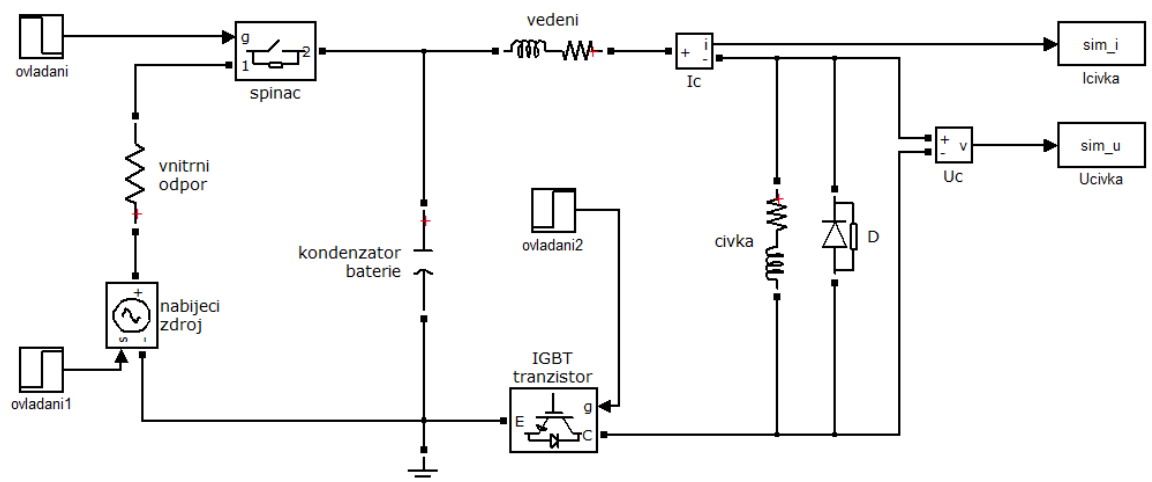
Ze simulovaných průběhů je zřejmé, že při nabíjení kondenzátorové baterie s kapacitou 0,1 F při napájecím napětí 40 V trvá dosažení stavu plného nabití 20 s. Průběh je zobrazen na obr. 2.8. Nabíjení kondenzátorové baterie.



Obr. 2.8. Nabíjení kondenzátorové baterie

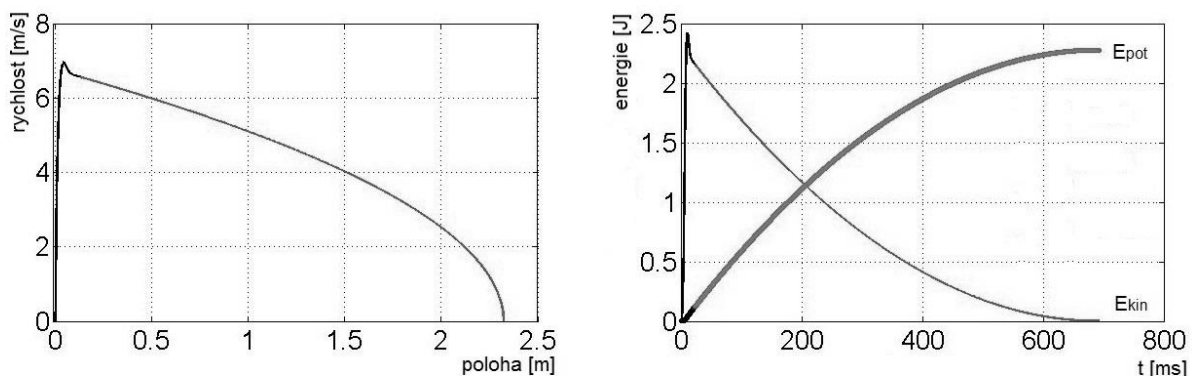
Jako kontrola simulovaných průběhů bylo provedeno měření, které odpovídá stejné době nabíjení jako u simulace.

2.2.3 Simulace výstřelu



Obr. 2.9. Schéma simulace výstřelu

Pro zjištění působení sil na projektil se provedly simulace obvodu v softwaru Matlab and Simulink. Podle schématu na *obr. 2.9. Schéma simulace výstřelu* byly vytvořeny průběhy energie a síly v závislosti na pozici a čase, které byly ověřeny jednoduchým měřením výšky výstřelu projektilu. Znázorněno na následujícím *obr. 2.10. a) Rychlost výstřelu, b) Energie projektilu*.

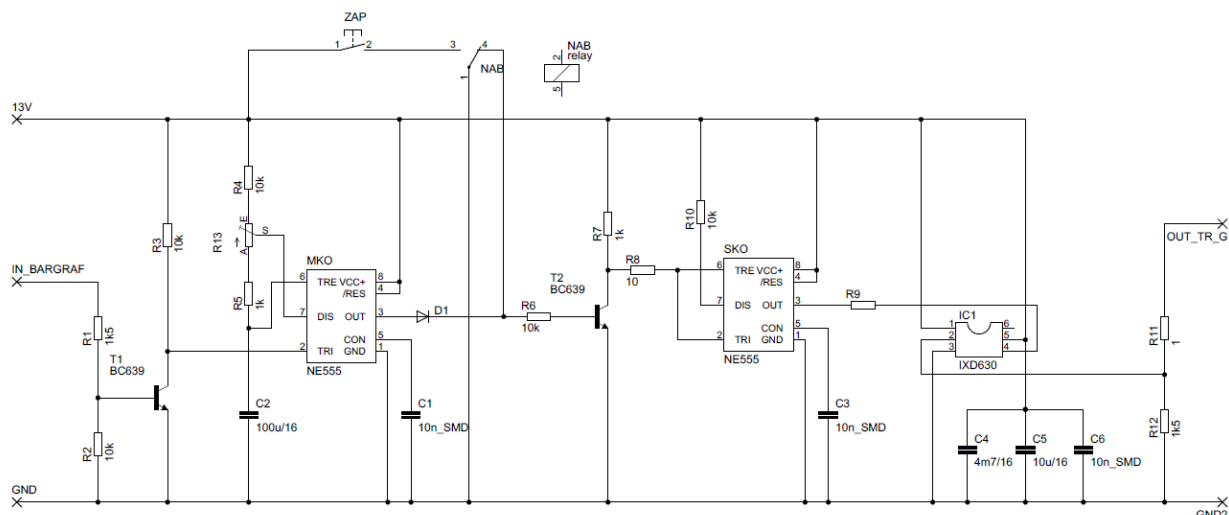


Obr. 2.10. a) Rychlost výstřelu, b) Energie projektilu

Ze simulovaných průběhů vyplývá důležitý důsledek. Cívka, která vytváří magnetické pole potřebné k výstřelu, působí na projektil moc dlouhou dobu a v konečné fázi projektil do značné míry zpomaluje. Je to způsobeno tím, že kondenzátorová baterie dostatečně rychle nedokáže odevzdat veškerou akumulovanou energii. Z tohoto jevu budeme vyvozovat konstrukční a ovládací změny pro druhý stupeň elektromagnetického děla.

2.2.4 Ovládací logika prvního stupně

U prvního stupně bylo potřeba vytvořit ovládací logiku, která zajistí správné nabití kondenzátorové baterie a následný výstřel projektilu. Schéma, pomocí něhož se popsany děj realizuje, je na *obr. 2.11. Ovládání prvního stupně elektromagnetického děla*.

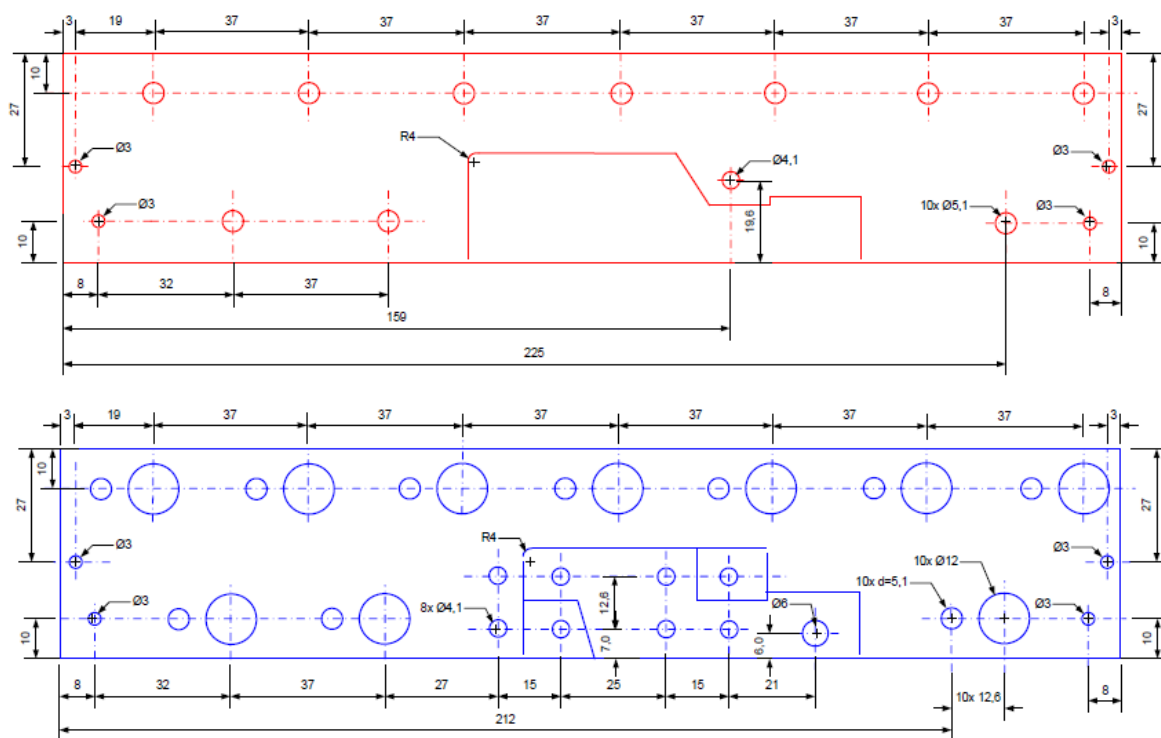


Obr. 2.11. Ovládání prvního stupně elektromagnetického děla

Po stisknutí ovládacího tlačítka označeného ZAP sepnou nabíjecí relé a kondenzátorová baterie prvního stupně se začne nabíjet pomocí zdroje popsaného v kapitole 2.2.1.1 Zdroj pro nabíjení baterie. Zároveň je baterie připojena na bargraf popsaný v kapitole 2.2.7. Indikátor napětí, po nabití baterie přepne vstup ovládací logiky spínacího monostabilního klopného obvodu. MKO vytvoří impuls o časové konstantě představující dobu sepnutí cívky prvního stupně. Impuls se přes stabilizující Schmittův klopný obvod přivádí na tranzistorové drivery IXD 630 od výrobce IXYS, které vytvářejí potřebné buzení pro spínací prvky. Zároveň je na výstup MKO připojen rozpínací kontakt ovládacího relé. Funkce MKO je vysvětlena v kapitole 2.3.4.1.

2.2.5 Kondenzátorová baterie prvního stupně

Stěžejním bodem práce bylo vytvořit vhodnou kondenzátorovou baterii, která by měla minimální parazitní indukčnost, ze které pak vychází námi potřebná velká strmost narůstajícího proudu. Pro první stupeň jsme zvolili konstrukci ze dvou měděných pásů. Pásky jsou umístěny nad sebou, každý je připojen na jeden potenciál kondenzátorů a jsou od sebe odděleny vzduchovou mezerou. Konstruktivní návrh je zobrazen na obr. 2.12. Konstrukce kondenzátorové baterie. Červenou barvou je znázorněna kladná deska a modrou záporná. Zapojení je možné nazvat sendvičovým uspořádáním kondenzátorové baterie.



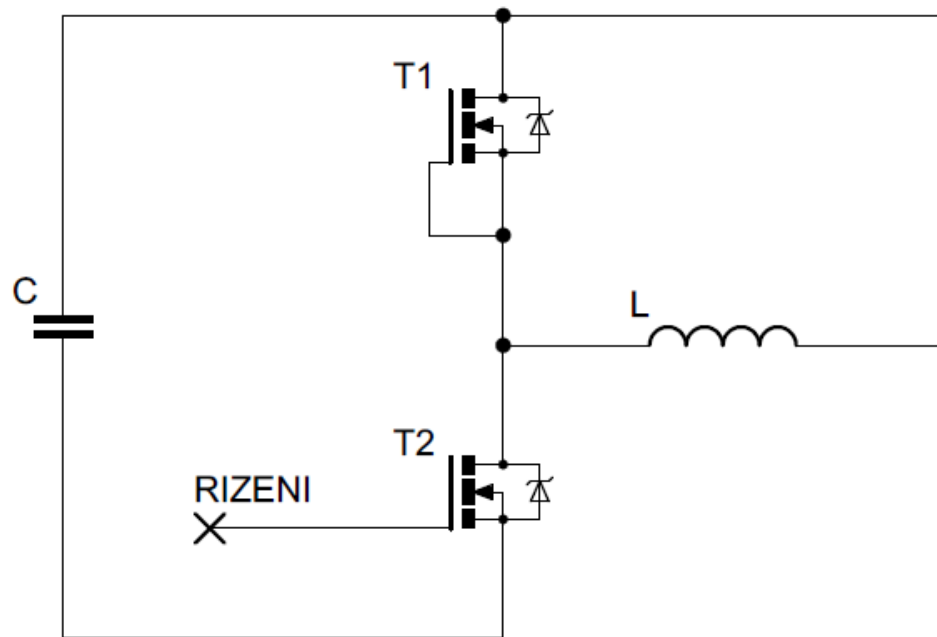
Obr. 2.12. Konstrukce kondenzátorové baterie

Pro zapojení byly zvoleny šroubové kondenzátory od firmy Kendeil typu K01 v celkovém zapojení deseti kusů paralelně. Kondenzátor je dimenzovaný na maximální napětí 63 V, čemuž odpovídá i nabíjecí zdroj a má kapacitu 10 mF, tudíž celková kapacita baterie je 0,1 F.

Nevýhodou tohoto uspořádání je různá vzdálenost jednotlivých kondenzátorů od spínacích prvků. V tomto důsledku jsou vzdálenější kondenzátory ovlivněny větším parazitním odporem a parazitní indukčností, díky čemuž odběr energie v nich uchovávaný je pomalejší než u kondenzátorů bližších. V případě vyšší spínací frekvence by mohly být bližší kondenzátory více výkonově namáhány, což vede k negativnímu vlivu na jejich životnost.

2.2.6 Dimenzování spínacích prvků

Součástí kondenzátorové baterie jsou též spínací prvky, jejichž zapojení je na *obr. 2.13. Spínací obvod elektromagnetického děla*. Umístění spínacích prvků na kondenzátorové baterii je opět z důvodů odstranění co největšího množství parazitních indukčností.



