

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ
KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh elektromagnetického kolejnicového děla

Autor práce: Bc. Jaroslav Broul
Vedoucí práce: Ing. David Pánek, Ph.D.

Plzeň 2013

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jaroslav BROUL**
Osobní číslo: **E10N0112P**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh elektromagnetického kolejnicového děla**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Provedte podrobnou rešerši.
2. Vytvořte matematický model problému a provedte jeho numerické řešení.
3. Navrhněte experimentální ověření modelu.
4. Srovnejte numerický výpočet a experiment.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. David Pánek, Ph.D.**

Katedra teoretické elektrotechniky

Konzultant diplomové práce: **Ing. František Mach**

Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2012**

Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2013**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na seznámení čtenářů s principem elektromagnetického děla, jeho vývoje v několika desetiletích a ověření jeho principu pomocí jednoduchého experimentu. Práce je rozdělena do několika kapitol, kde vás obeznámím s historií, která provází vývoj elektromagnetického kolejnicového děla (EM Railgunu) již od roku 1901. Poté bych se zaměřil na jeho princip, výhody a nevýhody, čili jeho technickou problematiku. Hlavním cílem je vytvoření matematického modelu a simulace EM Railgunu v programu Comsol Multiphysics. Experimentem se budu snažit prokázat jeho funkčnost a porovnat výsledky se simulací.

Klíčová slova

Elektromagnetické pole, magnetická síla, EM Railgun, projektil, pulzní napájecí zdroj, kapacitorová banka, indukčnost, kondenzátory, kolejnice, injektor, hlaveň Railgunu, proudový impulz, indukční gradient, ústňová rychlost, proudová hustota, energie, výkon, simulace.

Abstract

Broul, Jaroslav. *Design of the electromagnetic railgun [Návrh elektromagnetického kolejnicového děla]*. Pilsen, 2013. Master thesis (in Czech). University of West Bohemia. Faculty of Electrical Engineering. Department of Theory of Electrical Engineering. Supervisor: David Pánek

This Theses is focused on introducing readers to the principle of electromagnetic cannon, its development in several decades and verification of its principle in a simple experiment. The Theses is divided into several chapters, where you will learn about the history that accompanies the development of electromagnetic rail gun (EM railgun) since 1901. Then I focused on its principle, advantages and disadvantages, or its technical issues. The main objective is to develop a mathematical model and simulation of the EM railgun in the program Comsol Multiphysics. I'll try an experiment to demonstrate its performance and compare the results with simulation.

Keywords

Electromagnetic field, magnetic force, EM Railgun, projectile, pulsed power supply, capacitor bank, inductance, capacitors, rails, injector, bore Railgun, current impuls, inductance gradient, muzzle velocity, current density, energy, power, simulation.

Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem svou závěrečnou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce 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 § 270 trestního zákona č. 40/2009 Sb.

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

V Plzni dne 24. dubna 2013

Bc. Jaroslav Broul

.....

Podpis

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam symbolů a zkratk	viii
1 Úvod	1
1.1 Seznámení s problematikou	1
1.2 Cíl práce	1
2 Historie elektromagnetického děla	2
3 Aktuální vývoj EM Railgunu s vizí do budoucna	7
3.1 Integrace EM Railgunu na bitevní loď	7
3.2 Výstřel do vesmíru	9
4 Princip EM Railgunu	12
4.1 Výpočet rychlosti projektilu	13
4.2 Popis jednotlivých částí EM Railgunu	15
4.2.1 Projektil	15
4.2.2 Kolejnice	16
4.2.3 Pulzní napájecí zdroj	17
4.2.4 Injektor	17
5 Výhody a nevýhody EM Railgunu	19
5.1 Nevýhody	19
5.1.1 Gouging	19
5.1.2 Opotřebení kluzného kontaktu	20
5.1.3 Pulzní napájecí zdroj (PNZ)	20
5.1.4 Bodové svaření projektilu s kolejnicemi	21
5.1.5 Navádění střel	21
5.1.6 Systém chlazení	21
5.2 Výhody	22
5.2.1 Zpětný ráz	22
5.2.2 Ústřevá rychlost	22

5.2.3	Dostřel EM Railgunu	22
5.2.4	Bezpečnost obsluhy	23
6	Matematický model	24
7	Simulace PNZ a EM Railgunu	27
7.1	Parametry a simulace PNZ v programu PSpice	27
7.2	Parametry a simulace EM Railgunu v programu Comsol Multiphysics . . .	29
7.2.1	Postup modelování a simulace EM Railgunu	29
7.2.2	Výsledky simulace	34
8	Praktická část	38
8.1	Parametry modelu EM Railgunu	38
8.2	Parametry PNZ	41
8.3	Výsledky testů	43
9	Závěr	46
	Reference, použitá literatura	47
	Přílohy	50
A	Doprovodné obrázky	50

Seznam obrázků

2.1	Boční pohled na dalekonosný Railgun Fauchona Villepleeho, posazený na železničním podvozku. Převzato z [1] 	3
2.2	PEGASUS 10MJ EM Railgun s kapacitorovou bankou v pozadí. Převzato z [5]	5
3.1	Uspořádání pulzních alternátorů do páru. Převzato z [7] 	8
3.2	Projekt lodě s dalekonosným EM Railgunem napájený třemi páry pulzních alternátorů. Převzato z [7] 	8
3.3	Koncept lodního obranného systému. Převzato z [7] 	9
3.4	STAR koncept EM Railgunu. Převzato z [8] 	10
4.1	Fyzikální princip EM Railgunu. [9]	12
4.2	Geometrické rozměry pro výpočet indukčního gradientu L' . Převzato z [9] . .	14
4.3	Projektíl ve tvaru C s lexanovou hlavicí. Převzato z [11] 	16
4.4	Projektíl s kartáči a lexanovou hlavicí. Převzato z [11] 	16
4.5	Injektor na bázi stlačeného vzduchu.	18
5.1	Gouging (prohlubně ve tvaru kapek). Převzato z [11] 	19
5.2	Vlevo projektíl tvaru C bez opotřebení, vpravo po vystřelení se známkou eroze. Převzato z [11] 	20
5.3	Ukázka kombinované metody s rozložením jednotlivých sil mezi závěry hlavně a projektilem. Převzato z [20] 	22
6.1	Znázornění oblastí 2D modelu EM Railgunu	24
7.1	Schéma přechodového děje při vybití kapacitorové banky do EM Railgunu.	28
7.2	Grafické znázornění proudového impulzu.	28
7.3	Schéma násobiče napětí.	28
7.4	Grafické znázornění nabití kapacitorové banky.	29
7.5	Režim volby problematiky.	29
7.6	Rozměry EM Railgunu v milimetrech.	30
7.7	Tabulka zadaných konstant.	30
7.8	Definice proudového impulzu a stanovení rovnice magnetické síly.	31
7.9	Proudový impulz.	31
7.10	Tabulka domén.	32

7.11	Tabulka okrajových podmínek.	32
7.12	Tabulka řešení.	33
7.13	Tabulka nastavení výstupů simulace.	33
7.14	Proudový impulz.	34
7.15	Magnetická síla působící na projektil.	34
7.16	Rozložení hustoty síly napříč projektil.	35
7.17	Rozložení proudové hustoty.	35
7.18	Rozložení intenzity mag. pole a hustoty mag. síly v EM Railgunu.	36
7.19	Zrychlení projektilu.	37
7.20	Rychlost projektilu.	37
8.1	Předběžné varianty modelu.	38
8.2	Vylepšený model a jeho řez.	39
8.3	Upravený předešlý model a jeho řez.	39
8.4	Prototyp EM Railgunu.	40
8.5	Projektil s průřezem 1 cm^2 a jeho modifikace.	40
8.6	Upravený EM Railgun.	40
8.7	Projektil s průřezem 5 mm^2 a jeho modifikace.	40
8.8	Vybíjecí impulz bez přídavné indukčnosti.	41
8.9	Vybíjecí impulz s přidanou indukčností pro EM Railgun prototyp.	42
8.10	Vybíjecí impulz s přidanou indukčností pro EM Railgun druhý model.	42
8.11	Výsledek prvního testu na prototypu.	43
8.12	Výsledek testu na druhém modelu.	44
A.1	PNZ obsahující násobič napětí na 300 V, kapacitorovou banku s osmi $470 \mu\text{F}$ kondenzátory na 400 V zapojenými paralelně, ochranou diodu, LED diodu indikující nabíjení a spínače pro nabití a bezpečné vybití kapacitorové banky.	50
A.2	Cívka $40 \mu\text{F}$ použitá pro tvarování vybíjecího impulzu.	50
A.3	Porovnání modelů EM Railgunu, vpravo prototyp, vlevo druhý model.	51

Seznam symbolů a zkratek

a	Zrychlení [m/s^2].
\mathbf{B}	Vektor magnetické indukce [T].
C	Capacita [μF].
\mathbf{D}	Vektor elektrické indukce [Cm^{-2}].
E	Energie [J].
\mathbf{E}	Vektor intenzity elektrického pole [Vm^{-1}].
\mathbf{F}	Lorentzova síla [N].
\mathbf{F}_m	Vektor magnetické síly [N].
\mathbf{F}_e	Vektor elektrické síly [N].
\mathbf{H}	Vektor intenzity magnetického pole [A/m].
I	Elektrický proud [A].
\mathbf{J}	Vektor proudové hustoty [A/m^2].
\mathbf{J}_V	Externí proudová hustota [A/m^2].
\mathbf{J}^e	Transformační složka vířivých proudů [A/m^2].
L	Indukčnost [mH].
l	Délka [m].
L'	Indukční gradient [H/m].
m	Hmotnost [kg].
q	Elektrický náboj [C].
R	Poloměr vodiče (Poloměr kolejnice) [m].
R	Elektrický odpor [Ω].
r	Vzdálenost mezi vodiči (kolejnicemi) [m].
U	Elektrické napětí [V].
v	Rychlost [m/s].
γ	Měrná elektrická vodivost [S/m].
Γ	Hranice řešeného problému.
Ω	Oblast řešeného problému.
μ	Permeabilita [H/m].
τ	Časová konstanta [s].

EM Railgun	Elektromagnetické kolejnicové dělo.
ISS	International Space Station (Mezinárodní vesmírná stanice)
LEO	Low Earth Orbit (Nízká oběžná dráha).
MKP	Metoda konečných prvků.
PDE	Parciální diferenciální rovnice.
PNZ	Pulzní napájecí zdroj.
STAR	Switched Transiently Augmented Railgun (Railgun se spínanými magnety pro zvětšení magnetického pole).

Kapitola 1

Úvod

1.1 Seznámení s problematikou

Válečné konflikty jdou ruku v ruce s vývojem čím dál efektivnějších zbraní. Už během první světové války byly zaznamenány první pokusy navrhnout a sestavit elektromagnetické dělo. Dalo by se říct, že se jednalo o slepou uličku, poněvadž tyto zbraně byly méně efektivní než tehdejší konvenční zbraně a navíc většina návrhů se nikdy nerealizovala a zůstala jen na papíře. V té době také scházely vědcům lepší znalosti, moderní technologie a materiály. Po druhé světové válce opadla horečná snaha výzkumu zbraní, a tím i experimenty s elektromagnetickými děly. [1] Pokrok jde s dobou a s ním přichází i nové nápady a vylepšení, což dnes dělá elektromagnetická děla jedním z hlavních témat ve výzkumu amerického námořnictva. Jejich princip je už lépe vysvětlen a zdokonalen, nevýhody víceméně minimalizovány, a tak jejich implementace pro válečná vozidla a bitevní lodě by mohla být brzy skutečností.

U nás není tento směr vývoje zbraní nikterak rozšířený, a proto jsem se rozhodl čtenářům shrnout celosvětové poznatky o výzkumech, principech, výhodách a nevýhodách elektromagnetických děl. Ze začátku bych chtěl jen poznamenat, že tato práce je zaměřena na ověření principu elektromagnetického děla, a není zde úmysl poskytnout čtenáři postup pro jeho sestavení.

1.2 Cíl práce

Cílem práce je vytvořit podrobnou rešerši zahrnující historii a vývoj elektromagnetického kolejnicového děla (dále jen EM Railgun), jeho princip a technickou problematiku. Zmíněná témata jsou rozepsána v příslušných kapitolách. Hlavní část práce zahrnuje sepsání matematického modelu pro vytvoření simulace EM Railgunu v programu Comsol Multiphysics a následné ověření výsledků simulace pomocí malého modelu.

Kapitola 2

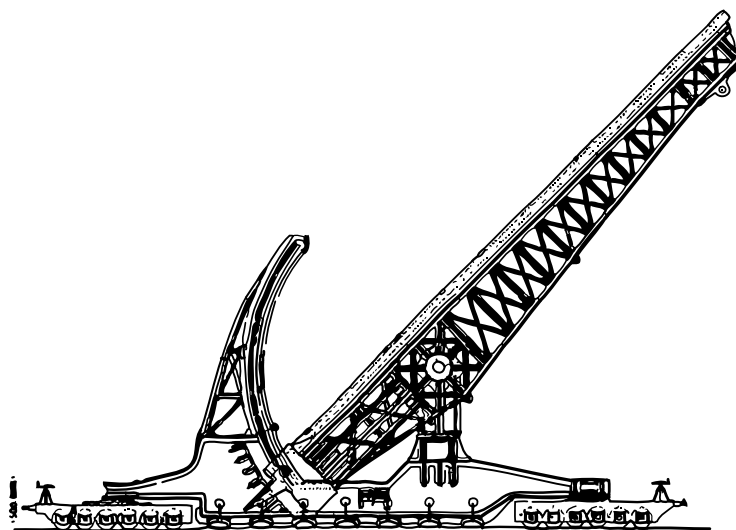
Historie elektromagnetického děla

Z dochovaných zdrojů je známo, že vývoj elektrických zbraní začal přibližně na začátku minulého století. Tento vývoj až do dnešních dob bych rád shrnul do stručného přehledu. Především se zaměřím na kolejnicové elektromagnetické dělo tzv. EM Railgun, což je cílem této práce, avšak je tu i zmínka o elektromagnetickém dělu se solenoidem tzv. Coilgun.

Snaha využít elektřinu jako zdroj energie k urychlení projektilu, místo střelného prachu, se objevuje počátkem 20. století. První studie byly provedeny norským vědcem Kristiánem Birkelandem. V roce 1901 při experimentu s novým proudovým jističem založeném na magnetické indukci si Birkeland všiml jevu, při kterém byl kus železa přitahován k solenoidu tak velkou silou, že proletěl skrz cívku jako střela. Tento jev byl již znám, ale Birkeland v něm viděl potenciální využití pro elektromagnetickou zbraň. V létě 1901 předložil komisi svoje detailní plány a požádal o svůj první patent elektromagnetického děla. Jako zdroj energie chtěl použít obrovský Faradayův disk, který byl schopen na krátkou dobu dodat 2 kV a 50 kA. [2]

V roce 1916 francouzský vědec Andre Louis Octave Fauchon Villeplee začal studie odlišného konceptu elektromagnetického děla a 22. června 1916 podal žádost o patent. Žádost byla odmítnuta, a tak se rozhodl vytvořit funkční model s využitím akumulátorů (baterií) jako zdroje. Tento koncept poté představil v červenci roku 1918 před komisí a díky tomu byl Fauchon Villeplee pověřen sestavit 30 mm až 50 mm dělo. Po skončení první světové války 3. listopadu 1918 se upustilo od vývoje zbraní a tento projekt byl zastaven. Fauchon Villeplee vydal publikaci popisující jeho práci a rozdíl v principech EM Railgunu a Coilgunu. Princip a hlavní části EM Railgunu jsou popsány v kapitole 4. Ve svých pracích popisuje funkční model EM Railgunu, zhotoveného pro demonstrování jeho principu. Délka hlavně měla 2 m, projektil byl 270 mm dlouhý a vážil 50 gramů. Pro dosažení ústřední rychlosti 200 m/s Fauchon Villeplee spočítal, že bude zapotřebí proudu o hodnotě 5 kA při napětí 40 až 50 V. Počáteční experimenty se prováděly v březnu 1917 za použití dynama, které dodávalo 600 A při 60 V. Fauchon Villeplee poznamenává možnost připevnění malého elektromagnetického děla na vozidlo s generátorem jako zdrojem energie. Generátor by byl poháněn pomocí motoru vozidla. Je to jeden z mnoha nápadů Fauchona Villepleeho, které nikdy nebyly uskutečněny. Dalším extrémním nápadem bylo

elektromagnetické dělo s hlavní délkou 30 m, pojízdné po železniční dráze a schopné vystřelit 100 kilogramový projektil s úst'ovou rychlostí 1600 m/s. Lze ho svými parametry srovnat s "Pařížským dělem", které Němci použili v první světové válce při ostřelování Paříže v roce 1918. Výkon měl dosahovat 3,4 GW, proud kolem 3,5 MA a ve špičkové hodnotě dokonce dvojnásobku. Dělo mělo být napájeno několika generátory zapojenými sérioparalelně. Energie vyžadovaná na každý výstřel byla odhadnuta na 512 MJ a bylo by tak zapotřebí, podle jeho výpočtů, čtrnáct 130ti voltových generátorů, každý o hmotnosti 25 až 30 tun. Celková hmotnost systému byla odhadnuta na 1000 tun. [1] Tento neuskutečnitelný návrh je ukázán na obrázku (2.1).



