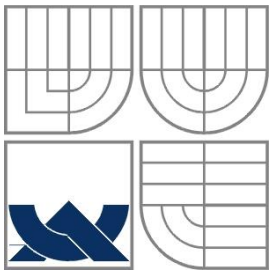
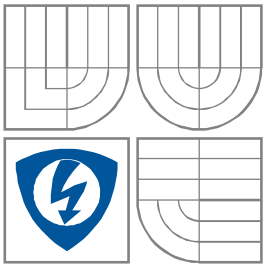


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

ELEKTROMAGNETICKÝ POHON JEDNODUCHÝCH OBJEKTŮ

ELECTROMAGNETIC ACTUATOR OF SIMPLE OBJECTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR´S THESIS

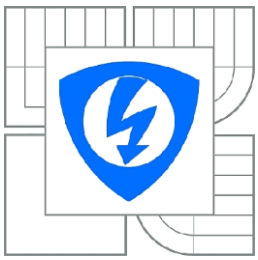
AUTOR PRÁCE Andrej Kolek

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE Ing. Michal Hadinec , Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO, 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Andrej Kolek ***ID:*** 125154
Ročník: 3 ***Akademický rok:*** 2012/2013

NÁZEV TÉMATU:

Elektromagnetický pohon jednoduchých objektů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte současný stav konstrukcí v oblasti elektromagnetických urychlovačů – „coilgunů“ a jednotlivá řešení dostatečně popište. Na základě prostudované literatury realizujte experimentální pohon jednoduchých objektů a jeho funkčnost ověřte při experimentech. Při návrhu využijte jednak dostupných simulačních programů pro obvodovou část a jednak programů pro simulaci průběhu magnetického pole. Proveďte srovnání dosažených výsledků s předpoklady.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] MAYER, D., ULRYCH, B. Elektromagnetické aktuátory. BEN – technické nakladatelství, 2008.

[2] IERUSALIMSCHY, R. Programming in Lua, Lua.org, 2006.

Termín zadání: 11.2.2013 ***Termín odevzdání:*** 31.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Michal Hadinec, Ph.D.
Konzultanti bakalářské práce:

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
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.

Bibliografická citácia práce:

KOLEK, A. Elektromagnetický pohon jednoduchých objektů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Michal Hadinec, Ph.D..

ABSTRAKT

Hlavným cieľom tejto práce je zoznámiť sa s princípom pohybu veľmi malých telies pomocou elektromagnetickej sily. V prvej časti sa zoznámime s teóriou elektromagnetizmu a delením coil gunov. V druhej časti sa zameriame na návrh, optimalizáciu pomocou simulácií a následnú konštrukciu zariadenia. Na záver urobím niekoľko praktických meraní, výsledky porovnám s teoretickými predpokladmi a zhodnotím ich.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

magnetická indukcia, magneticky tok, intenzita magnetického poľa, vlastná a vzájomná indukčnosť, feromagnetické materiály, vírivé prúdy, coil gun, indukčný a Hallov senzor, Gratezov usmerňovač, FEMM, PSpice

ABSTRACT

The main objective of this work is to study the principles of the movement of very small bodies using electromagnetic forces. The first part is acquainted with the theory of electromagnetism and the second part will focus on the already functioning device, called coil gun. In the end, I will make several practical measurments, results will be compared against theoretical assumption and take measure it.

KEYWORDS

Magnetic induction, magnetic flux, magnetic field strength, self and mutual inductance, ferromagnetic materiále, eddy currents, coil gun, Induction and Hall sensor, Greatz rectifier, FEMM, PSpice

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalařskou práci na téma Elektromagnetický pohon jednoduchých objektů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářske práce 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 uvedeného bakalářske 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 30.5.2013 .....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářske práce Ing. Michal Hadinec , Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářske práce.

V Brně dne 30.5.2013 .....
podpis autora

OBSAH

Zoznam obrázkov **viii**

Zoznam tabuliek **xi**

Úvod **1**

1 Teoretické základy elektromagnetizmu **2**

1.1 Popis magnetických veličín ... 3

1.2 Magnetické pole a jeho účinky ... 6

1.3 Vlastná a vzájomná indukčnosť ... 6

1.4 Feromagnetické materiály ... 8

1.5 RLC obvod ... 9

1.6 Usmerňovače ... 14

2 Súčastný stav coil gunov **20**

2.1 Coil gun ... 20

2.2 Opis činnosti ... 21

2.3 Delenie coil gunov ... 21

2.3.1 Neprenosné ... 22

2.3.2 Prenosné ... 28

2.4 Využitie ... 33

3 Relizácia vlastného coil gunu **34**

3.1 Návrh konštrukcie ... 34

3.2 Simulácia FEMM ... 43

4 Výsledky experimentov **46**

4.1 Východisková pozícia ... 46

4.2 Optimálna dĺžka projektilu ... 48

4.3 Materiál hlavne ... 49

5 Záver **51**

Zoznam použitej literatúry **52**

Zoznam symbolov, veličín a skratiek **54**

6 Zoznam príloh **55**

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr.1 Cievka s jadrom.....2

Obr.2 Magnetické pole v okolí magnetu.....3

Obr.3 Na pravej strane homogénne a na ľavej nehomogénne magnetické pole.....4

Obr.4 Magnetický indukčný tok v závite.....5

Obr.5 Siločiary ukazujúce tvar magnetického poľa v blízkosti magnetu.....6

Obr.6 Cievka a jej siločiary.....7

Obr.7 Dve cievky a ich vzájomná indukčnosť.....8

Obr.8 Hysterézna krivka látky.....9

Obr.9 Príklad RLC obvodu zo spínačom..... 11

Obr.10 Časový priebeh napätia na kondenzátore pri aperiodickom deji.....12

Obr.11 Časový priebehy napätia pre kmitavý dej.....12

Obr.12 Schéma jednocestného usmerňovača s vyhladzovacím kondenzátorom bez zaťaženia..13

Obr.13 Schéma jednocestného usmerňovača s vyhladzovacím kondenzátorom so záťažou.....13

Obr.14 Schéma napäťovej zaťažovacej charakteristiky jednocestného usmerňovača naprázdno.....14

Obr.15 Schéma napäťovej zaťažovacej charakteristiky jednocestného usmerňovača pri zaťažení.....15

Obr.16 Schéma prúdovej zaťažovacej charakteristiky jednocestného usmerňovača pri zaťažení.....15

Obr.17 Dvojcestný uzlový a) a mostíkový usmerňovač b).....16

Obr.18 Schéma mostíkového usmerňovača s vyhladzovacím kondenzátorom, chod pri zaťažení.....16

Obr.19 Časové priebehy pre mostíkový usmerňovač z programu PSpice. Na prvom obrázku napäťová a na druhom prúdová charakteristika.....17

Obr.20 Zaťažovacia charakteristika jednocestných a dvojcestných usmerňovačov pri zaťažení a bez neho.....18

Obr.21 Zjednodušený náčrt coil gunu.....19

Obr.22 Prenosný coil gun ako pištoľ.....19

Obr.23 Celkový pohľad na viacstupňový neprenosný coil gun.....22

Obr.24 Kondenzátory použité v trojstupňovom neprenosnom coil gune.....23

Obr.25 Podrobný popis cievky a všetkých jej súčastí. 24

Obr.26 Použité projektily.....25
Obr.27 Tvar projektilu. 25
Obr.28 Výkonový spínač IGBT.....26
Obr.29 Schéma spínaného zdroju.....26
Obr.30 Schéma senzorov.....27
Obr.31 Mikrokontrolér ATmega32.....27
Obr.32 Nákres zapojenia prenosného jednocievkového coil gunu vyrobeného zo súčiastok fotoaparátu.....28
Obr.33 Obvodová doska jednorazového fotoaparátu a na nej vyznačené miesta pre pripojenie cievky a kondenzátorov.....29
Obr.34 Elektromagnetická pištoľ CS-P01A bez vrchného krytu.....29
Obr.35 Kondenzátory použité pri konštrukcii pištole CS-P01A.....30
Obr.36 Princíp fungovania prevodníka pri zapnutom a vypnutom spínači.....31
Obr.37 Súčiastky prevodníka osadené na doske plošných spojov.....32
Obr.38 Cievky namontované na hlavni, medzi nimi stabilizačné prstence s otvormi pre čidlá.....32
Obr.39 Mostíkový usmerňovač.....34
Obr.40 Priebeh napätia na usmerňovači (zelený priebeh).....34
Obr.41 Kondenzátorová batéria.....35
Obr.42 Simulácia priebehu napätia a prúdu na batérii pri vybití kondenzátorovej batérie.....35
Obr.41 Schéma rlc obvodu zo simulácie.....36
Obr.44 Návrh rozmerov cievky na základe jej indukčnosti.....37
Obr.45 Navinutá cievka upevnená v stojanoch.....38
Obr.46 IGBT tranzistor IGBT P741.....39
Obr.47 mosadzná a pvc hlaveň.....39
Obr.48 Projektily použité pri experimentoch.....40
Obr.49 Výsledná schéma zapojenia obvodu coil gunu.....41
Obr.50 Časový priebeh prúdu na cievke v konečnom zapojení.....42
Obr.51 Časový priebeh napätia na kondenzátorovej batérii.....42
Obr.52 Výsledná konštrukcia hotového coil gunu.....43
Obr.53 Simulácia v čase 0,6 ms pri napätí 150 A.....44
Obr.54 Simulácia v čase 1,8 ms pri napätí 285 A.....45
Obr.55 Simulácia v čase 4,2 ms pri napätí -100 A.....45

Obr.56 Simulácia v čase 5,4 ms pri napätí -215 A.....46
Obr.57 Pozícia náboja v cievke.....47
Obr.58 Spôsob výpočtu rýchlosti.....49

ZOZNAM TABULIEK

Tab.1 Pomerná permeabilita vybraných feromagnetických látok.....8

Tab.2 Pomerná permeabilita vybraných feromagnetických látok.....10

Tab.3 Prehľad rýchlostí železného a medeného projektilu v závislosti na polohe v cievke.....31

Tab.4 Prehľad kinetickej energie a rýchlosti nábojov rôznych rozmerov. 32

Tab.5 Prehľad rýchlosti projektilov rôznych rozmerov vystrelených z PVC a mosadznej hlavne.....33

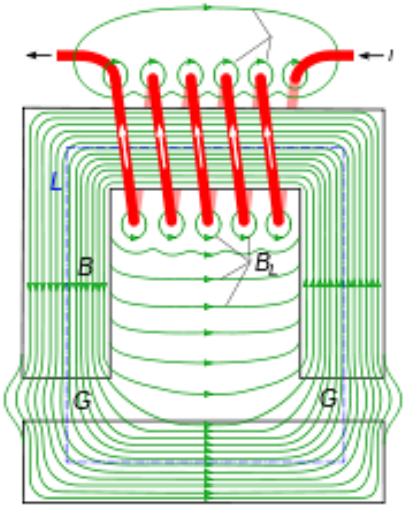
ÚVOD

V tejto práci mám za úlohu zoznámiť sa princípom elektromagnetizmu a jeho vplyvom na malé telesá. Budú tu popísané javy ako magnetická indukcia, magnetický tok, intenzita magnetického poľa, magnetické pole a vírivé prúdy a vlastná a vzájomná indukčnosť. Ako príklad premeny elektromagnetickej sily na silu mechanickú použijeme zariadenia zvané coil gun alebo ľudovo nazývané elektromagnetické delo, ktoré funguje na rovnakom princípe. Po teoretickom úvode opíšem súčasný stav v oblasti coil gunov. Následne sa zameriam na návrh, optimalizáciu a konštrukciu vlastného zariadenia. Optimalizácia bude prebiehať pomocou dostupných simulačných programov. Výslednú konštrukciu podrobím niekoľkým experimentom pre dosiahnutie maximálnej účinnosti zariadenia.

1 TEORETICKÉ ZÁKLADY ELEKTROMAGNETIZMU

Pod slovom elektromagnetizmus sa rozumie súbor javov, v ktorom sa prejavuje vzájomná súvislosť poľa elektrického a magnetického. Tieto polia ovplyvňujú častice s elektrickým nábojom a sú nimi a ich pohybom priamo definované. Sila, ktorou elektromagnetické pole pôsobí na častice sa nazýva sila elektromagnetická.[1]

Jedeným z najľahších spôsobov, ako vytvoriť riadené magnetické pole je pomocou elektromagnetu. Elektromagnet je cievka s jadrom z magneticky mäkkého materiálu.



Obr.1 Cievka s jadrom[2].

Magnetická sila tu vzniká pri prechode striedavého elektrického prúdu vinutím cievky na jadre. Zvyčajná cievka má dĺžku niekoľkonásobnú ako je jej priemer. Magnetické pole vytvárané vo vnútri valca je pomerne homogénne, najmä v strede cievky. Čím väčší je pomer dĺžky k priemeru, tým rovnomernejšie je pole v strede elektromagnetu.

Orientačná hodnota magnetického poľa(magnetickej indukcie) je daná vzťahom:

$$B = \mu_0 \cdot NI \tag{1}$$

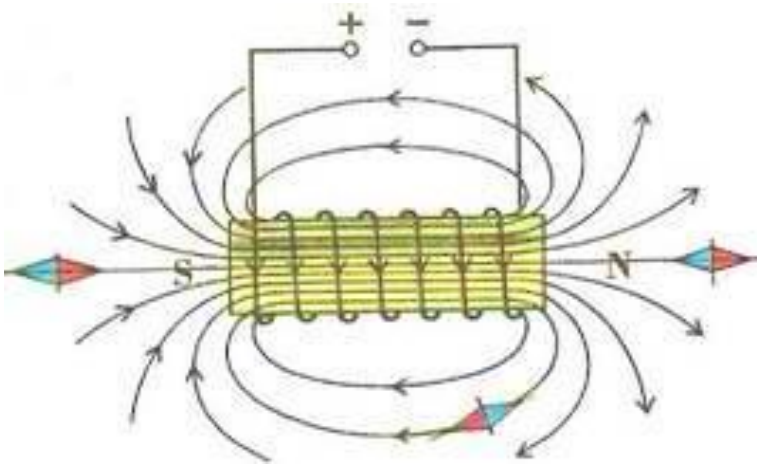
B je indukcia magnetického poľa, μ_0 permeabilita vákua, *N* je počet závitov cievky , a *I* ja prúdu tečúci cez drôt . Tento vzťah bude platiť presne, ak cievka bude nekonečne dlhá. Presnejší výpočet ukazuje, že vyššie uvedený vzťah platí s odchýlkou do 2 percent v strede cievky, ak je pomer dĺžky k priemeru päť alebo viac.

Táto rovnica ukazuje, že jeden spôsob, ako zvýšiť *B* je zvýšiť *I*. Ale, pretože každý drôt má odpor, tento postup si vyžaduje zvýšenie napätia cez cievku a výsledkom tohto je viac tepla generovaného odporom drôtu. Ďalší spôsob, ako zvýšiť *B* je zvýšenie *N*, ale toto zvýšenie možno dosiahnuť len znížením veľkosti priemeru drôtu, čo vedie k zvýšeniu odporu a zvýšenie napätia potrebného pre daný prúd, ako aj k zvýšeniu tepla generovaného odporom

drôtu. Alternatívny spôsob, ako zvýšiť *B* je navinúť niekoľko vrstiev drôtu. Tento postupom sa zvyšuje odpor drôtu, pridajú sa izolačné problémy, a znižuje sa pomer dĺžky k priemeru. Výber vhodného kompromisu je zásadným problémom, ktorý musí byť riešený prostredníctvom dôkladného návrhu cievky [2].

Magnetické pole a elektrický prúd

Podľa skorších objavov vieme, že elektrický prúd je sprevádzaný magnetickým poľom. Typický príklad vidíme na obrázku, kde sú pomocou feromagnetických teliesok zobrazené siločiary magnetického poľa pretekajúce cievkou. Závislosť medzi intenzitou magnetického poľa *H* a prúdom cievky *I* je popísaná I. Maxvellovou rovnicou.[3]



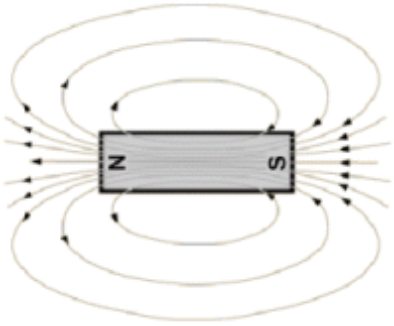
Obr. 2 Cievka a jej siločiary[3].

1.1 Popis magnetických veličín

Magnetická indukcia

Magnetická indukcia je vektorová veličina, ktorá vyjadruje silové účinky magnetického pola na častice s nábojom alebo magnetickým dipólovým momentom.

Tvar magnetického poľa môžeme popísať magnetickými indukčnými čiarami. V priestore s magnetickým poľom môžeme zostrojiť krivky, ktorých dotyčnice v každom bode sú rovnobežné s vektorom magnetickej indukcie $\vec{B}$. V grafickom zobrazení sa na krivky nanášajú šípky udávajúce smer magnetickej indukcie *B*. Také krivky so šípkami nazývame magnetické indukčné čiary. V miestach s väčšou hustotou magnetických indukčných čiar je veľkosť magnetickej indukcie *B* vyššia.[3]



Obr.3 Magnetické pole v okolí magnetu[2].

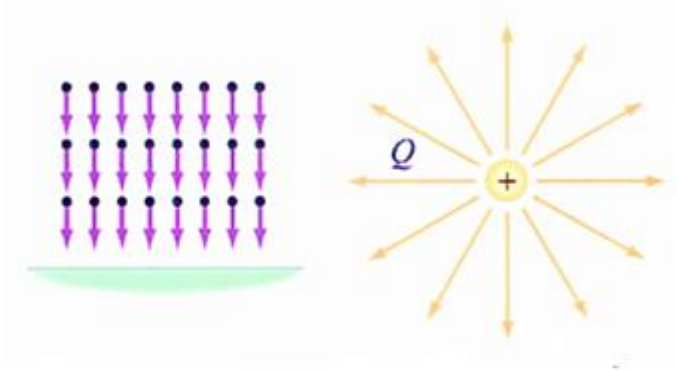
Podľa priestorového rozloženia delíme magnetické pole na:

Homogénne magnetické pole

Je v danej oblasti priestoru také magnetické pole, ktorého magnetická indukcia je vo všetkých bodoch tejto oblasti zhodná veľkosťou i smerom. Dá sa znázorniť priamymi, rovnobežnými, rovnako od seba vzdialenými indukčnými čiarami.

Nehomogénne magnetické pole

Sa nachádza v oblastiach priestoru, kde podmienka pre homogénne magnetické pole nie je splnená.



Obr. 4 Príklad homogénneho a nehomogénneho magnetického poľa [3].

Veľkosť mag. indukcie cievky (solenoidu) je:

$$\vec{B} = \mu_0 \frac{NI}{l} \tag{2}$$

N je počet závitov cievky, *I* je prúd prechádzajúci cievkou, *l* dĺžka cievky a μ je permeabilita, ktorá sa počíta podľa vzorca:

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \tag{3}$$

kde μ_0 je permeability vákua a μ_r relatívna permeabilita.[3]

Vo vnútri ideálnej cievky(dostatočne dlhá a so závitmi blízko seba) sa nachádza homogénne mag. pole.

Magnetický tok

Magnetický tok je skalárna veličina definovaná napätím u_i indukovaným v závite pri časovej zmene toku Φ podľa vzorca:

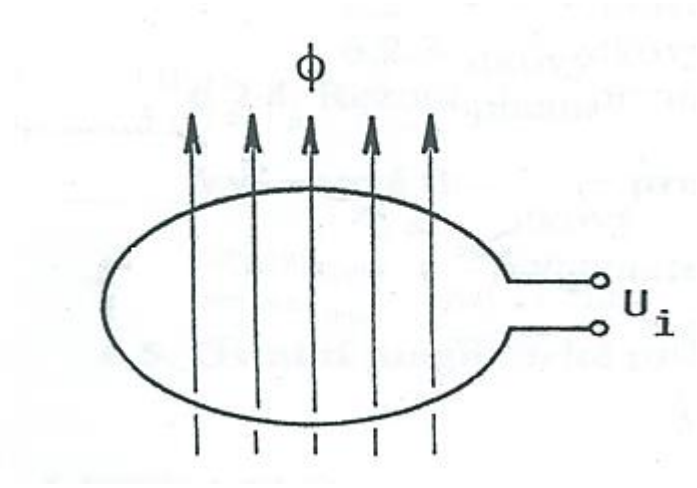
$$u_i = \frac{d\Phi}{dt} \tag{4}$$

Magnetickému toku 1 Wb odpovedá indukované napätie 1 V, ktoré vznikne v závite obklopujúcom tok pri rovnomernom poklese toku z jednotkovej hodnoty na nulu v čase t= 1 s. Ak je zložka B kolmá k ploche S, môžeme magnetický indukčný tok definovať podľa vzťahu[3]:

$$\Phi = BS \tag{5}$$

Ak zložka B kolmá k ploche S nie je:

$$\Phi = \int BS \tag{6}$$



Obr. 5 Magnetický indukčný tok v závite[3].

Intenzita magnetického poľa

Je vektorová veličina definovaná z I. Maxvellovej rovnice, podľa ktorej, je vo vzdialenosti a od priameho veľmi dlhého vodiča s prúdom I intenzita magnetického poľa[3]:

$$H = \frac{I}{2\pi a} \tag{7}$$

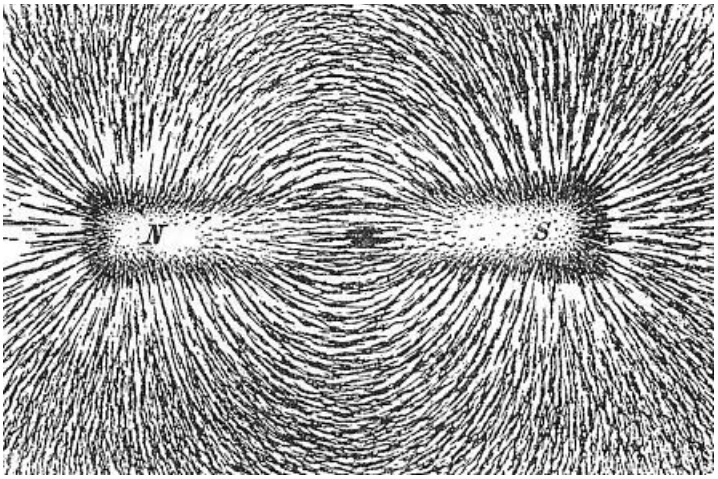
Súvislosť intenzity poľa a indukcie je daná vzťahom:

$$B = \mu H \tag{8}$$

Kde veličina μ je permeabilita prostredia.