Obr. 2.13. Spínací obvod elektromagnetického děla

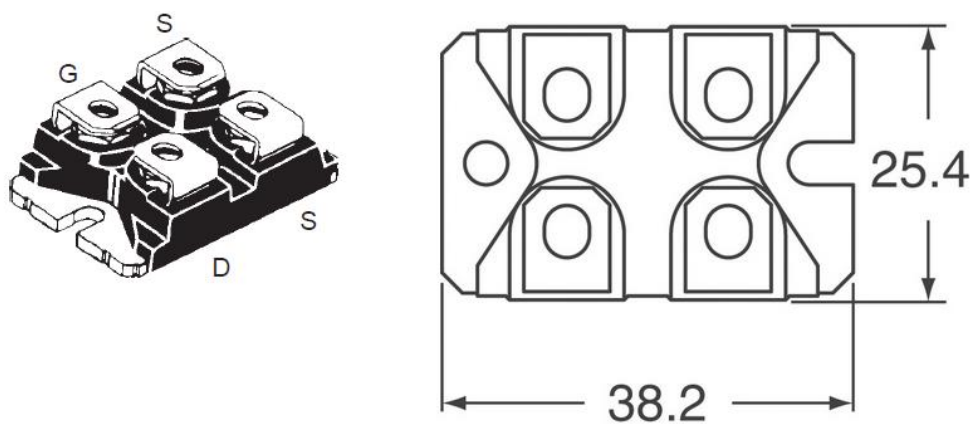
Jako spínací prvky byly zvoleny MOSFET tranzistory IXFN 340N07 od firmy IXYS, zobrazeny i s rozměry na obr 2.14. Spínací prvky prvního stupně, s následujícími parametry:

V_{DDS} - 70 V, maximální stejnosměrné napětí

I_{D25} - 340 A, přípustná hodnota střední hodnoty proudu

R_{DS(ON)} - 4 mΩ, odpor mezi drain a source v sepnutém stavu

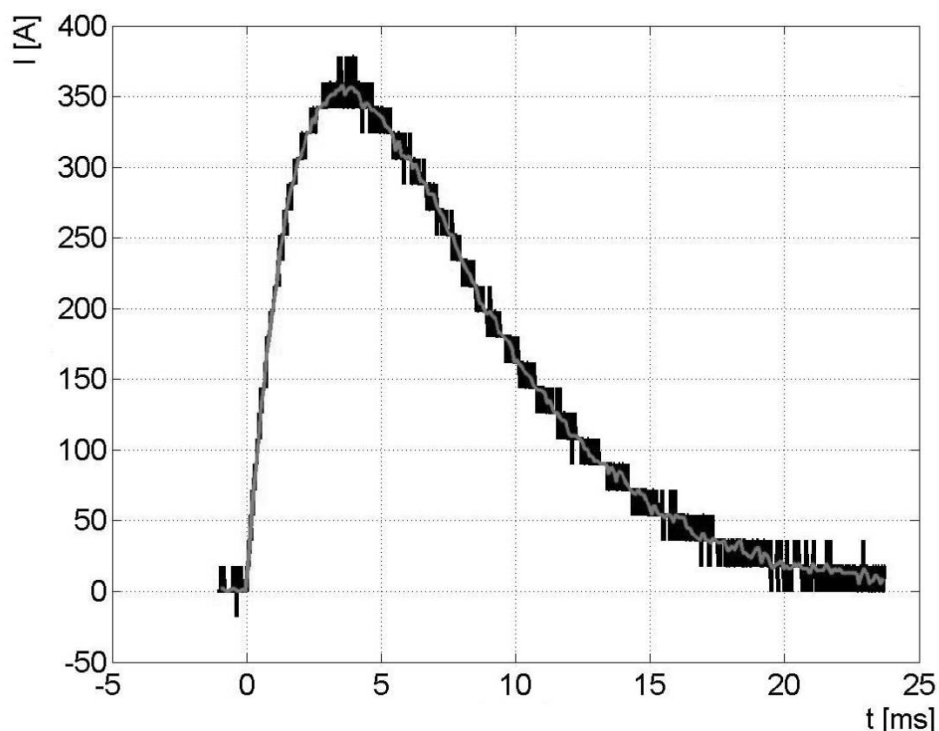
T_{D(ON)} - 100 ns, čas potřebný pro sepnutí



obr 2.14. Spínací prvky prvního stupně [28]

Stejněsměrné pracovní napětí tranzistorů je 70 V, což je pro použití s baterií na maximální napětí 63 V dostatečná rezerva. Střední hodnota maximálního průchozího proudu tranzistorem je 340 A, špičkově zvládá přenášet proud až 1360 A. [28]

Z provedeného měření, viz *obr. 2.15. Proudový impuls cívkou prvního stupně*, vyplývá, že tranzistorem prochází proud o špičkové hodnotě 360 A, která překračuje maximální střední hodnotu průchozího proudu tranzistorem o 20 A po dobu 2 ms, což tranzistor zvládá bez obtíží.

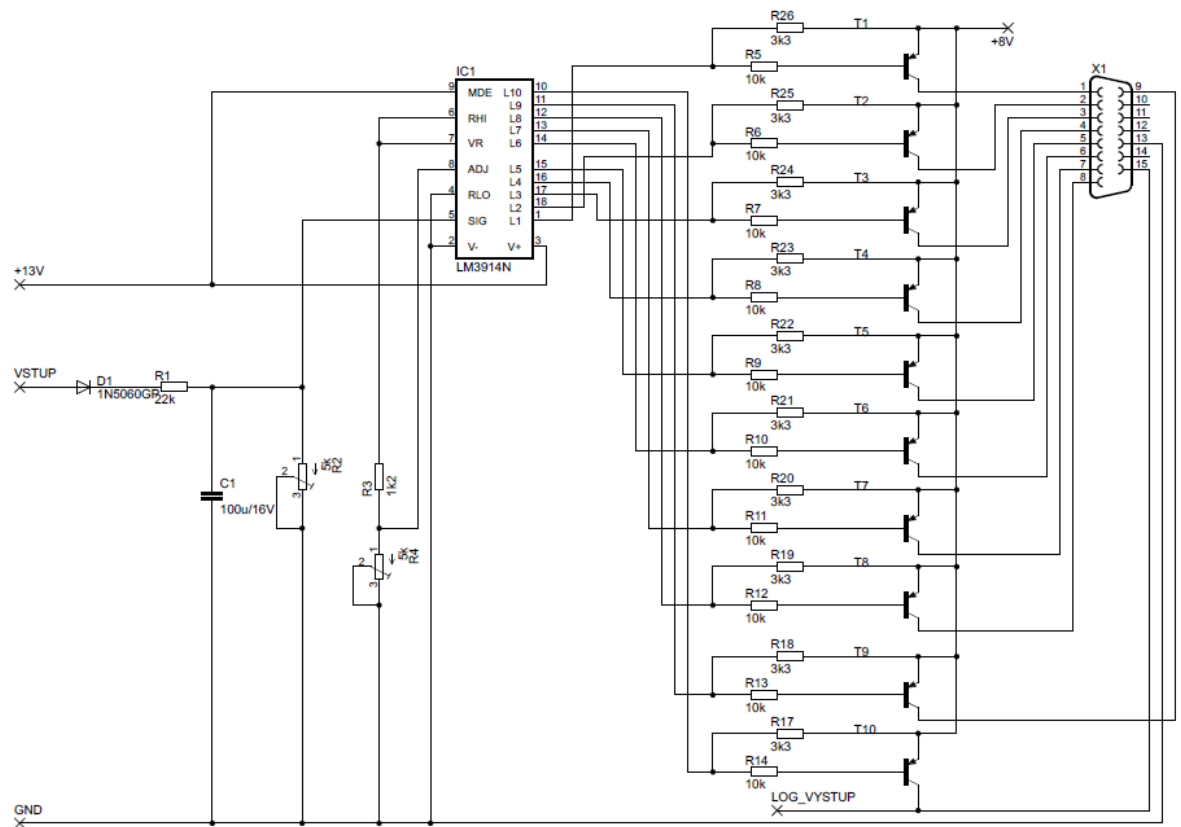


Obr. 2.15. Proudový impuls cívkou prvního stupně

Vzhledem k tomu, že můžeme impuls vysílat nejčastěji v řádu desítek vteřin s ohledem na nabíjení kondenzátorové baterie, nedochází na tranzistorech k prakticky žádnému oteplení. Tranzistor podle uvedených dat může pracovat při maximální teplotě 150 °C. Ze zde uvedených důvodů nemusíme ke spínacím tranzistorům připojovat chladič.

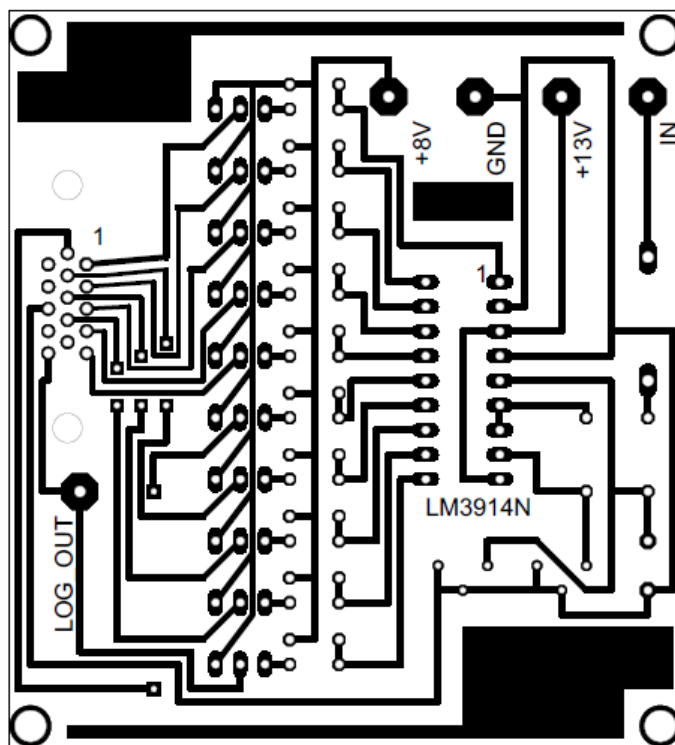
2.2.7 Indikátor napětí

Elektromagnetické dělo je doplněno o indikátor napětí, též bargraf, který znázorňuje míru nabití kondenzátorové baterie. Bargraf je napájen ze zdroje popsaném v kapitole 2.2.1.3. Jeho zapojení je na *obr. 2.16. Zapojení bargrafu*.



Obr. 2.16. Zapojení bargrafu

Hlavní částí bargrafu je integrovaný obvod LM 3914N, jeho úkolem je postupně rozsvěcovat LED diody v závislosti na stavu nabití baterie a po jejím plném nabití vyslat impuls, díky kterému se provede výstřel. Deska plošných spojů pro bargraf je na *obr. 2.17. DPS pro bargraf*. Seznam součástek a jejich rozmístění je v příloze F.

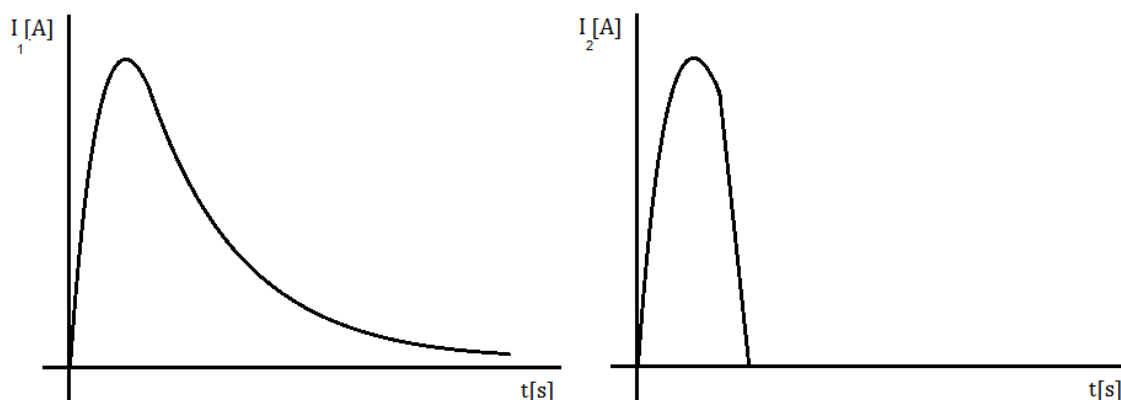


Obr. 2.17. DPS pro bargraf

2.3 Druhý stupeň elektromagnetického děla

Pro druhý stupeň elektromagnetického děla bylo mým úkolem vytvořit ovládací prvky, kondenzátorovou baterii a jejich příslušné napájení.

Napětí kondenzátorové baterie vzrůstá na 400 V oproti 63 V prvního stupně, celková kapacita baterie pro druhý stupeň je 10 mF. Proud cívkou může vzrůst na stovky ampér a zkrátí se čas jeho průchodu. Tudíž je nutné ukončit proudový impuls a nenechat samovolně plně vybit kondenzátorovou baterii jako v případě prvního stupně, jak je znázorněno na *obr. 2.18. Tvar proudového impulsu prvního a druhého stupně.*



Obr. 2.18. Tvar proudového impulsu prvního a druhého stupně

2.3.1 Kondenzátorová baterie druhého stupně

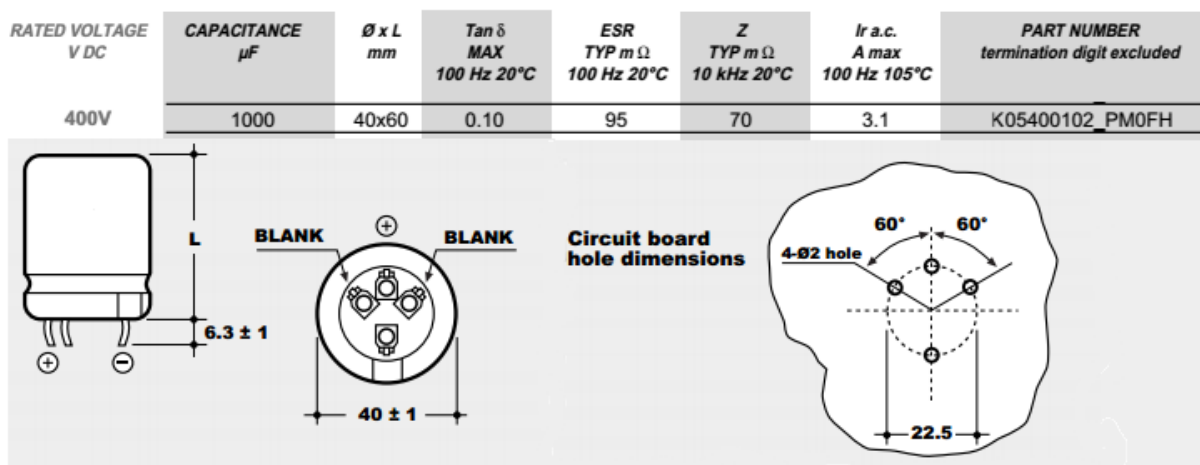
K druhému stupni bylo potřeba vytvořit kondenzátorovou baterii s možností odevzdání velkého množství energie za velmi krátký časový okamžik.

V návaznosti na požadavek se v dnešní době ve výkonové elektronice používá sendvičové uspořádání na desce plošných spojů vytvořené formou dělicích čar. Deska plošných spojů vytvořena formou dělicích čar využívá maximálního možného množství mědi, tudíž umožňuje přenášet velké proudy bez nežádoucího odporu, parazitní indukčnosti a oteplení desky. Různé potenciály jsou odděleny pouze tenkou nevodivou vrstvou. Tato technologie snižuje rušivé vlivy a maximalizuje výkonové využití desky plošných spojů.

Desku plošných spojů lze vytvořit v prakticky jakémkoliv rovinném tvaru. Oproti předchozí kondenzátorové baterii pro první stupeň, která je vyrobena z pásové mědi, můžeme zvolit příznivější tvar, který významně zkrátí vzdálenost mezi jednotlivými kondenzátory a spínacími prvky, což významně snižuje parazitní indukčnosti a odpory. Lze též umístit všechny kondenzátory v prakticky stejné vzdálenosti od spínacích prvků, což má příznivý vliv na rovnoměrné využití kondenzátorů a tím i jejich životnost.