Obrázek 2.1: Boční pohled na dalekosný Railgun Fauchona Villepleeho, posazený na železničním podvozku. [Převzato z [1]]

V roce 1923 ruský profesor A.L.Korolkov zpochybnil některé závěry stanovené v pracích Fauchona Villeplee. Ve svých pracích vyjmenovává a rozebírá jedenáct výhod EM Railgunu prohlášených Villepleem, jenž mohou být spekulativní, ba dokonce některá tvrzení Korolkov vyvrací. [1]

Vybraná tvrzení Villepleeho okomentovaná Korolkovem:

- Variabilita dostřelu a úst'ové rychlosti děla může být dosáhnuta změnou velikosti napětí beze změny úhlu náměru. Korolkov s tvrzením souhlasí a poznamenal to za největší výhodou elektromagnetického děla. [1]
- Pro urychlení projektilu není použito střelného prachu, tím pádem nemůže v hlavní dojít k předčasné explozi. Korolkov souhlasí s tímto tvrzením, avšak hlaveň musí vydržet vysoké elektromagnetické síly, a může tedy dojít k selhání v důsledku těchto sil a ne explozí. [1]

- Elektromagnetická děla se neopotřebují, nejsou podrobena velkému namáhání, teplotě a tlaku. Korolkov tomuto tvrzení nevěří, poněvadž díky tření (kluzný kontakt) vzniká teplo, které dokáže zničit hlavěň po několika výstřelech. Tímto problémem se vědci zabývají i v dnešní době. EM Railgun má tedy nízkou životnost a je podroben vysokému namáhání, teplotě a tlaku. Poznamenává, že vhodnou volbou moderních materiálů by se mohla zvýšit jeho životnost. [1]
- Jelikož se elektromagnetická děla málo zahřívají a odpadá u nich otevírání a zavírání závorníku hlavně, mohou střílet s vyšší frekvencí než konvenční zbraně. Korolkov toto tvrzení navrhl a uvádí, že frekvence výstřelů je stanovena dobou, vyžadovanou k nabití energetického zásobníku. S návrhem modernějšího systému uložení energie, by mohla celková energie pokrýt i několik výstřelů bez průběžného nabíjení. Nevýhodou by byl větší ohřev hlavně. [1]
- Zpětný ráz elektromagnetického děla je podstatně menší než u konvenčních zbraní. S tímto tvrzením Korolkov souhlasí, avšak je tu závislost na hmotnosti a rychlosti samotného projektilu. [1]

Podrobněji popsané výhody a nevýhody EM Railgunu uvádím v kapitole 5.

Během druhé světové války vzniklo v Německu mnoho inovací a detailních analýz elektromagnetických děl pod vedením Dr. Joachima Hanslera, který si byl dobře vědom prací Fauchona Villepeeho. Hansler se zabýval výzkumem elektromagnetického děla od roku 1943 až do konce druhé světové války. Počáteční experimenty byly prováděny v Berlíně na již dříve zmíněném Coilgunu. Elektrická energie pro experimenty byla poskytována pomocí kapacitorů, baterií a AC strojů. Tento směr experimentů byl po šesti měsících zavrhnut a Hansler se zaměřil na EM Railgun, jehož problematiku rozdělil do dvou částí, samostatné dělo a napájecí zdroj. Napájecí zdroj zahrnoval tisíc dvanácti voltových olověných akumulátorů a kapacitní banku s energií 48 kJ při napětí 2 kV. Cílem experimentů mělo být dosažení ústřední rychlosti 1500 m/s s hlavní děla o délce 2 m. První výsledky vedly k ústřední rychlosti 800 m/s s projektilem o hmotnosti 10 gramů a proudu o hodnotě 10 kA. Byly prováděny další experimenty, kde se nahradila slitina mědi kolejnic čistou mědí. Snížil se tak jejich odpor, zvýšil se proud, a tím i ústřední rychlost, která činila 920 m/s. Dalšími modifikacemi křidélek projektilu pro stabilizaci letu a kluzného kontaktu se zvýšila rychlost na 960 m/s až 1080 m/s. Spojením dvou hlavních o délce 2 m do série dosáhli vědci zvýšení rychlosti pouze na 1200 m/s, to je o hodně méně než předpokládali. [1]

Kromě výzkumu EM Railgunu se Hansler a jeho kolega zaměřili na vývoj napájecího zdroje. V potaz brali čtyři následující typy zdrojů, elektrostatický (kapacitory), elektromagnetický (pulzní transformátory), elektrochemický (baterie) a mechanický (pulzní generátory). Baterie sloužily jako hlavní napájecí zdroje, ale Hansler poznamenal, že daleko lepším způsobem uložení energie je pomocí homopolárního pulzního generátoru. [1]

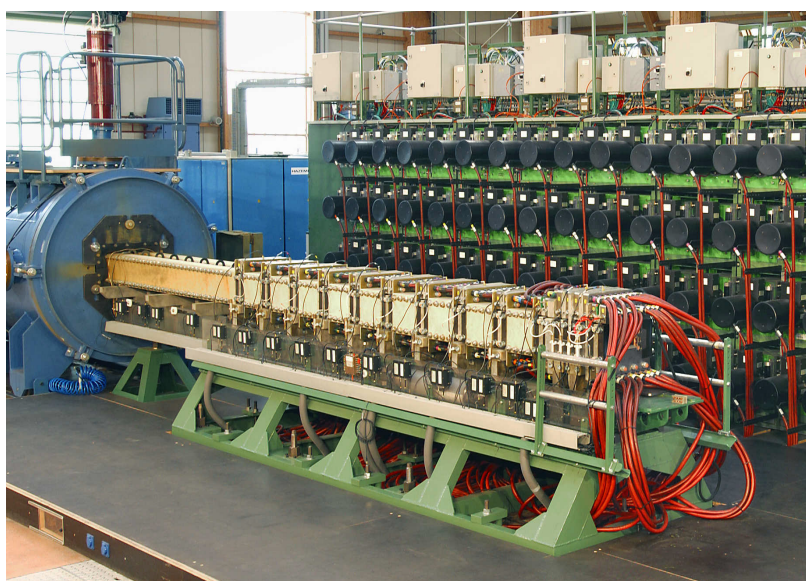
V té době vyvstala ambiciózní myšlenka postavit protiletadlové elektromagnetické dělo s těmito požadavky:

- ústňová rychlost 2000 m/s
- hmotnost projektilu 6,5 kg
- 6 děl schopných pálit současně, připojených na jeden napájecí zdroj
- palebná frekvence 1 výstřel za 5 s
- hlaveň o délce 10 m a ráže 128 mm

Není tedy překvapující, že tohoto cíle na konci druhé světové války nebylo dosaženo. [1]

Další záznamy o testování EM Railgunu jsou z roku 1970 na Australské národní univerzitě, kde během deseti let výzkumu byla prozkoumána většina problémů spojovaných s EM Railgunem. Výzkum byl poté přesunut do USA. [3]

V roce 1982 byl v Saint Louis vytvořen Francouzskou–Německo–Nizozemský program, který úzce spolupracoval se Spojenými státy. Hlavní motivací tohoto programu bylo dosáhnout vyšší ústňové rychlosti elektromagnetického děla, než mají konvenční zbraně. Zatímco konvenční zbraně mají ústňovou rychlost pod 2 km/s, pro EM Railgun by to mohla být rychlost 3 až 4 km/s. Vyšší ústňové rychlosti, a tím pádem i dostřelu EM Railgunu se dosáhne zvýšením energie z řádů jednotek MJ na desítky MJ. [4] Z jejich spolupráce v roce 1998 vzešel projekt PEGASUS 10 MJ EM Railgun, který byl použit pro experimentální účely. Na obrázku (2.2) můžete vidět jeho provedení spolu s pulzním napájecím zdrojem (kapacitorovou bankou).



Obrázek 2.2: PEGASUS 10MJ EM Railgun s kapacitorovou bankou v pozadí. |Převzato z [5]|

Hlaveň měřila 6 m na délku a měla 40ti milimetrový kalibr se čtvercovým průřezem. Energie dodaná dělu pro jeden výstřel činila 10 MJ s proudovým impulzem o hodnotě 2 MA. Při použití projektilu o hmotnosti 300 g s rychlostí 2400 m/s bylo dosaženo celkové účinnosti 25 %. [5]

V posledním desetiletí se americké námořnictvo snaží modifikovat EM Railgun pro bitevní lodě. Jejich zájem o tuto technologii je velký, poněvadž elektromagnetická děla mohou dosáhnout ústřelových rychlostí 2000 až 3000 m/s, což značně převyšuje rychlosti projektilů u konvenčních zbraní. A s vyšší rychlostí se zvyšuje i průraznost projektilu. Armáda Spojených států amerických se snaží vyvinout lehčí mobilní bitevní verze EM Railgunů pro dělostřelectvo a bitevní lodě. Největší výzvou je pro ně vyvinutí pulzního napájecího systému, který by se rozměrově vešel do vozidel a hmotnostně je nepřetěžoval. V porovnání s vozidly jsou bitevní lodě mnohem vhodnější. Dokážou unést mnohem těžší náklad a mají dostupný i větší prostor, což dovoluje zvažovat kapacitorové banky jako napájecí zdroje pro EM Railguny, které by nešly umístit do vozidel kvůli svým rozměrům a hmotnostem. Rovněž i děla s větším kalibrem a délkou hlavně nelze jen tak umístit na vozidla, zatímco bitevní lodě tento problém řešit nemusí. U děl s delší hlavní lze pracovat s nižší akcelerací projektilu, a tím snížit jejich namáhání. Z toho plyne zvýšení životnosti elektromagnetického děla, která je i tak omezená na desítky až stovky výstřelů. Pro dosažení životnosti 10 000 výstřelů je pro vědce zatím nepřekonatelná výzva. [6]

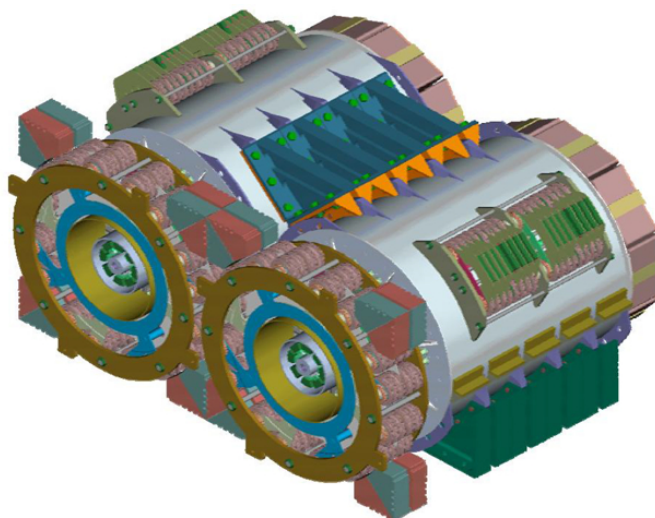
Kapitola 3

Aktuální vývoj EM Railgunu s vizí do budoucna

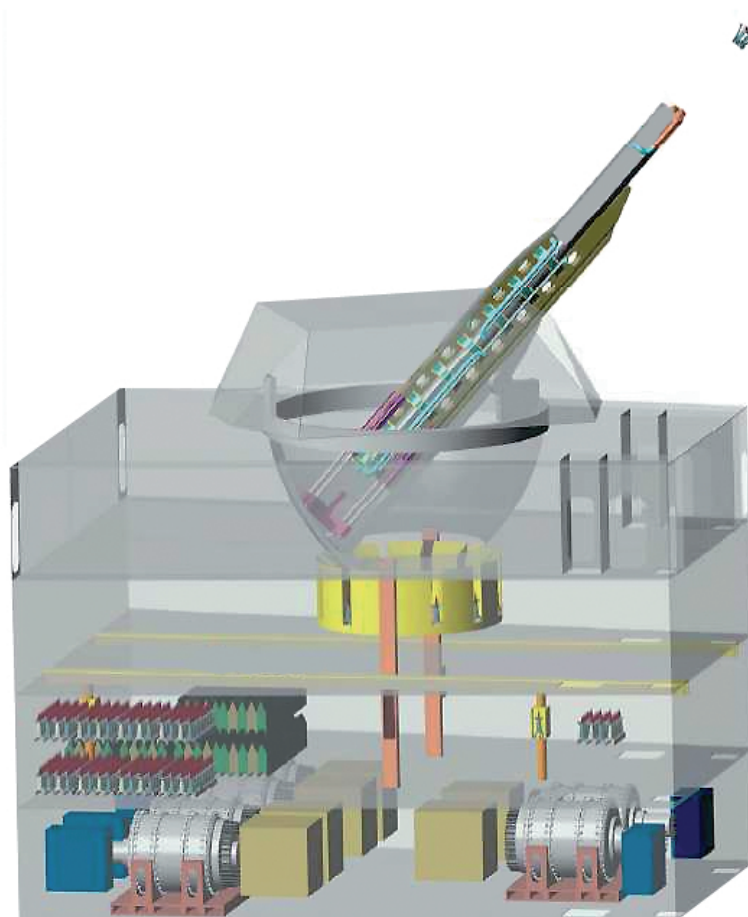
3.1 Integrace EM Railgunu na bitevní lodě

Námořnictvo Spojených států amerických se velmi zajímá o princip EM Railgunu a uvažuje do budoucna nahradit na letadlových lodích katapultovací systémy poháněné parou, které pomáhají při vzletu letadel na krátkých ranvejích. Budoucí letadlové lodě by již tak mohly mít elektromagnetický letadlový odpalovací systémem. Systém musí být schopen uskladnit několik stovek MJ energie, která bude nejspíš zprostředkována rotujícími stroji (pulzními alternátory), jenž mají menší rozměry než kapacitorové banky. Technologie uskladnění dostatečné energie v rotujících strojích je téměř skutečností, navíc letadlové lodě jsou schopné pojmout jejich rozměry a hmotnosti, avšak prostor na nich není neomezený. Vybití energie uskladněné setrvačně v pulzním alternátoru výrazně zpomaluje rotor stroje, a tak je zapotřebí energii pro další výstřel obnovit roztočením rotoru zpátky na původní otáčky. K tomuto účelu se používají motory s převodovkami a spojky, nebo turbíny. Armáda Spojených států v posledním desetiletí investovala právě do vývoje lehkých vysokorychlostních pulzních alternátorů, které by se využily pro EM Railguny jak na bitevních lodích, tak i pro pozemní vozidla. Pro zmírnění momentu reakce rotoru (gyroskopického efektu), který ovlivňuje pohyb a náklon lodí, letadel a vozidel, jsou alternátory uspořádány protiběžně do párů. Nevýhodou pulzních alternátorů je, že dodávají střídavé napětí, zatímco EM Railgun vyžaduje stejnosměrné. Je zapotřebí použít výstupní usměrňovací systém, který se z důvodu současné křemíkové technologii tyristorů výrazně podílí na velikosti stroje. Uspořádání pulzních alternátorů do páru je vidět na obrázku (3.1). [7]