1.2 Magnetické pole a jeho účinky

Magnetické pole je charakterizované vektorom intenzity magnetického poľa *H* resp. magnetickou indukciou *B*. Priebeh *H* v okolo magnetu je zobrazený pomocou siločiar magnetického poľa, čo sú miesta s konštantnou hodnotou *H*. Na základe analógie medzi magnetickým a elektrickým poľom je používaný pojem magnetický náboj. Pomocou neho je definovaný magnetický dipól, pričom najmenším dipólovým útvarom je molekula látky.



Obr. 6 Siločiary ukazujúce tvar magnetického poľa v blízkosti magnetu[2].

1.3 Vlastná a vzájomná indukčnosť

Indukčnosť alebo vlastná indukčnosť je fyzikálna veličina, ktorá vyjadruje mieru množstva magnetického toku vyvolaného daným elektrickým prúdom. V mojom projekte sa budem zaoberať hlavne indukčnosťou cievky. Je to fyzikálna veličina vyjadrujúca veľkosť magnetického indukčného toku okolo cievky pri jednotkovom elektrickom prúde (1 A) prechádzajúcim cievkou. Popisuje schopnosť cievky zmeniť elektrickú energiu na energiu magnetického poľa. Indukčnosť cievky ovplyvňujú parametre ako materiál, počet závitov, tvar a zloženie jadra cievky [2].
Statická definícia:

$$L = \frac{\Phi}{I} \tag{9}$$

kde Φ magnetický indukční tok, *I* je elektrický prúd, ktorý uvedený tok vyvolal. Dynamická definícia:

$$. \; U_i = -L\frac{dI}{dt} \tag{10}$$

Energia ,ktorá bude nahromadená v cievke môže byť popísaná vzťahom:

$$W_m = \frac{1}{2}LI^2 \tag{11}$$

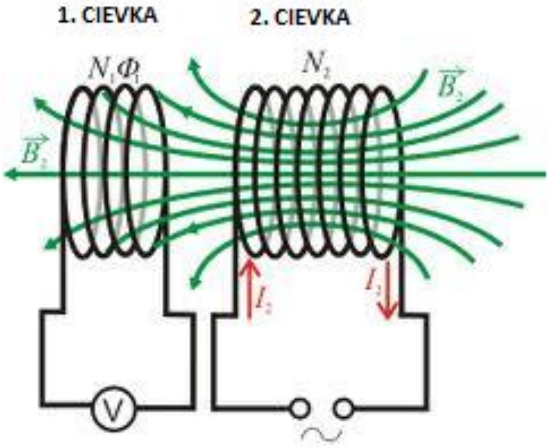
Vlastná indukčnosť cievky:

$$L = \frac{\mu N^2}{l} S \tag{12}$$

kde μ je permeabilita prostredia, N je počet závitov cievky, l je dĺžka cievky, S je obsah prierezu cievky (vzťah platí pre cievku, ktorej dĺžka je omnoho väčšia než polomer) [2].

Pod pojmom vzájomná indukčnosť si predstavme pôsobenie dvoch cievok vzájomne na seba. Ak sú dve cievky blízko seba a jednou z nich preteká stály prúd I, prechádza druhou z nich magnetický tok. Ak meníme prúd pretekajúci prvou cievkou vzniká v cievke druhej elektromagnetické pole dané faradayovím zákonom. Takže vzájomná indukčnosť udáva mieru väzby medzi dvoma cievkami.

Na obrázku, kde pre jednoduchosť sú dve cievky nakreslené ako dva závity, prvým závitom tečie prúd I_1 , druhým I_2 .



Obr. 7 Dve cievky a ich vzájomná indukčnosť [3].

Magnetický tok je definovaný integrálom

$$\Phi_{21} = \int\int B_1 \cdot dS_2 = \int\int \left[\int \frac{l_1 dS \cdot r}{r^3} \right] \cdot dS_2 = l_1 \int\int \left[\int \frac{dS \cdot r}{r^3} \right] \cdot dS_2 = l_1 L_{21} \tag{13}$$

Pričom vektor magnetickej indukcie esa počíta podľa Biotovho-Savarthovho zákona. Pre vektor B_1 v okolí prvého vodiča teda platí :

$$B_1 = \int \frac{l_1 dS \cdot r}{r^3} \tag{14}$$

Spojením dvoch predošlých vzorcov dostaneme pre magnetický tok Φ_{21} plochou ohraničenou

druhým závitom, ale vyvolaným prúdom tečúcim prvým závitom :

$$\Phi_{21} = \int\int B_1 \cdot dS_2 = \int\int \left[\int \frac{l_1 dS \cdot r}{r^3} \right] \cdot dS_2 = l_1 \int\int \left[\int \frac{dS \cdot r}{r^3} \right] \cdot dS_2 = l_1 L_{21} \qquad (15)$$

kde L_{21} , vyjadrený ako plošný integrál, je vzájomná indukčnosť.[1]

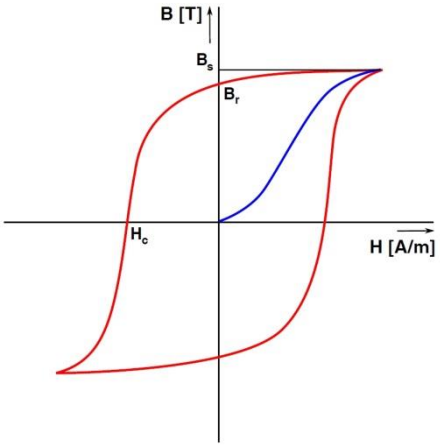
1.4 Feromagnetické materiály

Do tejto skupiny patria prevažná väčšina technicky využiteľných magnetických materiálov. Vo feromagnetických látkach je možné pôsobením aj malého poľa vyvolať silnú magnetizáciu, ktorá úplne nevymizne ani po odstránení vonkajšieho poľa.

Feromagnetické materiály sa rozdeľujú do dvoch skupín, magneticky mäkké a magneticky tvrdé. Tieto poznatky využijem pri výbere materiálu pre konštrukciu projektilu. Najdôležitejším parametrom projektilu bude schopnosť elektromagnetickej vodivosti a schopnosť indukovať vírivé prúdy. Tieto vlastnosti spĺňajú všetky feromagnetické látky. Nevýhodou väčšiny materiálov je neschopnosť sýtenia až do nekonečna. To znamená, že veľkosť magnetickej indukcie neporastie do maxima daným silou vytvorenou pomocou cievky, ale že sa zastaví na určitej hodnote danou hysteréznou slučkou B_s.[2]

Tab.1 Pomerná permeabilita vybraných feromagnetických látok.

Materiál	Permeabilita
čisté železo	do 6000
trafo plechy	~ 6500
ferit	~ 10 000
železo legované niklom	do 300 000



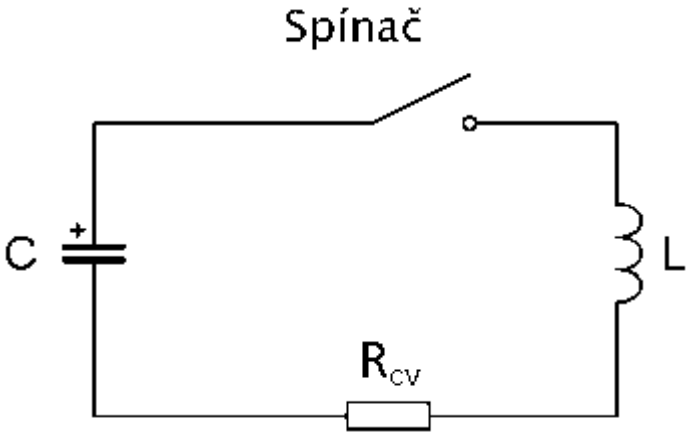
Obr.8 Hysterézna krivka feromagnetickej látky[2].

Vírivé prúdy

Sú to uzavreté elektrické prúdy, ktoré sú indukované zmenou magnetického toku vo vodivých telesách (napr. pohybom v magnetickom poli). Kovové časti sú vlastne vodičom s veľkým prierezom, v ktorom sa indukované prúdy tvoria v plochách kolmých na smer magnetickej indukcie. V týchto plochách majú indukované prúdy tvar uzavretých kriviek (odtiaľ názov "vírivé" prúdy). Veľkosť vírivých prúdov je závislá od veľkosti kovového predmetu, merného odporu a rýchlosti zmeny. Ak sú vírivé prúdy vyvolané pohybom vodiča v magnetickom poli, podľa Lenzovho zákona, tento pohyb brzdia. Vírivé prúdy vytvárajú svoje vlastné magnetické pole, ktoré ma opačnú fázu ako pole budiace. Tým sa budiace pole zoslabuje a vzniká výsledné magnetické pole. Toto sa odzrkadľuje na zmenšení pohybovej energie projektilu a čiže zmenšením účinnosti. Redukcia vírivých prúdov sa dá docieliť použitím kvalitných feromagnetických materiálov s čo najnižšou vodivosťou a taktiež vytvorením zárezov pozdĺž osi projektilu.[1]

1.5 RLC obvod

Obvod RLC je analógový oscilačný elektrický obvod zložený z rezistoru *R*, cievky *L* a kondenzátoru *C* spojených paralelne, alebo sériovo. Tento jednoduchý obvod tvorí základ nášho zapojenia, doplnený o ďalšie obvodové časti. Energia v obvode sa premieňa na napätie kapacity a prúd indukcie podľa časovej konštanty obvodu. V komponentoch skutočného rezonančného obvodu vznikajú pri prechode prúdu straty. Skutočnú cievku môžeme nahradiť ideálnou bezstratovou cievkou a stratovým odporom. Skutočný kondenzátor môžeme nahradiť ideálnym kondenzátorom a stratovým odporom. Rezistor *R* väčšinou nebýva tvorený samostatnou súčiastkou, ale jedná sa o symbolické vyjadrenie nedokonalosti použitých súčiastok, tzv. ESR odpor.[5]



Obr.9 Príklad RLC obvodu zo spínačom[3].

Pre rozkmitanie je nutné priviesť energiu a obvod kmitá neobmedzene dlhú dobu len pri absencii rezistoru (teda s ideálnymi súčiastkami) a bez záťaže. Pri jednej, tzv. rezonančnej

frekvencii sa v tomto obvode vyrovnáva kapacitná a induktívna reaktancia a rezonančný obvod sa pri tejto frekvencii chová ako činný odpor. Stav obvodu, ktorý nastane pri rezonančnej frekvencii, sa nazýva rezonancia. Prúd pretekajúci obvodom je v tomto stave maximálny a odpor minimálny. Keď sú cievka a kondenzátor spolu zapojené, elektrický prúd medzi nimi kmitá pri frekvencii,

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \tag{16}$$

kde L je indukčnosť cievky vyjadrená v jednotkách henry H a C je elektrická kapacita kondenzátora vyjadrená vo faradoch F.

Pri rezonancii sa reaktancie rovnajú [5].

$$X_L = X_C \tag{17}$$

Sériový rezonančný obvod

Sériový rezonančný obvod má pri rezonančnej frekvencii najmenšiu impedanciu a najväčší prúd, pričom tento je v obvode konštantný.

Sériový rezonančný obvod sa využíva tam kde potrebujeme dosiahnuť maximálny prúd čo je náš prípad [5].

Tlmenie sériového rezonančného RLC obvodu

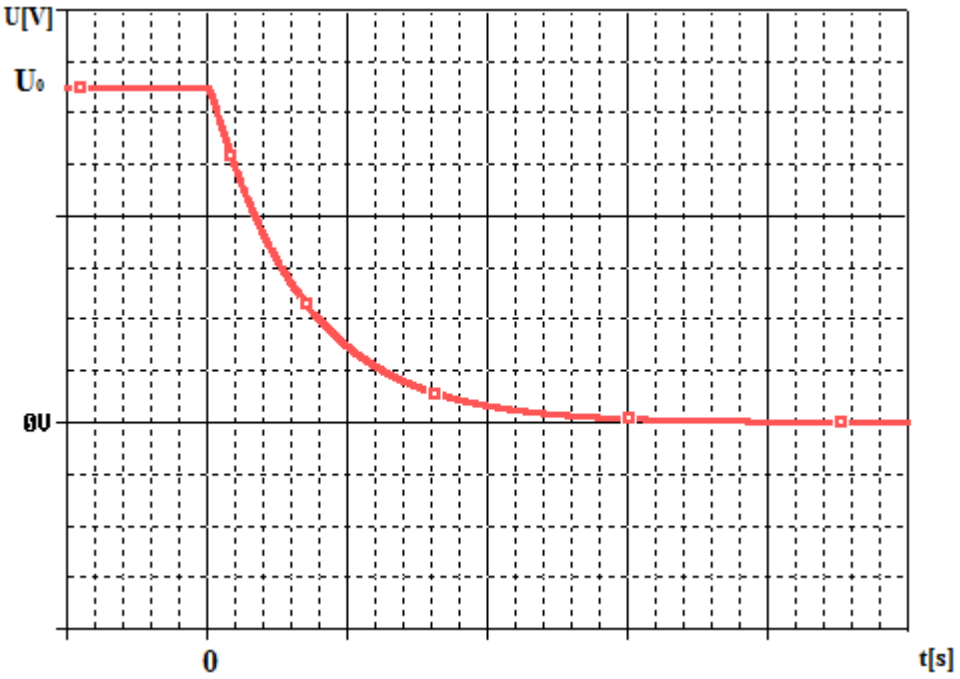
Kondenzátor je nabitý na napätie U_0 a v okamžiku $t = 0$ je pripojený k zvyšku obvodu. To aký bude mať obvod charakter závisí na činiteli tlmenia δ, rezonančnom kruhovom kmitočte obvodu ω_0 a najviac od činiteľu akosti Q.

$$Q = \frac{\omega_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{\omega_0 \cdot C \cdot R} \tag{18}$$

Ako zo vzorca vyplýva, deje ktoré sa budú v obvode odohrávať záležia na hodnotách cievky, odporu a kondenzátoru. Tieto deje sa nazývajú prechodové deje a vznikajú pri náhlej zmene pomerov v obvode ako je napríklad náhle pripojenie alebo odpojenie napájacieho zdroja. Môžu nastať tieto možnosti[13]:

Aperiodicky tlmený dej – $0 < Q < 0{,}5$

$$-\ \delta < \omega_0$$

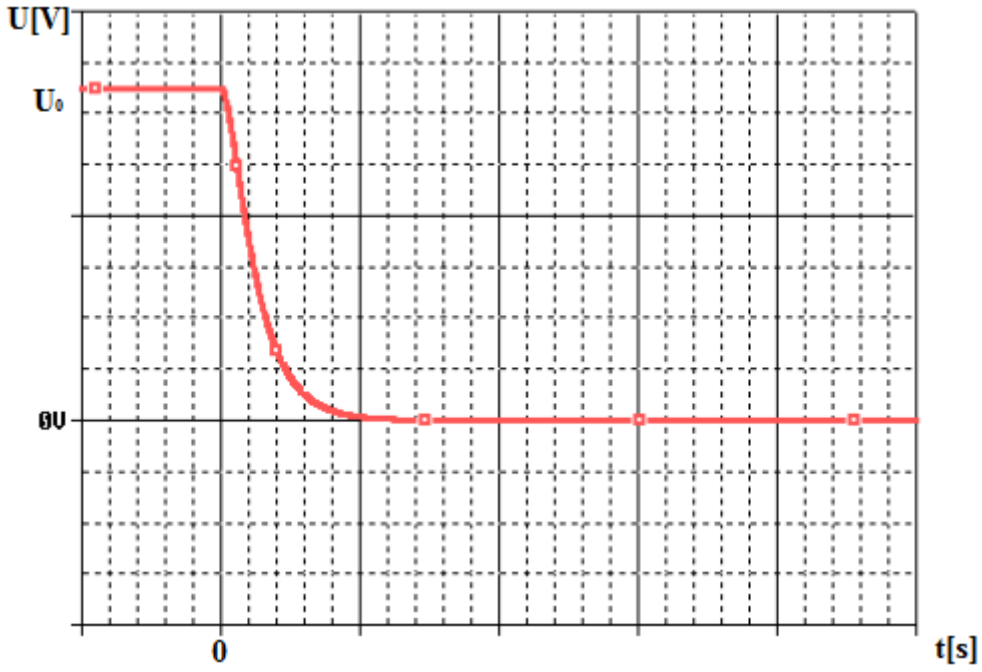


Obr.10 Časový priebeh napätia na kondenzátore pri aperiodickom deji.

Kriticky tlmený dej – $\delta = \omega_0$

– Q = 0,5

Časové priebehy U_c a i sa tvarom podstatne nelíšia od odpovedajúcich závislostí pri aperiodickom deji. Líšia sa len rýchlosťou poklesu na nulovú úroveň (rýchlejšie utlmenie kmitu).

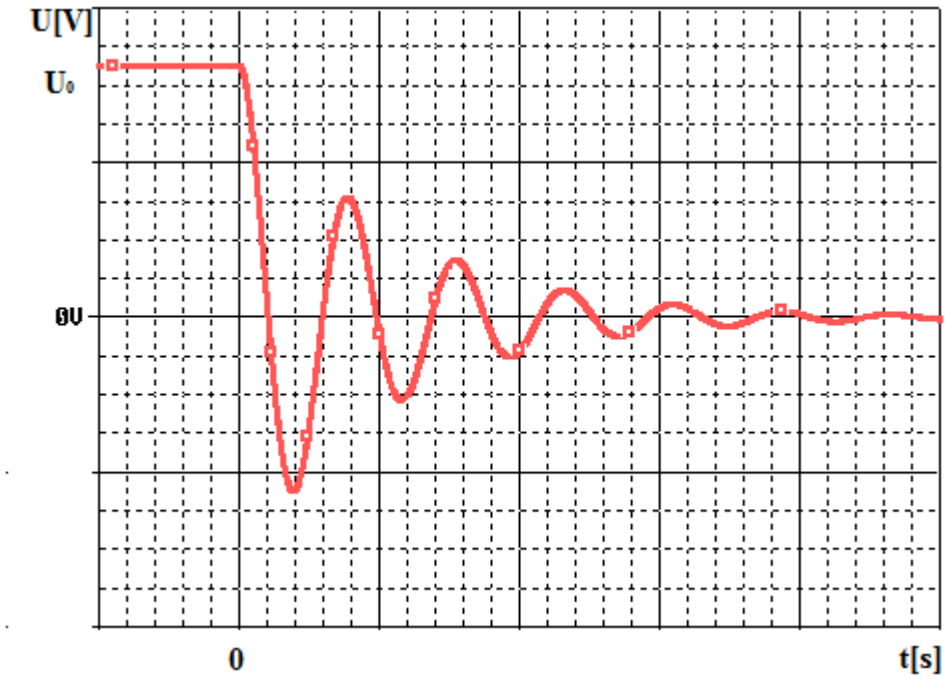


Obr.10 Časový priebeh napätia na kondenzátore pri kriticky tlmenom deji.

Podkriticky tlmený dej (kmitavý dej) – $\delta < \omega_0$

– $Q > 0{,}5$

Priebeh je harmonický s exponencionálne tlmenou amplitúdou.



Obr.11 Časový priebeh napätia pre kmitavý dej.

Netlmený dej – $\delta = 0$

– $Q = \infty$

Priebeh napätia aj prúdu je harmonický, s konštantnou amplitúdou, jednoznačne určený počiatočnými podmienkami, nemeniacimi sa počas celého deja[13].

V našom zapojení sa vyskytuje tlmený kmitavý dej. Pomocou kombinácií parametrov jednotlivých prvkov sa budeme snažiť o ideálne nastavenie a načasovanie obvodu. To znamená čo najväčšie špičkové napätia a prúdy hneď pri prvej perióde a čo najväčšie utlmenie pri nasledujúcich periódach.

Činiteľ akosti

Udáva koľkokrát je väčšie napätie na cievke (kondenzátore) pri rezonančnej frekvencii ako napätie na odpore, a ako je celkové napätie .Vyjadruje straty vzniknuté na cievke alebo kondenzátore. [5]

ESR

Je Equivalent series resistance (zdanlivý odpor ekvivalentný sériový odpor). Popisuje odporovú zložku výsledného celkového odporu daného zariadenia.

Reálne kondenzátory a tlmivky , používané v elektrických obvodoch nie sú ideálnymi prvkami iba s kapacitnou alebo indukčnosti . Môžeme ich však vyjadriť ako ideálny prvok s kapacitou alebo indukčnosťou v sérii s odporom , tento parazitný odpor je definovaný ako ekvivalentný sériový odpor (ESR).

Teória elektrických obvodov sa zaoberá ideálnymi prvkami ako odpor , kondenzátor a induktor avšak, každý týchto prvkov má nenulovú hodnotu každého z týchto prvkov. Je to spôsobené tým, že tieto prvky sú vyrobene z materiálov s konečnou hodnotou elektrického odporu, takže okrem indukčnosti a kapacity majú aj určitý odpor.

Jedným zo spôsobov ako sa s týmto vysporiadať pri obvodovej analýze je vyjadriť každý reálny komponent ako kombináciu ideálneho komponentu a malého odporu v sérii. Kondenzátory, cievky a odpory sa snažia výrobcovia navrhnúť tak aby boli ostatné parametre čo najviac minimalizované. V mnohých prípadoch sa môže stať, že napríklad parazitná indukčnosť a kapacita odporu sú tak malé, že neovplyvnia funkciu obvodu.

Tieto malé odchýlky od ideálneho správania zariadenia sa môže stať významným za určitých podmienok, ktoré sú zvyčajne vysoké frekvencie, kde reaktancie malých kapacitách a indukčnosti môže stať významným prvkom obvodu prevádzky. Ideálne kondenzátory a cievky nepohlcujú energiu. Každý proces, ktorý spotrebúva energiu(napr. premieňa ju na teplo), musí byť v obvode vyjadrený jedným alebo viacerými rezistormy.

V kondenzátoroch sú príčinou ESR odpor vodičov, elektród a straty v dielektriku. Typická udávaná hodnota ESR pri keramických kondenzátoroch je medzi 0,01 a 0,1 ohm. Hliníkové a tantalové kondenzátory majú oveľa vyššie ESR, až do niekoľkých ohmov a rastie s využitím v čaše [4].