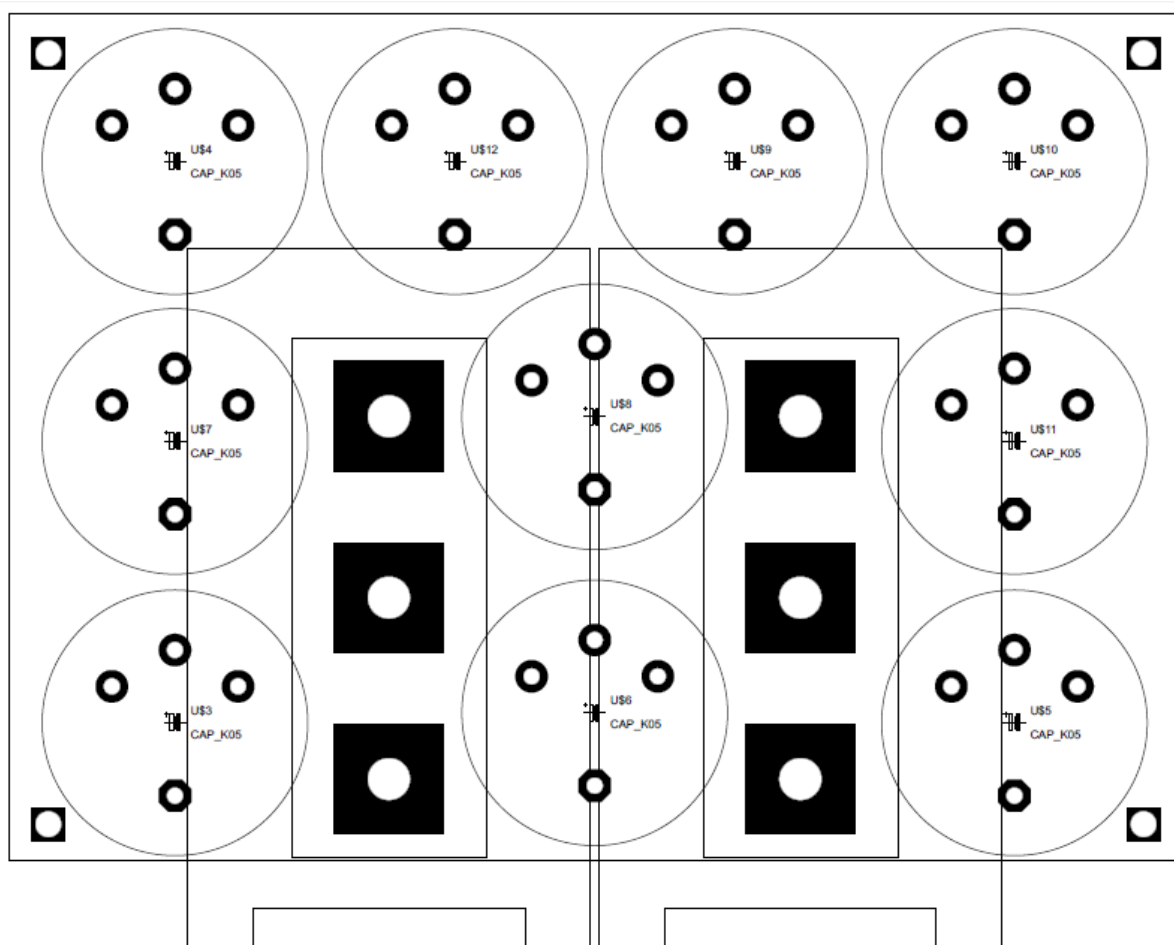
Po výpočtech ostatních členů pracujících na projektu bylo nutné vytvořit baterii schopnou pracovat s napětím 400 V. Voleno bylo mezi možnostmi kondenzátory na plné napětí 400 V nebo možnostmi zapojení dvou prvků vždy do série, tudíž by stačily kondenzátory na poloviční napětí 200 V, ale také by se zmenšila celková kapacita na polovinu.

Po zohlednění požadavků na kapacitu, maximální provozní napětí, rychlost přenosu energie, možnost montáže na desku plošných spojů a ekonomického hlediska se v současné době jeví nejvhodnější paralelní spojení deseti kusů kondenzátorů K05400102_PM0FH od firmy Kendeil. Zmíněný kondenzátor má kapacitu 1 mF a je schopen pracovat s napětím 400 V, tudíž není nutné řadit více prvků do série, jedná se o elektrolytický THT kondenzátor, tyto typy se vyznačují minimálním odporem a možností přenosu velkých proudů tedy i malou časovou konstantou. Forma montáže je snapin, která je vhodná pro pájení do desky plošných spojů a zároveň se vyznačuje velkou mechanickou odolností srovnatelnou se šroubovacími kondenzátory. Technické specifikace kondenzátoru jsou na *obr. 2.19. Kondenzátor pro baterii druhého stupně*. [29]



Obr. 2.19. Kondenzátor pro baterii druhého stupně [29]

V návaznosti na výběr kondenzátorů a spínacích prvků, jejichž výběr bude popsán v následující kapitole, bylo třeba vytvořit návrh desky plošných spojů. Spínací prvky a kondenzátory jsou umístěny na jedné desce z důvodu co nejmenšího odporu a parazitní indukčnosti. Jako neoptimálnější návrh pomocí zvolených součástek se jeví ten, jenž je zobrazený na obr. 2.20. *Rozmístění součástek kondenzátorové baterie*. Bylo zvoleno středové umístění spínacích prvků, okolo nichž jsou souměrně rozmístěny kondenzátory. Zvolený návrh zaručuje optimální využití všech kondenzátorů, malý odpor a parazitní indukčnost, protože kondenzátory jsou co nejbližší spínacím prvkům. Zároveň se jedná o maximální úsporu prostoru a dále byla zpřístupněna čelní strana desky, kde jsou umístěny vývody pro ovládání spínacích prvků, což zaručuje bezproblémovou montáž přívodů s ovládacím signálem.

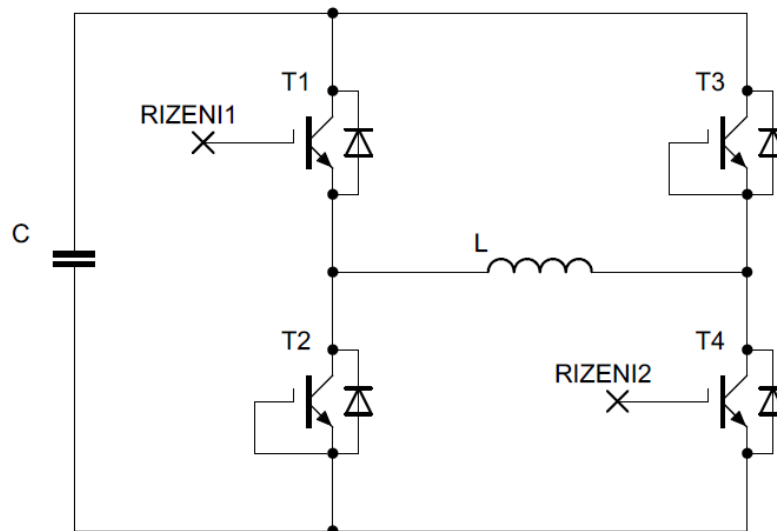


Obr. 2.20. Rozmístění součástek kondenzátorové baterie

Rozložení mědi je zobrazeno v příloze B. V horní části je zobrazena spodní strana desky, která má záporný potenciál, na této straně jsou připevněny spínací tranzistory. V dolní části je vrchní strana desky, která je připojena ke kladnému potenciálu, a na této straně jsou též kondenzátory připevněny. Veškeré otvory jsou prokovené kvůli nutnosti montáže všech prvků na obě polarity.

2.3.2 Dimenzování spínacích prvků

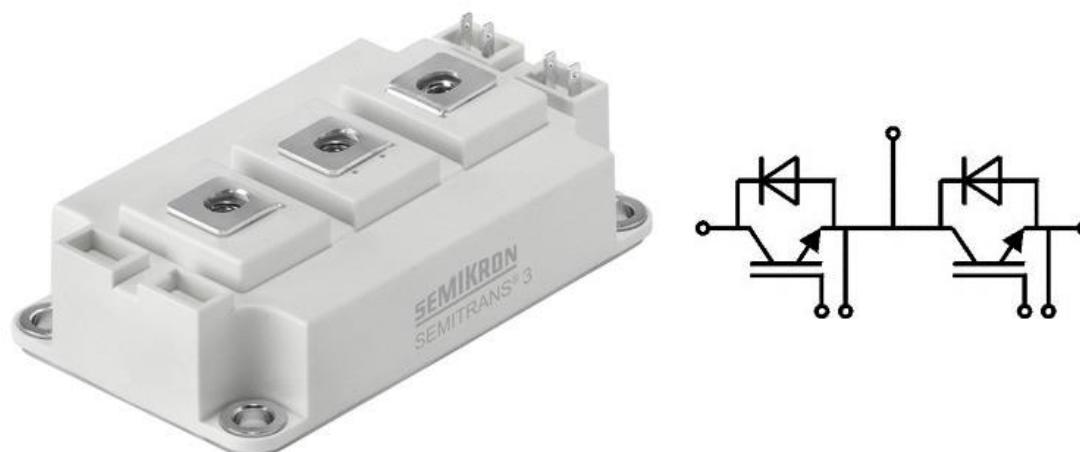
Pro druhý stupeň cívkového děla bylo potřeba vybrat spínací prvky, které vydrží 400 V napětí na kondenzátorové baterii, zároveň dokáží přenášet velké proudy v řádu až stovek ampér a především jejich spínací čas by měl být co nejmenší. Spínací prvky jsou umístěny na kondenzátorové baterii a jejich zapojení je na *obr. 2.21. Spínací obvod 2. stupně.*



Obr. 2.21. Spínací obvod 2. stupně

K dimenzování spínacích tranzistorů nelze použít klasické vzorce uvedené v literatuře [26]. Jelikož náš prvek spíná ve velmi dlouhém časovém horizontu na krátký okamžik, a tak se nejedná o klasické využití prvku výkonové elektroniky.

Nejprve zvolíme prvky, které mají odpovídající vlastnosti zapojení na *obr. 2.21. Spínací obvod 2. stupně*. Vzhledem k potřebě zapojení tranzistoru, který má ve vnitřní struktuře zpětnovazební diodu, můžeme volit mezi MOSFET a IGBT tranzistory. Velkou výhodou MOSFET tranzistorů je schopnost nedestruktivního, mnohonásobného proudového přetížení na krátký časový okamžik, který se opakuje s frekvencí blízkou nule, což přesně naší aplikaci vyhovuje. Avšak rychlost sepnutí do stavu plného otevření hovoří jednoznačně ve prospěch IGBT tranzistorů, která je u cívkového děla daného výkonu důležitější. Dále zvolíme nejhorší možné průběhy veličin na spínacím prvku. V našem případě je maximální napětí dáno kondenzátorovou baterií, tj. 400 V. Proud je dán poměrem napětí na baterii, součtem parazitních odporů cívky a ostatních částí obvodu. Je možné, že napětí 400 V dokáže cívku protlačit proud řádů až stovek ampér. Jelikož má baterie kapacitu pouze 10 mF a délka spínacího impulsu je v řádu milisekund, opakující se v dlouhém časovém horizontu, předpokládáme naprosto minimální oteplení spínací součástky vlivem průchozího proudu. Též oteplení spínacími ztrátami z výše uvedeného důvodu zcela zanedbáme.



Obr. 2.22. Spínací prvek druhého stupně a jeho vnitřní zapojení [27]

Po zohlednění popsaných požadavků a ekonomického hlediska jsme se rozhodli pro volbu modulu dvou tranzistorů IGBT v jednom pouzdře a to v počtu dvou kusů. Konkrétně modulu SKM300GB12V od výrobce Semikron v pouzdře Semitrans3, zobrazeném na obr. 2.22. Spínací prvek druhého stupně a jeho vnitřní zapojení, s následujícími parametry:

- VCES - 1200 V, maximální stejnosměrné napětí
- ICN - 300 A, přípustná hodnota střední hodnoty proudu
- ICRM - 900 A, maximální okamžitá hodnota proudu
- RCE - 3,03 mΩ, odpor mezi kolektorem a emitorem v sepnutém stavu
- TD(ON) - 340 ns, čas potřebný pro sepnutí
- TD(OFF) - 576 ns, čas potřebný pro vypnutí [27]

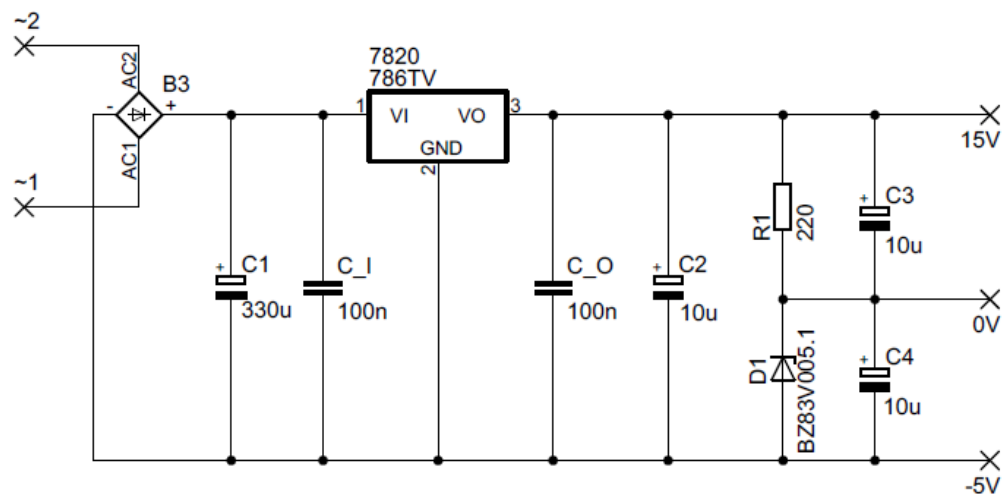
2.3.3 Zdroj pro spínací tranzistory

Námi vybrané spínací prvky potřebují pro rychlé a kvalitní spínání zdroj nejenom kladného, ale i záporného napětí, který bylo třeba navrhnout a zrealizovat. Jako vhodné se jeví zapojení se stabilizátorem z řady LM 78XX. Zvolen byl jeden stabilizátor LM 7820, který má na svém výstupu napětí 20 V. Napětí je děleno pomocí Zenerovi diody na napětí 5,1 V, které zajišťuje zápornou polaritu a je využíváno při vypínání tranzistorů. Zbývá hodnota napětí 14,9 V je použita k sepnutí tranzistoru. Schéma zapojení je zobrazeno na obr. 2.23. Zapojení zdroje pro spínací prvky a dále doplněno o usměrňovací můstek z důvodu napájení z transformátoru připojeného na střídavou síť. Návrh desky plošných spojů je na obr. 2.24. DPS pro zdroj spínacích prvků.

Kapacity C2, C3 a C4 bylo nutné zvolit s ohledem elektrický náboj hradla spínacích prvků. Z matematického vzorce:

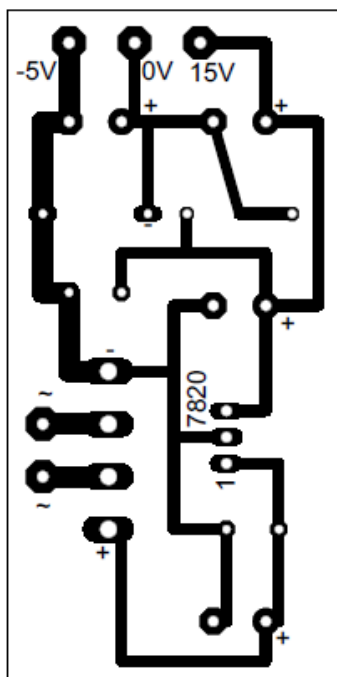
$$C = \frac{Q}{U}$$

Vychází, že při potřebě odčerpání náboje nutného ke změně vodivosti stavu spínací součástky druhého stupně, který je dle datasheetu 3300 nC, a požadovaném poklesu napětí maximálně 0,5 V potřebujeme kondenzátory o kapacitě minimálně 6,6 μF . S ohledem na výpočet, výrobní řady a přesnost prvků volíme rezervu v podobě 10 μF kondenzátoru.