Pro integraci EM Railgunu se dále musí řešit umístění pulzního napájecího zdroje (dále jen PNZ) tak, aby moc neovlivnil svojí vahou těžiště lodi. Velká EM děla, pro dalekosáhlé bombardování pobřeží, potřebují podstatně větší PNZ, který bude nedílnou součástí lodi. Na obrázku (3.2) můžete vidět uspořádání PNZ pro velký EM Railgun se třemi páry pulzních alternátorů s potřebnými usměrňovači a motory pro obnovení energie. [7]

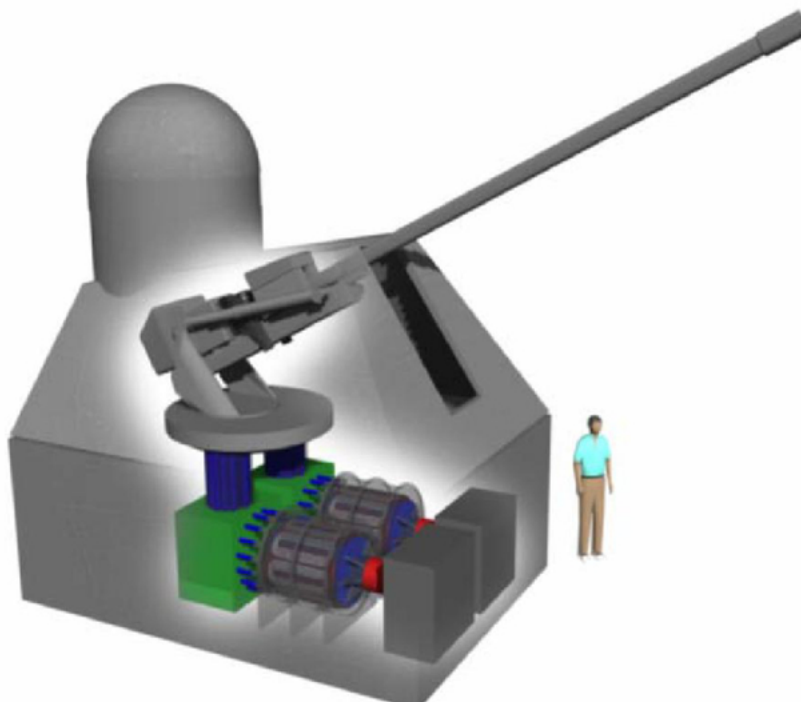


Obrázek 3.1: Uspořádání pulzních alternátorů do páru. [Převzato z [7]]



Obrázek 3.2: Projekt lodě s dalekonosným EM Railgunem napájený třemi páry pulzních alternátorů. [Převzato z [7]]

Naproti tomu je na obrázku (3.3) ukázán menší palubní obranný EM Railgun s PNZ umístěným ve stejném prostoru s dělem. [7]



Obrázek 3.3: Koncept lodního obranného systému. [Převzato z [7]]

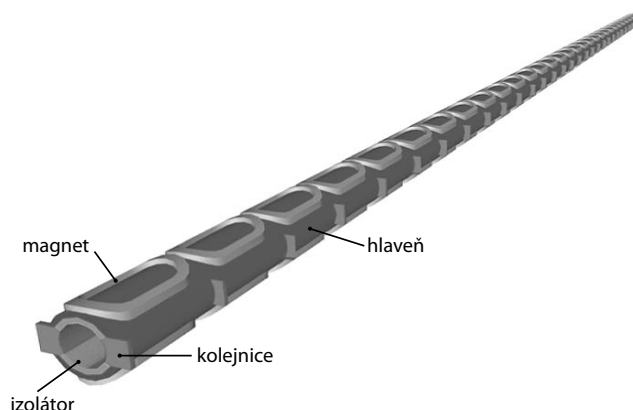
3.2 Výstřel do vesmíru

Je myslitelné, že by mohlo být v budoucnu skutečností dopravovat objekty (družice, materiál) na nízkou oběžnou dráhu Země (dále jen LEO—Low Earth Orbit) pomocí EM Railgunu? Výzkum ve zdroji [8] se zabývá touto studií a dokazuje, že zde nejsou žádné podstatné překážky, které by vyvracely tuto možnost. Ačkoliv bude zapotřebí dosáhnout technického pokroku v určitých oblastech. Úspěšnost výzkumu přinese podstatné snížení peněžních nákladů při dopravě materiálu na LEO.

Délka hlavně EM Railgunu byla stanovena na 1600 m a skládá se z několika fází. EM Railgun by měl být připevněn fixně k povrchu a orientován tak, aby se maximalizovaly výhody Zemské rotace při výstřelu projektilu do vesmíru. Pro tyto účely a snížení termálního ohřevu letícího objektu atmosférou, by nejlépe sloužil horský svah s co možná největší nadmořskou výškou. Pro urychlení objektu o hmotnosti 1250 kg na rychlost 7.5 km/s by bylo zapotřebí energie o hodnotě 44 GJ. To však platí pro STAR koncept EM Railgunu, který je zde popisován. Každá fáze děla je samostatně napájena a spínána v době přítomnosti projektilu, navíc obsahují magnety ve tvaru sedla, které zvětšují magnetické pole uvnitř hlavně. Magnety jsou vlastně cívky o N závitech umístěné v sérii

z vnějšku hlavně, jak je vidět na obrázku (3.4). Díky tomu můžeme snížit proud potřebný pro urychlení projektilu, ale i tak je jeho hodnota stanovena na 6,6 MA. Pro napájení jednotlivých fází EM Railgunu bude zapotřebí 100 pulzních vysokorychlostních elektrických generátorů, jak je zaznamenáno v tabulce (3.2), kde jsou odhadnuty cenové náklady na výrobu EM Railgunu a v tabulce (3.1) jsou definovány jeho parametry. [8]

Dále se musí řešit tvar, materiál a obsah projektilu, kde bude umístěn hlavní raketový pohon, dokovací trysky, přepravovaný náklad, naváděcí a chladicí systém. Všechno musí být navrženo do kompaktní střely, která vydrží náročné podmínky dané zrychlením 19500 m/s^2 a termálním ohřevem pouzdra při průletu atmosférou při 7.5 km/s . [8]



Obrázek 3.4: STAR koncept EM Railgunu. [Převzato z [8]]

Parametry	hodnoty
celková hmotnost projektilu (kg)	1250
délka projektilu (m)	6
ústňová rychlost (m/s)	7500
energie potřebná pro výstřel (GJ)	35
délka děla (m)	1600
průměr hlavně (m)	1.1
průměrné zrychlení (m/s^2)	17600
maximální zrychlení (m/s^2)	19500
doba urychlení projektilu (s)	0.43
indukční gradient ($\mu\text{H/m}$)	1
lineární proudová hustota (MA/m^2)	6.8
průměrný proud (MA)	6.6
účinnost děla (%)	80
dodávaná energie (GJ)	44

Tabulka 3.1: Parametry EM Railgunu. [Převzato z [8]]

Komponenty	cena za kus	počet kusů	celkem
AC generátory	\$5M	100ks	\$500M
spínací prvky	\$1.5M	100ks	\$150M
hlaveň	\$0.1M/m	1600m	\$160M
magnety	\$1.6M	100ks	\$160M
sběrnice a konstrukce			\$100M
potřebná technika			\$250M
součet			\$1320M

Tabulka 3.2: Peněžní náklady na výstavbu. |Převzato z [8]|

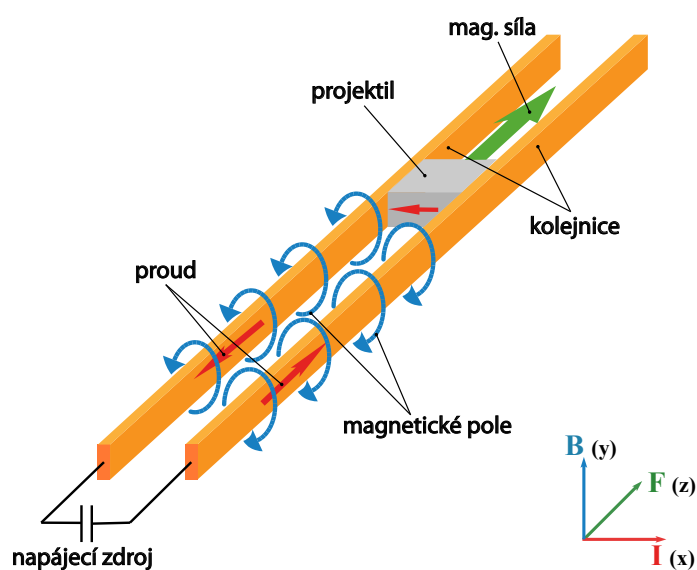
Zajímavou myšlenkou je využití EM Railgunu jako odpalovacího systému umístěného na Měsíci. Díky nízké gravitaci, by dělo mohlo pracovat s podstatně nižšími úst'ovými rychlostmi (přibližně 2.5 km/s). Další alternativou by mohlo být umístění EM Railgunu na ISS, která by sloužila jako předsunutá základna pro dopravu materiálu a podporu mise na Mars. [8]

Kapitola 4

Princip EM Railgunu

Jak již bylo zmíněno, elektromagnetické dělo je založeno na principu přeměny elektrické energie na kinetickou, která urychluje projektil na více než 2000 m/s, což je mnohem více než dosáhnou konvenční zbraně. Možná proto výzkum této technologie neupadl i pro své nevýhody, jako jsou eroze kolejnic, krátká životnost, vysoká teplota spojená s třením a elektrickým proudem, hmotnost a rozměry napájecích zdrojů.

Pro jednodušší představu stanovme, že se EM Railgun skládá ze tří hlavních částí, což jsou kolejnice, projektil a PNZ. Projektil a kolejnice jsou vyrobeny z elektricky vodivého materiálu většinou ze slitiny mědi, nebo bezoxidové mědi a projektil z hliníku. Na obrázku (4.1) je znázorněn princip EM Railgunu. PNZ je připojen ke kolejnicím, které se chovají jako vodič. Jestliže vložíme vodivý projektil mezi kolejnice, uzavře se elektrický obvod a začne přes projektil procházet elektrický proud. Proud generuje magnetické pole, které vytváří Lorentzovy síly. Tato magnetická síla F_m je kolmá na směr proudu I a směr magnetické indukce B . Projektil je urychlován touto silou na vysokou rychlost.



Obrázek 4.1: Fyzikální princip EM Railgunu. [9]

4.1 Výpočet rychlosti projektilu

Abychom mohli stanovit rychlost projektilu, musíme provést velké množství výpočtů. Navíc výsledky nikdy nebudou přesné, poněvadž zahrnujeme do výpočtů různé zjednodušující podmínky a předpoklady. Rychlost projektilu je závislá na jeho hmotnosti a na zrychlení, jenž je funkcí magnetické síly. Pro výpočet sil použijeme Lorentzovu rovnici, kde spočítáme celkovou sílu působící na náboj:

$$\mathbf{F} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4.1)$$

Vztah (4.1) lze přepsat do tvaru:

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m \quad (4.2)$$

Lorentzovu sílu \mathbf{F} z rovnice (4.2) lze rozepsat na elektrickou sílu \mathbf{F}_e a magnetickou sílu \mathbf{F}_m . Protože elektrická síla je vůči magnetické síle zanedbatelná, lze vztah zjednodušit na tvar, jenž říká, že na částici s nábojem q pohybující se rychlostí \mathbf{v} v magnetickém poli o indukci \mathbf{B} působí síla \mathbf{F}_m :

$$\mathbf{F}_m = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4.3)$$

Nechť se přímý vodič délky l , jímž protéká proud I , nachází v magnetickém poli o indukci \mathbf{B} . Elementem vodiče $d\mathbf{l}$ se bude pohybovat náboj dq rychlostí \mathbf{v} a podle rovnice (4.3) bude na tento náboj působit magnetická síla \mathbf{F}_m :

$$d\mathbf{F}_m = dq(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (4.4)$$

Dále platí, že proud je definován jako pohybující se náboj za jednotku času a rychlost jako dráha za jednotku času:

$$I = \frac{dq}{dt} \quad (4.5)$$

$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{l}}{dt} \quad (4.6)$$

Pomocí vztahů (4.5) a (4.6) upravíme rovnici (4.4) a dostaneme vztah:

$$d\mathbf{F}_m = I(d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) \quad (4.7)$$

Jestliže se přímý vodič délky l nachází v homogenním magnetickém poli $\mathbf{B}=\text{konst.}$, bude na něj působit magnetická síla \mathbf{F}_m :

$$\mathbf{F}_m = I(l \times \mathbf{B}) \quad (4.8)$$

Vztah (4.8) lze přepsat na tvar:

$$F_m = IlB \sin \alpha \quad (4.9)$$

Předpokládá se, že magnetické pole B je kolmé k proudu I , proto se úhel $\sin \alpha = 1$ a vztah (4.9) se zjednoduší na:

$$F_m = IlB \quad (4.10)$$

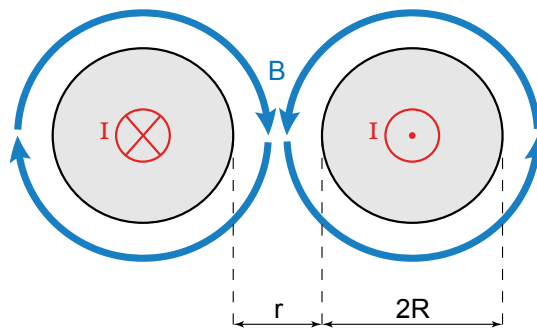
Pro určení magnetického pole B v určitém místě použijeme Biot Savartův zákon:

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_l \frac{I(dl \times r_0)}{r^2} \quad (4.11)$$

Předpokládáme, že magnetické pole kolejnic s obdélníkovým průřezem je podobné magnetickému poli vodiče kruhového průřezu. Dále předpokládáme, že proud prochází středem vodiče. Vztah (4.11) lze přepsat na tvar:

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_R^{R+r} \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{2R+r-l} \right) dl \quad (4.12)$$

kde: $2R$ je průměr vodiče, r je vzdálenost mezi vodiči, jak je ukázáno na obrázku (4.2) a μ_0 je permeabilita vakua. [9]



Obrázek 4.2: Geometrické rozměry pro výpočet indukčního gradientu L' . [Převzato z [9]]

Vztah (4.12) dosadíme do rovnice (4.10) a získáme magnetickou sílu F_m :

$$F_m = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \int_R^{R+r} \left(\frac{1}{l} + \frac{1}{2R+r-l} \right) dl \quad (4.13)$$

Po integraci získáme tvar:

$$F_m = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \ln \left(\frac{(R+r)^2}{R^2} \right) \quad (4.14)$$

Magnetickou sílu lze psát ve tvaru:

$$F_m = \frac{1}{2} L' I^2 \quad (4.15)$$

kde:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{(R+r)^2}{R^2} \right) \quad (4.16)$$

L' se nazývá indukční gradient a udává se v jednotkách H/m. L' není indukčností systému, ale faktorem magnetického pole závislého pouze na geometrii samotného EM Railgunu. [9]

Z rovnice magnetické síly lze vypočítat zrychlení projektilu pomocí druhého Newtonova zákona:

$$F_m = ma \quad (4.17)$$

$$a = \frac{L'I^2}{2m} \quad (4.18)$$

kde: a je zrychlení, m je hmotnost projektilu.