Tab.2 Typické hodnoty ESR pre vybrané typy kondenzátorov.

Typ	22 mF	100 mF
Štandardné hliníkové (nami použité)	0,1 až 3,0 Ω	0,05 až 0,5 Ω
Keramický	<0,015 Ω	

ESR sa dá merať pomocou ESR metru a býva zapísané aj v datasheete komponentu. Do istej miery sa dá vypočítať z vlastností prvku [4].

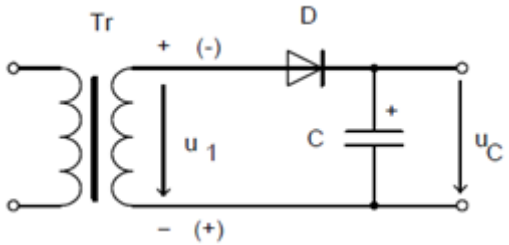
V našom prípade musíme použiť kondenzátory s čo najnižšou hodnotou ESR. Čím je nižšia tým lepšie, pretože na nich tým pádom vznikajú menšie straty v rámci RLC obvodu a to sa týka všetkých prvkov, ktoré majú vnútorný odpor.

1.6 Usmerňovače

Usmerňovače využívajú ku svojej činnosti diódy, ktorá prepúšťa elektrický prúd, pokiaľ je jej anóda kladnejšia, než katóda, a to o cca. 0,65 V pre kremíkovú diódu. V opačnom prípade prúd dióda nevedie.
Podľa zapojenia sa usmerňovače rozdeľujú na: jednocestné a dvojcestné.

Jednocestný usmerňovač s vyhladzovacím kondenzátorom

Chod naprázdno

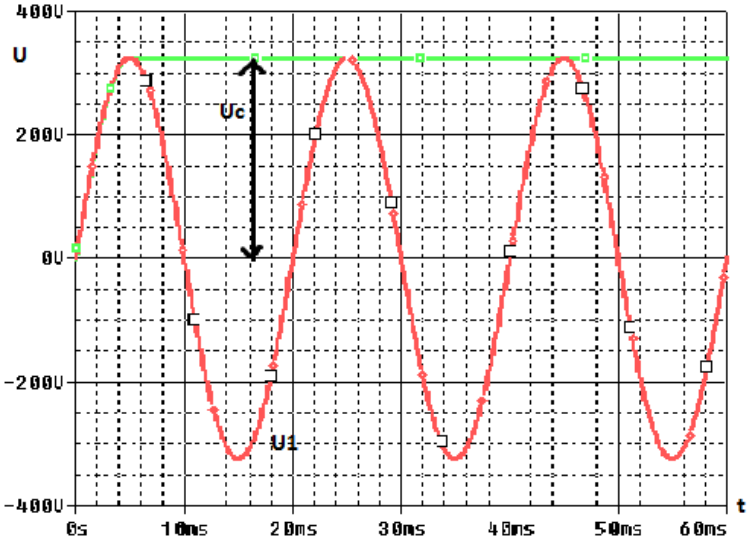


Obr.12 Schéma jednocestného usmerňovača s vyhladzovacím kondezátorom bez zaťaženia[7].

Ak je okamžitá veľkosť napätia U_1 väčšia ako napätie na kondenzátore U_C, je dióda D otvorená, prúd z transformátoru Tr preteká diódou D a nabije kondenzátor C až na maximálnu hodnotu napätia U_1, tj. na U_{1max} .

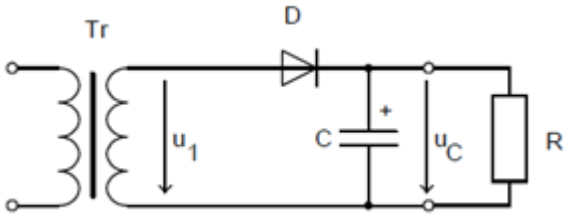
V závernom smere je dióda namáhaná napätím U_{Dmax}, ktoré je dvojnásobné oproti napätiu na výstupe transformátora U_{DMAX}, keďže pri zápornej pól perióde sa napätie na kapacitore pričíta k napätiu z transformátoru. Preto sú diódy konštruované tak, aby toto napätie U_{Dmax} zniesli aj s rezervou. a neboli v závernom smere prerazené.[7]

$$2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1ef} = 2 \cdot U_{C\,max} \tag{18}$$



Obr.14 Schéma napäťovej zaťažovacej charakteristiky jednocestného usmerňovača naprázdno.

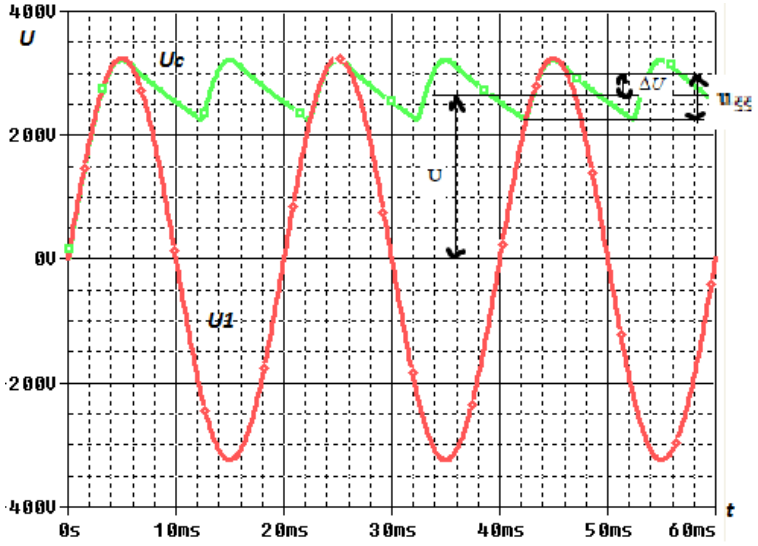
Chod pri zaťažení



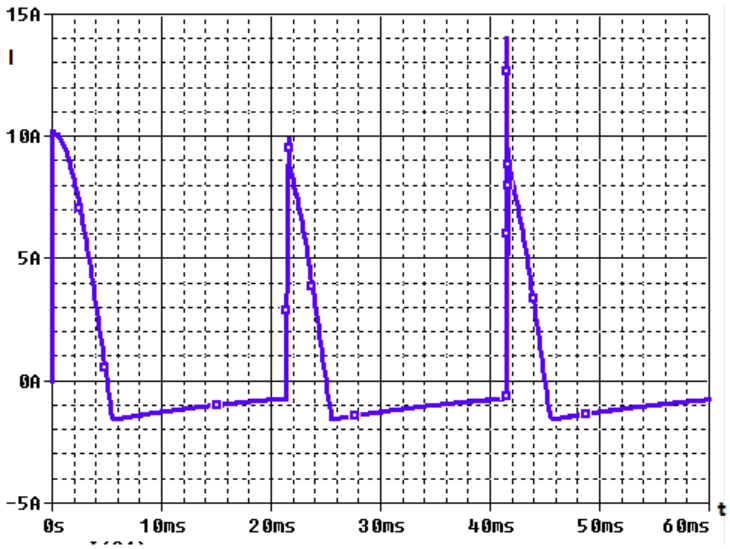
Obr.13 Schéma jednocestného usmerňovača s vyhladzovacím kondenzátorom so záťažou[7].

Pokiaľ je však na výstupe usmerňovača pripojená záťaž a $U_1 > U_c$, potom prúd z transformátoru preteká diódou D jednak do záťaže R a jednak dobíja kondenzátor C počas tzv. doby otvorenia diódy, takže napätie U_C na ňom vzrastá.

Ak je však okamžitá veľkosť vstupného napätia u_1 menšia, než napätie na kondenzátore U_c , je dióda D polarizovaná v závernom smere a prúd ňou teda neprechádza. Behom tejto doby uzavretia diódy dodáva prúd do záťaže kondenzátor C, ktorý sa tím ale vybíja, takže jeho napätie U_c klesá. Objavuje sa teda zvlnenie o veľkosti ΔU s mezivrcholovou hodnotou $U_{šš}$ usmerneného napätia okolo jeho strednej hodnoty U, majúce frekvenciu rovnakú, ako má striedavé napätie, ktoré je usmerňované.



Obr.15 Schéma napäťovej zaťažovacej charakteristiky jednocestného usmerňovača pri zaťažení.

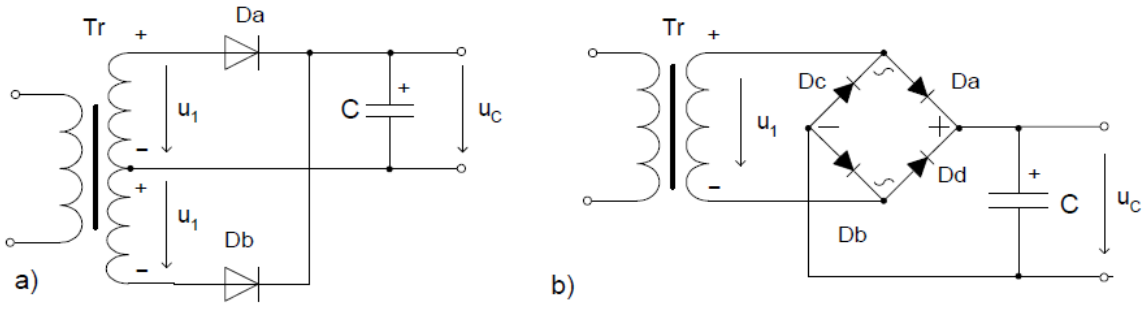


Obr.16 Schéma prúdovej zaťažovacej charakteristiky jednocestného usmerňovača pri zaťažení.

Maximá impulzov prúdu sa vyskytujú po 360° rovnako, ako maxima napätia U_1 , a nastávajú po pripojení transformátoru k napätiu, keď je (ešte) kondenzátor C celkom vybitý, tzn. keď je na ňom nulové napätie. Takúto prúdovú špičku musí dióda zniesť bez poškodenia. Veľkosť špičky je obmedzená v podstate len (ohmickým) odporom vinutia transformátoru (tzv. nabíjacím odporom) [7].

Dvojcestné zapojenie

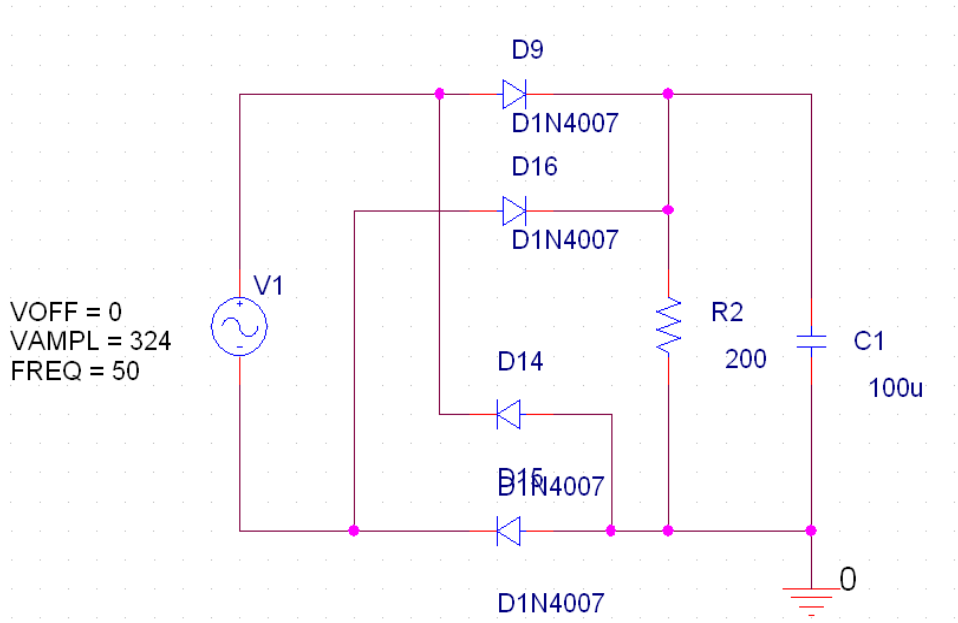
Pri dvojcestnom zapojení sa používa zapojenie s uzlovým usmerňovačom alebo mostíkový usmerňovač.



Obr.17 Dvojcestný uzlový a) a mostíkový usmerňovač b)[7].

Aby transformátor nemusel mať vyvedený stred vinutia ako v prípade uzlového zapojenia, používa sa druhá dvojice diód a vzniká mostíkový usmerňovač.

Mostíkový usmerňovač



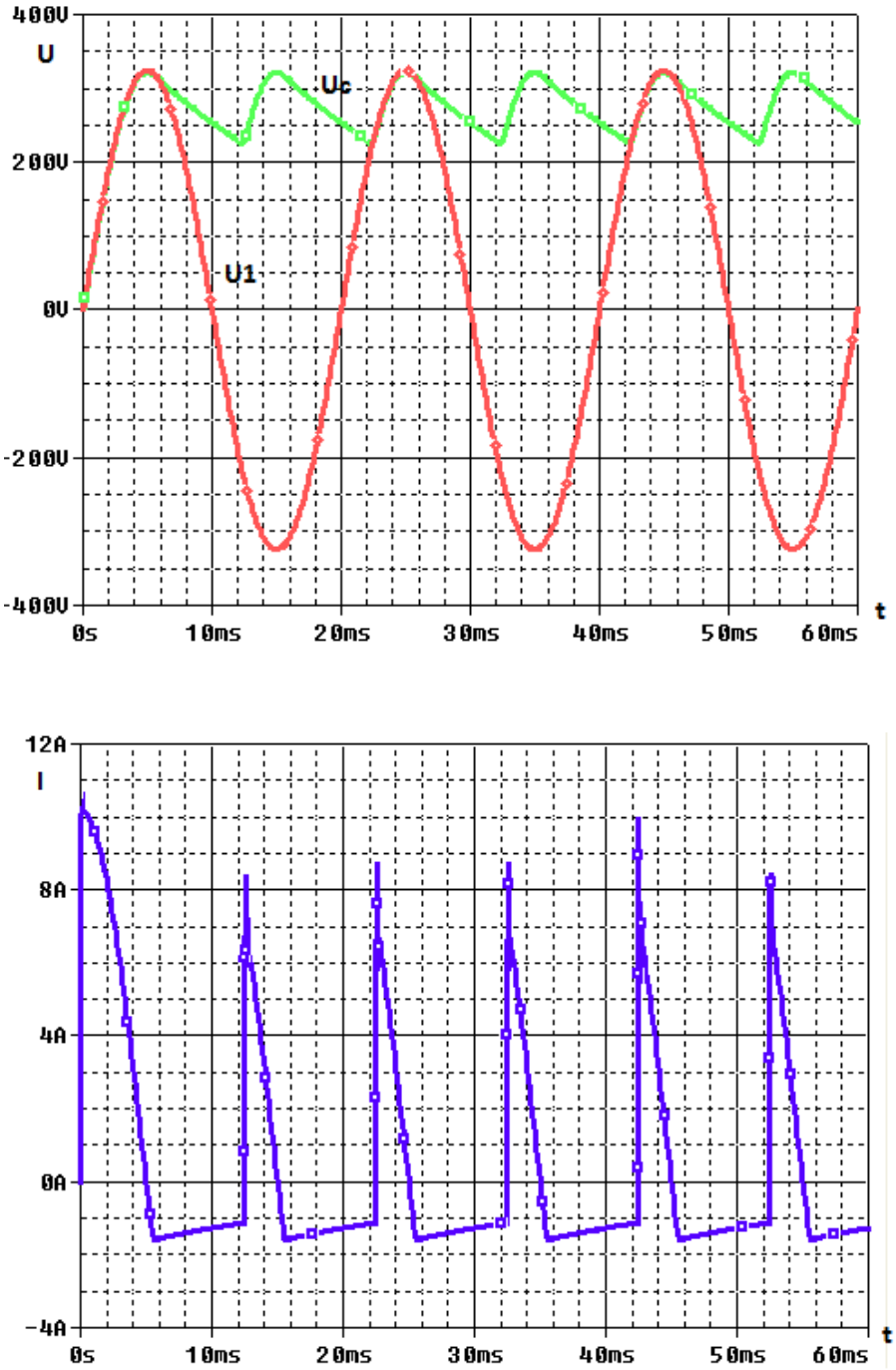
Obr.18 Schéma mostíkového usmerňovača s vyhladzovacím kondenzátorom a záťažou, z ktorého boli získané simulácie časových priebehov napätia a prúdu.

Pri tomto zapojení (obr. 17 *b*) v kladnej pólperióde napätie z transformátoru (ak je teda horná svorka transformátoru kladná) tečie prúd cez diódu *Da* do (nezakreslenej) záťaže, a z nej cez diódu *Db* do spodnej (tu zápornej) svorky transformátoru.

Pri zápornej pólperióde (ak je horná svorka transformátoru záporná) tečie prúd od spodnej (teraz kladnej) svorky transformátoru diódou *Dd* do (nezakreslenej) záťaže a z nej cez diódu *Dc* do hornej (teda teraz zápornej) svorky transformátoru. Transformátorom sa teraz neuzatvára jednosmerná zložka prúdu, teraz je ňou teda prídavne sýtený.

Kmitočet zvlnenia usmerňovaného napätia pri zaťažení je v tomto prípade dvojnásobný, než je kmitočet striedavého usmerneného napätia z transformátoru, pretože maximá impulsov prúdu sa vyskytujú dvakrát za jednu periódu usmerňovaného striedavého napätia, ako plynie z časových priebehov na obrázku nižšie.

V závernom smere sú diódy namáhané iba napätím $U_1 \approx U_c$, teda polovičným, ako v predchádzajúcom prípade.[7]



Obr. 19 Časové priebehy pre mostíkový usmerňovač z programu PSspice. Na prvom obrázku napäťová a na druhom prúdová charakteristika.

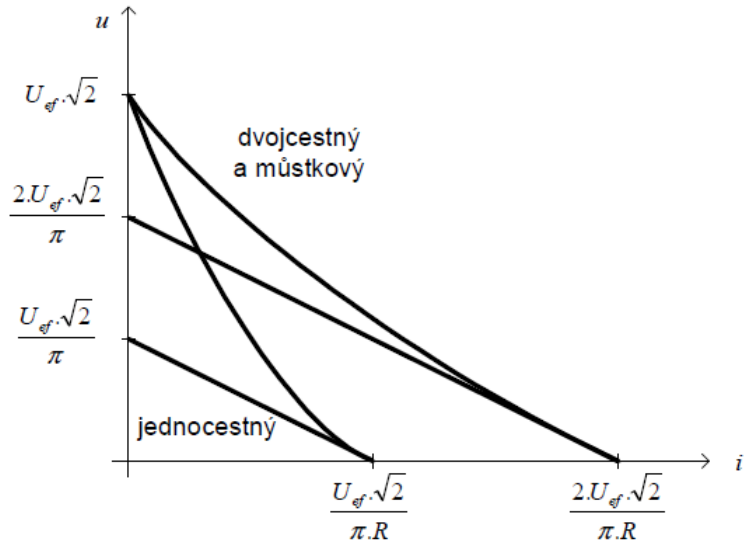
Zaťažovacia charakteristika

Z vypočítaných a odvodených parametrov týchto usmerňovačov môžeme zostrojiť ich zaťažovaciu charakteristiku.

Z obrázku je vidno, že dvojcestný a mostíkový usmerňovač s rezistorovou záťažou poskytujú väčšie napätie než jednocestný .

Najväčšie napätie ale len naprázdno dávajú usmerňovače s filtračným kapacitorom, ale napätí jednocestného usmerňovača v porovnaní s ostatnými rýchlejšie klesá. Je teda jednocestný usmerňovač tzv. mäkší, než dvojcestný alebo mostíkový.

Prúdy nakrátko majú potom usmerňovače dvojcestný aj mostíkový s filtračným kapacitorom aj bez neho rovnaké a väčšie, ako usmerňovač jednocestný s filtračným kapacitorom aj bez neho.[7]



Obr.20 Zaťažovacia charakteristika jednocestných a dvojcestných usmerňovačov pri zaťažení a bez neho[7].

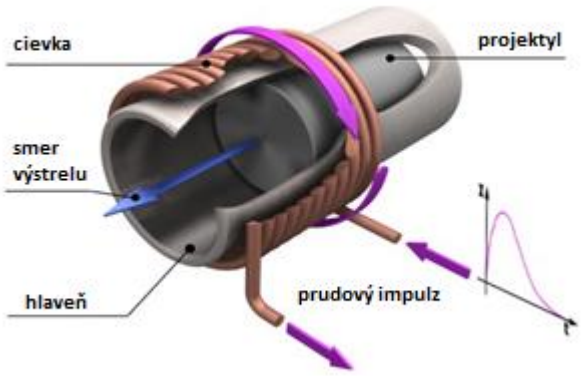
Výhodou dvojcestného zapojenia je väčšia stredná hodnota usmerneného napätia. Konkrétne dvojnásobná, zmenšená o úbytok napätia spôsobený prechodom prúdom *i* cez odpor diódy R_D. Zvlnenie vychádza v porovnaní s jadnocestým usmernení menšie, pretože kapacitor *C* sa do záťaže vybíja kratšiu dobu.[7]

Z týchto dôvodov použijeme dvojcestné zapojenie konkrétne Greatzov mostík.

2 SÚČASTNÝ STAV COIL GUNOV

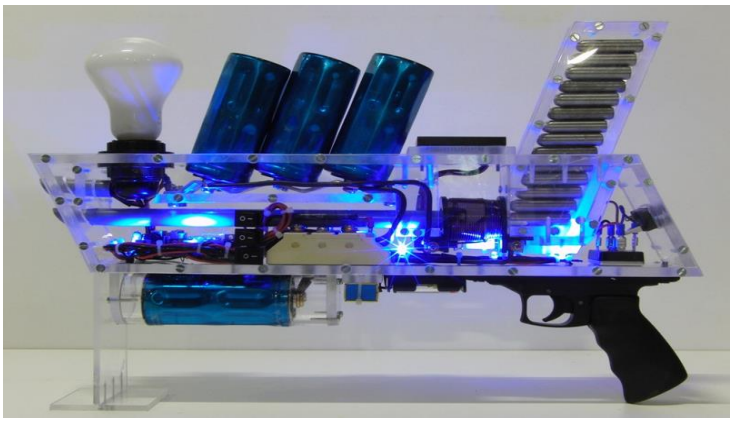
2.1 Coil gun

Ako sa už na začiatku spomenulo jedná sa o zariadenie pracujúce na princípe využitia elektromagnetizmu. Zariadenie pracuje v dynamickom režime, pretože spína veľké prúdy na veľmi krátke časy. Elektrický prúd sa premieňa na mechanickú prácu . Toto zariadenie môžeme považovať za lineárny motor pričom stator tvoria elektromagnety a rotor je tvorený projektilom, ktorý nevykonáva točivý pohyb, ale pohyb sa vykonáva v rovine (urýchľovacej komory) . V jednoduchosti sa jedná o obvod, v ktorom je zdroj energie, ktorého energia sa uvoľní do cievky . Najlepšie je použiť ako zdroj kondenzátor , pretože dokáže odovzdať veľké množstvo energie za krátky čas čiže veľký impulzný prúd, ktorý potrebujeme. Čo sa týka elektrotechnického poňatia ide o obvod RLC, pozostávajúci z kondenzátora, cievky a spínača. Nesmieme zabudnúť na vnútorný odpor týchto prvkov a taktiež celkovú indukčnosť pri zapojení [8].