Obr. 2.23. Zapojení zdroje pro spínací prvky

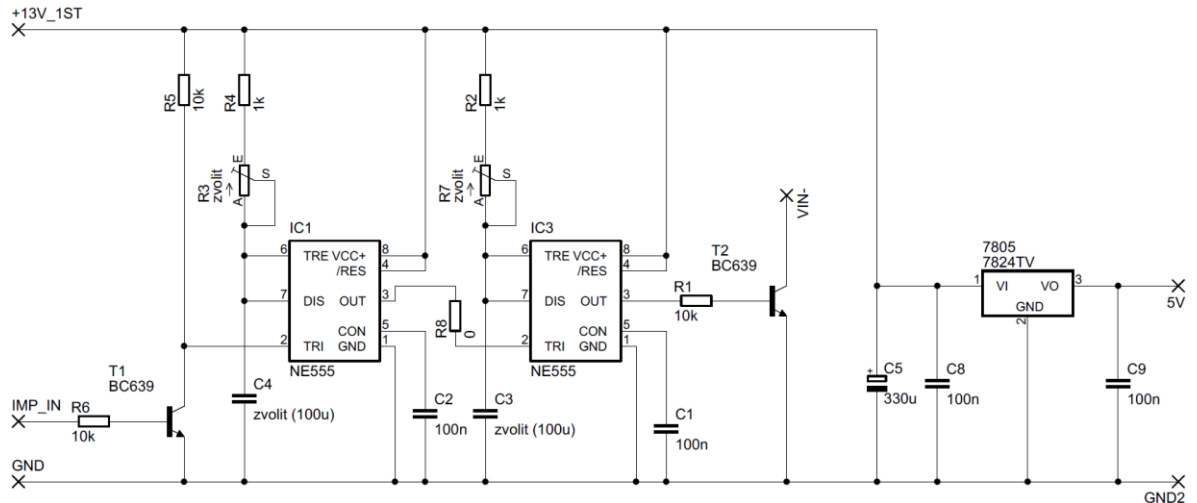
Nevýhodou zdroje jsou pevně daná napětí na výstupu. Vhodnou alternativou by bylo zapojení se stabilizátory LM 317 pro kladné napětí a LM 377 pro záporné napětí, u kterých je možnost ladění výstupního napětí pomocí potenciometru.



Obr. 2.24. DPS pro zdroj spínacích prvků

2.3.4 Ovládací logika druhého stupně

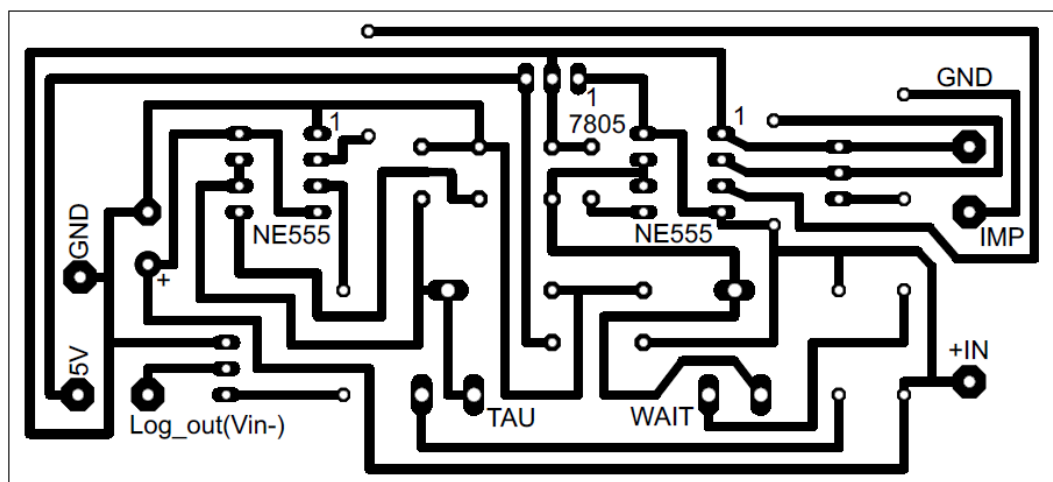
Pro potřebu spuštění proudového impulsu cívkou druhého stupně elektromagnetického děla ve správný časový okamžik bylo třeba vytvořit ovládací obvod. Na spínací obvod, viz obr. 2.25. *Spínací obvod druhého stupně*, je přiveden spínací impuls z ovládacího obvodu prvního stupně. Impuls je zpožděn o adekvátní časový okamžik, který odpovídá době doletu projektilu na okraj cívky druhého stupně. Výpočet tohoto času není součástí této práce a byl úkolem jiných pracovníků projektu. Zpoždění je realizováno integrovaným obvodem NE 555 zapojeným jako monostabilní klopný obvod. Délka časového okamžiku je nastavitelná pomocí potenciometru R3. V okamžik ukončení zpoždění začne generovat druhý monostabilní klopný obvod impuls o časové konstantě odpovídající doletu projektilu do středu cívky druhého stupně. Výpočet této časové konstanty též není součástí práce. Délka časové konstanty je laditelná pomocí potenciometrů R7. Dále se generovaný impuls, realizovaný pomocí tranzistoru s otevřeným kolektorem, kvůli možnosti využití negativní logiky, přivádí na dva optoelektronické oddělovače s budiči spínacích tranzistorů.



Obr. 2.25. Spínací obvod druhého stupně

Návrh desky plošných spojů pro předchozí schéma je na *obr. 2.26. DPS pro ovládací logiku druhého stupně*. V příloze D.: Spínací obvod druhého stupně je zobrazeno rozmístění součástek a jejich seznam.

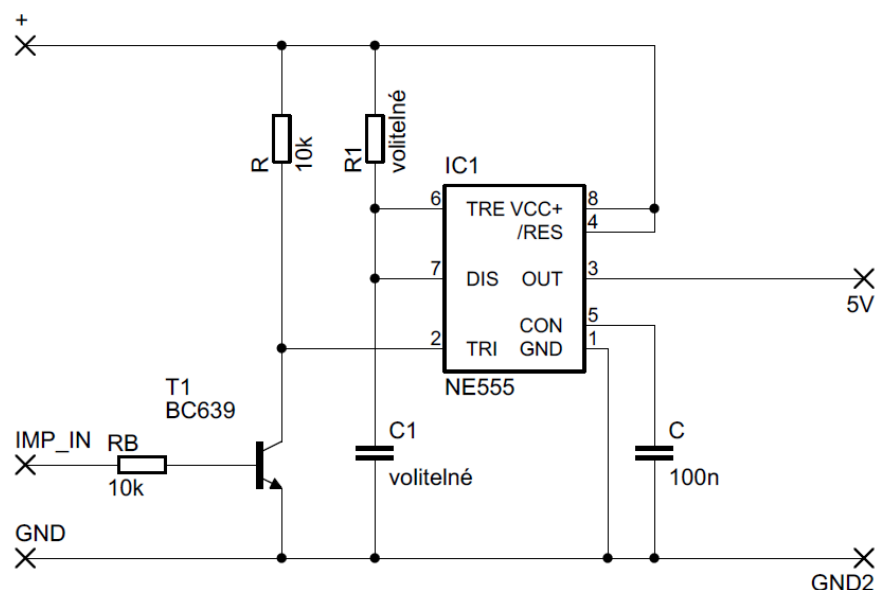
Deska též obsahuje stabilizátor napětí LM 7805, jenž je schopen přivedené napětí 13 V snížit na napětí 5 V, které se dále používá pro napájení vstupní části elektroniky optoelektronického oddělovače HCPL-316J popsaného v dalších kapitolách.



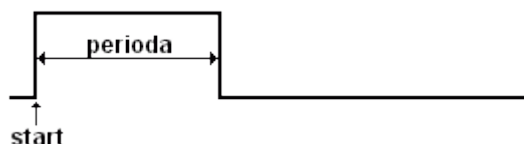
Obr. 2.26. DPS pro ovládací logiku druhého stupně

2.3.4.1 Laditelný generátor impulsů

Pro tvorbu spínacího impulsu pro druhý stupeň elektromagnetického děla byl použit integrovaný obvod NE 555 zapojený jako monostabilní klopný obvod, viz obr. 2.27. NE 555 zapojený jako MKO. Monostabilní klopný obvod generuje napěťový impuls o délce periody T , reaguje na sestupnou hranu přivedeného spínacího impulsu, proto je nutné v případě potřeby reakce na náběžnou hranu předřadit tranzistor. Názorně je funkce zobrazena na obr. 2.28 Výstup MKO.



Obr. 2.27. NE 555 zapojený jako MKO [18]



Obr. 2.28 Výstup MKO [18]

Délku periody zajišťuje volba součástek, dá se určit podle následujícího vztahu:

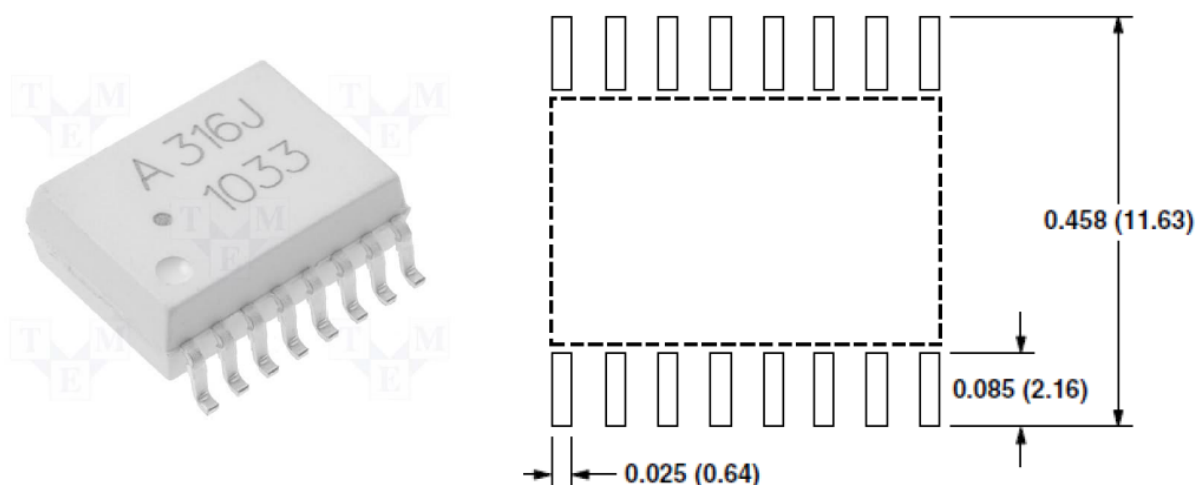
$$T = 1,1 \times R_1 \times C_1$$

1,1 je ve vzorci, protože časovací kondenzátor je nabíjen na úroveň $2/3$ napájecího napětí, tj. 67%. To je více než při běžné časové konstantě ($R_1 \times R_2$), která je pro 63% nabití.

Laditelnosti period dosahujeme pomocí potenciometru místo znázorněného R_1 . V tomto případě je nutné před potenciometr předřadit rezistor o minimálním odporu 1 k Ω . [18]

2.3.5 Buzení výkonových tranzistorů

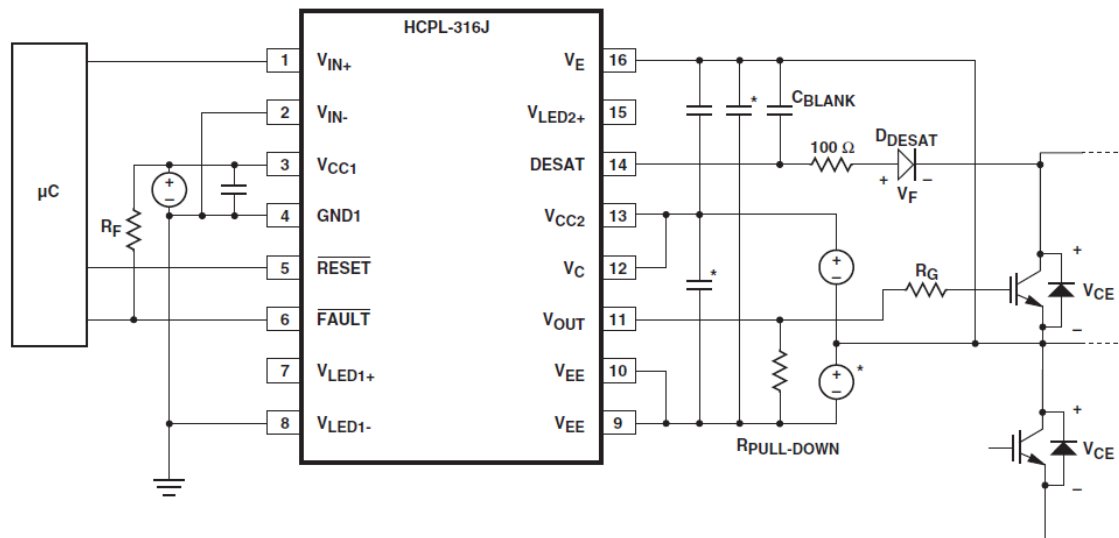
Tranzistory, popsané v kapitole 2.3.2 Dimenzování spínacích prvků, je potřeba spínat pomocí zvláštních obvodů. Nejčastěji se nazývají drivers, česky též budiče. Slouží ke galvanickému oddělení výkonové části od ovládacích prvků s mnohem menší výkonovou zatížitelností, dále slouží k přivedení spínacích signálů na výkonové prvky v patřičné proudové a napěťové velikosti. V neposlední řadě dokážou ochránit výkonové prvky před některými nežádoucími jevy v obvodu.



Obr. 2.29. Pouzdro a rozměry optočlenu HCPL-316J [19]

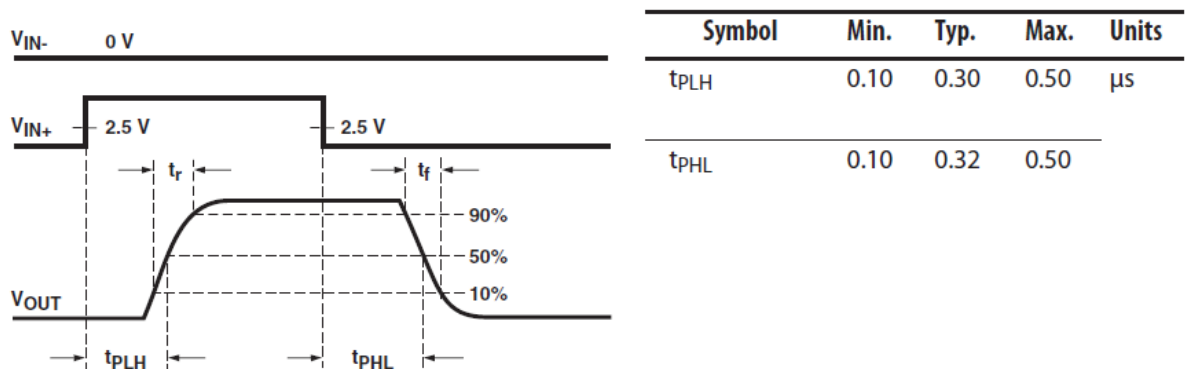
V našem případě byl zvolen optočlen HCPL-316J od firmy Avago Technologies, který je zobrazen na obr. 2.29 Pouzdro a rozměry optočlenu HCPL-316J. Volba proběhla na základě doporučení přední české firmy pracující v oblasti výkonové elektrotechniky. Optočlen je součástí DPS ovládací logiky 2. stupně. Jedná se o optické oddělení ovládacích obvodů a výkonových obvodů. Tento budič je schopen spínat tranzistory do kolektorového proudu $I_c = 150 \text{ A}$ a napětí $U_{ce} = 1200 \text{ V}$. Výkonové obvody poskytují budící signály pro hradla IGBT tranzistorů o přesných parametrech spínacích pulsů, z toho vyplývá, že by budič měl být schopen dodat potřebnou energii pro rychlé a spolehlivé otevření výkonového prvku.