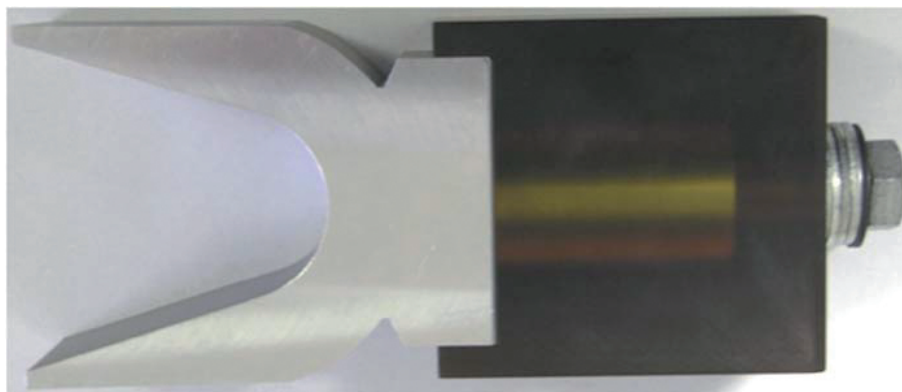
Ze vzorce pro zrychlení lze nakonec dopočítat rychlost projektilu. [9] [10]

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{I^2}{2m} \frac{dL'}{dx} \quad (4.19)$$

4.2 Popis jednotlivých částí EM Railgunu

4.2.1 Projektil

Pro projektil je hlavním z požadavků dobrá elektrická vodivost, proto se upřednostňují materiály jako hliník, měď a jejich slitiny. Důležitou roli hraje hmotnost projektilu, která by se měla minimalizovat. Proto se preferuje hliník s hustotou 2,6 g/cm³ před mědí 8,9 g/cm³. Typický tlak v hlavni je kolem 400 MPa (50 000 lib/in²) a tento tlak musí projektil z onoho materiálu vydržet bez podstatné deformace. Jelikož čistý hliník je relativně měkký, preferují se jeho slitiny. U většiny kovů, se zvyšováním mechanické pevnosti snižuje schopnost elektrické vodivosti, proto se musí volit kompromis při výběru slitin. Poněvadž se projektil pohybuje v hlavni děla velkou rychlostí, jeho povrch se opotřebovává o kolejnice vlivem tření. Projektily se vyrábí většinou ve tvaru C, jak je ukázáno na obrázku (4.3). Flexibilní ramena mají princip pružiny, která tlačí na kolejnice a tvoří tak kontakt kov na kov, který je přítomný i po částečném opotřebení projektilu na konci hlavně. Tím je zajištěn stálý kontakt mezi projektilem a kolejnicemi a nevzniká tak elektrický oblouk. Dalším typem je projektil s kartáči. Kartáče přesahují šířku samotného projektilu, jak je vidět obrázku (4.4). Po vložení do hlavně se kartáče ohnutím napruží a vzniká tak velmi dobrý kontakt mezi povrchy. Pro vyvážení a stabilitu testovacích projektilů jsou přidány nevodivé hlavice z polyamidu (nylonu), nebo polykarbonátu (lexanu). [11] Existuje nespočet provedení projektilů, které jsou založeny na těchto dvou typech.



Obrázek 4.3: Projektil ve tvaru C s lexanovou hlavicí. [Převzato z [11]]



Obrázek 4.4: Projektil s kartáči a lexanovou hlavicí. [Převzato z [11]]

4.2.2 Kolejnice

Kolejnice musí být vyrobeny z dobře vodivých materiálů, protože jimi prochází vysoké proudy řádově kiloampéry až mega ampéry. Základními veličinami při volbě jejich rozměrů a materiálů jsou proudová hustota, magnetické síly, elektrický odpor, tlak a indukční gradient. [12] Faktor magnetického pole, nebo také indukční gradient, je hlavní veličinou pro stanovení přeměny elektrické energie na kinetickou. Výpočet indukčního gradientu je stanoven vzdáleností kolejnic od sebe, jejich výškou a šířkou. [10] Touto problematikou se podrobněji zabývá prof. Asghar Keshtkar ve své práci [13]. Kolejnice se vyrábějí z velmi čisté bezoxidové mědi, která má nízký elektrický odpor, ale vysokou míru opotřebení. Mezi hlavní poškození kolejnic, která snižují životnost EM Railgunu, patří rýhy, trhlinky a prohlubně ve tvaru kapek. Vystává zde snaha najít materiál s lepší mechanickou odolností než má měď. V úvahu se mohou vzít materiály jako wolfram, chróm, nikl a tantal, které se jako mechanicky odolné vrstvy nanášejí na měděné kolejnice a vytváří tak hybridní strukturu. [14]

4.2.3 Pulzní napájecí zdroj

Pulzní napájecí zdroj (PNZ) poskytuje energii pro EM Railgun a jeho parametry ovlivňují ústovou rychlost a efektivnost systému. PNZ je hlavní problematikou, kde se řeší jeho rozměry, hmotnost a množství energie dodané v krátkém okamžiku, protože čas potřebný k urychlení projektilu je roven době trvání impulzu PNZ, který činí jednotky milisekund. Pro napájení EM Railgunu lze použít PNZ založené na těchto systémech uložení energie: elektrostatické (kapacitorové banky), elektromagnetické (indukčnosti), elektrochemické (baterie), elektromechanické (kompulzátory, homopolární generátory). Aby bylo dosaženo vysokých ústových rychlostí EM Railgunu, musí PNZ dodávat proudové impulzy v řádech kiloampér až mega ampér v čase několika milisekund. [15]

Nejběžnějším typem PNZ jsou kapacitorové banky, kde se pro dosažení potřebného množství elektrické energie a napětí spojují kondenzátory sérioparalelně. Dřívější technologie nebyly tak vyspělé jako dnes, a proto se především používaly elektrochemické a elektromechanické systémy uskladnění energie.

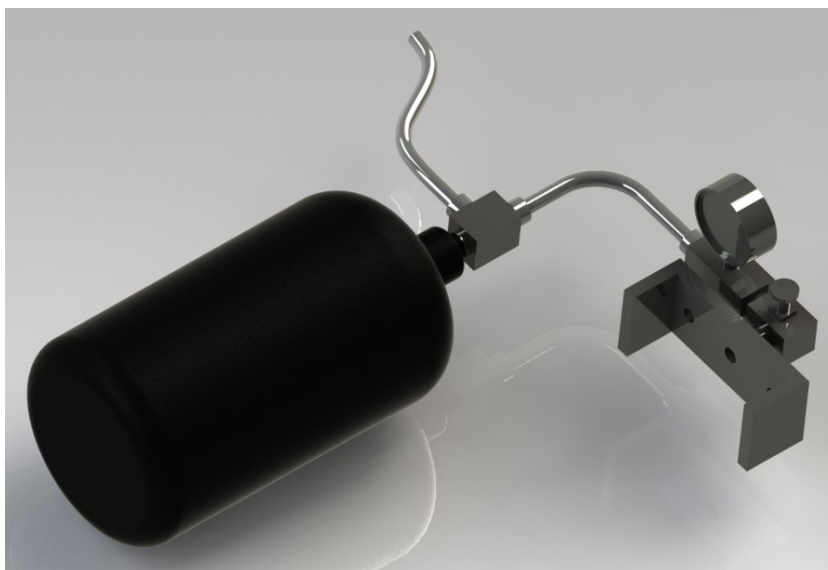
Armáda Spojených států amerických investuje posledních několik let do vývoje vysokorychlostních, pulzních alternátorů, jež mají být alternativou velkých kapacitorových bank. Pulzní alternátory plní funkci zásobníků, v nichž je setrvačně uskladněná energie. Tato energie se při výstřelu (vybitím do EM Railgunu) rapidně sníží a zpomalí se tak rychlost otáčení rotoru. Pro další výstřel je nutné energii obnovit. Toho lze dosáhnout pomocí elektrického motoru, jež zvýší stávající rychlost otáčení rotoru na původní hodnotu. Při využití motorů je zapotřebí převodovek a spojek.

Další alternativou je využití baterií, nebo nízkonapěťových homopolárních generátorů. Baterie jsou velmi efektivní při uchovávání energie, ale nejsou schopné dodávat energii v dostatečném množství potřebném pro velké EM Railguny. Proto se homopolární generátory a baterie využívají ve spolupráci s induktivní kompresí energie (cívky). [6] Kompresy energie lze popsat jako přeměnu vstupní energie o malém výkonu, dodávané po delší dobu časového intervalu, na výstup s vysokým výkonem a krátkou dobou trvání impulzu. [16] Takto nahromaděná energie se poté vybíjí do EM Railgunu. Výhodou je menší velikost zařízení, nižší pracovní napětí než u kondenzátorů a nepotřebují k provozu elektrické motory. Avšak je zapotřebí speciálních spínačů pro spínání velmi vysokých proudů a poskytnutí potřebného proudového pulzu pro EM Railgun. [6]

4.2.4 Injektor

Injektor je využíván pro urychlení projektilu v počáteční nevodivé fázi hlavně, kde nemáme elektricky vodivé kolejnice. Jestliže bychom vložili projektil mezi kolejnice bez urychlení, došlo by k jeho svaření s kolejnicemi důsledkem intenzivní teploty, způsobené velkou energií snažící se projít přes jejich kontakt. [17] Čím větší počáteční rychlost udělíme projektilu, tím menší energii musí kolejnice předat projektilu, a nedojde tak k jejich bodovému svaření. Pro urychlení, v počáteční nevodivé části hlavně EM Railgunu, se

využívá jak pružinového injektoru, tak injektoru s tlakovou nádobou. [10] V citaci [17] je poznamenáno, že je zbytečné plýtvat uskladněnou elektrickou energií pro počáteční urychlení projektilu na prvních několik stovek m/s. Injektoru s tlakovou nádobou je efektivní způsob pro předurychlení projektilu do doby, než se bude pohybovat již takovou rychlostí, kde urychlení elektrickou energií bude mít větší účinnost. Výhodou je, že se zvyšující počáteční rychlostí snižujeme ohřev a erozi kolejnic. Při experimentech na EM Railgunech se převážně využívá injektoru se stlačeným dusíkem na několik desítek až stovek barů. Na obrázku (4.5) je ukázán model injektoru složeného z tlakové nádoby, ventilu a redukce pro EM Railgun.



Obrázek 4.5: Injektor na bázi stlačeného vzduchu.

Kapitola 5

Výhody a nevýhody EM Railgunu

Princip EM Railgunu je velmi jednoduchý, ale má několik technických nevýhod, jenž mu brání přejít z experimentů na praktické využití. Navzdory svým nevýhodám, které se snaží vědci již několik desítek let minimalizovat, ať už úspěšně nebo ne, má i několik svých výhod, které udržují zájem o tento princip.

5.1 Nevýhody

5.1.1 Gouging

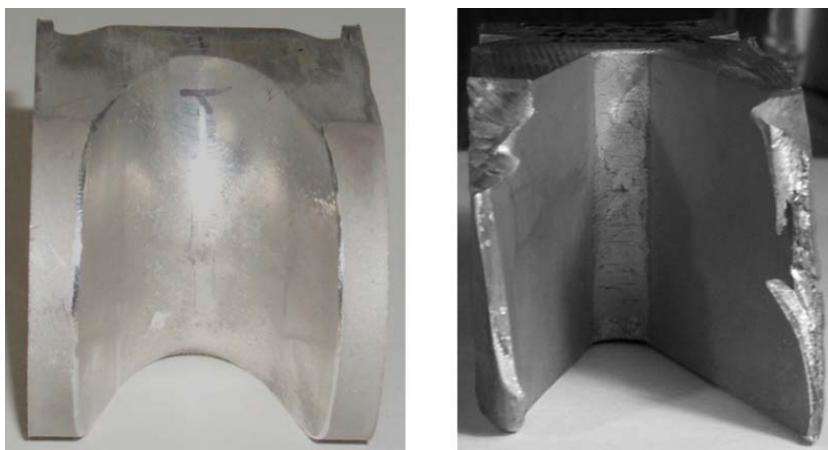
Gouging popisuje mechanický jev, objevující se na povrchu kolejnic. Jeví se jako prohlubně ve tvaru kapek podélně orientovaných ve směru pohybu projektilu. Vznikají vlivem kluzného kontaktu při rychlostech nad kritickou hodnotu pro konkrétní kombinaci materiálů kolejnic a projektilu. Se zvyšující rychlostí kluzného kontaktu se zvyšuje i počet prohlubní na povrchu kolejnic. Nezávisí tedy na proudu procházejícího přes kolejnice a projektil. [11] Tento jev lze snížit volbou materiálu kolejnic s lepší mechanickou odolností než má měď. V potaz lze vzít materiály jako wolfram, chróm, nikl a tantal, které se jako mechanicky odolné vrstvy nanášejí na měděné kolejnice, a vytváří tak hybridní strukturu. [14] I přes všechny možné úpravy materiálu se gouging občas objevuje, a snižuje tak životnost EM Railgunu. [11] Tento jev je ukázán na obrázku (5.1).



Obrázek 5.1: Gouging (prohlubně ve tvaru kapek). [Převzato z [11]]

5.1.2 Opotřebení kluzného kontaktu

Tento jev vzniká během výstřelu projektilu v počáteční části hlavně. Kontakty projektilu se důsledkem tření opotřebí a jejich přítlak se sníží na tolik, až je nemožné vytvořit spolehlivý kontakt. Opotřebení tak může zapříčinit tvorbu elektrického oblouku. Proud již není přenášen přes kontakt dvou kovů, ale přes oblouk, nebo plazmu mající charakteristicky vyšší úbytek napětí. Jakmile se tento jev jednou objeví, začnou všechny materiály v blízkosti erodovat a vznikne evidentní poškození kolejnic, projektilu a izolantů v hlavní děla. Tento jev významně snižuje životnost EM Railgunu. [11] Na obrázku (5.2) vpravo je vidět eroze projektilu po vystřelení.



Obrázek 5.2: Vlevo projektil tvaru C bez opotřebení, vpravo po vystřelení se známkou eroze. [Převzato z [11]]

5.1.3 Pulzní napájecí zdroj (PNZ)

PNZ musí být schopen dodat velké množství energie (desítky MJ) za velmi krátký čas (jednotky ms). Potřebný výkon pro vystřelení projektilu se pohybuje okolo desítek GW. Pro praktické účely by měl být EM Raigun schopen vystřelit 6–12 krát za minutu. Čas potřebný pro nabití PNZ pro další výstřel je pouze 5 s, což takové množství energie nemůže být za tak krátký čas dostupné. Proto musí být PNZ schopen uskladnit dostatek energie pro všech 6–12 výstřelů za minutu. Pro poskytnutí velkého množství energie lze brát v úvahu kapacitorové banky, nebo kompulzátory. V kapitole 4 byla také zmínka o bateriích a homopolárních generátorech. Nejsou však schopné dodat dostatečné množství energie za tak krátký čas, proto se musí přidat indukční komprese energie. Tato metoda je problematická, a proto se zatím nevyužívá.

Je zřejmé, že s rostoucím množstvím energie, rostou rozměry, hmotnost a cena PNZ. Kapacitorová banka schopná dodat takové množství energie k pokrytí 6–12 výstřelů za minutu, by zabrala plochu o rozměrech několik desítek metrů čtverečných a vážila by

několik stovek tun. Pro mobilní vozidla zcela nepoužitelné, ale pro bitevní lodě s velkým skladovacím prostorem by zde možnost byla.