Obr.21 Zjednodušený princíp funkcie coil gunu [10].

Vývoj coil gunov došiel až tak ďaleko, že existujú prenosné zariadenia s dizajnom klasických strelných zbraní. Na týchto coil gunoch sú rôzne nadštandardné funkcie od automatického nabíjania projektilov až po laserové zameriavanie.



Obr.22 Prenosný coil gun ako pištoľ [2].

2.2 Opis činnosti

Kondenzátor sa nabije na požadované napätie. Potom sa na krátky čas (ms) zopne spínací prvok, a časť energie sa presunie do cievky, kde sa vytvorí silné elektromagnetické pole a to vtiahne magneticky vodivý materiál do vnútra urýchľovacej komory.

Projektil je priťahovaný magnetickou silou k stredu cievky ,kde je najväčšie pôsobenie sily, ako náhle prejde projektil do stredu cievky je potrebné ukončiť prúdový impulz, pretože sila pôsobí na projektil rovnakou silou pozdĺž celej jeho osi. Z tohto dôvodu je dôležité správne načasovanie prúdového impulzu, inak by mohlo nastať spätné brzdenie projektilu prípadné zastavenie. Po tomto prúdovom impulze sa začne energia z cievky vracať spätne do kondenzátora. Toto nastáva ak má obvod RLC malé tlmenie (nemusí to však nastať vždy). Kondenzátor sa začne nabíjať spätnou polaritou čo spôsobuje jeho znehodnoteniu a postupnému poškodeniu.

Energia magnetického poľa cievky je priamo úmerná druhej mocnine prúdu v cievke.

$$W = 0,5 \cdot L \cdot I^2 \tag{19}$$

Čiže nezáleží na smere prúdu a preto bude sila vždy pôsobiť do stredu cievky.

Aby bolo zabránené spätnému prebíjaniu kondenzátorov tak v sérii je nainštalovaná dióda s malým odporom paralelne ku kondenzátoru, ktorá utlmí záporný impulz a premení ho na teplo. Tento typ je na rozdiel od klasického RLC obvodu s konštantnými parametrami analyticky ťažko riešiteľný až neriešiteľný.

Vo chvíli keď projektil získa pohybovú energiu, nie je potrebné aby sa magnetické pole menilo tak rýchlo, pretože k naindukovaniu vírivých prúdov v projektile stačí samotný pohyb projektilu stacionárnym magnetickým poľom vytvoreným cievkou [2].

2.3 Delenie coil gunov

Coil guny môžem z hľadiska prenosnosti rozdeliť do dvoch hlavných skupín na prenosné a neprenosné a z hľadiska počtu cievok (modulov), na jednocievkové a viaccievkové.

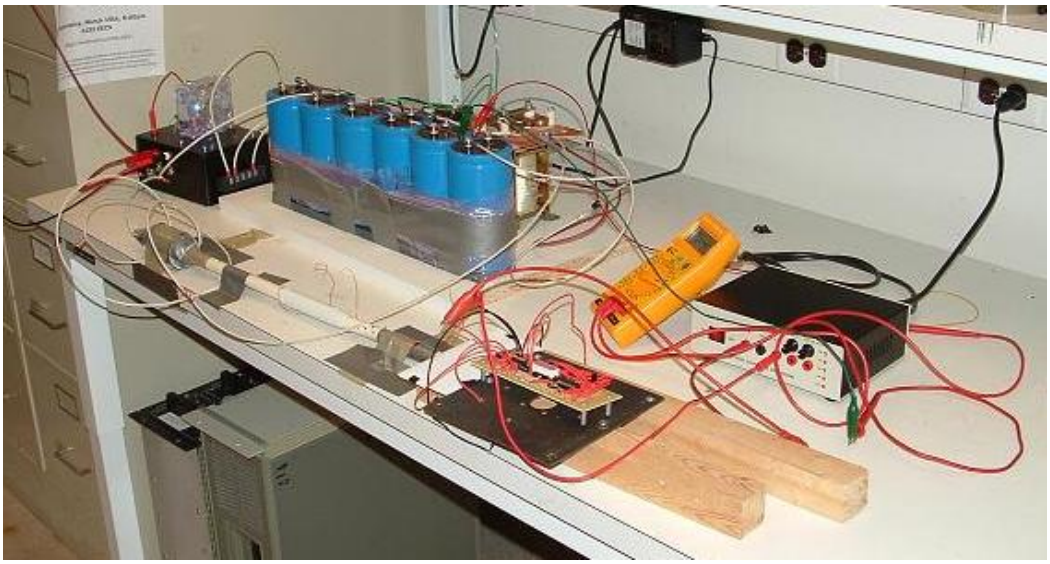
Coil guny – prenostné – jenocievkové
– viaccievkové

– neprenostné – jednocievkové
– viaccievkové

2.3.1 Neprenosné

Jednocievkové

Ako príklad najjednoduchšieho typu coil gunu si uvedieme zaradenie s pracovným názvom **Colin's 2 KJ coilgun**.



Obr. Colin's 2 KJ coilgun[6].

Cievka

Ako najideálnejšia vyšla pre toto zapojenie cievka so štyrmi vrstvami s dĺžkou 7,5 cm a hrúbkou drôtu 1,4 mm. Kôli návrhu a zefektívneniu konečnej podoby cievky bola použitá počítačová simulácia.

Kondenzátorová batéria

Ako už z názvu vyplýva jedna sa o batériu, ktorá poskytne coil gunu výkon 2 KJ s kapacitou 2400 uF. Každý zo šiestich kondenzátorov je dimenzovaný na 450 V DC.

Spúšťací mechanizmus

Vo väčšine zariadení sa používa SCR, alebo silikónové riadené usmerňovače avšak tu je použitý takzvaný stykovač. Stýkače sú elektromechanické relé, ktorých účelom je kontrolovať obrovské množstvo elektriny. Jeden stýkač je určený pre 800 A kontinuálne na 60 VAC , druhý pre 1000 ampér kontinuálne na 60 VAC. Každý stýkač má štyri strieborné kontakty, ktoré sa spoja zakaždým, keď je napätie nad 350 voltov. Nevýhodou použitia stýkačov je čas potrebný na zapnutia kontaktov. 10 milisekúnd je pri zariadení s viacerými stupňami príliš dlhý čas avšak pri jednostupňovom zariadení na tom nezáleží.

Napájanie

Jedným z hlavných kľúčov k úspechu pri konštrukcii coil gunu je ako vyplýva z rovnice pre množstvo uloženej energie v kondenzátoroch

$$E = 0.5 \cdot C \cdot U^2 \tag{20}$$

veľkosť napätia *U*. Ideálnou voľbou sú 450 V DC s prepätím na 525 V DC, pretože kondenzátory s vyšším napätím už nemajú potrebnú kapacitu. Bola namontovaná prepäťová ochrana na 440 V DC.

Na nabíjanie týchto kondenzátorov je použitý vysokonapäťový spínaný zdroj a časovač.

Spínaný napájací zdroj sa skladá z troch hlavných častí: induktor, výkonový tranzistor a časovač. Spínané napájacie zdroje fungujú na princípe využitia cievok, pretože na krátky časový úsek, môže tlmivky vytvoriť napätie, ktoré je väčšie ako pôvodné napätie použité na induktore. ak cez induktor zrazu prestane pretekať prúd, začne sa jeho magnetické pole rúcať. Tento kolaps vytvára náhly a krátky časový úsek, kedy napätie na cievke začne stúpať. Napäťová špica, ktorú induktor vytvára môže byt aj tisíc voltov. Na druhej strane diódy sa nachádza kondenzátor alebo kondenzátorová batéria, v ktorej sa hromadí energia. Dióda prepúšťa napätie z cievky len v tom prípade ak je vyššie ako na kondenzátore. Toto sa opakuje s frekvenciu niekoľko kHz. Za účelom tohto sa v obvode používa časovač s výstupným signálom od 0 do 1, ktorý je privedený na gate výkonového transformátora. Ako ochrana kondenzátorov pred napäťovými špičkami z induktorov sa používa napäťový komparátor, ktorý pri prekročení stanoveného napätia zastaví časovač.

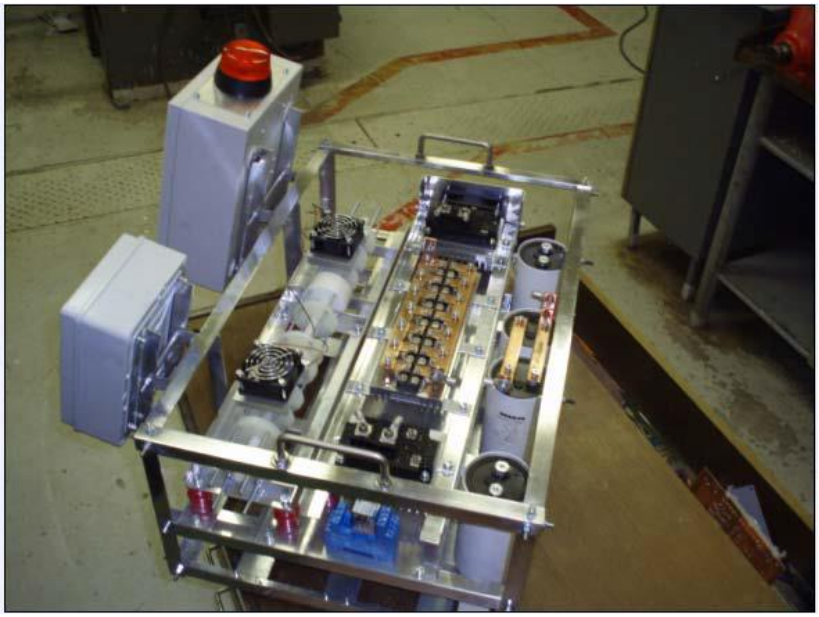
Hlaveň

Je vyrobená z PVC materiálu s vonkajším priemerom 1,73 cm a vnútorným 1,1 cm a dĺžkou cca 0,5 m.

Ako projektil bola použitá skrutka a na ňu našróbované matice s celkovou hmotnosťou 27 g.[6]

Viaccievkové

Ako príklad v nasledujúcej časti sa zameriam na **trojstupňový urýchľovač**. Ako už názov naznačuje, jedná sa o zariadenie s troma cievkami.



Obr.23 Celkový pohľad na viacstupňový neprenosný coil gun [8].

Kondenzátorová batéria

Je základným zdrojom energie pre cievky.

1. Stupeň

U_{max} = 400 V

Kapacita = 4700 uF

ESR = 8 m Ω pri 20 C

Energia kapacitnej jednotky W = 339,34 J

Prevádzková teplota Tmax = +85 C

2. Stupeň

Umax = 400 V

Kapacita = 9400 uF

ESR = 10 m Ω pri 20 C

Energia kapacitnej jednotky W = 678,68 J

Prevádzková teplota Tmax = +85 C

3. Stupeň

Umax = 400 V

Kapacita = 4700 uF

ESR = 8 m Ω pri 20 C

Energia kapacitnej jednotky W = 339,34 J

Prevádzková teplota Tmax = +85 C

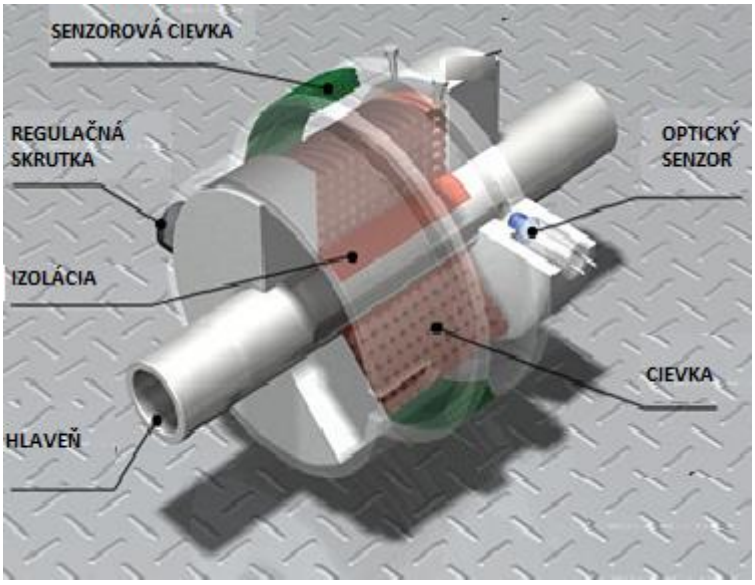
Pri kapacitných jednotkách je veľmi dôležitý vnútorný odpor takzvaný ESR pre danú teplotu . Čím je nižší tým lepšie, pretože na ňom tým pádom vznikajú menšie straty v rámci RLC obvodu sa to týka všetkých prvkov, ktoré majú vnútorný odpor. Kondenzátory, ktoré sú použité v tomto zapojení sú určené na impulznú činnosť jedná sa o elektrolytické kondenzátory, od firmy EVOX RIFA .

Pre ochranu proti záporným špičkám je na kondenzátory inštalovaná sériová kombinácia diódy a odporu paralelne ku kondenzátoru.[8]

Obr.24 Kondenzátory použité v trojstupňovom neprenosnom coil gune [8].

Cievka

Je jednou zo základných častí tohto zariadenia Pri jej navrhovaní bol použitý RLC simulátor. Samotné navíjanie cievky je dosť komplikovaný proces z dôvodu inštalácie senzorov do cievky ako indukčného Halového senzoru a tepelného čidla. Cievky v tomto zariadení sú chladené ventilátormi (každá má vlastný). Je to z dôvodu udržovania konštantnej teploty aby sa nezmenili a zostali zachované parametre cievky a hlavne jej odporu, ktoré by mohli, ak by sa zmenili, zapríčiniť destabilizáciu celého RLC obvodu, skresli údaje no najmä poškodiť polovodičové prvky. Z toho dôvodu sú takto chladené, a to za pomoci PWM regulácie cez procesor, ktorému podáva aktuálne informácie o stave teploty teplotný senzor DS1820 s rozlíšením 0,5 ºC, ideálna teplota cievok je v rozmedzí (23 ºC – 27 ºC).[8]



Obr.25 Podrobný popis cievky a všetkých jej súčastí [8].

Projektil

Najdôležitejšie na projektile je materiál, z ktorého je zostrojený. Dobré je vedieť, že železné jadro zosilní magnetickú indukciu cez ktorú preteká prúd. V tomto prípade bola

použitá na konštrukciu magneticky mäkká oceľ. Povrch projektilu bol upravený teflonovým povlakom.

Tvar je aerodynamický a jeho dĺžka je minimálne taká ako je dĺžka cievky .[8]

Obr.26 Použite projektily [8].

Výkonový spínač

Aby sa dostala energia z kondenzátorov do cievky je za potreby okrem vodičov aj spínací prvok v tomto prípade IGBT tranzistor. . IGBT je hybrid medzi unipolárnym a bipolárnym tranzistorom. Výkonová časť týchto tranzistorov je tvorená bipolárnou časťou pre nízky odpor R_{ce}. Riadiaca časť je tvorená unipolárnou štruktúrou čiže je to ako pri mosfet tranzistore veľký vstupný odpor.

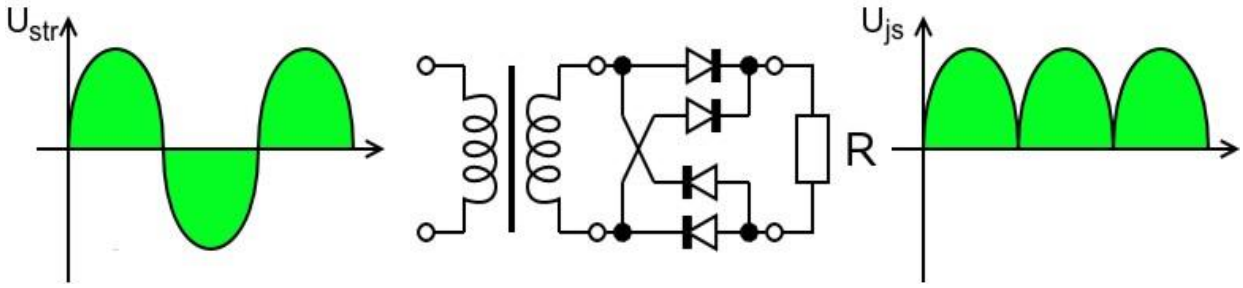
Problém nasáva pri plnom otvorení tranzistoru, keď sa hradlo chová ako kondenzátor a na jeho vybudenie treba do neho dostať prúdový impulz dostatočne veľký aby dokázal úplne otvoriť tranzistor. V našom prípade používame na to driver, ktorý dokáže poskytnúť požadovaný impulz do gatu a otvoriť ho a to tak, že driver má pri sebe kondenzátor približne 1000 uF /25 V a túto energiu presunie do gatu, ktorého hodnota je 60 nF, čo je pomerne veľa s porovnaním s ostanými komerčnými tranzistormi na vybudenie takéhoto hradla treba pomerne veľký špičkový prúd niekoľko ampérov. IGBT moduly, ktoré sú použité v tejto konštrukcii najviac vyhovujú požiadavkám zariadenia. Sú upevnené na chladiče s teplovodnou pastou a ochladzované ventilátorom, k chladičom sú pripojené teplotné senzory na monitorovanie teploty, ktoré zabezpečujú aby teplota neprekročila hodnotu 25ºC. Chladenie je navrhnuté tak aby mohlo fungovať v špičkovom režime 550 A (600 A), 1320A (1400A) bez straty výkonu alebo aby došlo k poruche. Na hradlo je privádzané napätie 18V čo stačí na jeho úplne otvorenie.

IGBT moduly sú použité od výrobcov Mitshubishi a ČKD polovodiče.[8]

Obr.28 Výkonový spínač IGBT [1].

Zdroj

Zariadenie je napájané napätím ~230 V, ktoré je následne usmernené pomocou usmerňovacieho zdroju a vyfiltrované na napätie 325 V. Týmto napätím sa nabíjajú kondenzátory cez ochranné odpory a zároveň cez tieto odpory sa aj vybíjajú. Usmernenie je riešené technológiou Gratezovho usmerňovača.[8]



Obr.29 Schéma a priebehy napätia na Greatzovom usmerňovači[4].

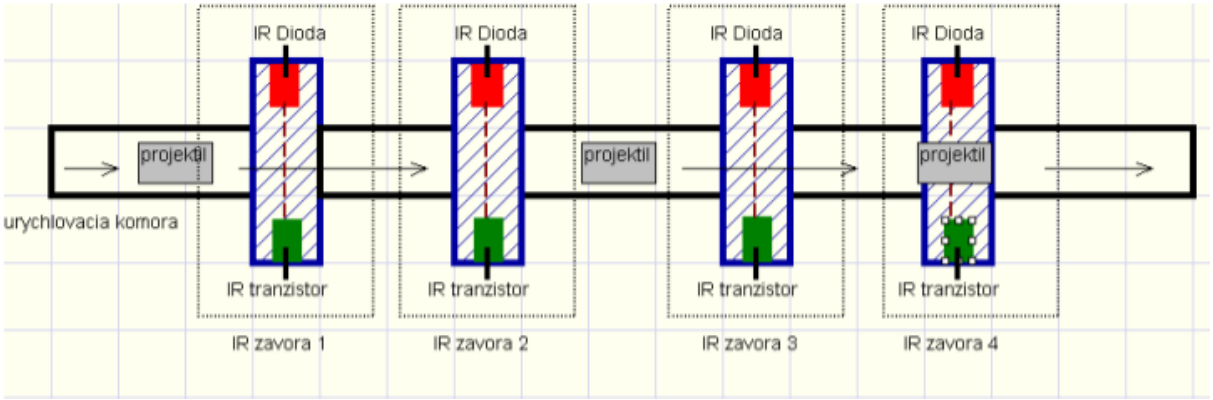
Senzory

Na tomto zariadení sa nachádza niekoľko senzorov, ktoré zabezpečujú jeho správne fungovanie. Nachádza sa tu optický, tepelný, indukčný a Hallov senzor.

Optický senzor je veľmi dôležitý, slúži na výpočet rýchlosti projektilu, na zistenie jeho polohy v komore a s tým spojené správne načasovanie celého systému. Senzory sú štyri a fungujú na princípe IR vysielača a IR prijímača reagujúci na lúč vysielaný z vysielača. Signál smeruje do procesoru.

Teplotný senzor zabezpečuje celkovú teplotnú stálosť cievok a polovodičov. Bol použitý konkrétne typ DS, ktorého tepelná presnosť je 0,5 C. Signál z neho je vedený na spracovanie priamo do mikrokontroléru, kde je spracovaný a vyhodnotený.

Dvojica indukčný a Hallov senzor poskytujú informácie o polohe projektilu a o veľkosti magnetického poľa. Informácie sa spracovávajú v procesore, ale ešte predtým sú prevedené z analógovej formy do digitálnej pomocou A/D prevodníka .[8]



Obr.30 Schéma umiestnenia senzorov na hlavni coil gunu [8].