Optočlen HCPL-316J je kompatibilní s TTL logikou, kterou mu poskytuje monostabilní klopný obvod v zapojení s NE555, je vybaven integrovanou desaturační ochranou, zpětnou vazbou detekce chyb, podpěťovou ochranou a uživatelskými nastaveními vstupu.



Obr. 2.30. Zapojení optočlenu HCPL-316J [19]

Na obr. 2.30. Zapojení optočlenu HCPL-316J je zobrazeno typické neinvertující zapojení převzaté z datasheetu součástky, ze kterého vychází naše zapojení. Důležitý je též obr. 2.31. Tvar signálu na výstupu optočlenu a jeho zpoždění, který ukazuje údaje citlivé pro správné načasování spínání výkonových prvků.



Obr. 2.31. Tvar signálu na výstupu optočlenu a jeho zpoždění [19]

K předchozímu obr. 2.31 je vhodné vysvětlit jednotlivé časové údaje:

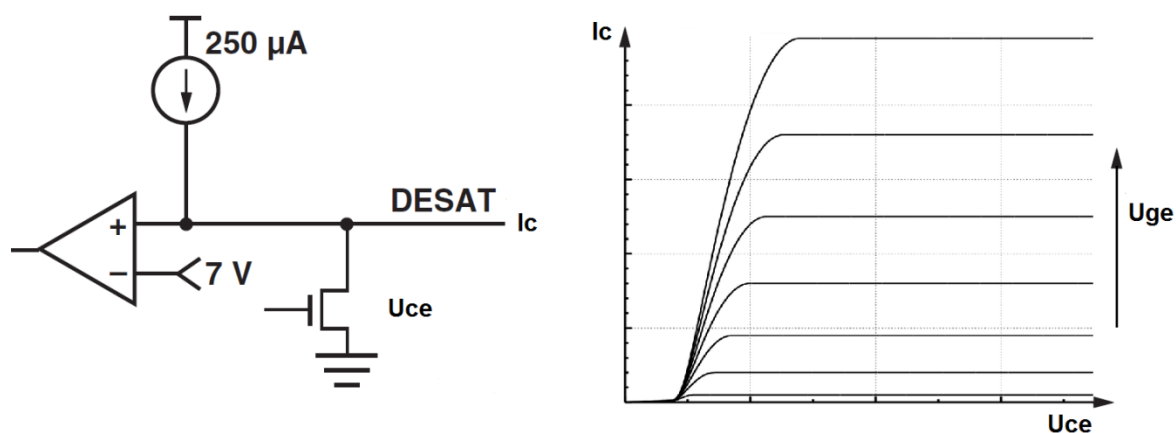
T_{PLH} - zpožděný náběh signálu z logické low na high, vůči vstupní náběžné hraně

T_{PHL} - zpožděný pokles signálu z logické high na low, vůči vstupní sestupné hraně

T_R - doba náběhu výstupního signálu

T_F - doba poklesu výstupního signálu

Napájení optočlenu je poměrně složité, optočlen vyžaduje tři různé napájecí zdroje. První s napětím 5 V na vstupu, jenž je realizováno pomocí stabilizátoru LM 7805 a je součástí DPS popsané v kapitole 2.3.4 Ovládací logika druhého stupně. Na výstupní straně optočlenu jsou potřeba dva napájecí zdroje o hodnotách napětí 15 V a -5 V, realizace potřebného zdroje je popsána v kapitole 2.3.3 Zdroj pro spínací tranzistory. Je důležité, aby zdroje pro vstupní a výstupní část optočlenu byly oddělené a optočlen tak mohl správně plnit svou funkci galvanického oddělení ovládacích a výkonových obvodů.



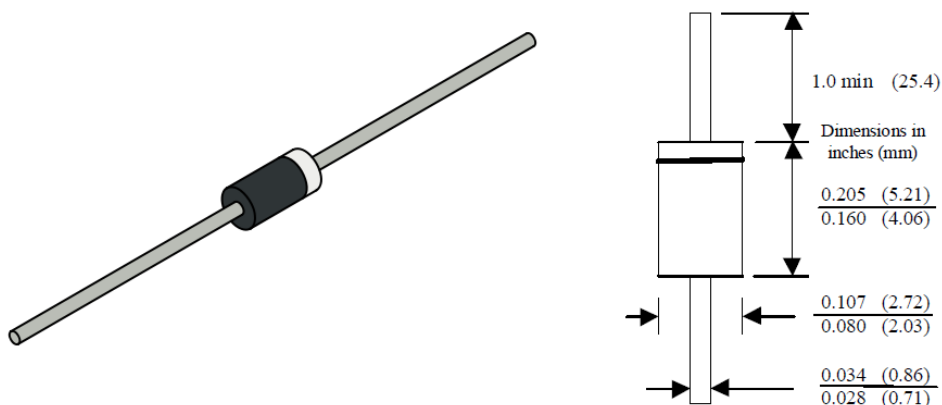
Obr. 2.32. Principiální schéma desaturační ochrany a charakteristika spínání tranzistoru [19]

Jelikož je deska ovládání připravena pro využití desaturační ochrany považují za vhodné vysvětlit její princip, který je na obr. 2.32. *Principiální schéma desaturační ochrany a charakteristika spínání tranzistoru*. U výkonových tranzistorů je snaha minimálního napěťového úbytku při velkých proudech, tudíž se snažíme pohybovat v lineární části jejich V-A charakteristik.

Jednotlivé křivky odpovídají velikosti napětí mezi gatem a emitorem. S rostoucím úbytkem napětí na tranzistoru (přechod do saturace) roste i ztrátový výkon, který se přeměňuje na teplo a je potřeba jej ze součástky odvézt. Lineární části charakteristik odpovídá napětí mezi kolektorem a emitorem IGBT tranzistorů rozmezí 1,5 V až 4 V. V další oblasti, kdy je už tranzistor v saturaci, při minimálním zvětšení proudu kolektorem velice rychle narůstá napětí mezi kolektorem a emitorem. Desaturační ochrana porovnává toto napětí s referenčním, v případě optočlenu HCPL-316J je to 7 V. Při překročení toho limitu v sepnutém stavu tranzistoru reaguje odvedením náboje ze součástky.

Když tranzistor není v sepnutém stavu, musí dioda (viz obr. 2.34. *Zapojení budičů pro výkonové tranzistory*) připojená k pinu desaturační ochrany vydržet napětí v závěrném směru

až v řádu stovek voltů, v závislosti na napětí stejnosměrného obvodu. Z proudového zdroje 250 μA neustále teče konstantní malý proud přes odpor a diodu. Tentýž vodič je připojen ke kladnému vstupu komparátoru a porovnáván s referenční hodnotou 7 V. Při vyšší hodnotě napětí mezi kolektorem a emitorem vyhodnotí komparátor signál na výstupu jako kladný a tím vyhodnotí desaturační ochrana, že má být aktivní, ale pouze při sepnutém stavu tranzistoru. [19]



Obr. 2.33. Dioda pro desaturační ochranu [20]

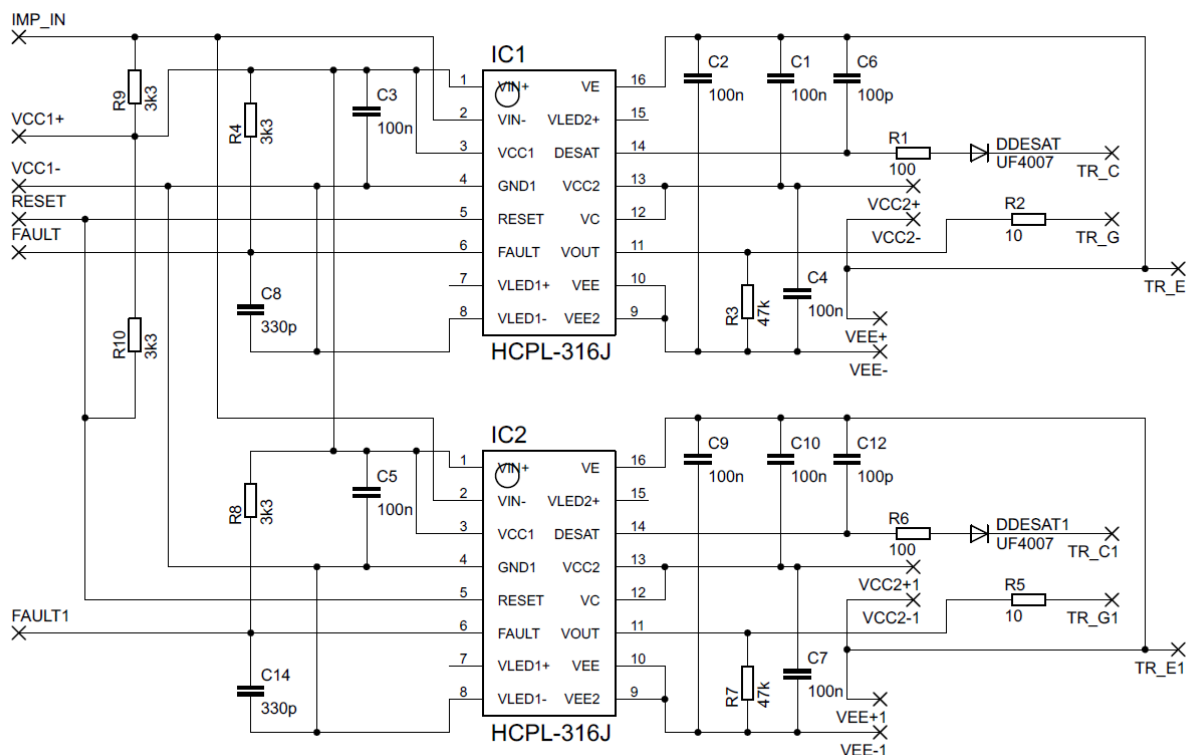
Při vypnutém stavu tranzistoru jsou kladeny velké nároky na parametry diody, především na její rychlost a napěťové zatížení. Datasheet k optočlenu HCPL-316J doporučuje diodu UF4007 zobrazenou na obr. 2.33. Dioda pro desaturační ochranu v pouzdře DO-41 a s následujícími parametry:

TRR - 75 ns, závěrný zotavovací čas diody

VRRM - 100 V, maximální závěrné napětí diody [19,20]

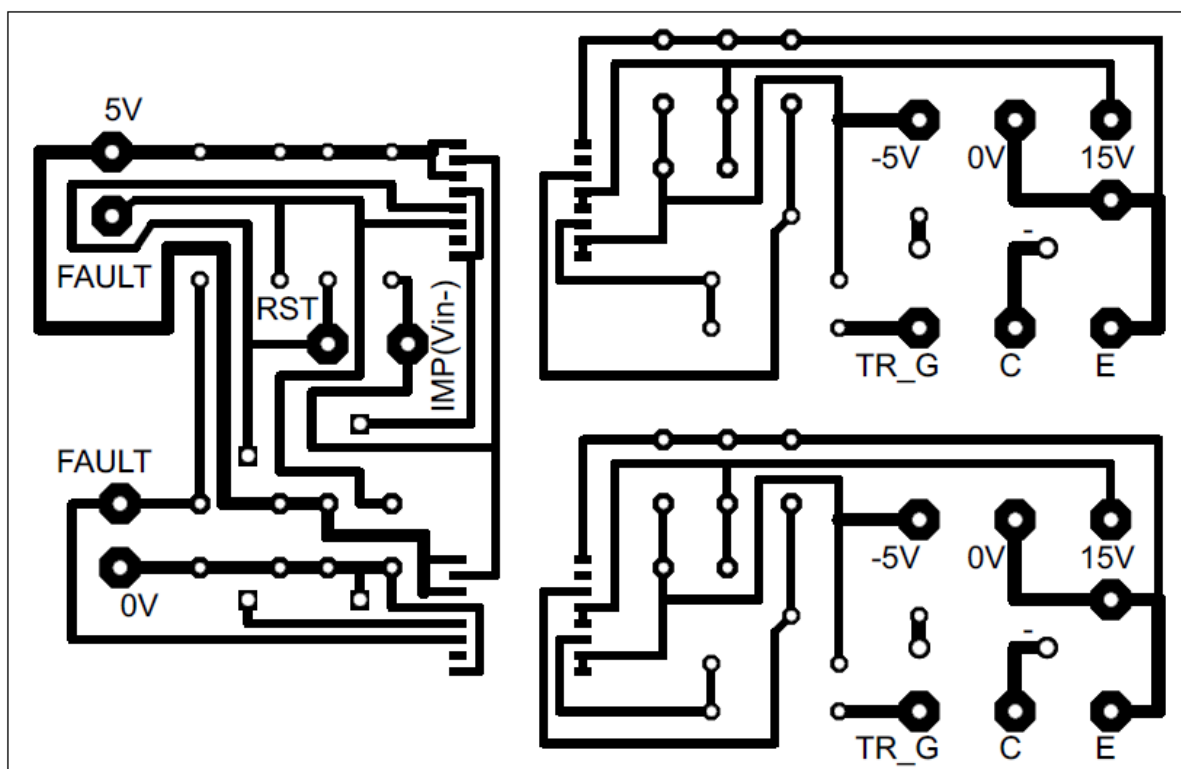
2.3.6 Zapojení budičů pro výkonové tranzistory

Impuls vytvořený pomocí spínacího obvodu druhého stupně, popsaného v kapitole 2.3.4 Ovládací logika druhého stupně, je potřeba přetvořit na správnou výkonovou hladinu a přivést na gate spínacích tranzistorů. Jako optimální se jeví vytvoření DPS, která bude obsahovat budič pro každý tranzistor zvlášť a společný přívod spínacího signálu.



Obr. 2.34. Zapojení budičů pro výkonové tranzistory

Schéma na obr. 2.34. Zapojení budičů pro výkonové tranzistory obsahuje dva budiče a přívod pro spínací impuls reagující na negativní logiku. Negativní logika je zvolena kvůli větší odolnosti proti okolnímu rušení, nežádoucím změnám v napájecí síti a možnosti velkého rozsahu přiváděného spínacího signálu díky využití zapojení tranzistoru s otevřeným kolektorem. Deska je též vybavena konektory, které umožňují zpětnou detekci chyb jednotlivých tranzistorů a možností restartu probíhajícího procesu ve spínacích prvcích. Výstupní strana obsahuje tři vývody pro každý tranzistor, postupně pro kolektor, gate a emitor spínacích prvků. Výstupní strana též obsahuje desaturační ochranu tranzistorů a je jí třeba napájet galvanicky oddělenými zdroji napětí popsanými v kapitole 2.3.3 Zdroj pro spínací tranzistory. Z obr. 2.35. DPS pro budiče výkonových tranzistorů je dobře vidět galvanické oddělení vstupní části neboli ovládací elektroniky od výstupní části pro výkonové obvody. Rozmístění součástek na desce a jejich seznam je v příloze E.



Obr. 2.35. DPS pro budiče výkonových tranzistorů

2.3.7 Ochranné prvky

Pro ochranu spínacích prvků a kondenzátorové baterie ve výkonovém obvodu se používají dva typy ochrany. První desaturační je součástí budiče tranzistorů HCPL-316J, chrání tranzistory proti průchodu proudem nadměrné velikosti. Druhým ochranným prvkem v obvodu je tzv. snubber, slouží k ochraně prvků proti napěťovým špičkám, jeho funkce a výběr pro náš obvod je popsán v následující kapitole.

2.3.7.1 Snubber

Snubbery, též tlumiče, jsou v elektrických obvodech často používány s indukční zátěží, kde v souladu s Faradayovým zákonem náhlé přerušení toku proudu vede k prudkému nárůstu napětí přes aktuální spínací prvek. Tento přechodný jev může být zdrojem elektromagnetického rušení pro jiné prvky a obvody. Navíc generované okamžité napětí může být tak velké, že dojde k překročení elektrické pevnosti spínacího zařízení a tím i k jeho zničení. Snubber poskytuje krátkodobou alternativní cestu kolem spínacího zařízení tak, aby mohl být indukční prvek vybit bezpečně. Indukční prvky bývají často neúmyslné, vznikají z proudové smyčky vyplývající z fyzického zapojení obvodu. Při spínání proudu jsou snubbery zpravidla nutné pouze tehdy, pokud je hlavní proudová cesta vedena například

přes napájecí zdroj. Snubbery se také často využívají k zabránění vzniku elektrického oblouku mezi kontakty relé, kontakty spínačů a elektrického rušení.