Další možností je využití kompulzátorů (kompenzovaných pulzních alternátorů). Lze je uspořádat v protiběžných párech pro minimalizování síly reakce točivého momentu (gyroskopického efektu). Tento efekt by byl nepodstatný u bitevních lodí vážících desítky tisíc tun, zatímco u lehčích vozidel by to byl velký problém. Jak bylo zmíněno v kapitole 4, je nutné v intervalu mezi výstřely EM Railgunu obnovit otáčky pulzního alternátoru pomocí elektrického motoru. [18] Tím však vzrůstají rozměry a hmotnost soustrojí. Ve zdroji [18] se zabývají návrhem systému, schopného dodat potřebnou energii pro EM Railgun s frekvencí 6–12 výstřelů za minutu. Takovýto systém, obsahující pulzní alternátory, motory, převodovky a spojky, by vážil klidně i víc jak sto tun. Problematika rozměrů a hmotnosti PNZ je tedy jedním z největších problémů, které se musí řešit.

5.1.4 Bodové svaření projektilu s kolejnicemi

Jedním z dalších hlavních problémů je svaření projektilu s kolejnicemi důsledkem velmi rychle uvolněné energie, která se částečně přemění na teplo kvůli snaze urychlit projektil. Ke snížení pravděpodobnosti tohoto jevu, obsahuje EM Railgun injektor, který mechanicky urychlí projektil, tím mu udělí počáteční rychlost předtím, než se dostane k vodivým kolejnicím.

5.1.5 Navádění střel

Jestliže má být EM Railgun schopen zasáhnout pohybující se cíl na více než 300 kilometrů, bude zapotřebí naváděcího systému implementovaného do projektilu pro navedení k jeho cíli. Jakákoliv elektronika v projektilu musí během výstřelu vydržet přetížení až 40 000g, což v současné době s technickými prostředky není možné. [18] Ve zdroji [19] se zabývají tímto problémem, kde se povedlo při ústřední rychlosti 170 m/s přenést signál z vystřeleného projektilu. Elektronika vydržela přetížení blížící se 20 000g. Do budoucna se plánují další testy při vyšších ústředních rychlostech.

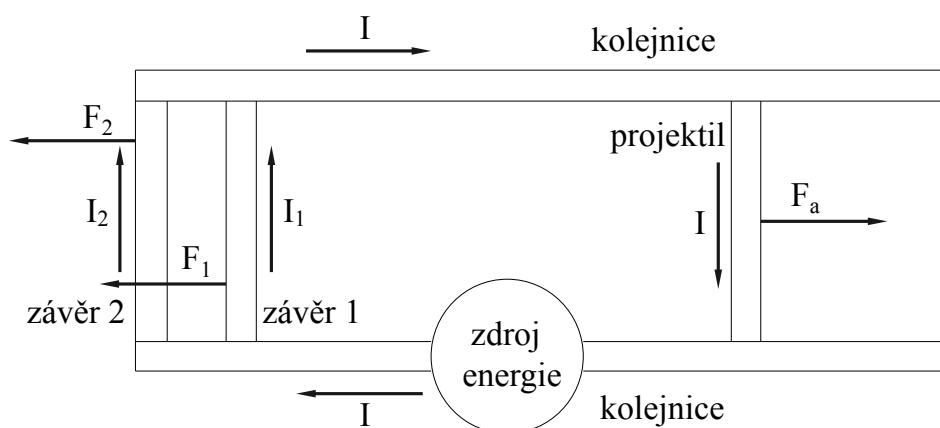
5.1.6 Systém chlazení

Další záležitostí, která se musí řešit, je systém chlazení. U většiny laboratorních experimentů na EM Railgunech se provádí testy po dobu jednoho výstřelu, a nemusí se tak řešit jeho chlazení. Pro praktické využití musí být EM Railgun schopen střílet s frekvencí 6–12 projektilů za minutu. Zde už bude zapotřebí chladicího systému, který by předcházela zvýšení teploty hlavně na hodnotu, která by nenávratně poškodila kolejnice a izolátory. Bylo by zapotřebí systému pohánějícího chladicí kapalinu, jenž by procházela kanály v kolejnicích. [6]

5.2 Výhody

5.2.1 Zpětný ráz

U konvenčních zbraní vzniká důsledkem vznícení střelného prachu síla, která tlačí hlavě se závěrem ve směru, jenž je opačný ke směru vystřeleného projektilu. Síla zpětného rázu roste s palebnou silou zbraně. U EM Railgunu je situace podobná, ale s tím rozdílem, že zpětný ráz netvoří tlak plynu, ale magnetická síla, která tlačí kolejnice s pevným závěrem v protisměru pohybujícího se projektilu. [20] Ve zdroji [20] je teoreticky popsáno chování zpětného rázu při pevně fixovaném závěru a uvádí, že jeho síla není nezbytně rovna síle urychlující projektil. Dále popisuje chování volného závěru, kde je síla zpětného rázu nulová. Poslední metodou je kombinace pevného a pohyblivého závěru, kde je síla zpětného rázu mezi hodnotami předešlých postupů.



Obrázek 5.3: Ukázka kombinované metody s rozložením jednotlivých sil mezi závěry hlavně a projektillem. [Převzato z [20]]

5.2.2 Ústřední rychlost

Za jednu z největších výhod lze brát ústřední rychlost EM Railgunu. U konvenčních zbraní, kde je projektil urychlován pomocí tlaku plynu vyvolaného explozí v hlavni, nepřesahují ústřední rychlosti 2000 m/s. S EM Railgunem lze dosáhnout rychlostí nad 3000 m/s. Bylo experimentálně dokázáno, že EM Railgun urychlil malý projektil o hmotnosti 5–10 g na rychlost 6–7 km/s. Takovéto ústřední rychlosti výrazně zvyšují průraznost projektilu. [21]

5.2.3 Dostřel EM Railgunu

Se zvyšující se ústřední rychlostí, u čím dál výkonnějších EM Railgunů, se zvyšuje i jejich dostřel. Například projektil o hmotnosti 60 kg s rychlostí 2,5 km/s (Mach 7,3) při úhlu

náměru EM Railgunu 52° (úhel náměru je nastaven tak, aby EM Railgun dosáhl maximálního dostřelu), může doletět na vzdálenost 400 km během 6 minut. [21] V porovnání s konvenčními děly je dostřel EM Railgunu 10–20 krát větší.

Některé výzkumy se zabývají možnostmi vystřelení projektilu, nebo transport družic a objektů na LEO. V dnešní době je stále vlivem technologických omezení maximální ústřevá rychlost kolem 6 km/s a vyžadovaná rychlost pro vystřelení objektů na LEO je 7,8 km/s. Pro aerodynamicky optimalizované projektily je úbytek rychlosti z důvodu gravitace a odporu vzduchu stanoven na 2,8 km/s. Celková rychlost pro dopravení objektu na LEO je stanovena na 10,6 km/s, a tak rozdíl mezi požadovanou rychlostí a rychlostí výstřelu EM Railgunu musí být dorovnán raketovým pohonem. Studie ukázaly, že projektil poháněný malým raketovým pohonem o váze menší než 50 kg je schopný dopravit náklad o hmotnosti 5 kg na LEO i navzdory vysokému zrychlení v hlavni a obrovskému teple v prvních deseti sekundách při výstupu. [22]

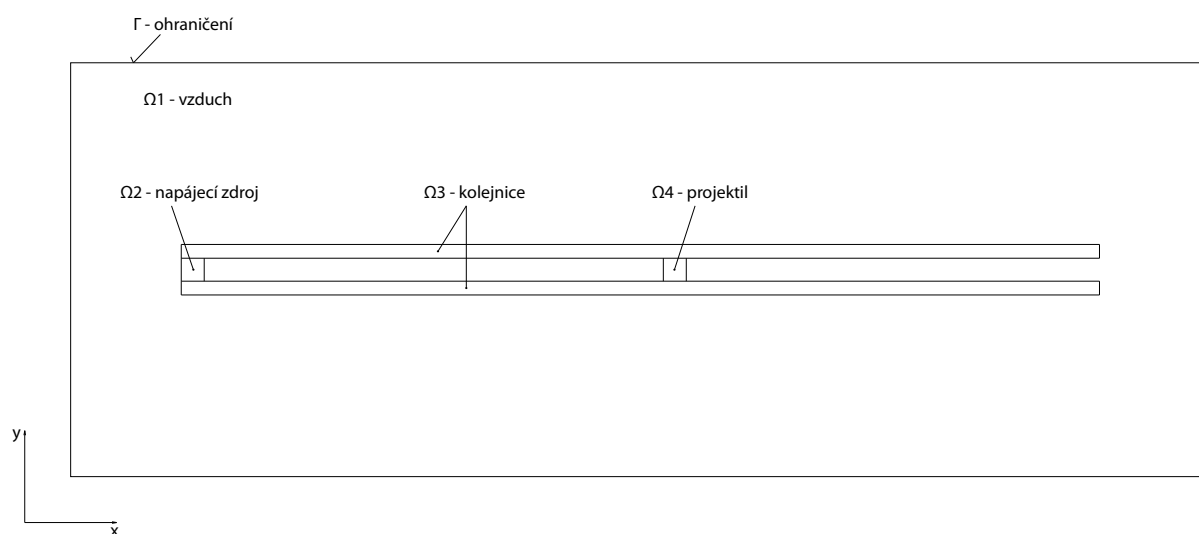
5.2.4 Bezpečnost obsluhy

Tento bod je spekulativní. Jak již bylo zmíněno v kapitole 2, v EM Railgunu není střelný prach, jenž by uvnitř hlavně přivodil předčasnou explozi. Místo toho vznikají v hlavni velké magnetické síly, které musí kolejnice a izolátory vydržet, aniž by se zdeformovaly. Za další výhodu lze považovat, že projektily díky své ohromné kinetické energii nepotřebují nést explozivní nálože ke zničení cíle. Osádka se tak při manipulaci s municí nemusí bát o své zdraví a muniční sklad při bombardování nehrozí svou detonací.

Kapitola 6

Matematický model

Abychom získali představu o řešené úloze, musíme nejdříve formulovat matematický model. V programu Comsol Multiphysics byl vytvořen 2D model EM Railgunu, jenž je umístěn do kartézské soustavy souřadnic v pohledu ze shora. Oblast Ω_1 znázorňuje okolní prostředí (vzduch) s hranicí Γ . Oblast Ω_2 značí PNZ a s oblastí Ω_4 (projektil) jsou umístěny mezi oblastí Ω_3 (kolejnice). PNZ simuluje proudový impuls s amplitudou řádově jednotek kiloampér s dobou trvání impulsu jednotek milisekund. Postupy, parametry a výsledky simulace jsou shrnuty v podkapitole 7.2.



Obrázek 6.1: Znázornění oblastí 2D modelu EM Railgunu

Vycházíme z I. a II. Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru pro nestacionární magnetické pole:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (6.1)$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6.2)$$

Pro nízké frekvence lze zanedbat posuvný proud $\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ bez vlivu na výsledek.

I. Maxwellovu rovnici upravíme do tvaru:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \mathbf{J} \quad (6.3)$$

Proudovou hustotu lze rozložit na složky:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \operatorname{rot} \mathbf{J}_v + \operatorname{rot} \mathbf{J}^e \quad (6.4)$$

Kde \mathbf{J}^e reprezentuje externí proudovou hustotu a \mathbf{J}_v daná časovou derivací magnetického pole, vyjadřuje transformační složku vířivých proudů.

Do Maxwellových rovnic dosadíme materiálové vztahy:

$$\mathbf{J} = \gamma \mathbf{E} \quad (6.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6.6)$$

Kde μ je materiálová konstanta, poněvadž její hodnota závisí na vlastnostech daného materiálu. Jelikož materiály, udané v této práci, mají $\mu_r = 1$, považujeme μ za konstantu.

Dosadíme vztah (6.5) do rovnice (6.4):

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = \gamma \operatorname{rot} \mathbf{E} + \operatorname{rot} \mathbf{J}^e \quad (6.7)$$

Do rovnice (6.7) dosadíme II. Maxwellovu rovnici v diferenciálním tvaru a obdržíme:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \operatorname{rot} \mathbf{J}^e \quad (6.8)$$

Pomocí vztahu (6.6) dostáváme:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = -\gamma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \operatorname{rot} \mathbf{J}^e \quad (6.9)$$

Pro lineární prostředí platí:

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) + \gamma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = \operatorname{rot} \mathbf{J}^e \quad (6.10)$$

Nyní můžeme pomocí vztahu (6.10) definovat oblasti Ω a hranici Γ :

Jelikož je proudová hustota \mathbf{J} rozložena na ploše x-y a vektor intenzity magnetického pole \mathbf{H} směřuje v ose z, dostáváme vztahy:

Pro oblast Ω_1 :

$$\operatorname{rot}(\operatorname{rot} \mathbf{H}) = 0 \quad (6.11)$$

Pro oblast Ω_2 :

$$\text{rot}(\text{rot}\mathbf{H}) + \gamma\mu\frac{\partial\mathbf{H}_z}{\partial t} = \text{rot}\mathbf{J}^e \quad (6.12)$$

Kde vektor \mathbf{H} má v kartézské soustavě souřadnic složky (H_x, H_y, H_z) , a H_z tedy reprezentuje jen zetovou složku: $H_z = (0, 0, H_z)$. Externí proudová hustota \mathbf{J}^e má pouze složku \mathbf{J}_y^e , pomocí které určíme směr toku proudu. Integrací proudové hustoty přes plochu S_1 (průřez vodiče) dostáváme velikost proudu I_{S_1} .

$$\int_{S_1} J_y dS = I_{S_1} \quad (6.13)$$

Pro oblast Ω_3 :

$$\text{rot}(\text{rot}\mathbf{H}) + \gamma\mu\frac{\partial\mathbf{H}_z}{\partial t} = 0 \quad (6.14)$$

Pro oblast Ω_4 :

$$\text{rot}(\text{rot}\mathbf{H}) + \gamma\mu\frac{\partial\mathbf{H}_z}{\partial t} = 0 \quad (6.15)$$

Pro hranici Γ :

$$H_z = 0 \quad (6.16)$$

V magnetickém poli s indukcí \mathbf{B} dostáváme vztah pro sílu \mathbf{F}_m působící na vodivou prostorovou oblast s objemem \mathbf{V} a s proudovou hustotou \mathbf{J} .

$$\mathbf{F}_m = \int_{\mathbf{V}} [\mathbf{J} \times \mathbf{B}] dV \quad (6.17)$$

Vzorec lze přepsat do 2D prostoru na 1m délky:

$$\mathbf{F}_m = \int_S [\mathbf{J} \times \mathbf{B}] dS \quad (6.18)$$

Vztah je obecný, neboť platí pro kolejnice a projektil libovolného průřezu, kde \mathbf{F}_m je výsledná magnetická síla na element dS protékany proudem \mathbf{I} .