Prúdový prevodník

Pre správnu funkciu zariadenia bolo potrebné merať veľkosť prúdových impulzov. To zabezpečuje bočník, ktorom pomocou odporu môžeme zmerať napätie. Zjednodušene ide o meranie úbytku napätia. Toto napätie je následne posielané do 10 bitového prevodníka a odtiaľ do mikrokontroléra. [8]

Procesor

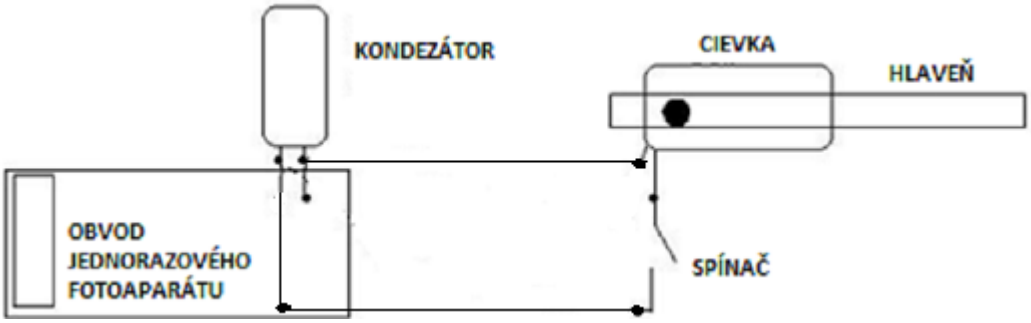
Ovládane zariadenia zabezpečuje mikrokontrolér ATmega32, ktorý riadi správne načasovanie IGBT modulov, nabíjanie a vybíjanie kondenzátorovej batérie a taktiež komunikuje so senzormi. Získané údaje zo senzorov sú cez sériovú linku zasielané do počítača, kde sa graficky spracúvajú a zaznamenávajú. Okrem riadenia cez počítač sad a zariadenie ovládať aj pomocou riadiaceho panelu uchytenom na ráme konštrukcie.[8]

Obr.31 Mikrokontrolér ATmega32[8].

2.3.2 Prenosné

Jednocievkové

Najjednoduchší typ prenosného coil gunu sa dá zostrojiť zo starého fotoaparátu na jednou použitie. V jednoduchosti ide o pripojenie cievky na kontakty demontovaného blesku.



Obr.32 Nákres zapojenia prenosného jednocievkového coil gunu vyrobeného zo súčiastok fotoaparátu.

Ako je vidno z obrázka systém pozostáva z obvodu pre blesk fotoaparátu, pôvodného 300 V kondenzátora z fotoaparátu, z medenej cievky navinutej na umelohmotnej hlavni, vodičov a jednoduchého spínača. Ako spínač môže byť použitá aj spúšť fotoaparátu.

Cievka

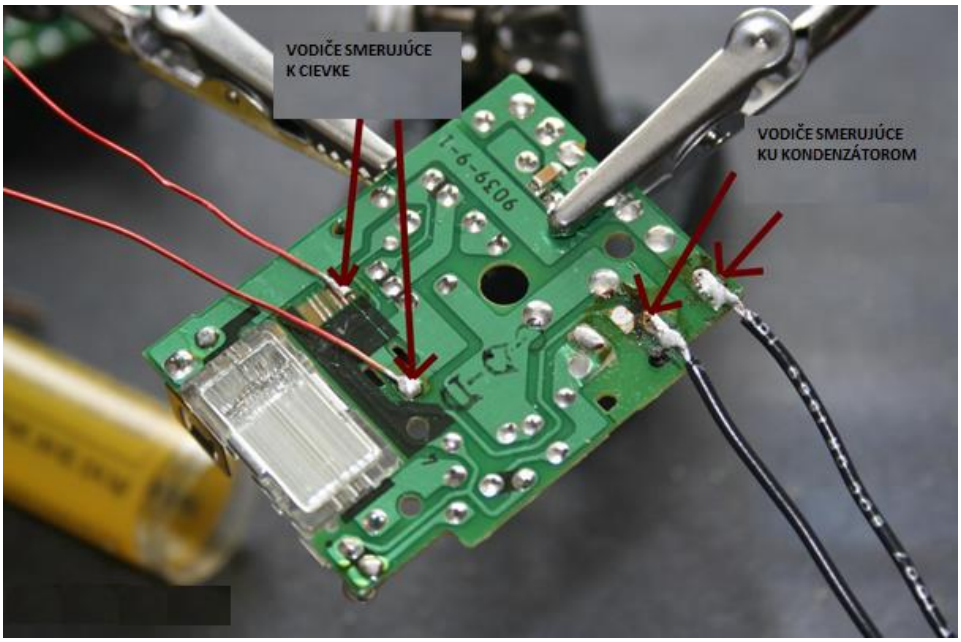
Je vyrobená z polakovaného medeného drôtu o priemere 0,75 mm a dĺžky 12,2 m. Jej rozmery sú 45 mm na dĺžku a 25 mm priemer. Cievka je navinutá na umelohmotnej hlavni o priemere 4 mm .

Zapojenie

Jeden vodič z cievky je privedený na záporný pól veľkého kondenzátora. Druhý koniec cievky je spojený s mikrospínačom, ktorý ma funkciu spínača. Druhý koniec spínača je pripojený na kladný pól kondenzátora. Namiesto pripojenia vodičov z cievky a spínača na kondenzátor sa dá použiť aj zapojenie na kontakty blesku.

Prevádzka

Toto zariadenie strieľa malé guličky alebo klinčeky. Ako zdroj je použitá AA batéria s fotoaparátu a nabitie kondenzátora na požadovanú úroveň (300 V) trvá cca 20 s. efektný dostrel je približne 5 m. [9]

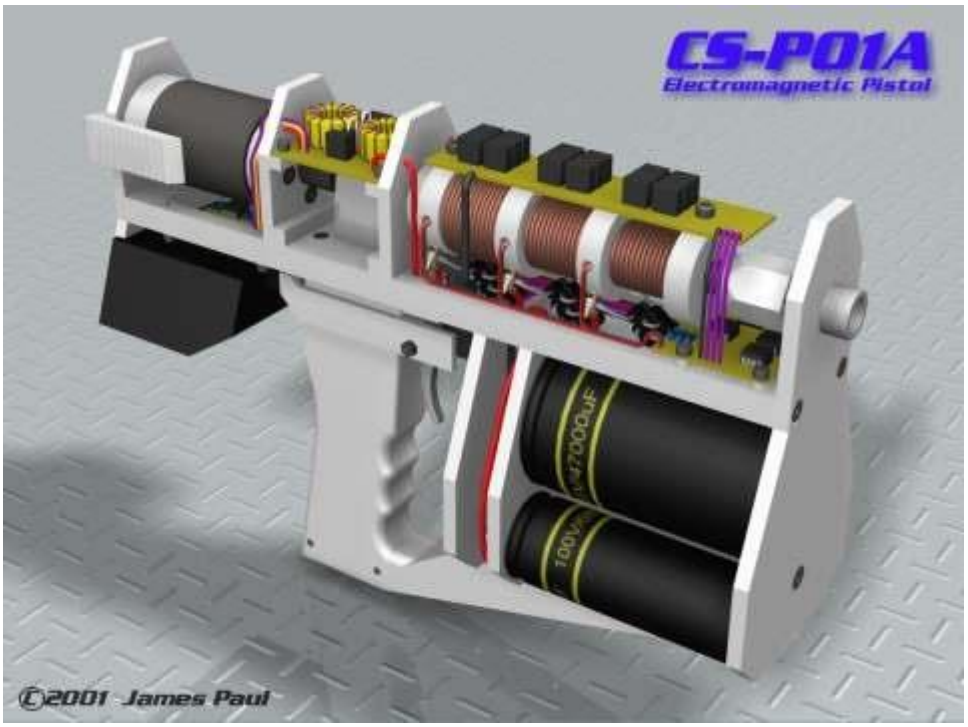


Obr.33 Obvodová doska jednorazového fotoaparátu a na nej vyznačené miesta pre pripojenie cievky a kondenzátorov[6].

Viacclevkové

Spomedzi viacclevkových coil gunov je v pomere výkon a náročnosť konštrukcie (hlavne načasovanie) najvýhodnejšie riešenie s troma clevkami.

Ako príklad trojstupňového prenosného coil gunu, pištole mi poslúži zariadenie s označením **CS-P01A**.



Obr.34 Elektromagnetická pištoľ CS-P01A bez vrchného krytu [2].

Základne parametre - ústňová energia- 2J

- počet stupňov- 3
- spúšťacia metóda- optické čidlo
- kapacita batérie- 90 výstrelov
- maximálna rýchlosť projektilu- 3,03 m/s
- účinnosť- 4,7%

Najdôležitejší aspekt pri konštrukcií pištoli je limitovanosť rozmermi a váhou pištole a preto musí byť veľkosť jednotlivých súčiastok a častí čo najmenšia.

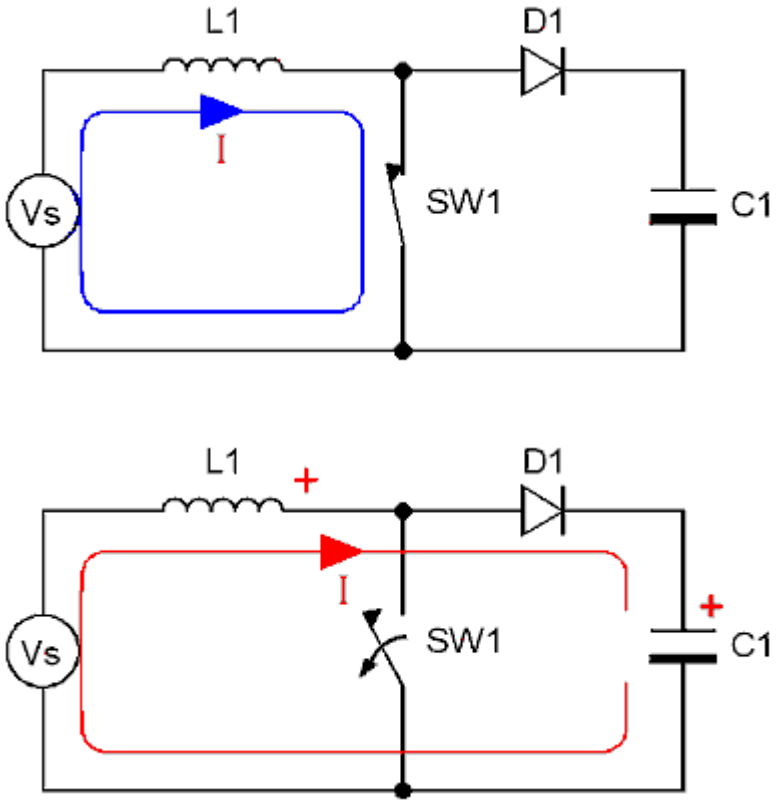
Kapacitná časť

Kondenzátorová batéria sa skladá z troch kondenzátorov, každý pre jeden stupeň. Kondenzátor na 1. stupni musím produkovať dlhší impulz ako kondenzátory na 2. a 3. stupni, to znamená, že musí mať väčšiu kapacitu ako 2. a 3. kondenzátor. Ich hodnoty sú 100V/ 22000uF pre prvý stupeň a 100V / 4700uF pre druhý a tretí stupeň .[2]

Obr.35 Kondenzátory použité pri konštrukcii pištole CS-P01A[4].

Menič napätia

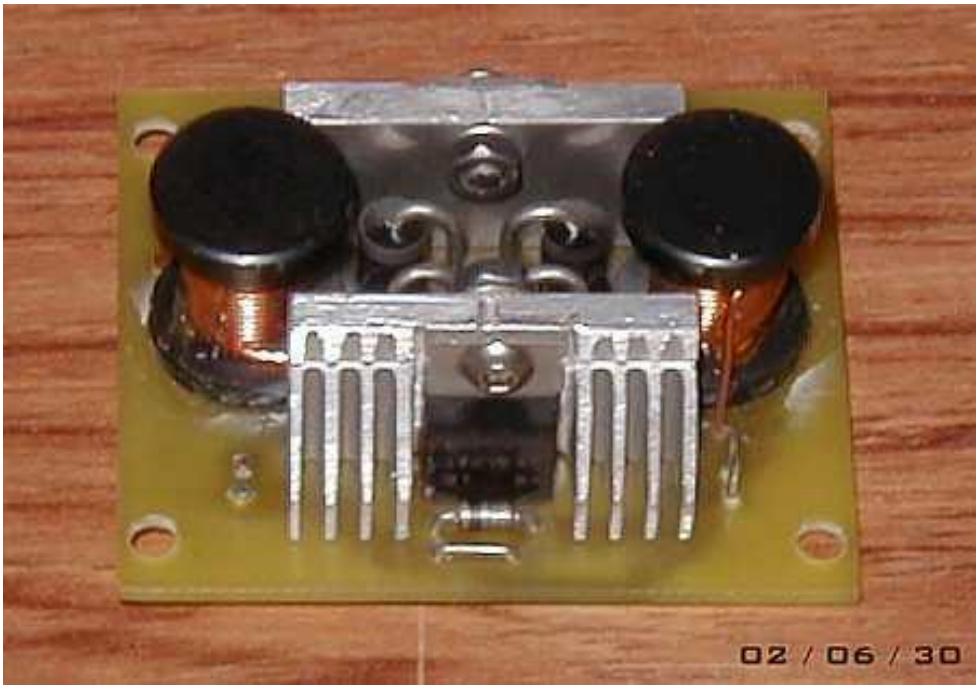
Na získanie vysokého napätia z nízkeho je použitý zosilňujúci prevodník. Funguje na princípe využitia induktora, spínacieho zariadenia a výstupnej diódy na generovanie prúdových impulzov na zvýšenie napätia.



Obr. 36 Princíp fungovania prevodníka pri zapnutom a vypnutom spínači[2].

Princíp funkcie obvodu

Pri vypnutom spínači je napätie uložené v induktore a narastá jeho hodnota. Nazýva sa to úložisková fáza. Na krátky časový úsek je prepínač pomocou oscilátora otvorený, čo spôsobí, že napätie na spínači sa zvýšiť. Spínač otvorí okruh, napätie stále stúpa a prúd je riadený cez výstupnú diódu. Prúd je riadený prostredníctvom diódy kým energia z induktora nie je vyčerpaná, to sa nazýva fáze dodávky. Vzhľadom k tomu, je možné použiť na nabíjanie vysokonapäťových kondenzátorov zdroj nízkeho napätia z batérie. Pracovná frekvencia tohto typu zariadenia je medzi 50-250 kHz, takže dióda a prepínač musí byť schopný rýchle a efektívne reagovať na zmeny polohy spínača. Štandardná usmerňovacia dióda a bipolárny tranzistor sú ideálne komponenty pri tomto type zapojenia. Veľkosť prevodníka a uloženie súčiastok na doske plošných spojov je tiež limitovaná miestom. Celý prevodník má rozmery len 55 mm x 48 mm. [2]



Obr.37 Súčiastky prevodníka osadené na doske plošných spojov[4].

Konštrukcia hlavne a cievok

V oceľovej hlavni o priemere 7 mm sú vyvŕtané otvory na optické senzory. Medzi cievkami sú nainštalované stabilizačné prstence, v ktorých sú nainštalované čidlá. Cievky sú navinuté z 1,5mm hrubého poakrylovaného medeného drôtu. Cievka na prvom stupni má 8 vrstiev druhá 6 a tretia 4 vrstvy.

Obr.38 Cievky namontované na hlavni, medzi nimi stabilizačné prstence s otvormi pre čidlá[2].

Zdroj

Ako zdroj napájanie pre kondenzátorovú batériu je použitá 15 článková litiovo-olovená batéria (32 V).

Konštrukcia tela a parametre

Telo pištole je vyfrézované z hliníka, do ktorého sú osadené jednotlivé časti: hlaveň s cievkami, kondenzátorová batéria, prevodník napätia, programovateľný čip a zásobník. Celková hmotnosť pištole sú 3 kg. Maximálna rýchlosť vystrelených železných projektilov je 3,03 m/s pri celkovej účinnosti zariadenia 4,7 %. [2]

2.4 Využitie

Coil guny zatiaľ nenašli uplatnenie do dnešnej doby. V súčasnosti sú využívané len na zábavu. Nadšenci si na turnajoch môžu otestovať schopnosti svojich zbraní a porovnať sa s konkurenciou .

V armádnom priemysle však prebieha už niekoľko desaťročí výskum na zdokonalení a vytvorení zbrane fungujúcej na podobnom princípe. Výhodou je veľká rýchlosť projektilu, ktorá sa dá dosiahnuť, absencia strelného prachu a nízka hlučnosť. Nevýhodou je avšak dĺžka času , ktorý prejde kým je delo schopné opätovného výstrelu a energetická náročnosť celého systému.

V budúcnosti sa táto technológia môže používať v kozmickom priemysle na vystreľovanie vesmírnych zariadení do vesmíru. Táto technológia asi nebude na Zemi nikdy použitá. Hlavnou príčinou je veľký rozmer trubice, v ktorej by bola loď urýchľovaná k únikovej rýchlosti. Trubica by navyše musela byť pravdepodobne aj vyplnená vákuom, kôli zníženiu odporu vzduchu na minimum. Je však veľmi pravdepodobné, že táto technológia bude v budúcnosti úspešným a veľmi lacným spôsobom dopravy nákladného materiálu z nízkogravitačných vesmírnych objektov (Mesiac). [10]

3 RELIZÁCIA VLASTNÉHO COIL GUNU

3.1 Návrh konštrukcie

Napájanie

Magnetické delo je napájane napätím zo siete 230 V striedavo. Následne je toto striedavé napätie pomocou mostíkového usmerňovača menené na jednosmerné:

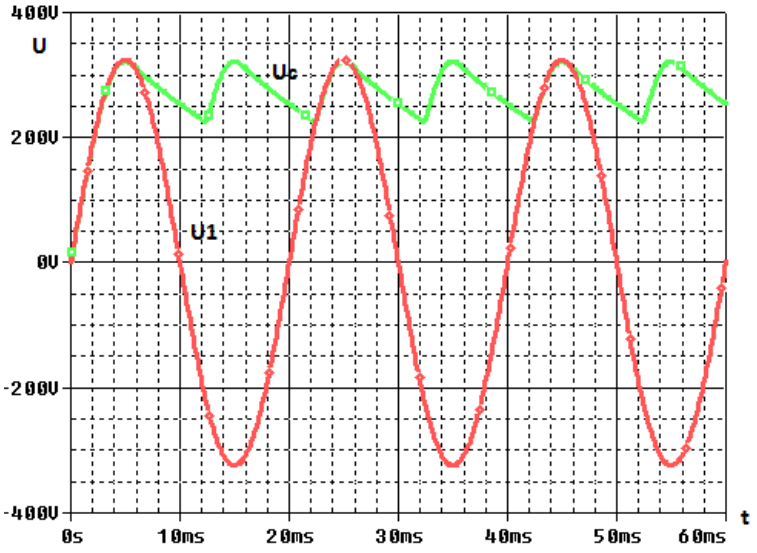
$$U_c = 230 \cdot \sqrt{2} = 325V \tag{21}$$

Obr.39 Mostíkový usmerňovač[2].

Z tejto hodnoty vypočítame špičkový prúd, ktorý budem mať na vrchole impulzu hodnotu:

$$I_p = U \cdot \sqrt{\frac{L}{C}} = 325 \cdot \sqrt{\frac{1,09}{1,36}} = 294,9A \tag{22}$$

Túto hodnotu sme schopný dosiahnuť pri ideálnom návrhu parametrov ostatných súčiastok, o čo sa budeme snažiť pri simulácii RLC obvodu v programe PSpice.



Obr.40 Priebeh napätia na mostíkovom usmerňovači (zelený priebeh).

Kondenzátorová batéria

Pre naše potreby sú najvhodnejšie kondenzátory s čo najväčšou kapacitou a veľmi veľkou rýchlosťou vybitia. Tie sú však málo dostupné a finančne nedostupné pre náš projekt, tak sme si zvolili rýchlo vybíjateľné kondenzátory s menšou kapacitou.

Rýchlosť vybitia kondenzátorov je pre nás kľúčová. Na cievke potrebujeme dosiahnuť kladnú špičku prúdového impulzu kým bude projektil ešte v jej vnútri. Ideálne by bolo aby pri pôsobení záporného prúdového pulzu bol náboj vo vzdialenosti od cievky, kde by už naň nemal vplyv a nebrzdil ho. To je však veľmi náročné na načasovanie a v našich podmienkach aj veľmi ťažko realizovateľné.

Kondenzátorová batéria sa skladá z dvoch kondenzátorov o kapacite 680 uF a jej celková kapacita je 1,36 mF. Tieto kondenzátory sme zvolili pre ich rýchlosť pri vybíjaní a pre ľahkú dostupnosť z laboratórií UTEE. Sú to elektrolytické kondenzátory a vyrobila ich firma Hitano.

$$C = 680uF + 680uF = 1,36mF \tag{23}$$

Pomocou tejto kapacity dokážeme dostať z batérie energiu o hodnote 71,8J.

$$W = \frac{1}{2} C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,36 \cdot 10^{-3} \cdot 325^2 = 71,8J \tag{24}$$

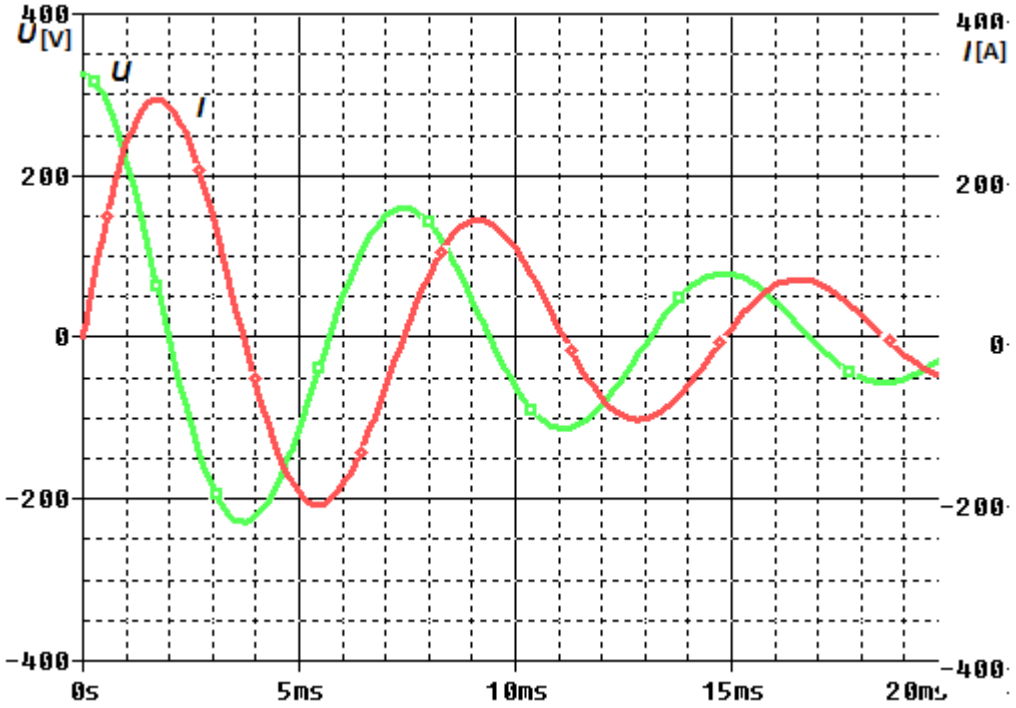
Obr.41 Kondenzátorová batéria.