Snubbery je možné realizovat pomocí třech základních principů:

- RC snubber

Jednoduchý snubber používá malý odpor v sérii s malým kondenzátorem. Tato kombinace může být použita k potlačení rychlého nárůstu napětí na tyristoru, zabraňuje chybnému zapnutí tím, že omezí rychlost nárůstu napětí na součástce, která by tento jev mohla vyvolat. Vhodně navržený RC snubber lze používat jak na stejnosměrné tak střídavé napětí. Tento druh snubberu se běžně používá s indukční zátěží, jako jsou elektromotory. Napětí na kondenzátoru se nemůže změnit okamžitě, takže snížený přechodný proud bude protékat na malý časový okamžik a na pomaleji se otevírajícím tranzistoru nevznikne přepětí.

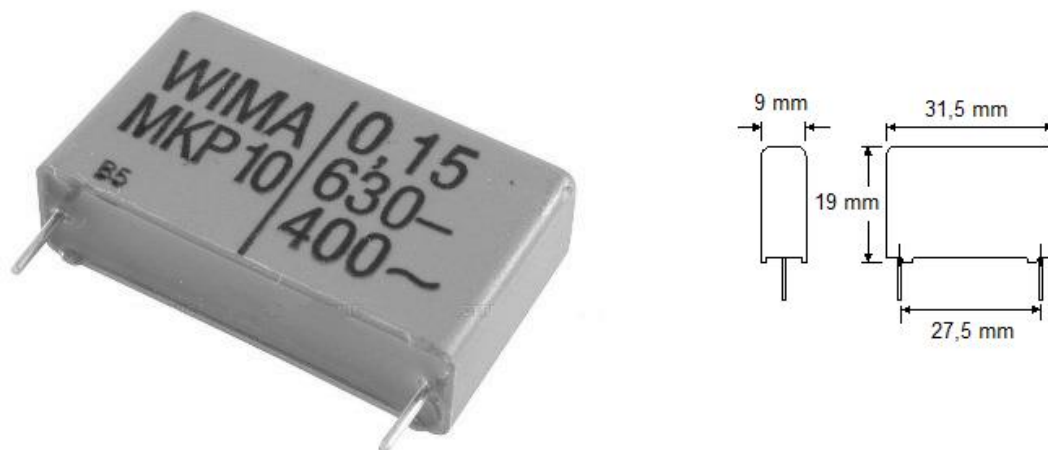
- Diodové snubbery

Pokud je proud, který teče zátěží stejnosměrného charakteru, dá se použít jednoduchá usměrňovací dioda jako tlumič. Dioda je připojena zpětnovazebně k indukční zátěži, např. cívkové relé nebo elektromotor. Dioda je umístěna tak, aby za normálních podmínek nepropouštěla proud. Při přerušení vnějšího budícího proudu začne namísto toho téct proud přes diodu. Energie uložená v induktoru se tedy postupně rozptýlí na odporu diody a odporu cívky samotné. Jednou z nevýhod použití obyčejné usměrňovací diody jako snubberu je, že dioda umožňuje, aby i nadále protékal proud po určitou dobu o něco déle, než je žádoucí. V případě potřeby rychlejšího přepínání než 10 ns je nutné použít ultrarychlé nebo Schottkyho diody.

- Sofistikovanější polovodičové snubbery

V některých stejnosměrných obvodech se místo obyčejné diody používá varistor, nebo dvě inverzně, sériově zapojené Zenerovy diody nazývané transil. Tato zařízení dokážou rozptýlit značně velké napěťové rázy o velké energii a jsou rychlejší než obyčejné diody. Výhodou použití transilu je, že chrání proti přepětí v obou polaritách, je-li připojen k zemi.

Ve střídavých obvodech nelze použít usměrňovací diody jako snubber. V případě, že RC snubber není dostačující, musí být použity složitější obousměrné konstrukce.



Obr. 2.36. Snubber pro spínací tranzistory [22]

V naší aplikaci je jako snubber pro spínací prvky zvolen fóliový, radiální kondenzátor MKP10 od výrobce WIMA. Zobrazen na obr. 2.36. *Snubber pro spínací prvky*. Kondenzátor je vyroben speciální technologií omezující parazitní jevy jako sériový odpor a indukčnost na minimum. Označení tohoto typu kondenzátoru je Low ESR (ESR = Equivalent Series Resistance), tyto typy se používají nejčastěji ve spínaných zdrojích.

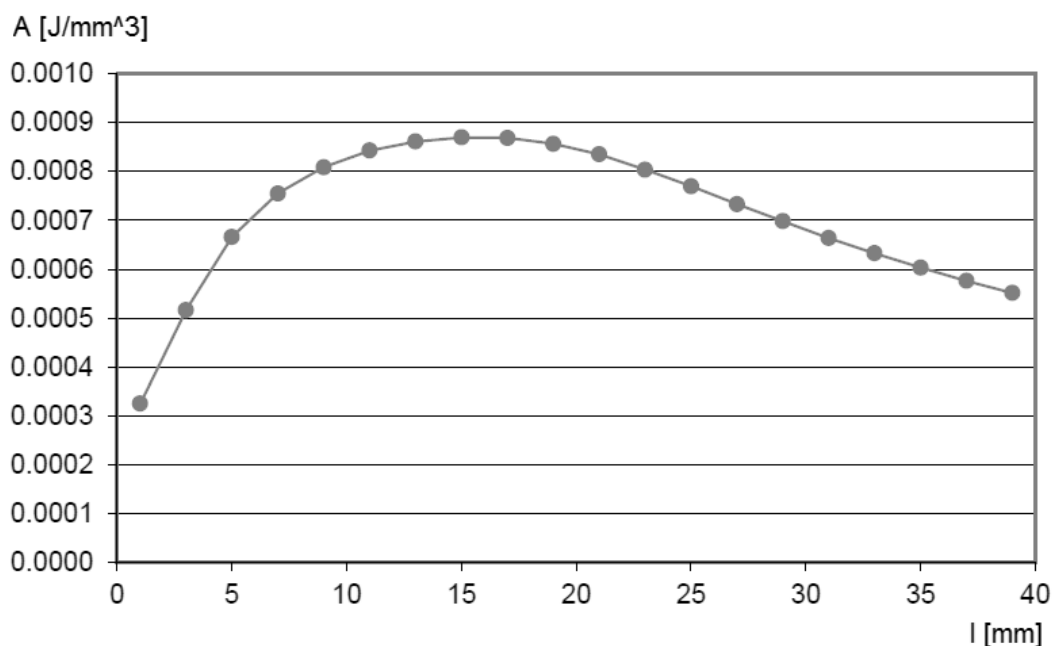
Hodnota kapacity zvoleného kondenzátoru je 150 nF, maximální napětí na kondenzátoru je 630 V stejnosměrných, nebo též 400 V střídavých. Pro daný výkon na tranzistorech se tato hodnota kapacity může jevit jako nedostatečná, avšak důležitější je reakční rychlost přijetí energie, která je zajištěna právě označením Low ESR. Další energii při přepětí dokáže odebrat paralelně připojená kondenzátorová baterie, která má díky zvoleným kondenzátorům též schopnost rychle přijímat energii. [21]

3 Navrhovaný vývoj

Současná konstrukce elektromagnetického děla nevyužívá svůj potenciál s dostatečně velikou účinností. Výpočty spínacích a čekacích časových konstant, jsou velmi složité a ovlivňuje je spousta proměnných faktorů. Navíc se výpočty nehodí pro malé konstrukce, jako je ta naše, protože v tomto malém měřítku se značně projevují různé parazitní jevy jako odpor projektilu, cívky a další, které značně snižují účinnost, a tak jsou časové konstanty stanoveny na základě střeleckých zkoušek, při kterých se zkoumá energie předaná projektilu v závislosti na jeho dostřelu. V této kapitole si dovoluji navrhnout metody, které se snaží zlepšit účinnost systému nebo obejít nepřesnosti způsobené výpočty.

3.1 Velikost projektilu

Nyní se v našem projektu využívá železný projektil o hmotnosti 100 g. Z pokusů uveřejněných v [23] vyplývá, že práce vykonaná projektilem je závislá na jeho délce, tedy i jeho hmotnosti. Zobrazeno na *obr. 3.1. Závislost vykonané práce na délce projektilu*. Bylo by tedy vhodné vytvořit větší počet projektilů, které by byly vystřeleny naším dělem. Poté v závislosti na hmotnosti a dostřelené vzdálenosti vypočítat jakou práci projektil vykonal, tedy kolik energie mu bylo při výstřelu předáno.



Obr. 3.1. Závislost vykonané práce na délce projektilu [23]

3.2 Optická závora

Optickou závorou bychom v našem případě mohli nahradit nutnost výpočtu zpoždění sepnutí cívky druhého stupně případně stupňů dalších. Umístěním optické závory na počátek cívky druhého stupně bychom dokonale odstranili nepřesnosti ve výpočtu zpoždění, zároveň bychom odstranili nutnost výpočtu časové konstanty zapnutí spínacích prvků a odstranili vliv náhodných jevů.

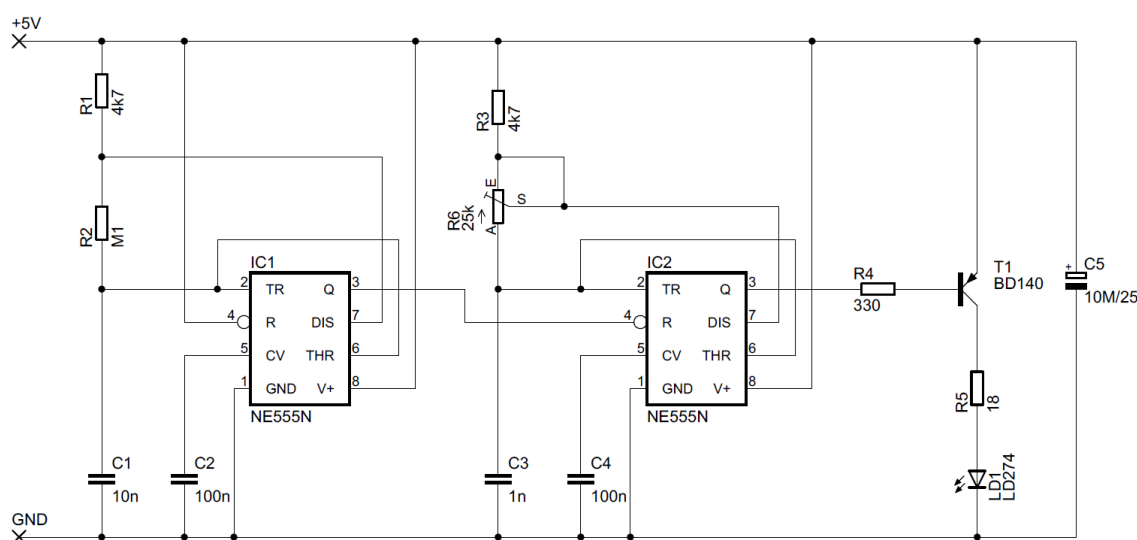
Projektil by byl vystřelen cívkou prvního stupně ke stupni dalšímu. Optická závora před druhým stupněm by při přerušení paprsku od projektilu generovala impuls pro spínací prvky druhého stupně, tímto by byla odstraněna nutnost výpočtu doby zpoždění. Ukončení

impulsu by nastalo při opětovném obnovení optické závory díky tom, že by projektil opustil prostor závory. Při dobrém poměru délky cívky a projektilu by se tímto odstranila nutnost výpočtu časové konstanty sepnutí tranzistorů.

Kombinace moderních polovodičových IR vysílačů a přijímačů, pracujících na principu dálkového ovladače umožňuje ve spojení s klasickým obvodem typu NE 555 velmi jednoduché, ale spolehlivé řešení světelné závory.

3.2.1 Vysílač světelné závory

Schéma vysílače pro světelnou závoru je na obr. 3.2. *Světelná závora, vysílač*. Vysílač se skládá ze dvou časovačů NE 555. Vysílač pracuje s nosným kmitočtem 36 kHz, který je modulován kmitočtem 300 Hz, proto jsou nutné dva časovače. IC1 je zapojen jako oscilátor modulačního kmitočtu a jeho výstupní kmitočet slouží pro modulování druhého oscilátoru IC2. Modulovaný kmitočet 36 kHz budí přes T1 diodu IR LED LD1 typu LD274.



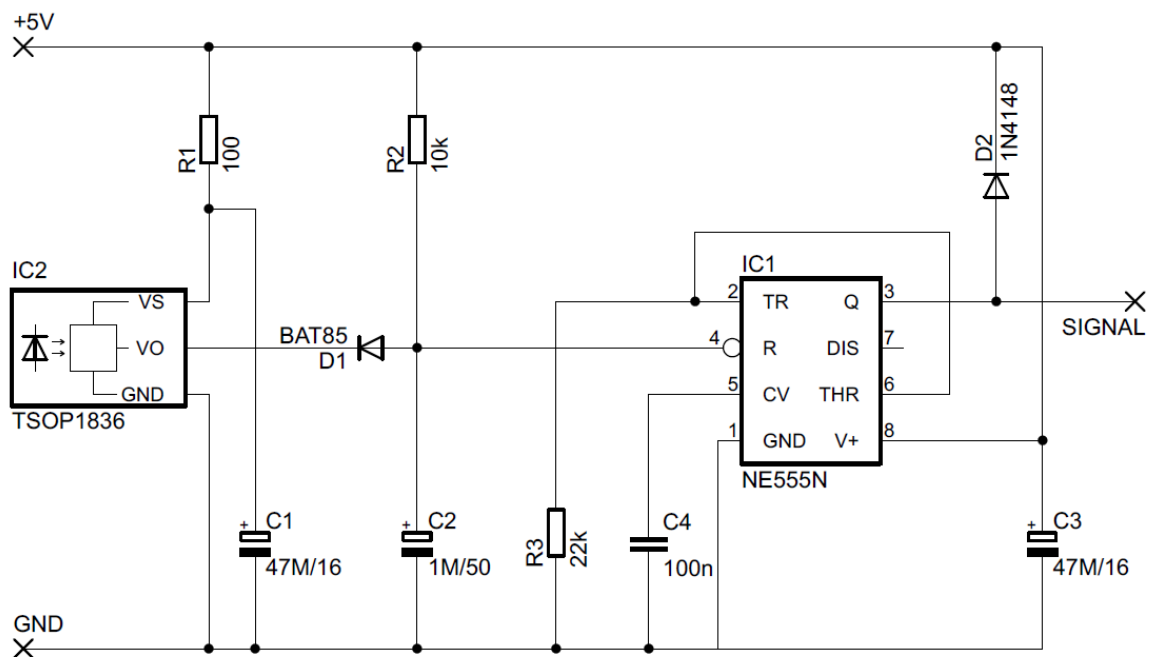
Obr. 3.2. Světelná závora, vysílač

3.2.2 Přijímač světelné závory

Pro kompletaci světelné závory je k vysílači potřeba vytvořit přijímač. Pro příjem IR signálů slouží řada zapojení. Většinou se liší pouze v zapojení vývodu a jejich funkce je velmi podobná. Na vstup přijímače dopadá signál z vysílače. Pro potlačení nežádoucího rušení je za přijímač zařazen selektivní filtr, který potlačuje kmitočty mimo dané pásmo. V našem případě je filtr nastaven na 36 kHz. Za filtrem následuje vyhodnocovací obvod, takže

na výstup IR přijímacího modulu se dostane pouze modulační signál z vysílače, tedy kmitočet 300 Hz. Pro naši závoru jsme vybrali modul TSOP1836.