Kapitola 7

Simulace PNZ a EM Railgunu

7.1 Parametry a simulace PNZ v programu PSpice

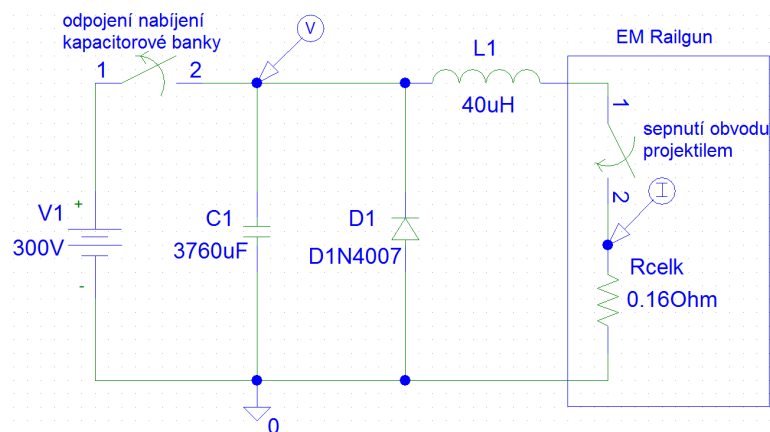
V programu PSpice bylo vytvořeno schéma pulzního napájecího zdroje se systémem kapacitorové banky, které je vidět na obrázku (7.1). Funkce jednotlivých prvků je následující. C_1 značí kapacitorovou banku do níž uskladňujeme energii, kterou následně vybíjíme přes kolejnice a projektil EM Railgunu. Kapacitorová banka se skládá z osmi $470\mu\text{F}$ kondenzátorů na napětí 400 V. Kondenzátory jsou spojeny paralelně pro dosažení celkové kapacity $3760\mu\text{F}$. Do budoucna lze kapacitorovou banku rozšířit o další kondenzátory, tím získáme větší energii. Celková uskladněná energie při napětí na kondenzátorech 300 V činí podle vzorce:

$$E = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2}3760 \cdot 10^{-6} \cdot 300^2 = 169,2 \text{ [J]} \quad (7.1)$$

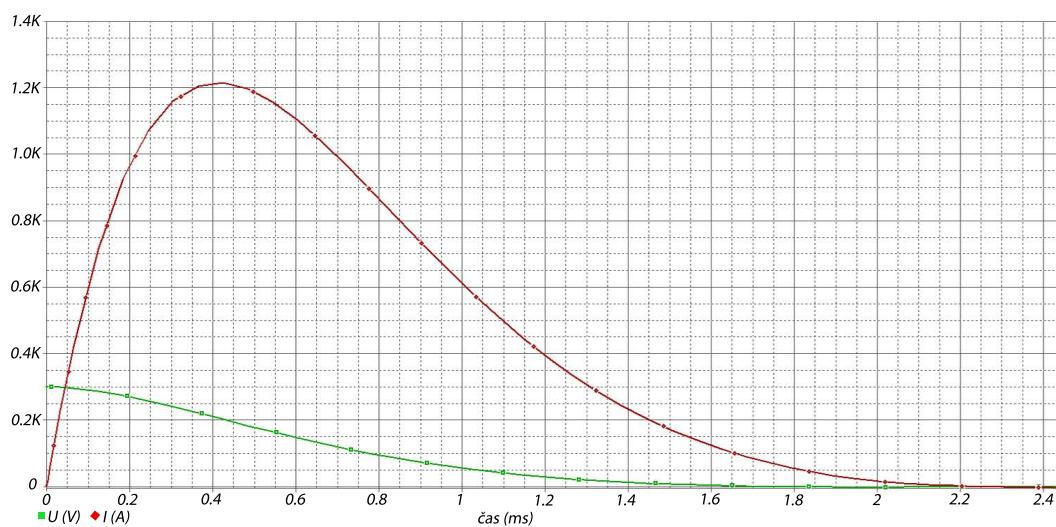
Uskladněnou energii v kapacitorové bance vybíjíme přes odpor R_{celk} , který značí celkový odpor systému, zahrnující odpor kolejnic a projektilu. Správnou volbou indukčnosti L_1 lze upravit proudový impuls tak, aby jeho nárůst byl plynulý s delší dobou trvání. Jestliže by impuls netrval dostatečně dlouho, projektil by se díky své setrvačnosti nemusel pohnout. D_1 má zde funkci jako ochranná dioda, chrání kapacitorovou banku před oscilací proudu. V_1 charakterizuje zdroj stejnosměrného napětí (násobiče napětí), který je schematicky znázorněn na obrázku (7.3). Násobič napětí nám tedy nabíjí kapacitorovou banku na napětí 300 V přes odpor $5\text{ k}\Omega$. Dobu nabití lze stanovit jako 4–6ti násobek časové konstanty, která je určena velikostí tohoto odporu a kapacitorové banky a činí:

$$\tau = R \cdot C = 5 \cdot 10^3 \cdot 3670 \cdot 10^{-6} = 18,35 \text{ [s]} \quad (7.2)$$

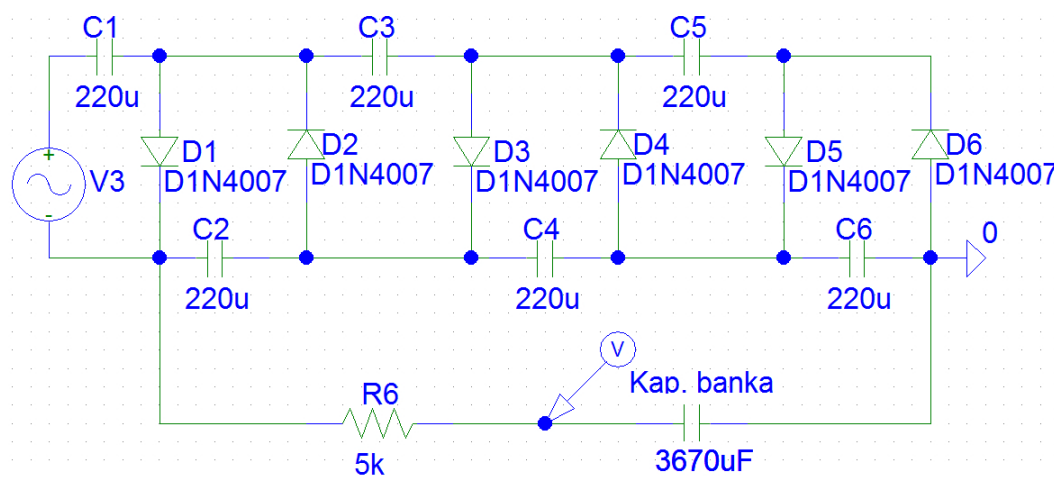
Dobu nabití kapacitorové banky lze tedy stanovit přibližně na 120 s, kdy napětí dosáhne 300 V, jak znázorňuje obrázek (7.4). Spínače na obrázku (7.1) simulují přechodový děj, jenž je ukázán na obrázku (7.2), kde je vidět proudový impuls spolu s napětím na kapacitorové bance. Proudový impuls by měl při těchto parametrech maximální amplitudu 1,22 kA v čase 0,4 ms a dobu impulsu 2,2 ms.



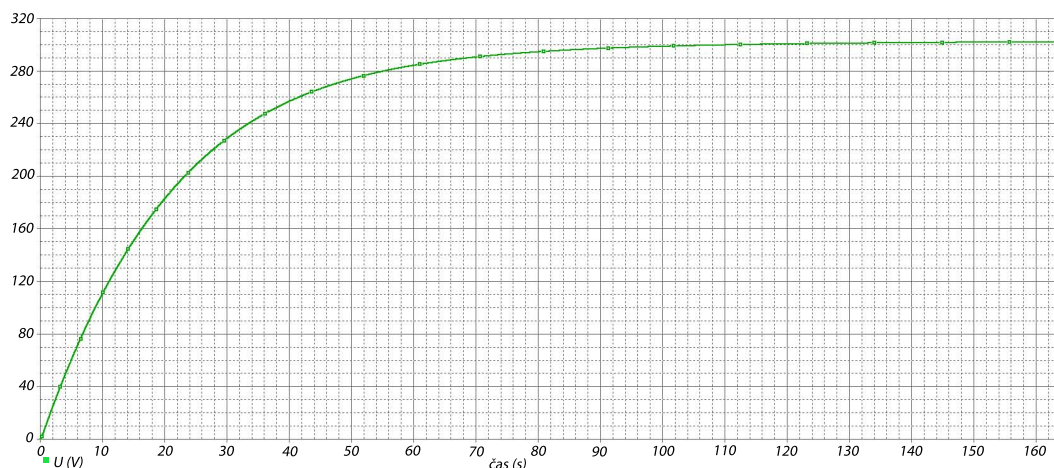
Obrázek 7.1: Schéma přechodového děje při vybití kapacitorové banky do EM Railgunu.



Obrázek 7.2: Grafické znázornění proudového impulsu.



Obrázek 7.3: Schéma násobiče napětí.



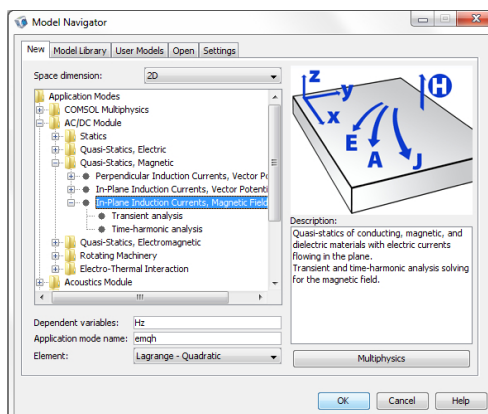
Obrázek 7.4: Grafické znázornění nabití kapacitorové banky.

7.2 Parametry a simulace EM Railgunu v programu Comsol Multiphysics

COMSOL Multiphysics je programem určeným pro vědecké práce se specializovaným zaměřením, který nám dovoluje řešit fyzikální problémy v oblastech elektromagnetismu, akustiky, termodynamiky a mechaniky. Umožňuje tak modelování a simulaci fyzikálních procesů popsaných parciálními diferenciálními rovnicemi (PDE) s následným řešením metodou konečných prvků (MKP).

7.2.1 Postup modelování a simulace EM Railgunu

V úvodní obrazovce programu Comsol bylo vybráno 2D zobrazení pro AC/DC modul s přechodovým dějem pro magnetické pole, kde máme rozložení proudové hustoty na ploše x–y a intenzita magnetického pole je ve směru osy z. Takovéto zobrazení se nám hodí právě pro matematický model v kapitole 6.

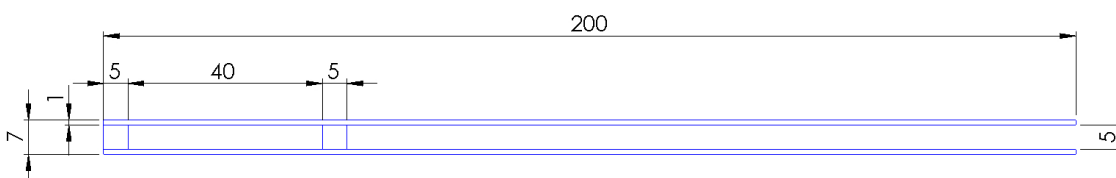


Obrázek 7.5: Režim volby problematiky.

V několika krocích shrnu postup řešení problému:

Preprocessing (předzpracování):

- Nejdříve jsme vytvořili geometrii problému, kde pro naše řešení stačí znázornit EM Railgun pouze jako kolejnice s PNZ a projektilem mezi nimi. Rozměry řešeného modelu jsou uvedeny na obrázku (7.6).



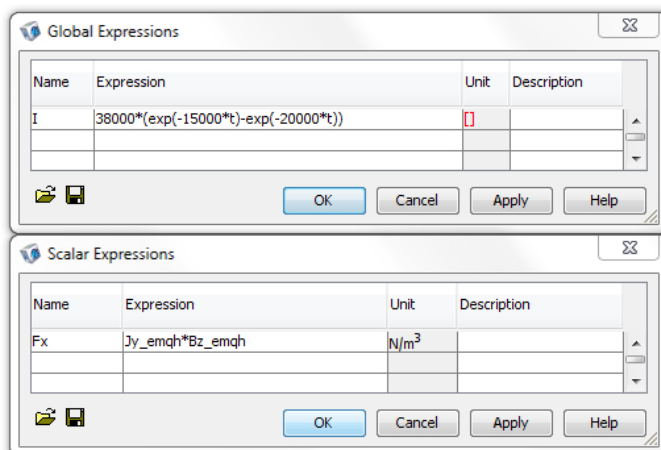
Obrázek 7.6: Rozměry EM Railgunu v milimetrech.

- K řešení naší úlohy je nadále zapotřebí nadefinovat konstanty (průřez projektilu, jeho objem a hmotnost, dále hustotu a elektrickou vodivost hliníku). Zadané parametry na obrázku (7.7) se později využijí pro další výpočty.

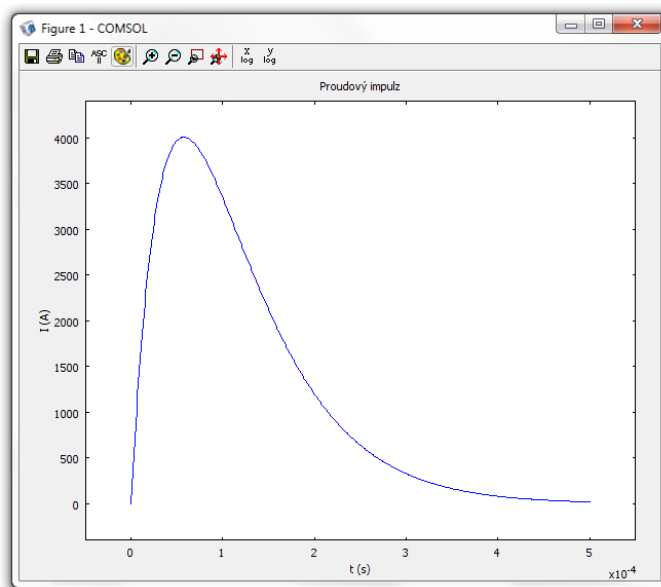
Name	Expression	Value	Description
S	0.005*0.005	2.5e-5	průřez projektilu
V	0.005^3[m^3]	(1.25e-7)[m	Objem projektilu
rho_Al	2700[kg/m^3]	2700[kg/m^3]	hustota hliníku
M	rho_Al*V	(3.375e-4)[k	hmotnost projektilu
k	100	100	konstanta
sigma_Al	1/2.65e-8[ohm*m]	3.773585e7[elektrická vodivost
w	0.005[m]	0.005[m]	vzdálenost kolejnic

Obrázek 7.7: Tabulka zadaných konstant.

- Pro simulaci proudového impulsu PNZ, jsme použili vztah, uvedený na obrázku (7.8) nahoře, vystihující křivku na obrázku (7.9). Impulz má amplitudu 4 kA, a odpovídá tak změřené křivce na obrázku (8.8), kde jsme neuvažovali přídatnou indukčnost $40 \mu\text{F}$ a v praktické části vycházely lepší výsledky. Pro výpočet magnetické síly v projektilu ve směru osy x, musíme podle vztahu pro Lorentzovu sílu, napsat rovnici zobrazenou na obrázku (7.8) dole. Jak jsem poznamenal v kapitole 6, vektor proudové hustoty \mathbf{J} je kolmý na vektor magnetické indukce \mathbf{B} a spolu jsou kolmé na vektor magnetické síly \mathbf{F}_m . Aby se vektor magnetické síly zobrazil v ose x, musí vektor proudové hustoty směřovat v ose y a vektor magnetické indukce v ose z.

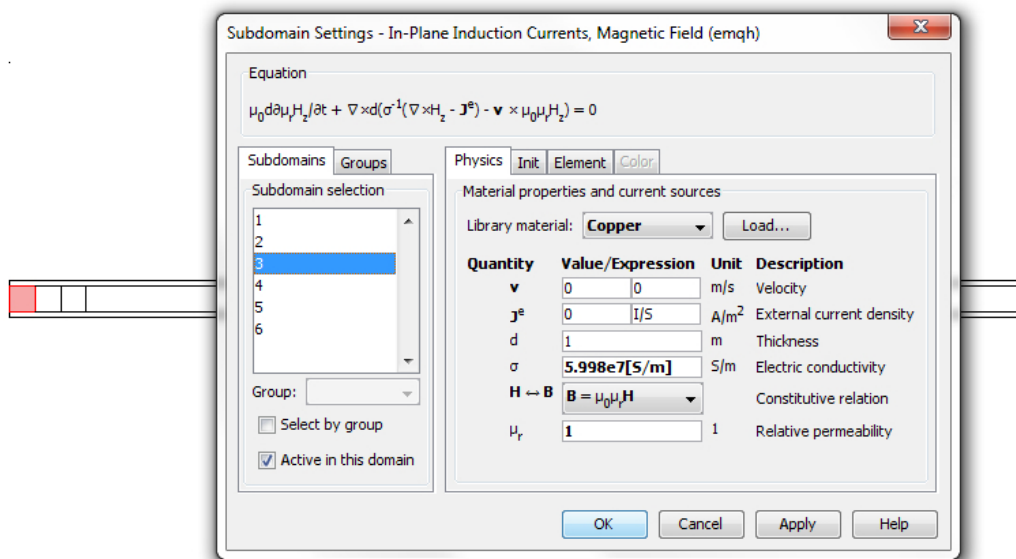


Obrázek 7.8: Definice proudového impulsu a stanovení rovnice magnetické síly.