Cievka

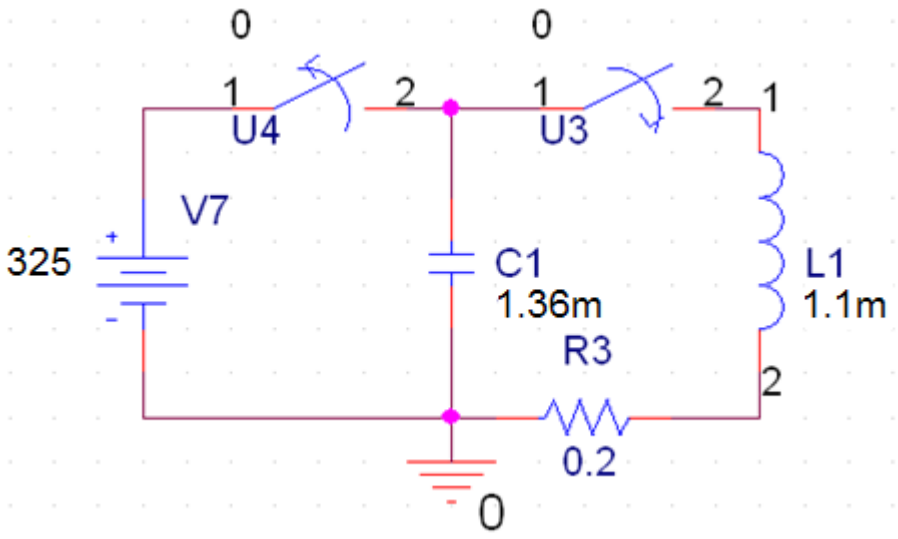
Pri návrhu cievky sme si pomohli programom PSpice. Na začiatku potrebujeme vedieť hodnoty troch základných parametrov, ktorými sú: napätie, ktorým budeme obvod napájať, kapacita kondenzátorovej batérie a poslednou je dĺžka polovice prúdovej periódy. Prvé dve hodnoty sme už vypočítali takže nám ostáva už len čas. Ten sa však nedá vypočítať podľa vzorca, musí sa stanoviť odhadom. Po preštudovaní niekoľkých návrhov podobných konštrukcii coil gunov sme na základe získaných informácii zvolili hodnotu 4 ms.[11]

V simulácii sme sa teda snažili nájsť pomocou ideálnej kombinácie hodnôt odporu

a indukčnosti cievky maximálne napäťové a prúdové špičky a zároveň o dosiahnutie dĺžky trvania prúdovej pól periódy 4 ms. Simulácia je citlivá aj na malé zmeny hodnôt parametrov. Z tohto dôvodu sa nám podarilo dosiahnuť (pri maximálnych napäťových a prúdových špičkách) hodnoty trvania prúdovej pól periódy 3,6 ms a nie ideálnych 4 ms. Tým sme sa snažili o maximalizovanie účinnosti energie, ktorú sme z kondenzátorovej batérie schopný dostať.



Obr.42 Simulácia priebehu napätia a prúdu na cievke z RLC simulácie pri vybití kondenzátorovej batérie.



Obr. 43 Schéma RLC obvodu zo simulácie.

Zo simulácie nám pri maximálnych prúdových a napäťových špičkách a vopred

vypočítaných hodnotách kapacity batérie, hodnoty napájania a dĺžky trvania kladného impulzu vyšla optimálna hodnota indukčnosti pre cievku 1,10 mH a hodnoty odporu 0,20 ohm.

Teoretické predpoklady sme overili aj prakticky. Po skonštruovaní sme zmerali maximálnu ústňovú rýchlosť a na základe dĺžky hlavne sme vypočítali čas za ktorý sa projektil dostane za polovicu cievky. Tento čas vyšiel 4,2 ms, čo oproti teoretickej hodnote 3,6 ms stanovenej zo simulácie nie je veľký rozdiel. Ten rozdiel medzi teoretickou a reálnou hodnotou mohol byť spôsobený vonkajšími vplyvmi: trením náboja v hlavni, odporom vzduchu, ale aj rozdielom medzi ideálnou a reálnou cievkou. Výsledok mohol byť presnejší ak by sme do výpočtu zahrnuli aj tieto faktory.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{0,055}{13,3} = 4,2ms \tag{25}$$

Za *s* je dosadená polovica dĺžky cievky 55 mm a za *v* maximálna ústňová rýchlosť projektilu 13,3 m/s. Táto rýchlosť bola dosiahnutá pri testovaní coil gunu v experimentálnej časti.

Návrh rozmerov cievky na základe jej indukčnosti

Pri návrhu rozmerov cievky sme si pre maximálnu efektívnosť pomohli programom pre návrh cievok [12]. Ako vstupné parametre sme použili indukčnosť cievky 1,1 mH a priemer drôtu z ktorého bude cievka namotaná 0,77 mm. Tieto vstupné hodnoty si program prispôsobil na 1,052 mH respektíve 0,80 mm. Tieto malé odchýlky nemajú zásadný vplyv na vlastnosti hotovej cievky. Na namotanie cievky sme použili medený lakovaný drôt. Z dôvodu výmeny hlavní, za účelom experimentu s ideálnym materiálom hlavne, bola cievka namotaná na rúrku do ktorej rozmerovo tieto hlavne pasujú.

Na výpočet rozmerov cievky program pracuje so vzorcom:

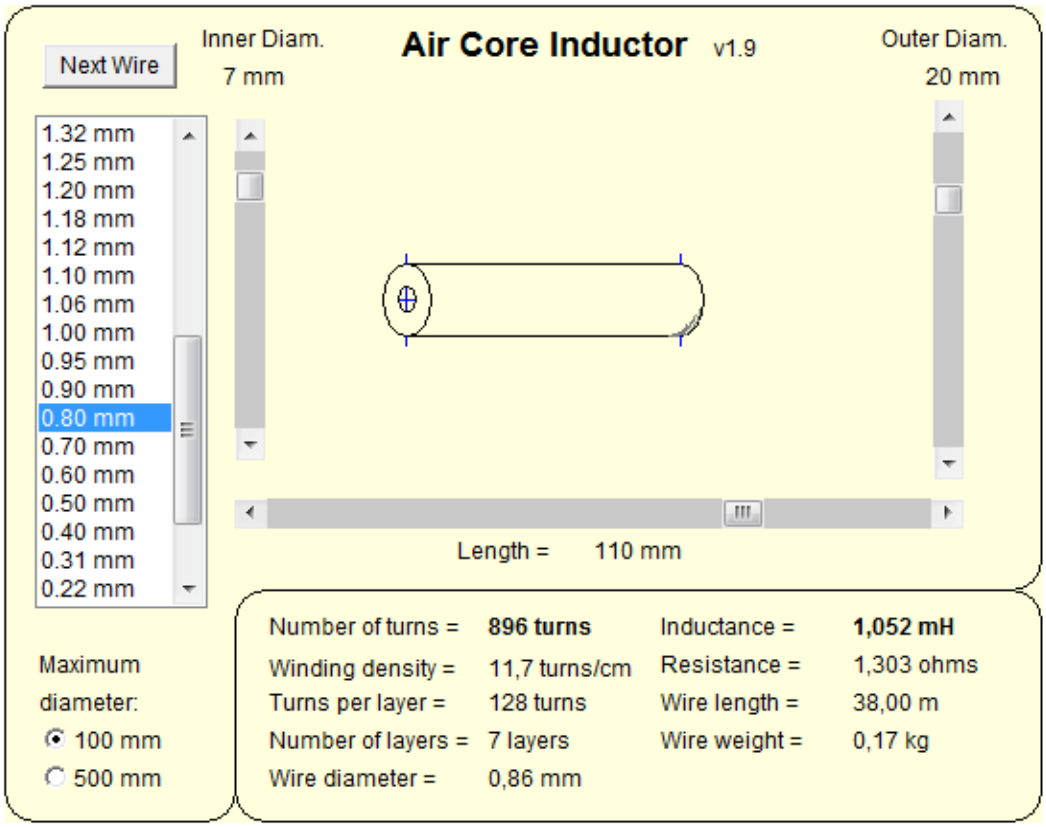
$$L = \frac{0,8(NA)^2}{6A + 9B + 10C} \tag{26}$$

N- počet závitov, *A*- polomer cievky, *B*- dĺžka cievky, *C*- hrúbka cievky

Výpočet prúdovej hustoty:

$$J = \frac{I}{S} = \frac{285}{3,14 \cdot 0,77^2} = 153A / mm^2 \tag{27}$$

Udáva množstvo prúdu, ktorý prejde prierezom vodiča kolmým na smer prúdu. Čím má vodič väčší priemer, tým menší odpor a tým sa menej zahrieva. V krajnom prípade môže dôjsť k pretrhnutiu alebo deformácii vodiča. Obecne prístupné hodnoty sú okolo 3A/mm^2, čo naša hodnota mnoho krát prekračuje, avšak špičková hodnota bude cievkou pretekať veľmi krátku dobu, za ktorú sa vodič nestihne poškodiť. Preto je drôt o priemere 0,77 mm vyhovujúci.



Obr.44 Návrh rozmerov cievky na základe jej indukčnosti[10].

Výsledné rozmery cievky sú nasledovné:

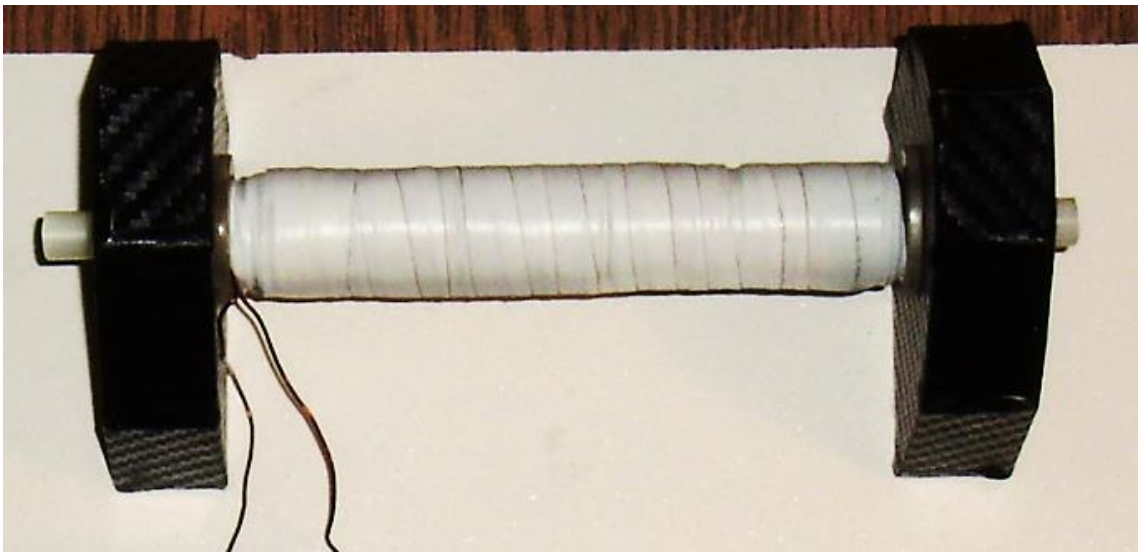
dĺžka - 110 mm
priemer - 20 mm
počet závitov - 896
počet vrstiev - 7

Energia, ktorú teoreticky môžeme z cievky dostať je 46,6 J.

$$W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot 1{,}1 \cdot 10^{-3} \cdot 293^2 = 46{,}6 J \tag{27}$$

Teoretický odpor má hodnotu 1,32 ohm, čo sa avšak dosť líši od reálne nameranej hodnoty 1,717 ohm. Táto odchýlka bola spôsobená menšími nepresnosťami pri navíjaní alebo kvalitou medeného drôtu.

$$R_i = \zeta \frac{l}{S} = 1{,}75 \frac{38}{50{,}024} = 1{,}32 \Omega \tag{28}$$



Obr.45 Navinutá cievka upevnená v stojanoch.

Spínač

Aby sa dostala energia z kondenzátorovej batérie do cievky, je potrebne okrem vodičov aj spínací prvok, v tomto prípade IGBT tranzistor. IGBT je hybrid medzi unipolárnym a bipolárnym tranzistorom. Jeho výkonová časť je tvorená bipolárnou častou pre nízky odpor R_{ce}. Riadiaca časť je tvorená unipolárnou štruktúrou takže ma veľký vstupný odpor. Oproti tyristoru má menší odpor v zopnutom stave a jeho výhodou je tiež rýchlosť zopnutia v rádoch desatín μs.

Treba mat na pamäti, že v spínacom režime sa hradlo chova ako kondenzátor, a na jeho plné otvorenie je treba do neho dostať prúdový impulz. V našom prípade budeme používať obyčajnú 9 V batériu.

Obr.46 IGBT tranzistor IGBT P74[10].

Hlaveň

Cievka je navinutá na rúrke o priemere 7 mm. Na výber sme mail z materiálov karbón, pvc a mosadz. Pri meraniach zistím, ktorý z týchto materiálov je najvhodnejší pre moje použitie. Podľa niektorých teórií by indukcia vírivých prúdov mohla zväčšiť účinnosť a projektil by mohol dosiahnuť vyššiu rýchlosť pri materiáloch, ktoré sú vodivé- karbón, mosadz. Teóriu overím meraním.

Obr.47 mosadzná a pvc hlaveň

Projektily

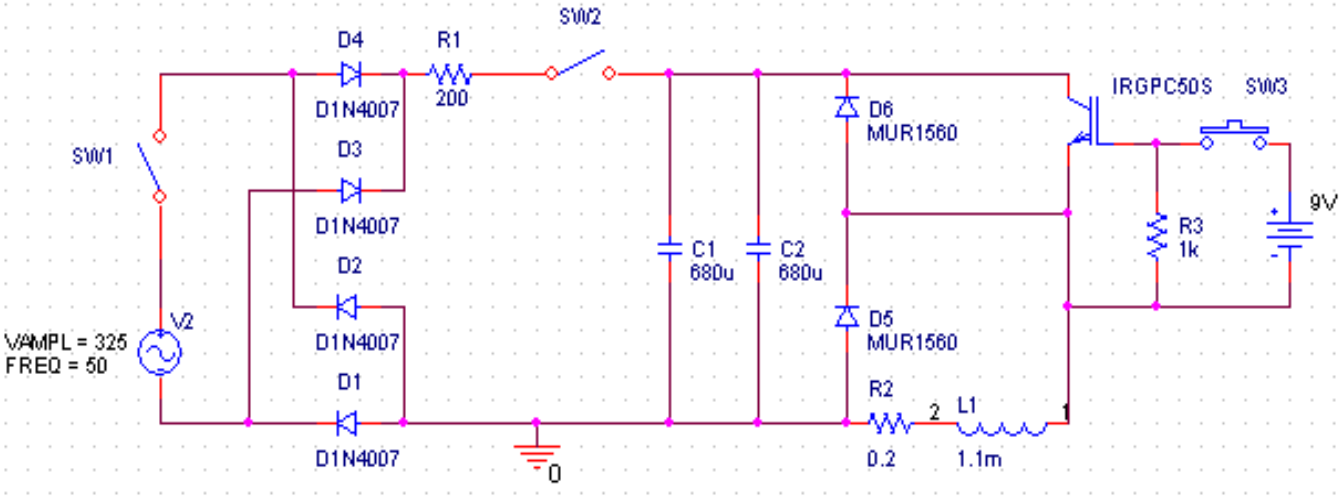
Ako náboje na strieľanie som použil klince. Tie sa od seba líšili či už rozmermi, alebo materiálom z ktorého boli vyrobené. Použil som náboje z ocele, mede a mosadze veľkosti od 12,8 - 6 cm.

Podľa predpokladov by mali mať najväčšiu účinnosť náboje zo železa, pretože sú z magneticky mäkkej ocele a tá zosilní magnetickú indukciu, ktorá bude nimi prechádzať.

Pri meraní sa pokúsim nájsť optimálny materiál, dĺžku náboja a jeho optimálnu polohu.

Obr.48 Projektily použité pri experimentoch.

Schematický nákres obvodu



Zoznam súčiastok

C1,C2 – 680 mF/400 V kondenzátor

D1,D2,D3,D4,D5,D6 – diódy

L1 -1,1mH navinutá cievka

R1 – odpor 200 ohm/5 W

R2 – odpor 0,2 ohm/5 W

R3 – odpor 1000 ohm/0,6 W

9V –batéria so ss 9 V

IRGPC50S- tranzistor

SW1 – vypínač siete

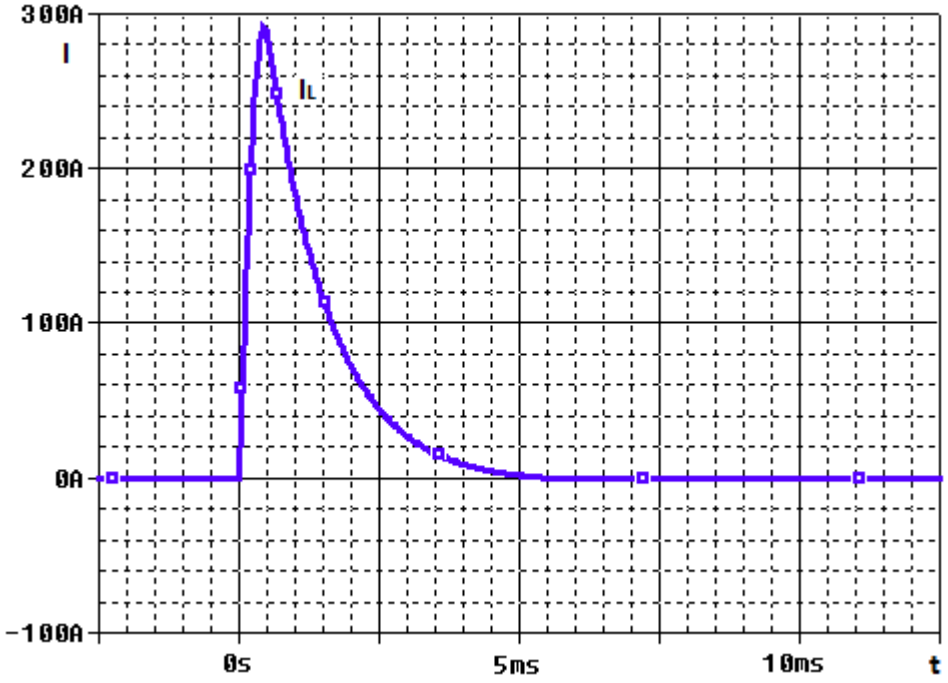
SW2 – vypínač kondenzátory

SW3 – tlačítko (spúšť)

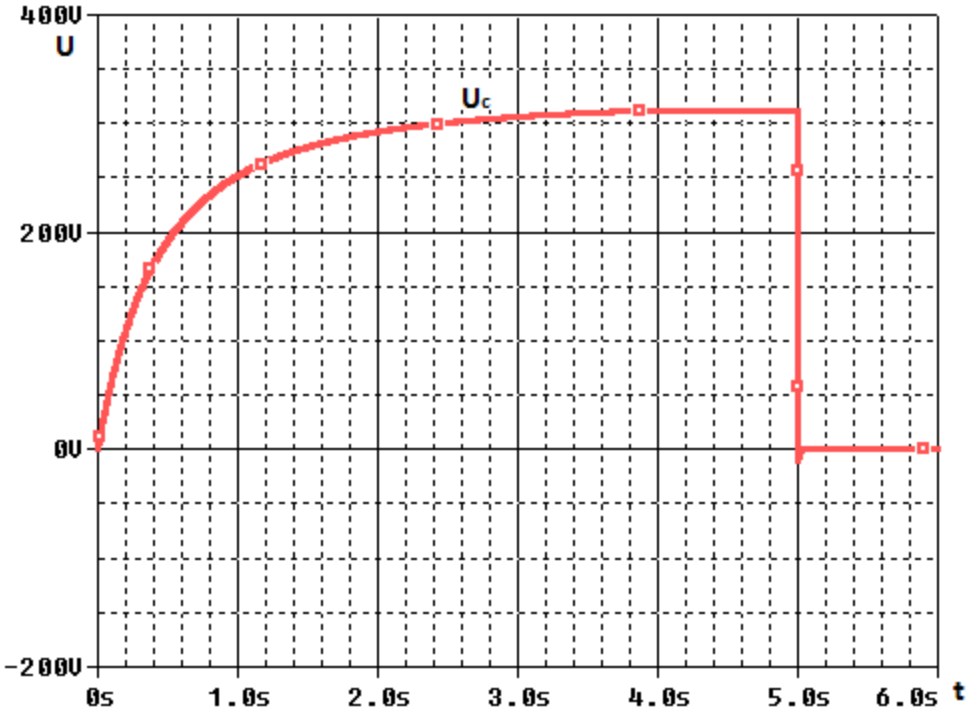
V2 – napájanie zo siete 230 V

Obvod je napájaný striedavým napätím zo siete, ktoré je menené na jednosmerné napätie pomocou mostíkového usmerňovača. Ten sa skladá z kombinácie štyroch diód D_1-D_4 a odporu R_1 Po usmernení napätie putuje do kondenzátorovej batérie zloženej z kondenzátorov C_1 a C_2. Odpaľovací mechanizmus sa skladá zo spínača, odporu R_3 a 9 V batérie, ktorá slúži na otvorenie IGBT tranzistora a uvoľnenie energie z kondenzátorovej batérie do cievky L_1, odkiaľ následne vyletí projektil. Odpor R_2 plní funkciu vyváženia RLC obvodu a dosiahnutie optimálnej dĺžky kladného prúdového impulzu. Ako ochranu IGBT spínača a kondenzátorovej batérie pred zápornými prúdovými špičkami, ktoré vznikajú kmitaním rezonančného obvodu je použitá kombinácia diód D_5,D_6 a odporu R_3. Táto ochrana premení nežiaducu energiu na teplo a chránia IGBT spínač pred prerážaním a kondenzátorovú

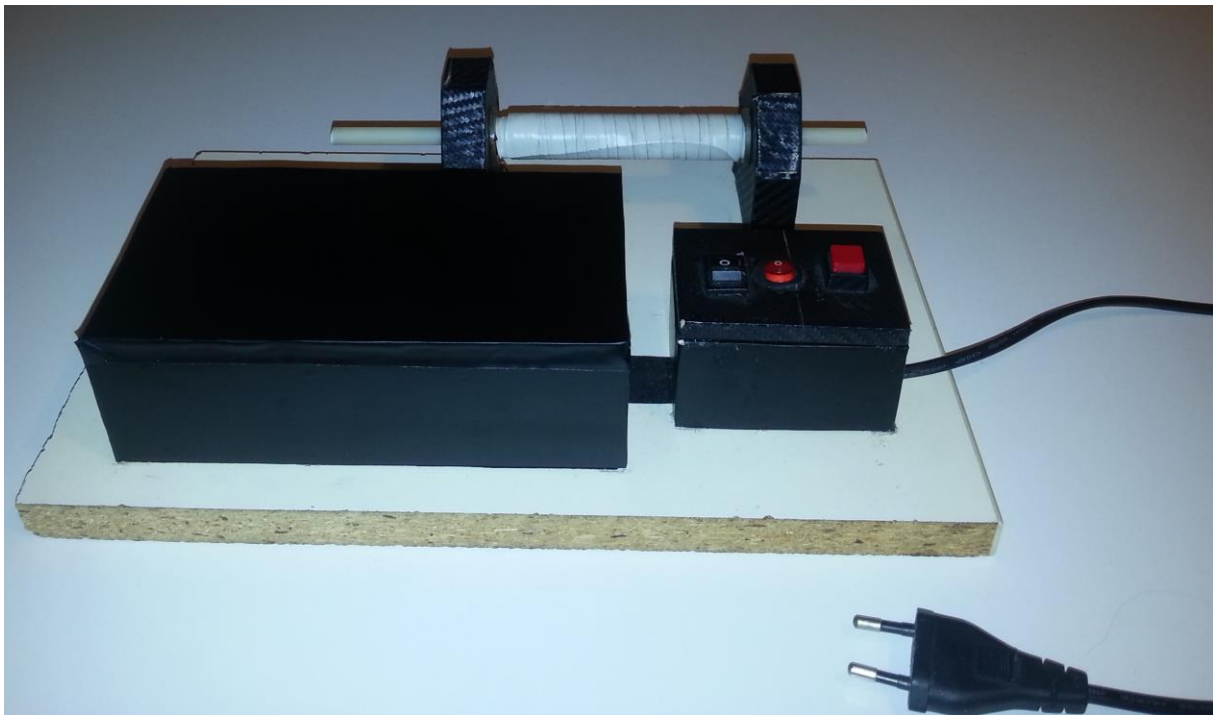
batériu pred jej znehodnotením.