Schéma zapojení je na *obr. 3.3. Světelná závora, přijímač*. Výstupní signál z přijímacího modulu je usměrněn diodou D1 a filtrován kondenzátorem C2, který je v klidu nabit na napětí zdroje přes R2. Příchodem signálu na vstup se kondenzátor C2 vybije. Na resetovacím pinu IC1 je nízká úroveň a obvod je zablokován. V okamžiku přerušení světelného paprsku stoupne napětí na resetovacím vstupu a výstup NE 555 přejde do vysoké logické úrovně, který je schopen nahradit spouštěcí signál pro cívku druhého stupně. [24]

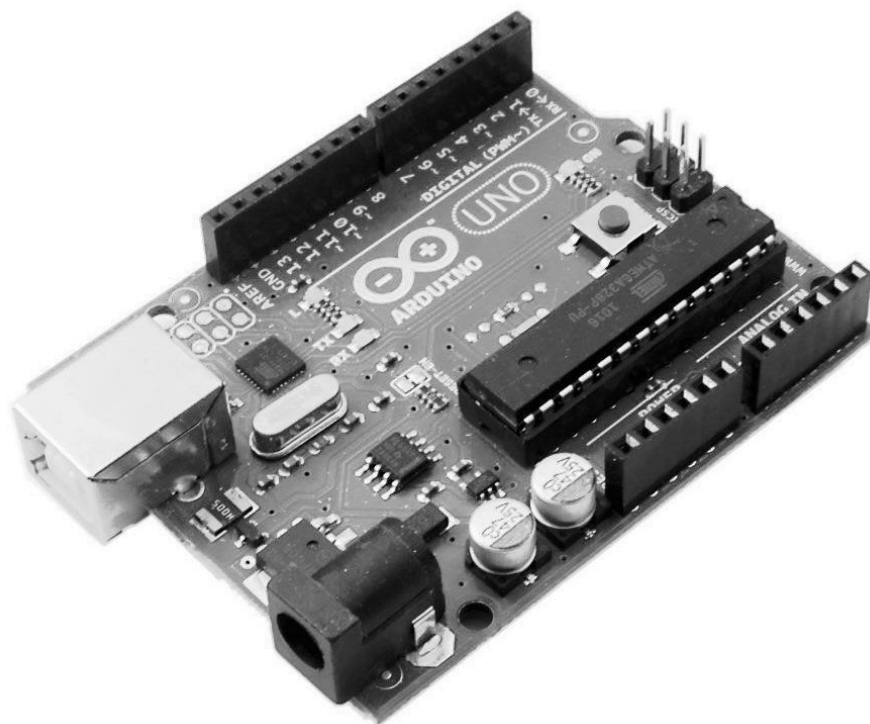


Obr. 3.3. Světelná závora, přijímač

3.3 Řízení mikropočítačem

Zařazení mikropočítače do ovládací struktury, by odstranilo nutnost používání veškerých desek pro ovládání magnetického děla. Mikropočítač dokáže nahradit ovládací obvod prvního stupně, ovládací obvod druhého stupně, přijímací i vysílací část obvodu světelné závory. Veškeré případné nutné změny v ovládání by probíhaly pohodlně na softwarové, nikoli hardwarové úrovni, jako je to v našem případě. Již obvod pro buzení výkonových tranzistorů druhého stupně je připraven pro použití s mikropočítačem, kde by se daly případně využít výstupy detekce chyb a resetovací vstup.

Jako vhodný mikropočítač se jeví dnes velmi používaný a dostupný vývojový kit od výrobce Arduino, zobrazený na obr. 3.4. *Arduino Uno*, kterým je mikrokontrolérová vývojová deska založená na ATmega328. Deska obsahuje 14 digitálních vstupních / výstupních pinů, 6 analogových vstupů, 16 MHz krystal, připojení pomocí USB, napájecí konektor a další rozhraní. [25]



Obr. 3.4. Arduino Uno [25]

Účelem mikropočítače by mohlo být automatizování odpalování druhé a dalších fází cívkového děla. Zaznamenávala by se doba, kdy projektil prochází optickou závorou a ze známé délky projektilu by se počítala jeho rychlost. Vztah pro provedení výpočtu je velice triviální.

$$v = \frac{d}{t}$$

Potom s využitím rychlosti a známé vzdálenosti mezi cívkami, bude čekat mikroprocesor na vhodné sepnutí dalšího cívkového stupně. Výběr Arduino Uno je zvolen, též kvůli své výpočetní rychlosti, aby stihl dokončit výpočet rychlosti, zatímco se projektil pohybuje k dalšímu stupni.

Velké usnadnění by bylo v případě připojování dalších stupňů elektromagnetického děla, odpadla by nutnost vytvoření dalších ovládacích prvků. Stačí pouze další stupně připojit na porty mikrokontroléru a uzpůsobit jeho ovládací software. [23]

Závěr

Předkládaná práce si stanovuje počáteční cíl vytvoření funkčního urychlovače projektilu na principu elektromagnetického děla pro ukázkou fyzikálních zákonů v praxi.

V první kapitole práce popisuje samotnou podstatu elektromagnetismu. Vysvětluje potřebné zákonitosti jako princip elektrické cívky sloužící k vytvoření magnetického pole, které se využívá k působení magnetické síly na projektil z feromagnetické látky. Vysvětluje i samotnou podstatu feromagnetismu. První kapitola se též zabývá elektromagnetickými děly na různých principech, jako je elektromagnetické cívkové dělo, indukční dělo a elektromagnetické kolejnicové dělo. Ke konci kapitoly se porovnávají jednotlivé výhody a nevýhody výše jmenovaných principů, na jejichž základě se přistupuje k volbě typu námi vytvářeného elektromagnetického cívkového děla.

Druhá kapitola práce pokračuje podstatou cívkového děla. V prvních řádcích informuje o vytyčeném cíli vytvořit ne jednostupňové, ale dvoustupňové elektromagnetické dělo a blokově představuje jeho předpokládané uspořádání. Následně se kapitola rozděluje na dvě části, každá popisuje problematiku jednoho ze stupňů. U obou řeší stěžejní prvky celé této práce, tj. nejprve se zabývá potřebami napájení celého projektu, v závislosti na požadavcích vytváří návrh napájecího zdroje, dále dimenzuje prvky pro jeho tvorbu, vytváří funkční vzorek, na kterém je provedeno patřičné měření funkčnosti a spolehlivosti. Navrhuje princip elektroniky a celého logického ovládní, které realizuje nejčastěji pomocí integrovaných obvodů zapojených jako generátor pravoúhlých signálů nebo jako časovač. V závislosti na výkonových požadavcích proudového impulsu potřebného pro výstřel vybírá vhodné zapojení spínacích prvků, které dále dimenzuje na patřičné zatížení a vybírá konkrétní vhodný typ spínacích prvků. Ke spínacím prvkům navrhuje a vytváří budící členy realizované pomocí optoelektronického oddělovače, navrhuje a realizuje též jejich vhodné napájecí zdroje. V souvislosti se spínacími prvky a požadavky na proudový impuls dimenzuje kondenzátorové baterie, které uchovávají potřebnou energii pro výstřel. Vybírá vhodné typy kondenzátorů pro jejich stavbu, kterou navrhuje a realizuje pomocí sendvičového uspořádání a vhodného spojení se spínacími prvky.

Ve třetí a zároveň poslední kapitole práce se na základě získaných zkušeností při stavbě odhalují nedokonalosti způsobené při volbě principů a pracovních postupů. Dále si poslední kapitola práce dovoluje navrhnout pravděpodobné možnosti zlepšení účinnosti celé

konstrukce a případnou vhodnou cestou vývoje. Poukazuje na pravděpodobnou možnost zlepšení účinnosti předání energie z cívky projektilu v závislosti na rozměrech projektilu. Navrhuje možnost využití principu optické závory, která by značně snížila složitost výpočtu časových konstant pro výstřel, zvýšila by jejich přesnost a odstranila teplotní závislost výpočtu, případně by potřebu celého výpočtu zcela odstranila. Jako vhodné se též jeví použití řídicího mikrokontroléru, který by nahradil ovládací logiku obou stupňů, a další potřebné změny by probíhaly na softwarové úrovni. Další případně přidané stupně děla by bylo možno zařadit bez nutnosti konstruování dalších obvodů pro ovládání. Mikrokontrolér může být použit k výpočtu rychlosti projektilu na základě vstupů z optických závor a poté je schopen vypočítat nejvhodnější časy pro spínací tranzistory, zároveň dokáže využít případné chybové a resetovací obvody driverů spínacích prvků.

Použitá literatura

- [1] R. P. Feynmann: Přednášky z fyziky, Fragment, Praha, 2000
- [2] L. Horký, J. Kákona: Magnetická puška, Fakulta Jaderná a Fyzikálně Inženýrská, Praha
- [3] I. Štoll: Elektřina a magnetismus, Vydavatelství ČVUT, Praha, 1997
- [4] R. Bozorth: Ferromagnetism, IEEE Press, Piscataway, N.J., 1993
- [5] online, [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/60-feromagnetismus-u-plynu.html> , 2014
- [6] E. Levi, H. L. Zabar, L. Birenbaum: Guidelines for the Design of Synchronous Type Coilguns, IEEE Transaction on Magnetics, 1991
- [7] H. Kolm, P. Mongeau: Basic principles of coaxial launch technology, IEEE Transaction on Magnetics, 1984
- [8] kolektiv autorů: Silent Machine Guns Are Fired By Electromagnets, Popular Mechanics, 1933
- [9] M. Plonus: Applied Electromagnetics, McGraw-Hill, New York, 1986
- [10] online, [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://www.coilgun.eclipse.co.uk/>
- [11] D. A. Bresie, S. K. Ingram: Coilgun Technology at the Center for Electromechanics, The University of Texas at Austin, 2011
- [12] online, [cit. 2014-03-05]. Dostupné z: <http://www.coilgun.info/>
- [13] online, [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://www.coilgun.ru/>
- [14] online, [cit. 2014-03-10]. Dostupné z: <http://www.nytimes.com/1990/01/30/science/lab-says-electromagnetism-could-launch-satellites.html?src=pm>
- [15] K. Kondo, A. Sawaoka: Development of Railgun Accelerator , IEEE Transaction on Magnetics, 1984
- [16] online, [cit. 2014-03-19]. Dostupné z: http://www.pragoboard.cz/images/graf_spoj.jpg
- [17] A. Krejčířík: Napájecí zdroje I. díl, BEN, Praha, 1997
- [18] A. Krejčířík: Spínané zdroje s časovačem 555, BEN, Praha, 1999
- [19] datasheet k HCPL-316J, Online dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/520978/AVAGO/HCPL-316J-000E.html>
- [20] datasheet k UF4007, Online dostupné z: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/34163/WTE/UF4007-TB.html>
- [21] R. Severns: Design of Snubbers for Power Circuits, IEEE IAS Transaction

- [22] datasheet k MKP10, Online dostupné z:
http://www.wima.com/EN/WIMA_MKP_10.pdf
- [23] J. Dagdagan, Y. Ko, S. Nanavati: Multistage Coil Gun, Final Repor for ECE 445, Senior Design, Spring, 2013
- [24] online, [cit. 2014-03-20]. Dostupné z: <http://www.elektronovinky.cz/konstrukce/svetelna-zavora>
- [25] datasheet k Arduino Uno, Online dostupné z:
<http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno>
- [26] F. Vondrášek: Projektování výkonových polovodičových měničů: vybrané stati, Západočeská univerzita, Plzeň, 2008
- [27] datasheet k SKM300GB12V, Online dostupné z: http://www.semikron.com/products/data/cur/assets/SKM300GB12V_22892073.pdf
- [28] datasheet k IXFN 340N07, Online dostupné z:
<http://datasheet.octopart.com/IXFN340N07-IXYS-datasheet-8325754.pdf>
- [29] datasheet k K05400102_PM0FH, Online dostupné z:
<http://www.kendeil.com/pdf/DATABOOK-2009.pdf>

Seznam příloh

- Příloha A.:** Napájecí zdroj prvního stupně
- Příloha B.:** DPS pro kondenzátorovou baterii
- Příloha C.:** Zdroj pro spínací tranzistory druhého stupně
- Příloha D.:** Spínací obvod druhého stupně
- Příloha E.:** DPS budičů výkonových tranzistorů
- Příloha F.:** DPS indikátoru napětí
- Příloha G.:** Spínací prvky a kondenzátorová baterie druhého stupně

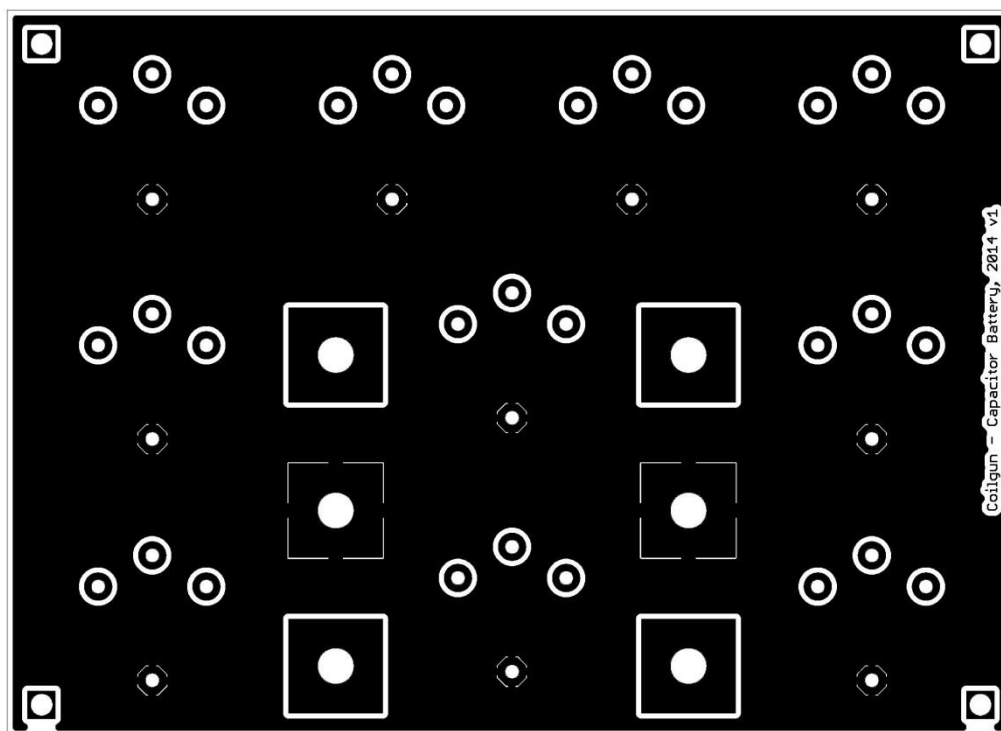
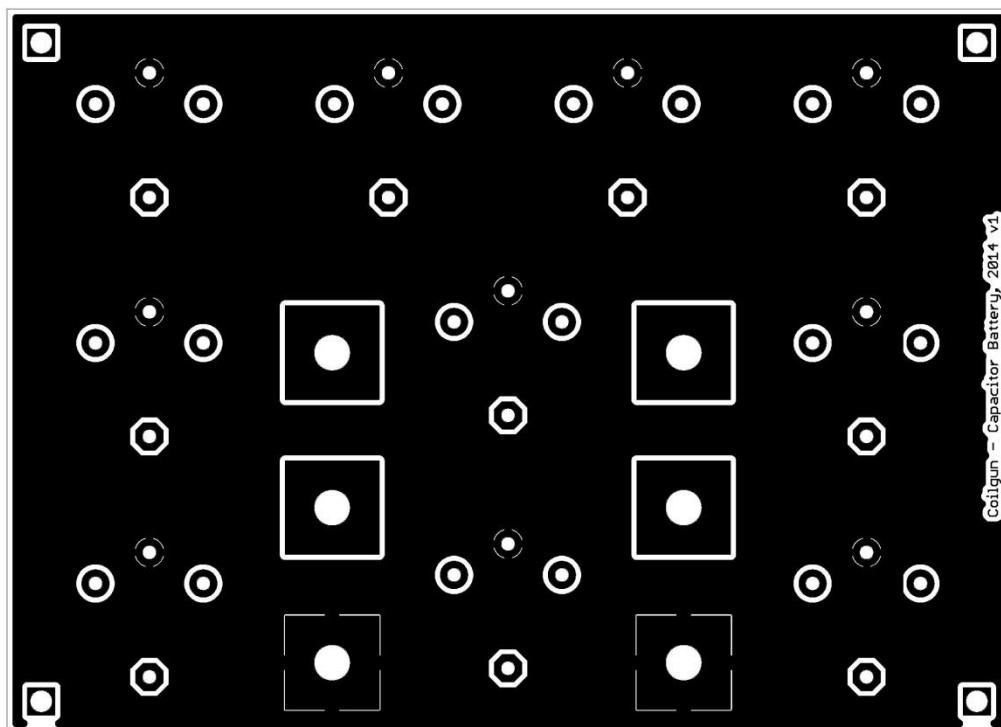
Přílohy