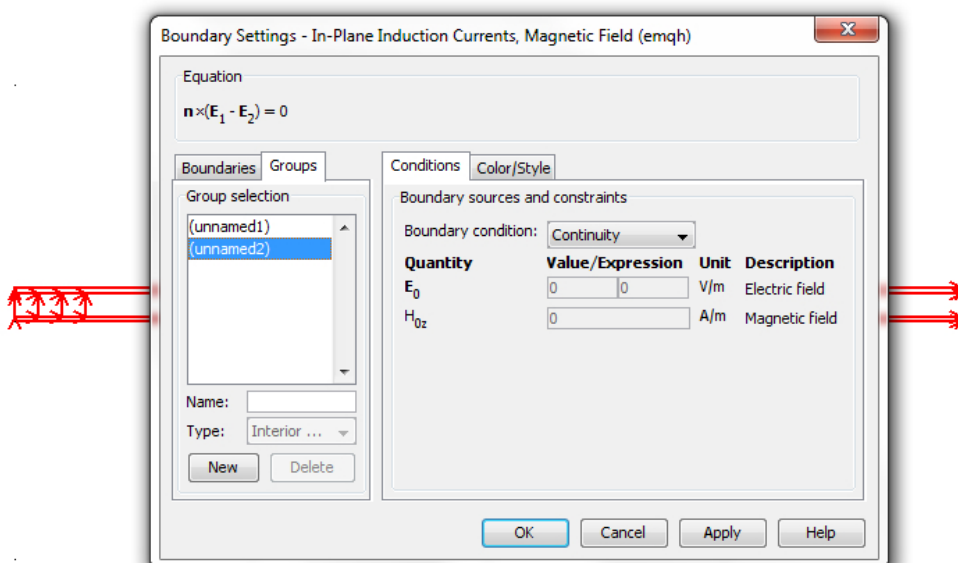
Obrázek 7.9: Proudový impuls.

- Nyní musíme nadefinovat domény, které nám charakterizují kolejnice, PNZ, projektil a prostředí, v němž se nacházejí. Na obrázku (7.10) můžete vidět nadefinování PNZ, jenž byl zvolen jako měděný vodič s relativní permeabilitou $\mu_r = 1$ a elektrickou vodivostí $\gamma = 5,99 \cdot 10^7$ S/m (v Comsolu značena σ). Do položky externí proudová hustota, byla vložena do souřadnice y proudová hustota vypočtená z nadefinovaného proudu a konstanty pro průřez (zvolil jsem stejný, jako má projektil). Domény 2, 4 charakterizují kolejnice, proto byla zvolena měď jako jejich materiál, tím vodivost a relativní permeabilita zůstávají stejné. Doména 6 znázorňuje projektil z hliníku. Nakonec domény 1, 5 charakterizují prostředí, v němž se EM Railgun nachází (vzduch). Jednotlivé materiály lze vybrat v knihovně materiálů, nebo přímo zadat jejich parametry do jednotlivých položek.



Obrázek 7.10: Tabulka domén.

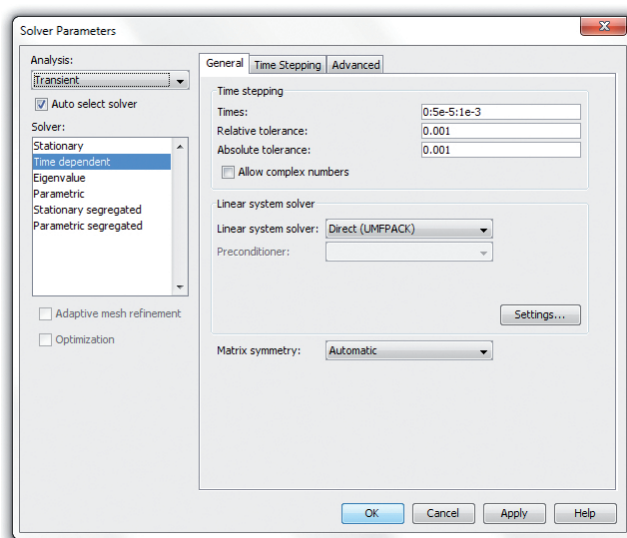
- Pro všechny elektricky vodivé domény byla vybrána podmínka kontinuity a pro hraniční oblast byla použita elektrická izolace $H_z=0$.



Obrázek 7.11: Tabulka okrajových podmínek.

Solution (řešení):

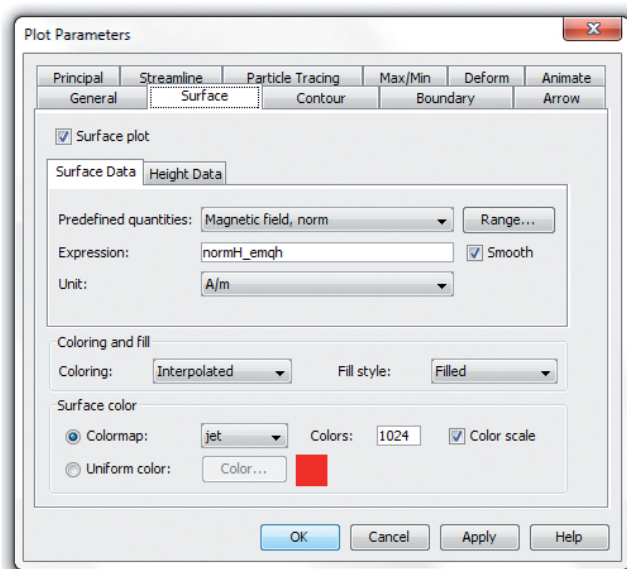
- Použijeme transientní typ analýzy s časem řešení $\epsilon(0; 1 \cdot 10^{-3})$ s s krokem $5 \cdot 10^{-5}$ s, jak je vidět na obrázku (7.12). Jestliže máme vše nastavené, můžeme spustit simulaci pro vyřešení naší problematiky.



Obrázek 7.12: Tabulka řešení.

PostProcessing (po zpracování):

- Po vyřešení úlohy se nám nabízí několik variant interpretace výsledků. V našem případě použijeme plošný diagram pro znázornění proudové hustoty a intenzity magnetického pole, šipky pro směr a velikost magnetických sil. Na obrázku (7.13) je ukázán výběr interpretace výsledků (plošný diagram intenzity magnetického pole).

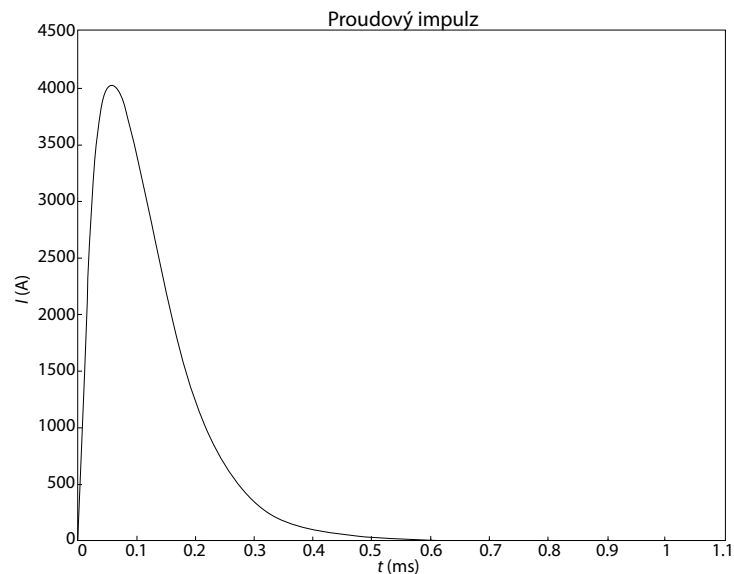


Obrázek 7.13: Tabulka nastavení výstupů simulace.

- Dále jsme vynesli proudový impulz, magnetickou sílu působící na projektil a jeho zrychlení v závislosti na čase. Všechny diagramy a grafy jsou ukázány a vysvětleny v podkapitole 7.2.2 Výsledky simulace.

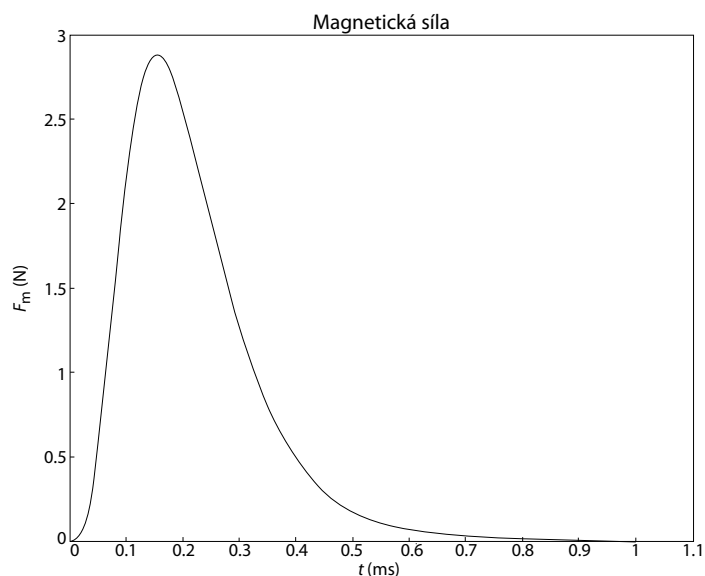
7.2.2 Výsledky simulace

Výsledný proudový impuls na obrázku (7.14) je nasimulován podle funkce zadané na obrázku (7.8). Impuls byl zvolen tak, aby přibližně odpovídal svojí velikostí a dobou trvání naměřené křivce v podkapitole 8.2 praktické části.



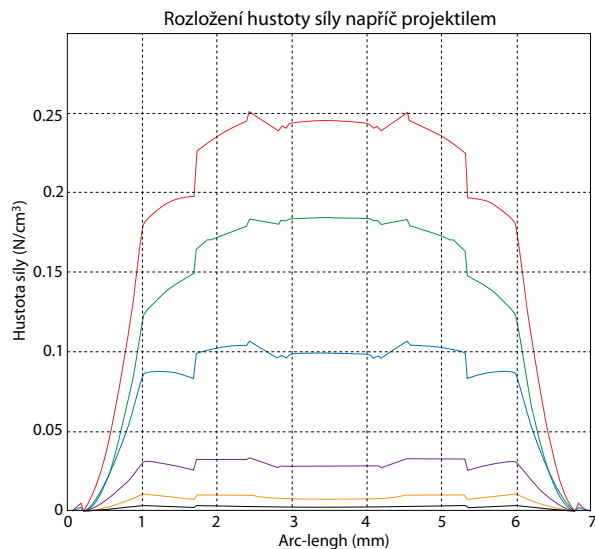
Obrázek 7.14: Proudový impuls.

Na obrázku (7.15) je vidět průběh magnetické síly F_m působící na projektil v závislosti na čase, která je dána integrací vektorového součinu proudové hustoty \mathbf{J} a magnetické indukce \mathbf{B} přes objem V : $\mathbf{F}_m = \int_V [\mathbf{J} \times \mathbf{B}] dV$. Magnetická síla vychází v jednotkách Newtonů a řádově přibližně odpovídá orientačně vypočteným hodnotám v praktické části.



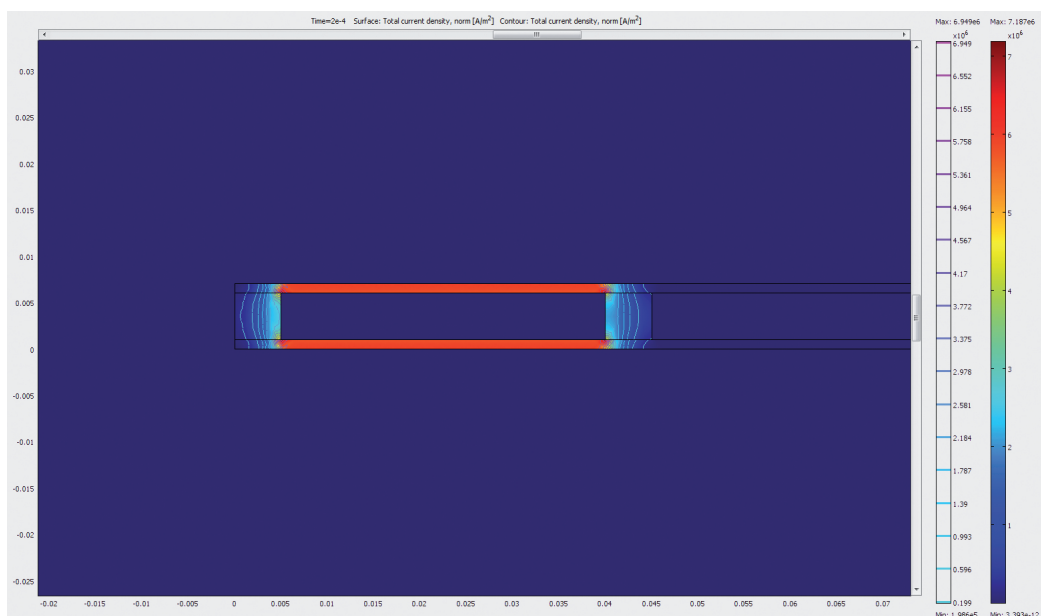
Obrázek 7.15: Magnetická síla působící na projektil.

Na obrázku (7.16) je vidět rozložení hustoty síly napříč projektilem, působící ve směru výstřelu. Na ose x si lze představit řez kolejnicí v rozmezí (0–1)mm, řez projektilem v (1–6) mm a řez druhou kolejnicí v (7–8) mm. Jelikož je rozložení magnetické síly stanoveno na jednotku objemu, dá se mluvit o hustotě a její jednotky jsou N/cm^3 .



Obrázek 7.16: Rozložení hustoty síly napříč projektilem.