Obr.50 Simulácia časové priebehu prúdu na cievke vo výslednom zapojení.



Obr.51 Simulácia časový priebehu napätia na kondenzátorovej batérii vo výslednom zapojení.



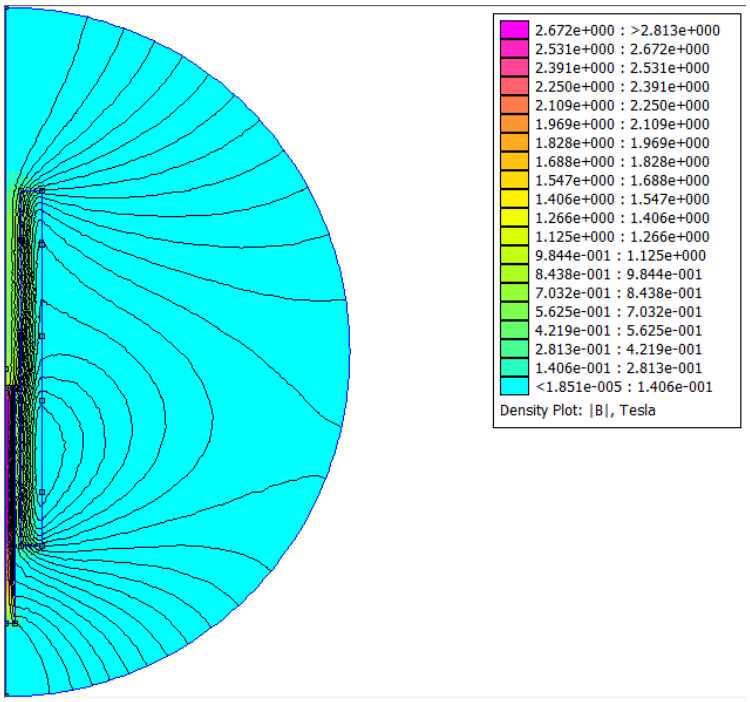
Obr.52 Výsledná konštrukcia hotového coil gunu.

3.2 Simulácia FEMM

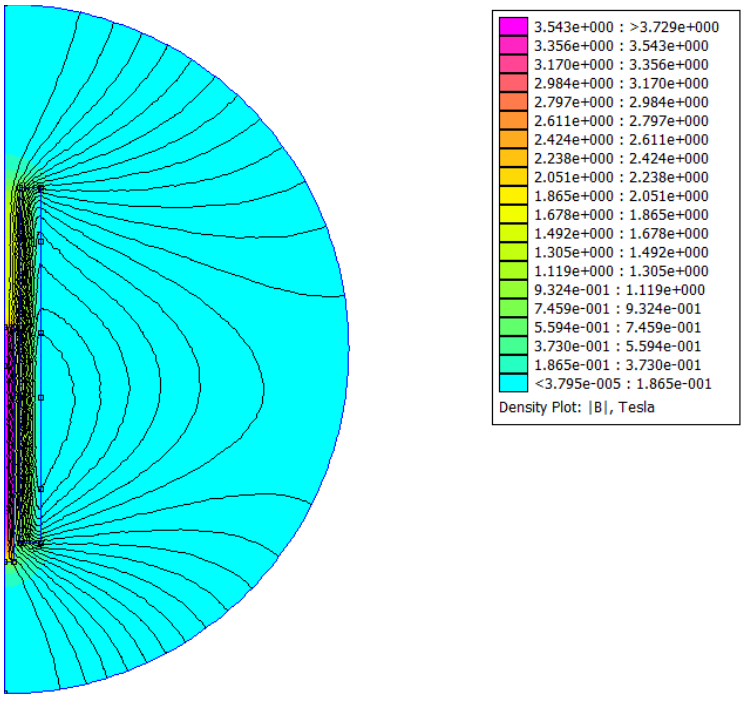
Na simuláciu vplyvu magnetického poľa cievky na projektyl sme použili program FEMM 4.2 . Pomocou ústňovej rýchlosti a času sme vypočítali polohu v akej sa bude projektyl v daný moment nachádzať. Hodnota prúdového impulzu v daný čas bola odčítaná z grafu (obr. 42) a doplnená do simulácie pre nastavenie prúdu prechádzajúcim cievkou.

Na nasledujúcich obrázkoch je vidno intenzitu magnetického poľa cievky ako pôsobí na železný projektyl. Miesta s najväčšou intenzitou magnetického poľa sú ružovej farby (miesta s najväčšou hustotou siločiar), naopak miesta s najmenšou intenzitou farby modrej (miesta s najmenšou hustotou siločiar). V tejto kapitole sa nachádzajú simulácie len pre štyri polohy náboja, ostatné sú uvedené v prílohe [A]. V simuláciách z času 0,0 ms , 3,6 ms a 7,2 ms je intenzita magnetického poľa nulová, a preto sa v nich nenachádzajú ani siločiary. Je to spôsobené prechodom prúdového impulzu nulou v týchto časoch. To znamená, že v týchto časoch nevplýva cievka magnetickou energiou na projektyl. Naopak maximálne hodnoty dosahuje intenzita v čase 1,8 ms a 5,4 ms. V kladnej polovici impulzu je to 285 A a v zápornej -210 A. Rozdiel medzi maximami v kladnej a zápornej pól perióde je spôsobený útlmom v obvode.

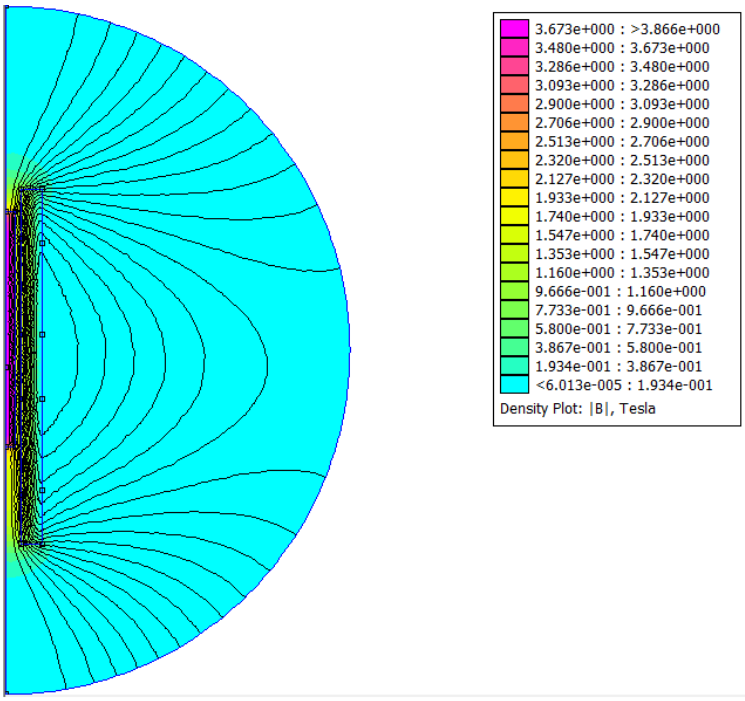
Z grafov tiež vyplýva, že intenzita magnetického poľa pôsobí takmer na celý náboj rovnomerne, iba na koncoch je slabšia. Siločiary v cievke a v jej tesnej blízkosti sú rovnobežné, preto môžeme považovať pole pôsobiace na projektyl za homogénne.



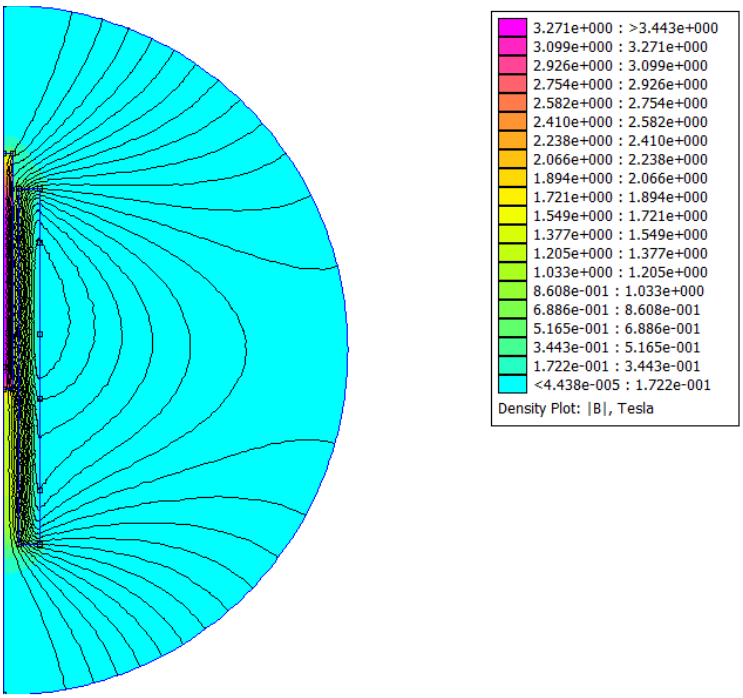
Obr.53 Simulácia v čase 0,6 ms pri napätí 150 A.



Obr.54 Simulácia v čase 1,8 ms a napätí 285 A.



Obr.55 Simulácia v čase 4,2 ms a pri napätí -100 A.



Obr.56 Simulácia v čase 5,4 ms a napätí -210 A.

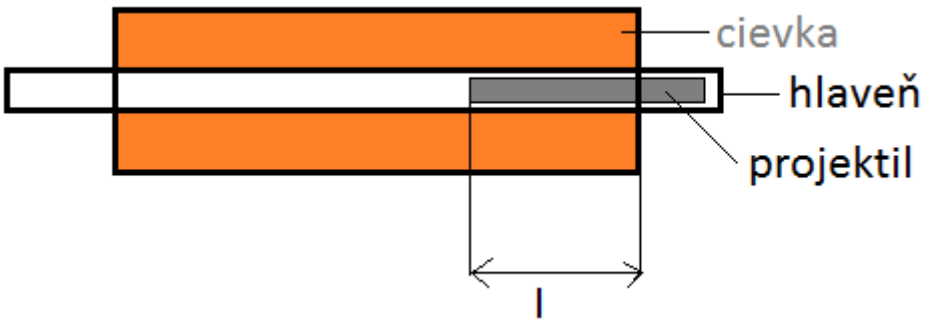
4 VÝSLEDKY EXPERIMENTOV

4.1 Východisková pozícia

Prvým z rady meraní bolo meranie zamerané na experimentálne stanovenie ideálnej východiskovej pozície pre projektil .

Poloha náboja je veľmi citlivá na výslednú rýchlosť. Stačí odchýlka niekoľko malo milimetrov a projektil nezíska maximálnu rýchlosť. Použil som niekoľko druhov projektilov – železný, medený, hliníkový a mosadzný. Tento graf spolu s tabuľkou ukazujú závislosť uloženia projektilu do hlavne a na jeho rýchlosti.

Optimálna východisková pozícia podľa meraní vyšla cca 4 cm. To znamená, že náboj bol zastrčený 4 cm(vzdialenosť *l*) do vnútra cievky. Najväčšiu rýchlosť dosiahol železný projektil a za ním nasledoval medený.

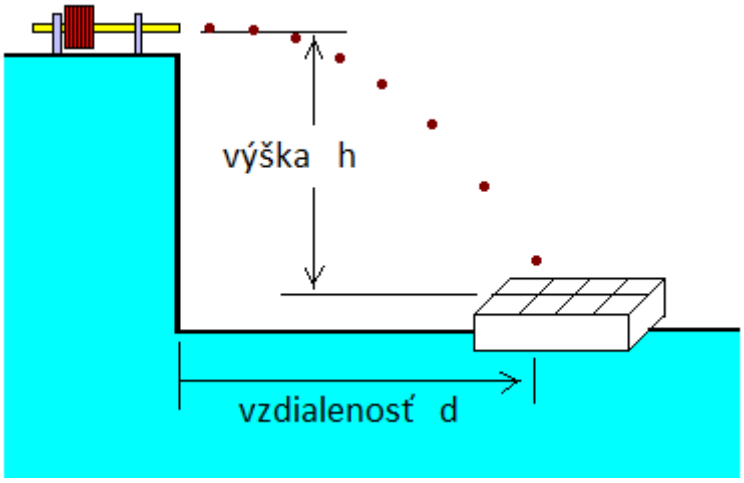


Obr.57 Pozícia náboja v cievke.

Rýchlosť projektilu som počítal pomocou vzorca:

$$v = d \cdot \sqrt{(g / 2h)} \tag{29}$$

pričom *d* je vzdialenosť, ktorú strela preletí, *h* je pokles a *g* je gravitačná konštanta.



Obr.58 Spôsob výpočtu rýchlosti[10].

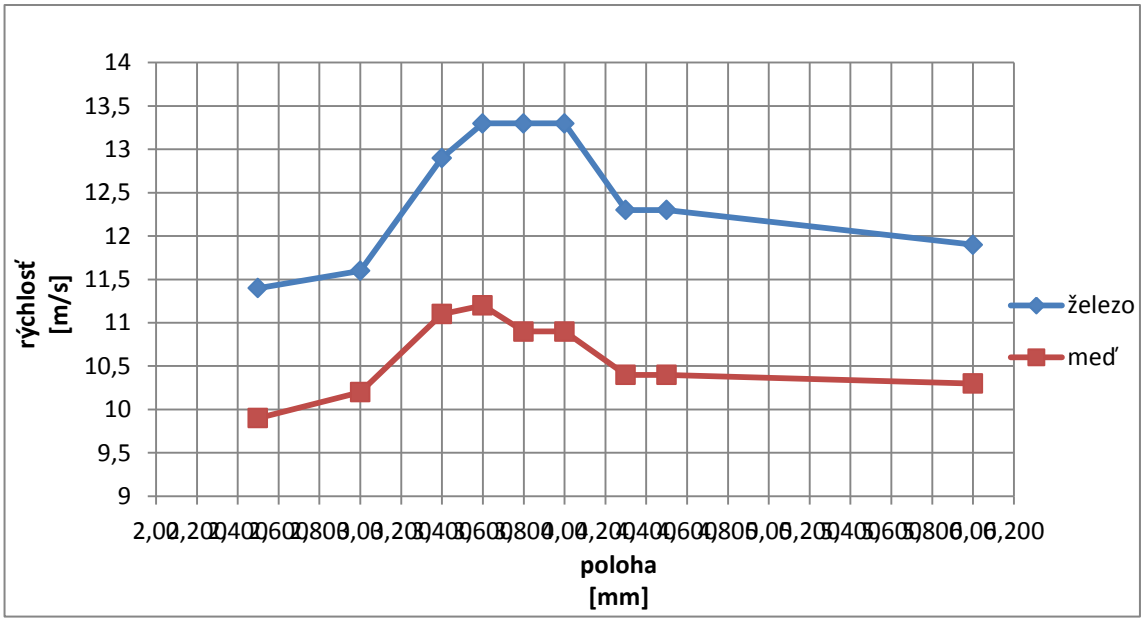
Výsledná kinetická energia sa počíta zo vzorca:

$$E_k = \frac{1}{2} m \cdot v^2 \tag{30}$$

kde *v* je rýchlosť a *m* hmotnosť.

Tab.3 Prehľad rýchlostí železného a medeného projektilu v závislosti na polohe v cievke.

optimálna poloha [mm]	rýchlosť železo [m/s]	rýchlosť meď [m/s]
2,5	11,4	9,9
3,0	11,6	10,2
3,4	12,9	11,1
3,6	13,3	11,2
3,8	13,3	10,9
4,0	13,3	10,9
4,3	12,3	10,4
4,5	12,3	10,4
6,0	11,9	10,3



Graf 1.: Závislosti rýchlosti železného a medeného projektilu na polohe v cievke.

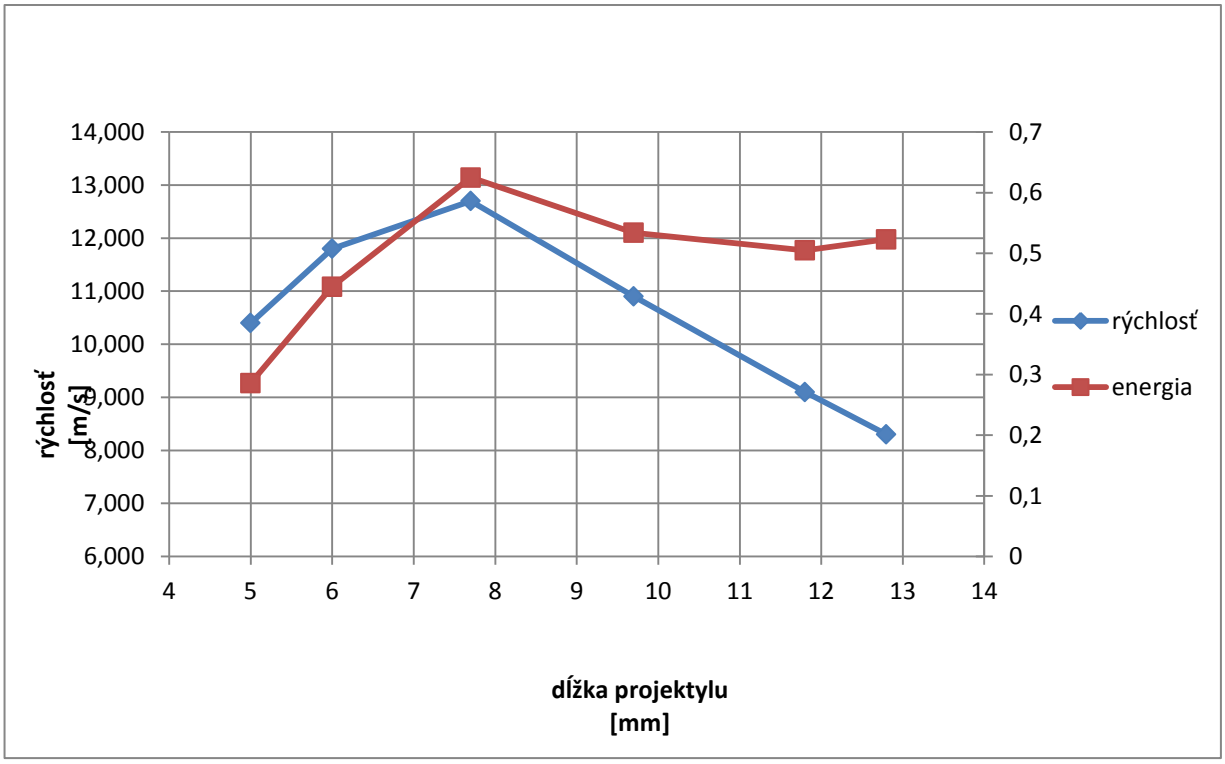
4.2 Optimálna dĺžka projektilu

Pri tomto meraní som zmeral rýchlosť a kinetickú energiu šiestich rôzne dlhých projektilov z ocele. Použili sme najvýhodnejšiu východiskovú pozíciu 4 cm zistenú z predchádzajúceho merania.

Ako je vidno z grafu a tabuľky najväčšiu rýchlosť a energiu dosahuje náboj dĺžky 7,7 cm a hmotnosti 7,7 g.

Tab.4 Prehľad kinetickej energie a rýchlosti nábojov rôznych rozmerov.

dĺžka [mm]	hmotnosť[g]	rýchlosť [m/s]	kinetická energia [J]
12,8	15,2	8,30	0,523
11,8	12,2	9,10	0,505
9,7	9,0	10,9	0,534
7,7	7,7	13,3	0,681
6,0	6,4	11,8	0,445
5,0	5,2	10,4	0,286



Graf 2.: Závislosť dĺžky projektilu na rýchlosti a energii.