Příloha A.: Napájecí zdroj prvního stupně



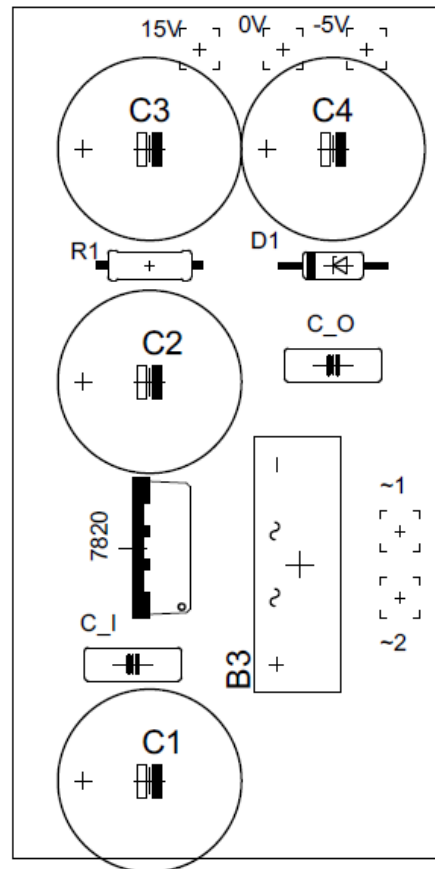
Seznam součástek:

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	10mF/50V	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C2	470p	C2.5/2	C2.5-2	capacitor-wima	1
C3	470p	C2.5/2	C2.5-2	capacitor-wima	1
C4	100nF SMD	C2.5/2	C2.5-2	capacitor-wima	1
C5	10mF/50V	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C6	10mF/50V	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
D3	1N5355B 18V/278mA	1N4446	DO35-10	diode	1
D4	1N5355B 18V/278mA	1N4446	DO35-10	diode	1
D5	BYW29	BYW29	DO220S	diode	1
IC	LM723CN	DIL14	DIL14	ic-package	1
IN_+		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
IN_GND		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
OUT_+		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
OUT_GND		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
R1	5k6	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R2	2k2	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R3	2k5	TRIM_EU-CA9V	CA9V	pot	1
R4	100R	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R6	1k	TRIM_EU-CA9V	CA9V	pot	1
R7	1k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R8	1k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R9	1k /2W	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R10	2k2	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R11	120R	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RD	10hm/1W	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
T1	BC639	2SC458	TO92-ECB	transistor	1
T2	BD911	BD535	TO220	transistor	1

Příloha B.: DPS pro kondenzátorovou baterii**Spodní strana záporného potenciálu****Vrchní strana kladného potenciálu**

Příloha C.: Zdroj pro spínací tranzistory druhého stupně

Rozmístění součástek

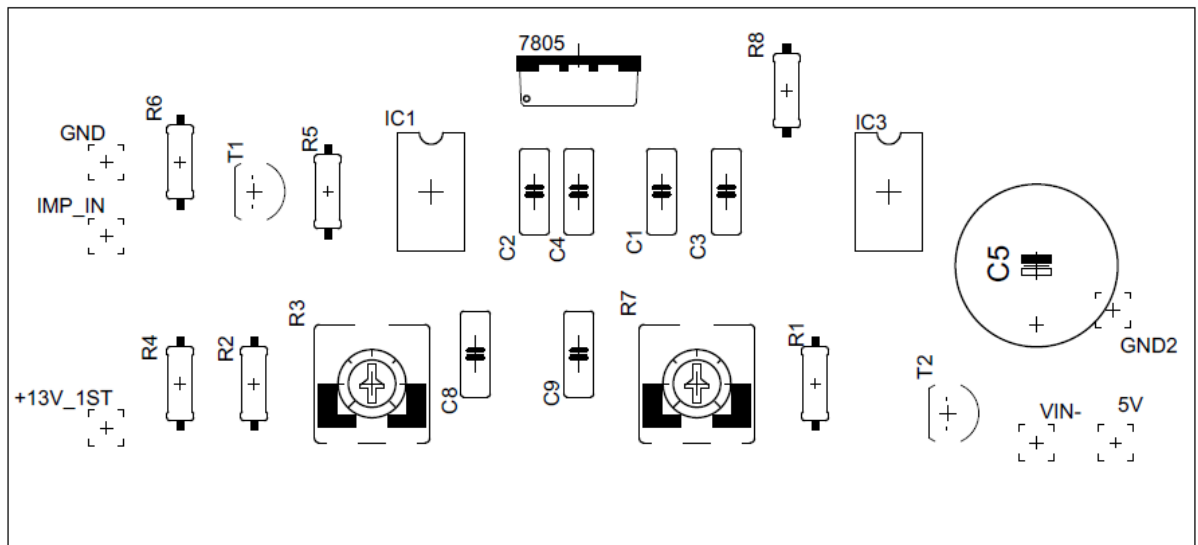


Seznam součástek

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
-5V		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
0V		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
15V		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
7820	786TV	786TV	TO220V	linear	1
B3		KBL	KBL	rectifier	1
C1	330u	CPOL-EUE5-13	E5-13	rcl	1
C2	10u	CPOL-EUE5-13	E5-13	rcl	1
C3	10u	CPOL-EUE5-13	E5-13	rcl	1
C4	10u	CPOL-EUE5-13	E5-13	rcl	1
C_I	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C_O	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
D1	BZ83V005.1	BZX55	DO35Z10	diode	1
R1	220	R-EU_0207/10	0207/10	rcl	1
~1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
~2		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1

Příloha D.: Spínací obvod druhého stupně

Rozmístění součástek

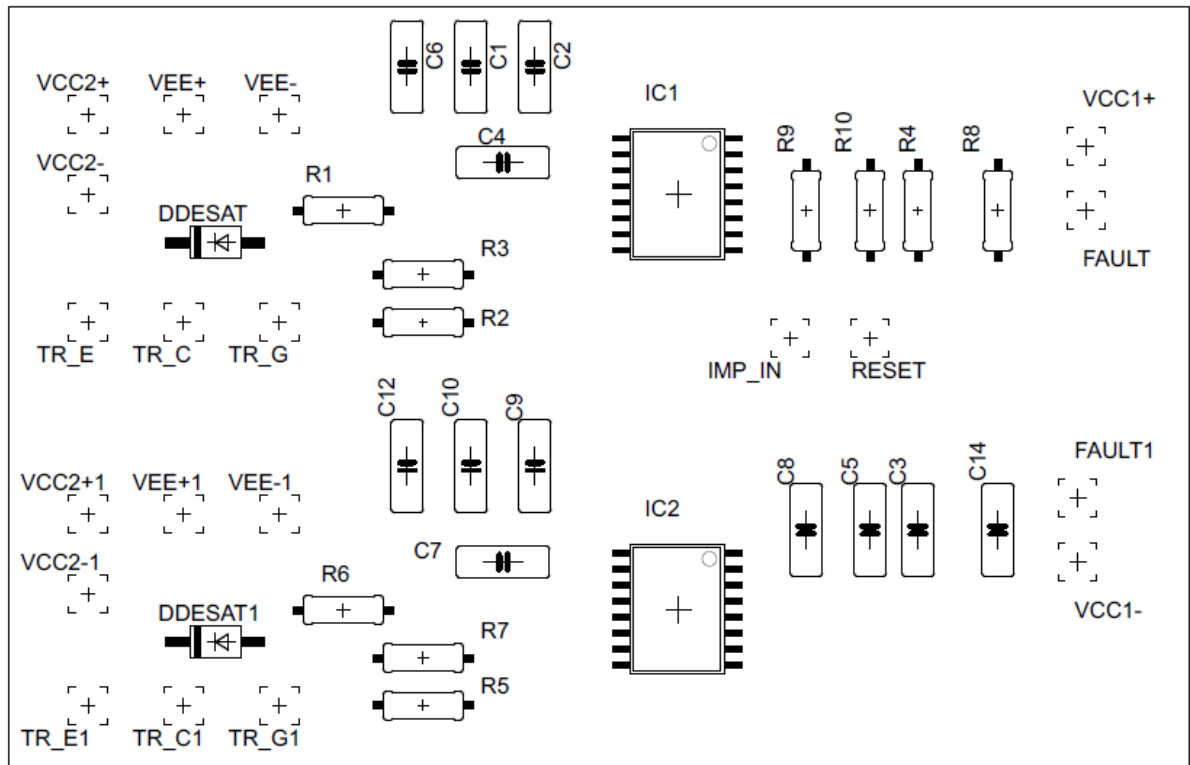


Seznam součástek

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
+13V_1ST		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
5V		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
7805	7824TV	7824TV	TO220V	linear	1
C1	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C2	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C3	zvolit (100u)	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C4	zvolit (100u)	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C5	330u	CPOL-EUE5-13	E5-13	rcl	1
C8	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C9	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
GND		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
GND2		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
IC1	NE555	NE555	DIL-08	st-microelectronics	1
IC3	NE555	NE555	DIL-08	st-microelectronics	1
IMP_IN		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
R1	10k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R2	1k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R3	zvolit	TRIM_EU-CA9V	CA9V	pot	1
R4	1k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R5	10k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R6	10k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
R7	zvolit	TRIM_EU-CA9V	CA9V	pot	1
R8	0	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
T1	BC639	2SC458	TO92-ECB	transistor	1
T2	BC639	2SC458	TO92-ECB	transistor	1
VIN-		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1

Příloha E.: DPS budičů výkonových tranzistorů

Rozmístění součástek



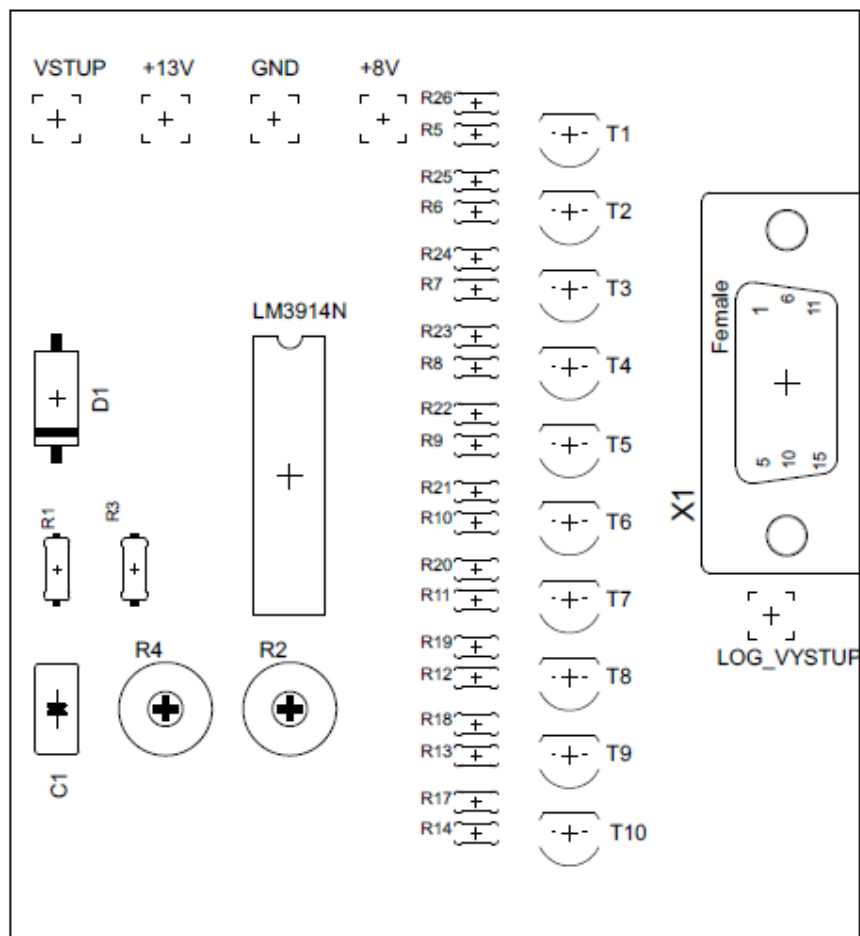
Seznam součástek

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
C1	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C2	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C3	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C4	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C5	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C6	100p	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C7	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C8	330p	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C9	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C10	100n	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C12	100p	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
C14	330p	C5/2.5	C5B2.5	capacitor-wima	1
DDESAT	UF4007	1N4004	DO41-10	diode	1
DDESAT1	UF4007	1N4004	DO41-10	diode	1
FAULT		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
FAULT1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
IC1	HCPL-316J	HCPL-316J	SO-16	HCPL-316J	1
IC2	HCPL-316J	HCPL-316J	SO-16	HCPL-316J	1
IMP_IN		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
RESET		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
RESET1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
RG1	100	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RG2	10	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RG3	47k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RG4	3k3	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RG5	10	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1

RG6	100	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RG7	47k	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RG8	3k3	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
RG9	3k3	R-EU_0207/10	0207/10	resistor	1
TR_C		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
TR_C1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
TR_E		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
TR_E1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
TR_G		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
TR_G1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VCC1+		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VCC1-		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VCC2+		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VCC2+1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VCC2-		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VCC2-1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VEE+		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VEE+1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VEE-		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1
VEE-1		3,17/1,1	3,17/1,1	wirepad	1

Příloha F.: DPS indikátoru napětí

Rozmístění součástek



Seznam součástek

Part	Value	Device	Package	Library	Sheet
+8V		3,81/1,1	3,81/1,1	wirepad	1
+13V		3,81/1,1	3,81/1,1	wirepad	1
C1	100u/16V	C5/3.5	C5B3.5	capacitor-wima	1
D1	1N5060GP	1N5060GP	DO15-12	diode	1
GND		3,81/1,1	3,81/1,1	wirepad	1
IC1	LM3914N	LM3914N	DIL18	linear	1
LOG_VYSTUP		3,81/1,1	3,81/1,1	wirepad	1
R1	22k	R-EU_0204/7	0204/7	rcl	1
R2	5k	R-TRIMM3339P	RTRIM3339P	rcl	1
R3	1k2	R-EU_0204/7	0204/7	rcl	1
R4	5k	R-TRIMM3339P	RTRIM3339P	rcl	1
R5	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R6	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R7	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R8	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R9	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R10	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R11	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R12	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R13	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R14	10k	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R17	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R18	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R19	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R20	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R21	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R22	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R23	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R24	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R25	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
R26	3k3	R-EU_0204/5	0204/5	rcl	1
T1		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T2		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T3		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T4		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T5		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T6		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T7		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T8		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T9		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
T10		-PNP-TO92-BEC	TO92-BEC	transistor	1
VSTUP		3,81/1,1	3,81/1,1	wirepad	1
X1		F15HDV	HDF15V	con-subd	1

Příloha G.: Spínací prvky a kondenzátorová baterie druhého stupně