4.3 Materiál hlavne

Materiál, z ktorého sa hlaveň skladá je dôležitý pretože sa v ňom môžu indukovať vírivé prúdy. Podľa teórie by nám mohli pomôcť zvýšiť účinnosť. Na výber som mal materiál pvc a mosadz.[10]

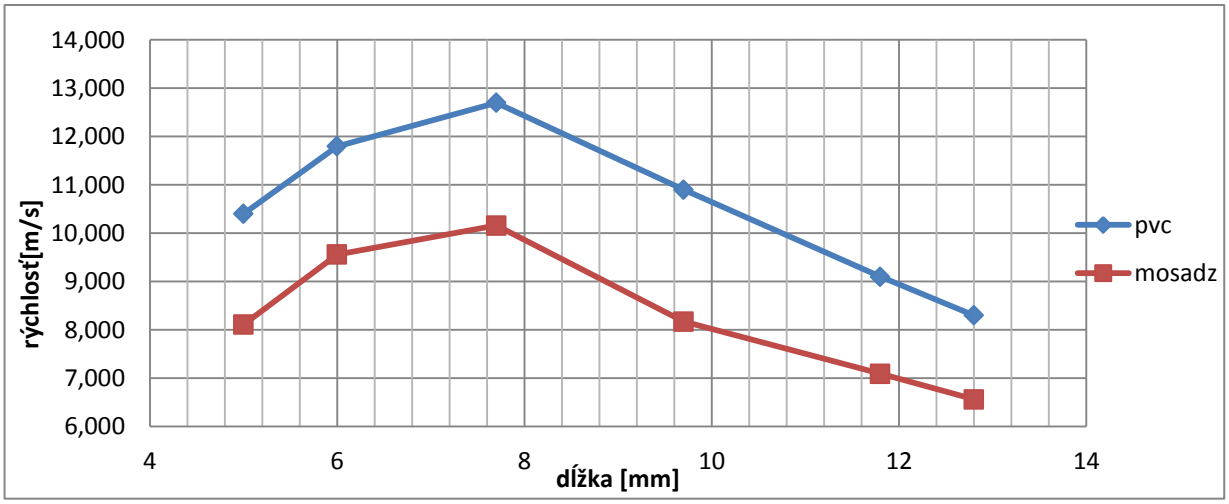
Teória sa však nepotvrdila a najväčšie rýchlosti som dosiahol pri použití hlavne z pvc.

Pre porovnanie strela vystrelená z mosadznej hlavne mala rýchlosť len 10,16 m/s pričom projektil vystrelený z PVC hlavne o rovnakých rozmeroch dosahoval rýchlosť až 12,7 m/s.

Rozdiel v rýchlosti dosiahol až 20 % čo je najviac s pomedzi všetkých meraní. Zníženie účinnosti bolo spôsobené rušením indukcie vírivých prúdov v projektile mosadzou.

Tab.5 Prehľad rýchlosti projektilov rôznych rozmerov vystrelených z pvc a mosadznej hlavne.

dĺžka [mm]	rýchlosť pvc hlaveň [m/s]	rýchlosť mosadzná hlavne [m/s]
12,8	8,30	6,56
11,8	9,10	7,09
9,7	10,9	8,17
7,7	13,3	10,16
6,0	11,8	9,56
5,0	10,4	8,11



Graf 3.: Závislosť rýchlosti projektilu na materiály hlavne.

5 ZÁVER

V tejto práci som objasnil teóriou elektromagnetizmu a jeho vplyvu na veľmi malé telesá. Opísali sme niekoľko fyzikálnych javov, ktoré spadajú do tejto kapitoly.

Ďalej sme opísali súčasný stav coil gunov, rozdelili ich do niekoľkých hlavných skupín a opísali konštrukciu jedného zariadenia z každej z nich.

Po tom čo som sa zoznámili s teóriou tejto problematiky, sme sa v druhej časti zaoberali realizáciou návrhu a konštrukcie vlastného coil gunu. Návrh bol optimalizovaný pomocou obvodového simulátora PSpice pre optimálne načasovanie prúdových špičiek. To sa nám s malými odchýlkami aj podarilo. V práci chýba porovnanie priebehov zo simulácie s priebehmi nameranými v praxi. To sa mi pre môj zdravotný stav nepodarilo. Porovnanie vyplýva len z výpočtu pomocou maximálnej ústňovej rýchlosti.

Simulácia vplyvu intenzity magnetického poľa cievky na projektyl bola urobená v programe FEMM 4.2. Z výsledných simulácii vyplýva, že pole pôsobí na projektyl rovnomerne a siločiary magnetického poľa ukazujú, že toto pole je v cievke a jej tesnej blízkosti homogénne. Výsledky sú však mierne skreslené kôli polohe projektylu, ktorá bola počítaná z ústňovej rýchlosti a nie rýchlosti zodpovedajúcej danej polohe.

Po skonštruovaní návrhu sme urobil niekoľko meraní za účelom zistenia optimálnych parametrov náboja jeho materiálu a materiálu hlavne. Namerané hodnoty a výsledky sú zapísane v tabuľkách a vynesené do grafov. Zistil som, že optimálnym materiálom projektilu je oceľ, jeho rozmery sú 7,7 cm a najvhodnejšia pre strieľanie je hlaveň vyrobená z pvc.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

[1] DOC. ING. KAREL DRAXLER, CSC., DOC. ING. PETR KACPAR, CSC. a PROF. ING. PAVEL RIPKA, CSC.
Magneticke prvky a mereni. Praha, 2008. ISBN 978-80-01-03970-0. Skriptum. CVUT Praha.

[2] PAUL. J. Coilgun Systems [online]. 2001-2006 [cit. 2011-12-22]. Dostupné z: http://www.coilgun.eclipse.co.uk/electromagnetic_basics_1.html

[3] Indukčnost. In: WIKIPEDIA. Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 10. marec 2013. [cit. 2011-12-22] Dostupné z: http://sk.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dnos%C5%A5

[4] Equivalent series resistance. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 5 March 2013 at 12:57. [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent_series_resistance

[5] Rezonančný obvod. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-2013, 26. júl 2012. [cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://sk.wikipedia.org/wiki/Rezonan%C4%8Dn%C3%BD_obvod

[6] Hack, M. The Coil Gun v2.0, [online]. 2013-[cit. 2013-03-05]. Dostupné z: http://matthack.com/the-coil-gun-v2-0/

[7] Brtník, Bohumil. Základní elektronické obvody [online]. 1. vydání. Praha: BEN, 2011 [cit. 2013- 03-15]. ISBN 978-80-7300-435-4. Dostupné z: http://shop.ben.cz/121331

[8] HANIC, M. Elektromagnetické pulzné zariadenie Coil gun [online]. Bratislava, Študentská vedecká a odborná činnost. STU Bratislava, 2010 -[cit. 2011-12-22]. Dostupné z: http://www.nuc.elf.stuba.sk/svoc10/cd/PRISPEVKY/15RE/SVOC_RE2010_Hanic_Vanco.pdf.

[9] MILLER, G. Angelfire: Coil Gun Kit Instructions [online]. 22.3.2006 -[cit. 2013-03-06]. Dostupné z: http://www.angelfire.com/80s/sixmhz/xgun.html

[10] HANSEN, B. Barry's Coilgun Design Site [online]. 1998-2012 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://www.coilgun.info/about/home.htm

[11] HANSEN, B. Barry's Coilgun Design Site [online]. 1998-2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://www.coilgun.info/mark4/timing.htm

[12] HANSEN, B. Barry's Coilgun Design Site [online]. 1998-2013 [cit. 2013-05-21]. Dostupné z: http://www.coilgun.info/mark2/inductorsim.htm

[13] PROF. ING. JURAJ VALSA, CSC., DOC. ING. JIŘÍ VALSA, CSC.,Teoretická elektrotechnika 2. Blansko: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1782-X. Skriptum. VUT Brno.

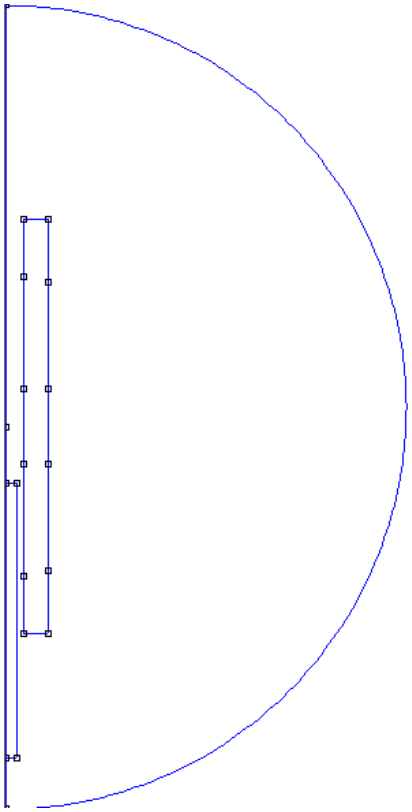
ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

B	magnetická indukcia
μ_0	permeabilita vákua
I	intenzita magnetického poľa
U_i	indukovane napätie
W	práca
U_{max}	maximálne napätie
$I_{peak,}$ I_p	špičkové napätie
L	indukčnosť cievky
C	kapacita kondenzátora
C_g	kapacita hradla
R	odpor
ESR	vnútorný odpor súčiastky
U_c	napätie kondenzátora
t	čas
R_i	odpor cievky
v	rýchlosť
g	gravitačná konštanta
h	výška
E_k	kinetická energia
m	hmotnosť
t	čas
T	teplota
J	prúdová hustota
SW	spínač
Q	činiteľ jakosti
Φ	magnetický indukčný tok

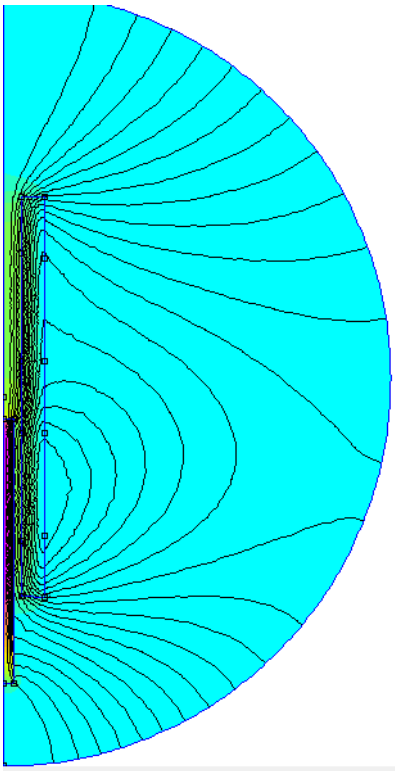
6 ZOZNAM PRÍLOH

Simulácia FEMM.....55

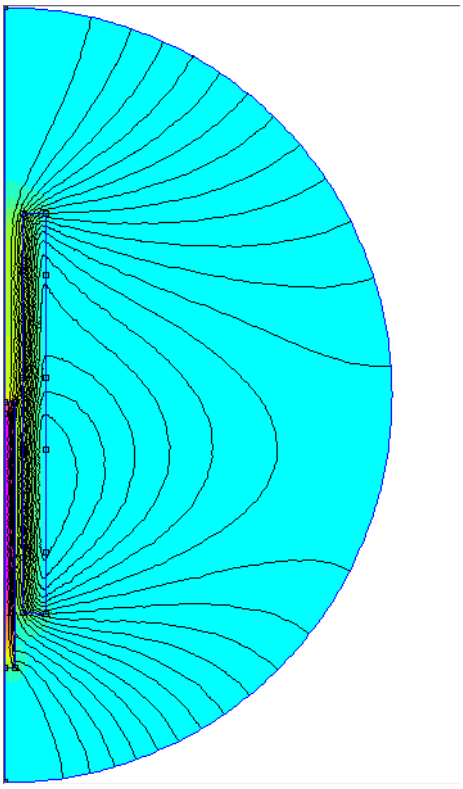
A Simulácia FEMM



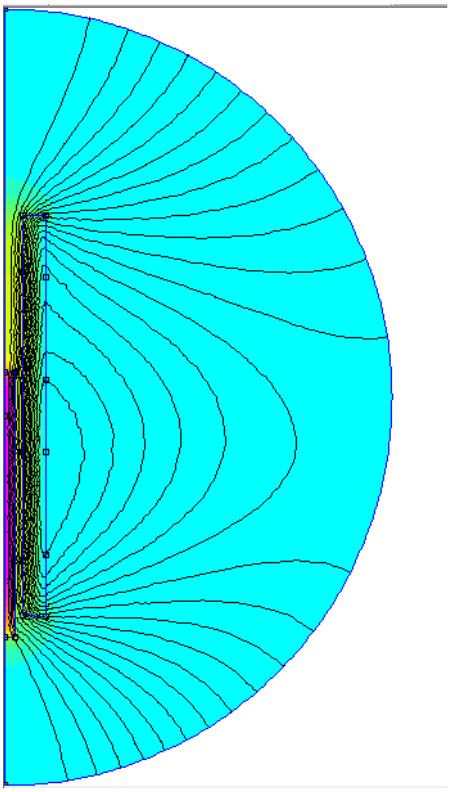
Čas 0,0 ms, prúd 0 A.



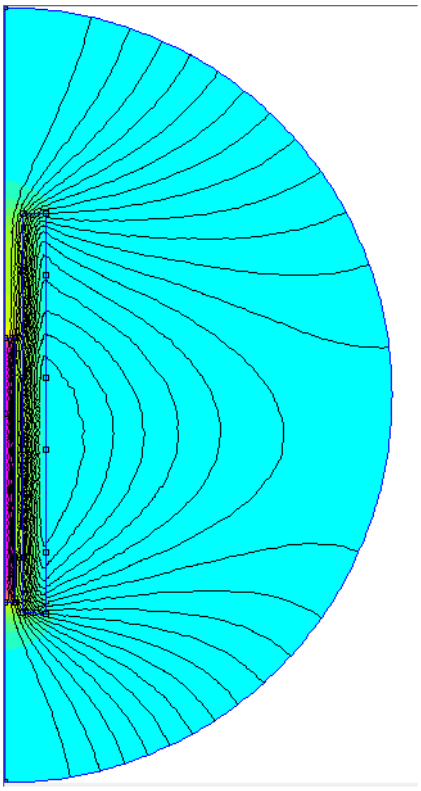
Čas 0,6 ms, prúd 150 A.



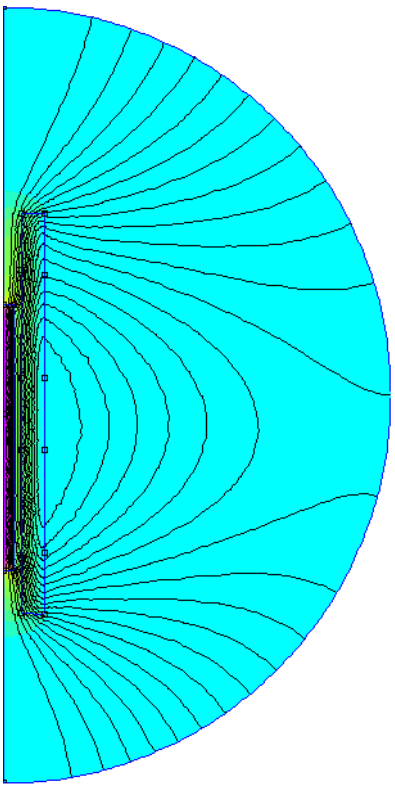
Čas 1,2 ms, prúd 260 A.



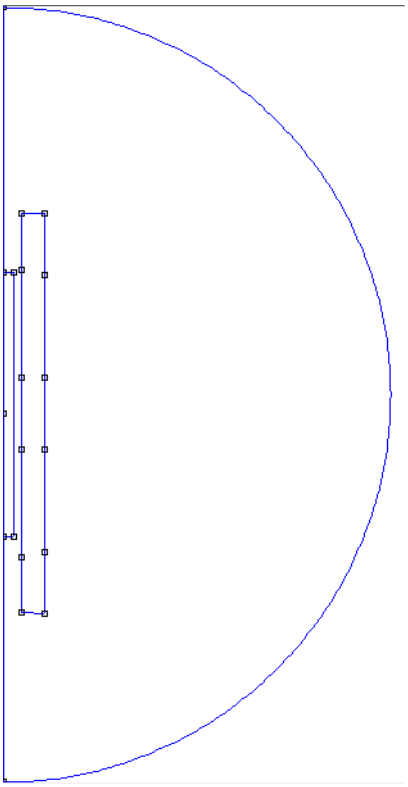
Čas 1,8 ms, prúd 285 A.



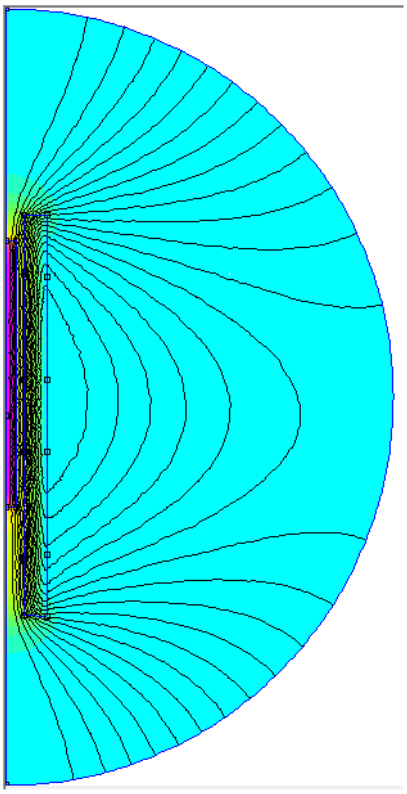
Čas 2,4 ms, prúd 260 A.



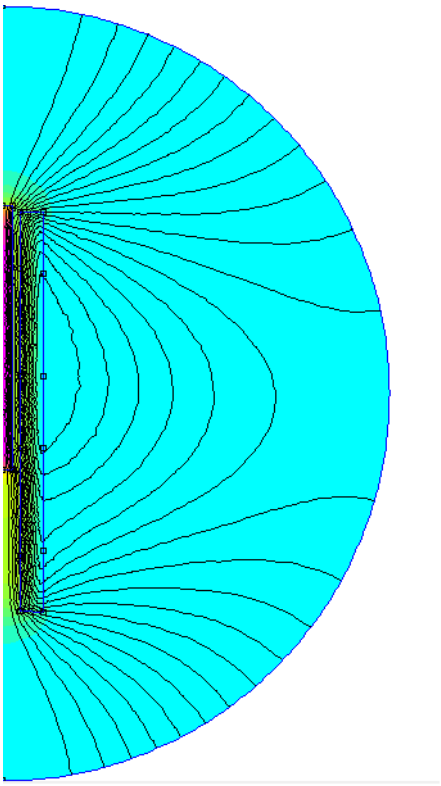
Čas 3,0 ms, prúd 150 A.



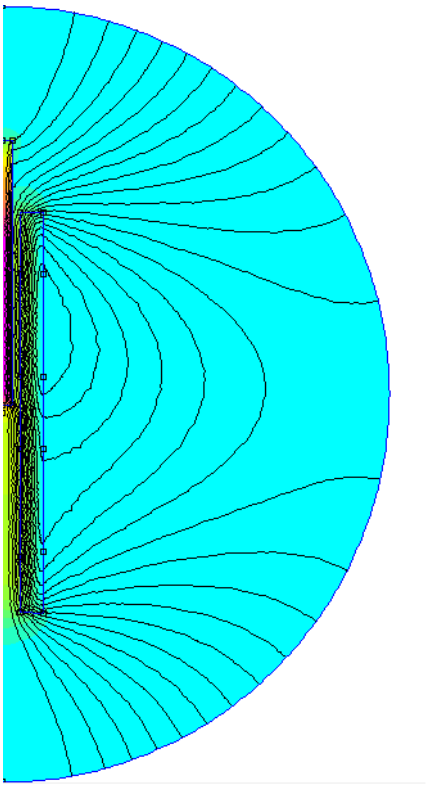
Čas 3,6 ms, prúd 0 A.



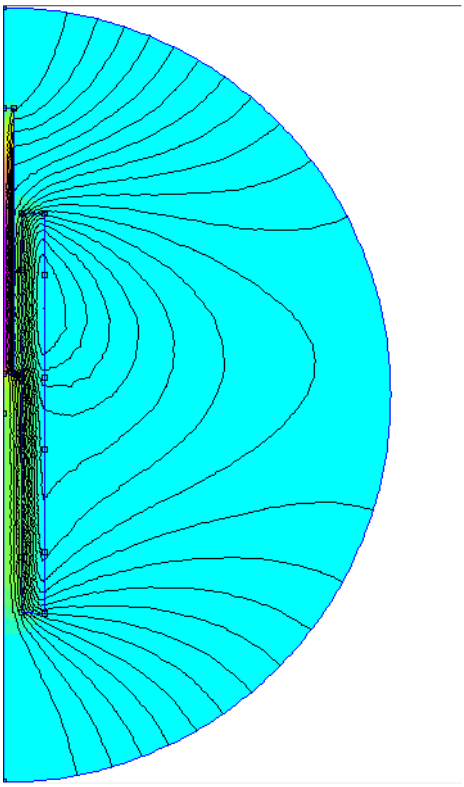
Čas 4,2 ms, prúd -100 A.



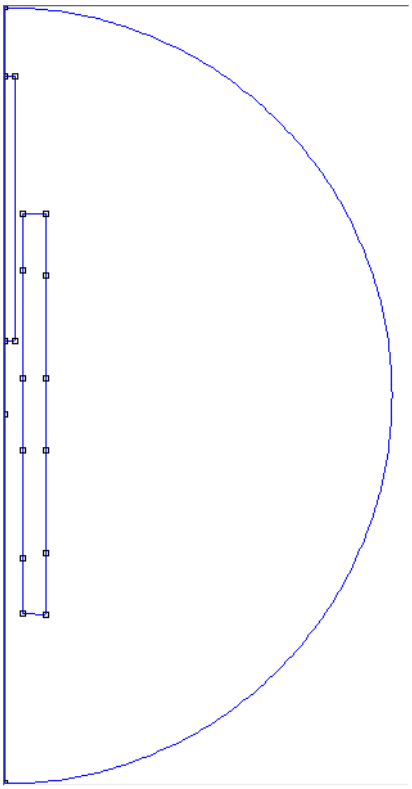
Čas 4,8 ms, prúd -180 A.



Čas 5,4 ms, prúd 210 A.



Čas 6,0 ms, prúd -180 A.



Čas 7,2 ms, prúd 0 A.