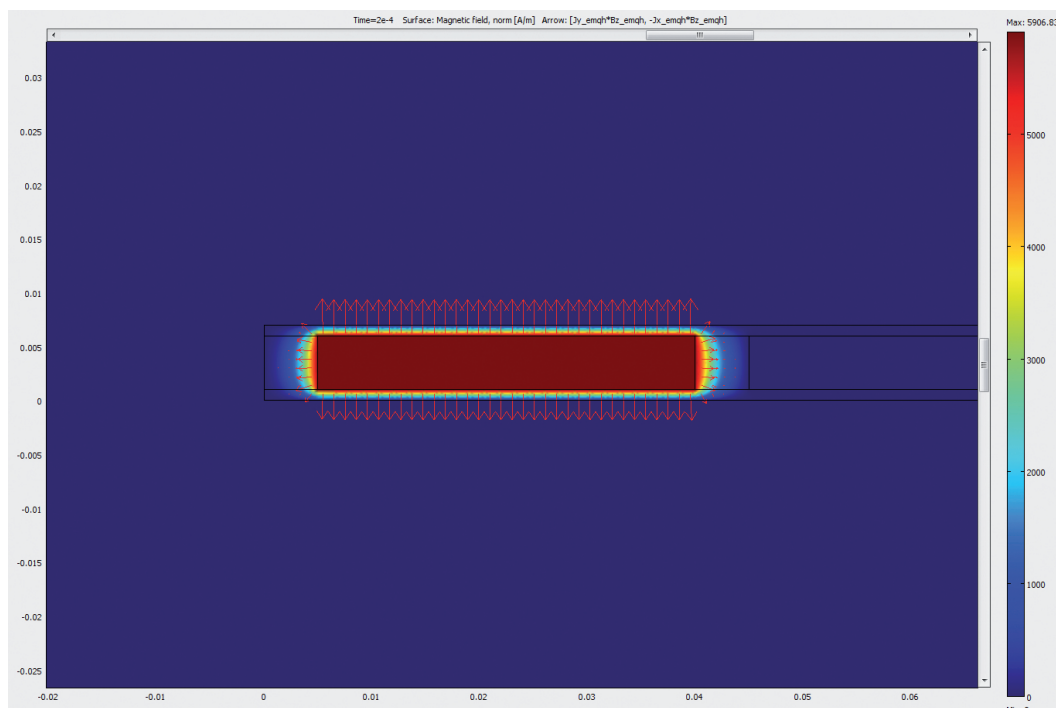
Na obrázku (7.17) je ukázáno rozložení proudové hustoty v EM Railgunu v čase $2 \cdot 10^{-4}$ s, v němž má proudový impulz maximální hodnotu. Proudová hustota je dána závislostí velikosti proudu na průřez vodiče, jímž protéká. Největší hustota proudu bude v kolejnicích (mají nejmenší průřez) mezi projektilem a PNZ (červená plocha diagramu).



Obrázek 7.17: Rozložení proudové hustoty.

Na obrázku (7.18) je znázorněno pomocí šipek rozložení hustoty magnetické síly v EM Railgunu v čase $2 \cdot 10^{-4}$ s, kde má proudový impuls, a tím pádem i magnetické síly největší hodnoty. Z diagramu je zřejmé, že na kolejnice také působí magnetické síly a jsou od sebe odpuzovány, proto musí být při praktických pokusech řádně upevněny. To platí i pro závěr hlavně EM Railgunu (v našem případě tuto roli hraje zdroj), na který působí magnetická síla v opačném směru než na projektil. Jak je zmíněno v podkapitole 5.2, síla působící na závěr hlavně se nemusí rovnat velikosti síly působící na projektil.

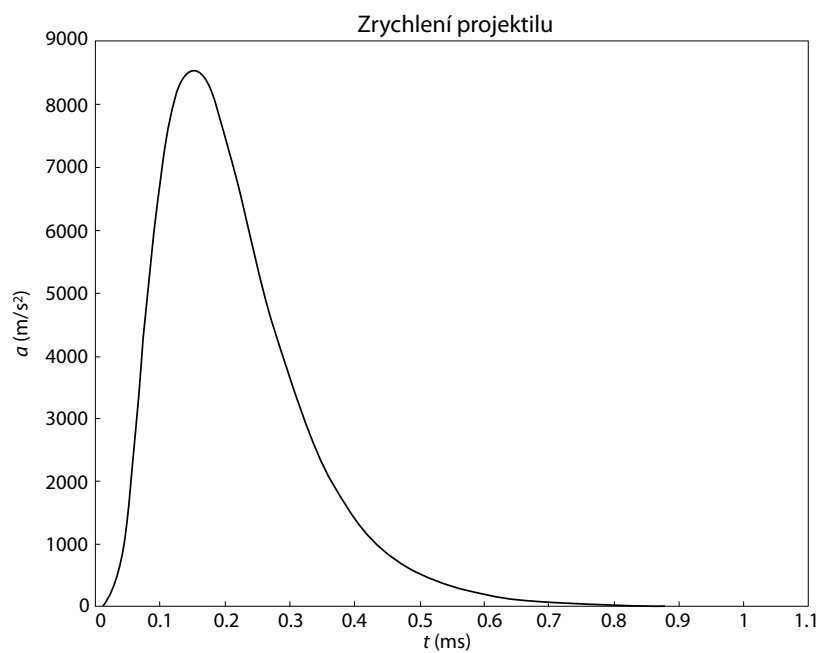
Plošný diagram znázorňuje rozložení intenzity magnetického pole, kde tmavě červená značí jeho největší intenzitu.



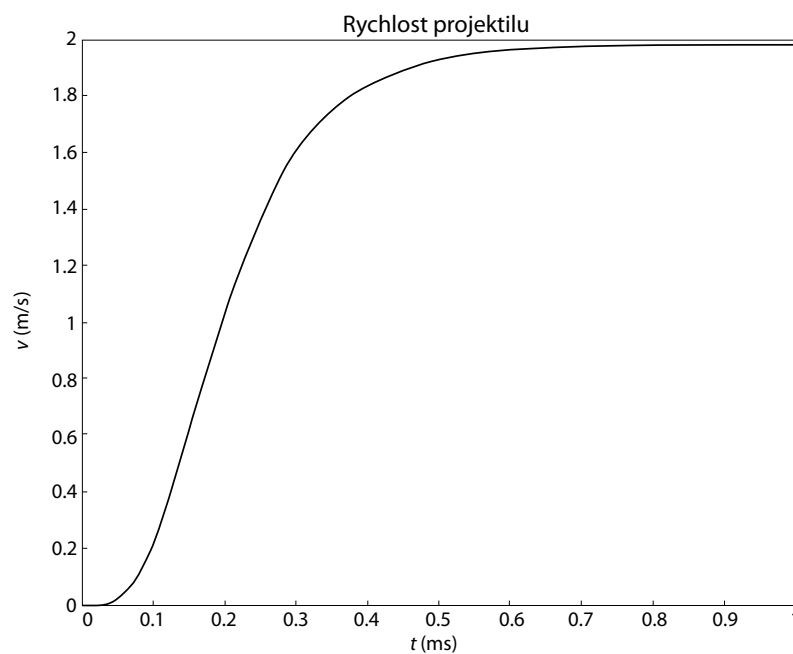
Obrázek 7.18: Rozložení intenzity mag. pole a hustoty mag. síly v EM Railgunu.

Na obrázcích (7.19) a (7.20) jsou vyneseny hodnoty zrychlení a rychlosti projektilu. Zrychlení je funkcí síly působící na projektil a hmotnosti projektilu: $a = F_m/m$. Platí tedy, čím menší je hmotnost projektilu, tím větší je jeho zrychlení, proto má projektil o hmotnosti 0,4 g tak velké zrychlení. Jelikož je zrychlení funkcí magnetické síly, odpovídá jeho křivka tvarově křivce magnetické síly.

Nakonec rychlost projektilu lze vypočítat ze zrychlení a časového úseku: $v = a \cdot t$. Vztah platí pro rovnoměrně zrychlený přímočarý pohyb, kde neuvažujeme počáteční rychlost projektilu, kterou by nám udělil injektor. Z grafu lze vyčíst, že rychlost projektilu za dobu 0.8 ms dosáhne 2 m/s. V praktické části je injektor nastaven tak, aby vsunul projektil mezi kolejnice a neudělil mu takovou počáteční rychlost, která by ovlivnila závěry stanovené v praktické části.



Obrázek 7.19: Zrychlení projektilu.



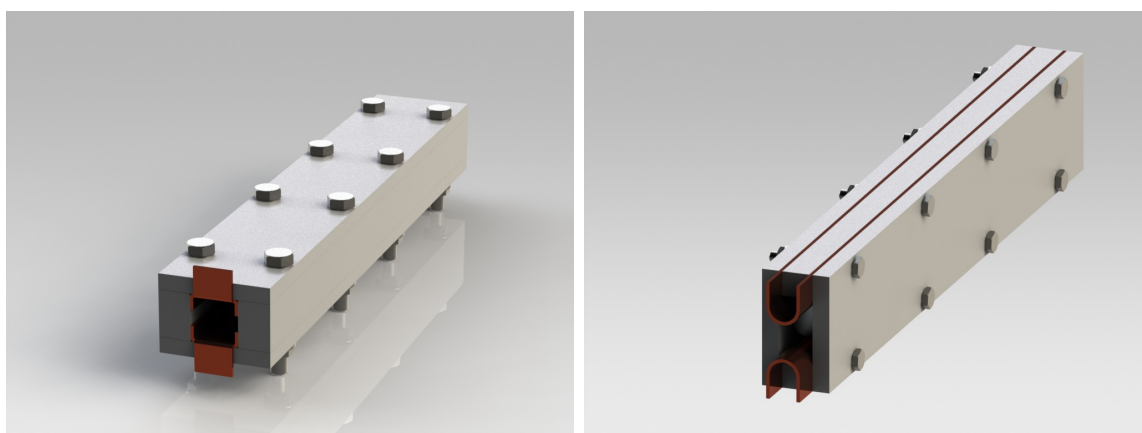
Obrázek 7.20: Rychlost projektilu.

Kapitola 8

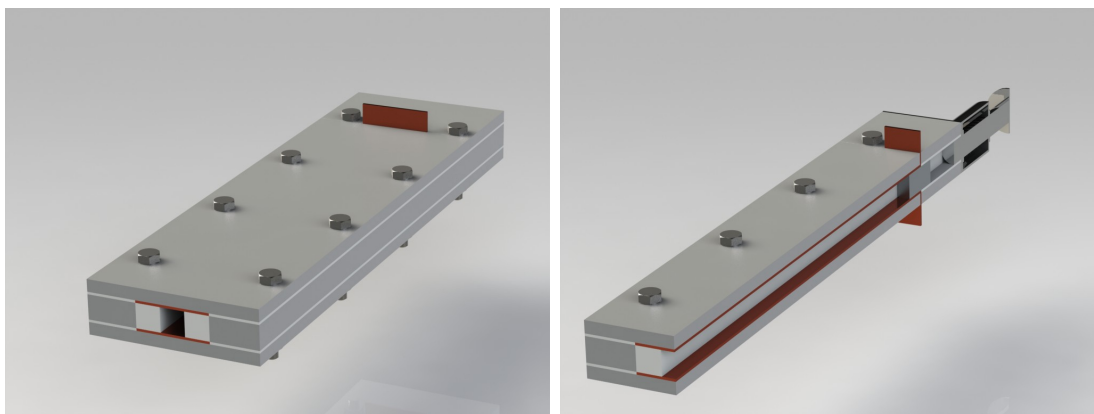
Praktická část

8.1 Parametry modelu EM Railgunu

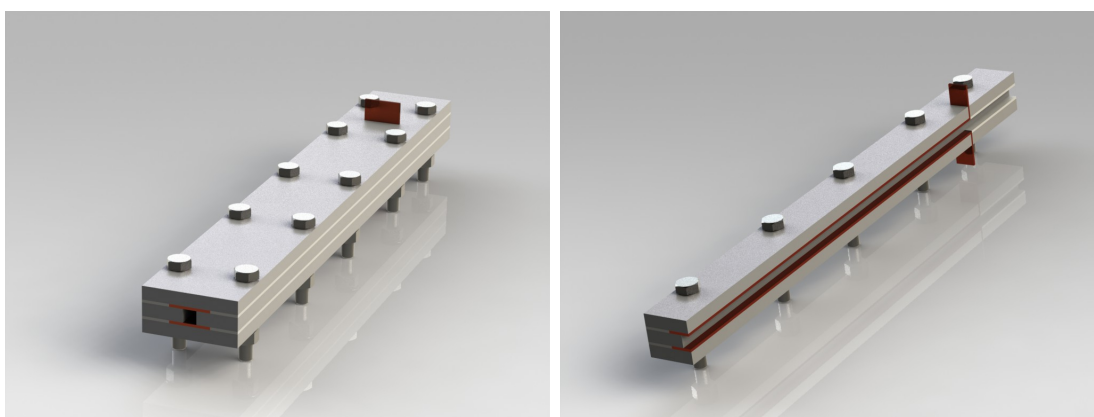
Pomocí 3D programu bylo vytvořeno několik předběžných návrhů modelu EM Railgunu, které můžete vidět na obrázcích (8.1) – (8.3). Vývody kolejnic jsou navrženy způsobem, dovolující snadné připojení PNZ. Od návrhů na obrázcích (8.1) bylo nakonec odstoupeno, jelikož vytvarování měděných plechů do tvarů U bylo náročné. Navíc na obrázku (8.1) vlevo, by část proudu procházela přes boky projektilu a snížilo by se nám tak působení magnetické síly na projektil. Na obrázku (8.1) vpravo by hustota proudu na přechodu mezi kolejnicemi a projektilem byla moc nízká. Model na obrázku (8.2) je již lépe navržen. Byly použity hranoly teflonu pro jeho dobré tepelné a kluzné vlastnosti a prodloužena hlaveň o nevodivou část pro urychlení projektilu před tím, než dosáhne vodivých kolejnic. Pro urychlení projektilu byl zvolen typ pružinového injektoru, který je vidět v řezu na obrázku (8.2). Všechny modely jsou navrženy pro projektil o průřezu 1 cm^2 . V posledním návrhu na obrázku (8.3) jsme zmenšili průřez projektilu na 5 mm^2 , a tím i jeho hmotnost, dále jsme zmenšili šířku kolejnic na polovinu a zvětšili tak jejich proudovou hustotu.



Obrázek 8.1: Předběžné varianty modelu.



Obrázek 8.2: Vylepšený model a jeho řez.



Obrázek 8.3: Upravený předešlý model a jeho řez.

Na zhotovení modelu se použily materiály Garolite G–10 (sklotextit), teflon a měděný plech tloušťky 1 mm.

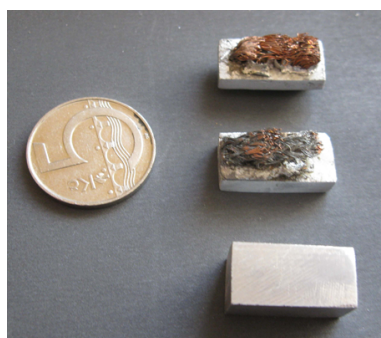
První Railgun, jako prototyp, byl vyroben podle modelu na obrázku (8.2) a jeho rozměry činí 240 x 75 x 22 mm (délka, šířka, výška). Sestava na obrázku vypadá celkem jednoduše, ale při výrobě v domácích podmínkách vyšlo najevo, jak je obtížné vytvořit přesnou vzdálenost mezi kolejnicemi po celé jejich délce tak, aby měl projektil s nimi dostatečný kontakt. Výrobek můžete vidět na obrázku (8.4) a projektily na obrázku (8.5).

Po testech na prototypu, které jsou uvedeny v podkapitole 8.3–Výsledky testů, byl vyroben další EM Railgun, odpovídající modelu na obrázku (8.3) a jeho rozměry činí 240 x 35 x 17 mm (délka, šířka, výška). Průřez projektilu byl zmenšen na 5 mm², a tím snížena jeho hmotnost. Výrobek a projektily jsou ukázány na obrázcích (8.6) a (8.7).

Obrázky (8.5) a (8.7) ukazují různé typy projektilů z hliníku. Jelikož nelze bez obráběcích strojů vyrobit přesné hranoly, které by měly dobrý kontakt s kolejnicemi, bylo nutné experimentovat. V podkapitole 4.2 byly popsány dva typy projektilů a rozhodl jsem se tak vyzkoušet projektil s kartáči, jak je ukázáno na těchto obrázcích.



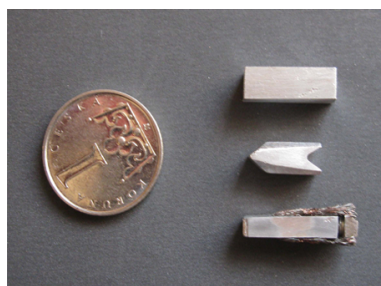
Obrázek 8.4: Prototyp EM Railgunu.



Obrázek 8.5: Projektil s průřezem 1 cm^2 a jeho modifikace.



Obrázek 8.6: Upravený EM Railgun.

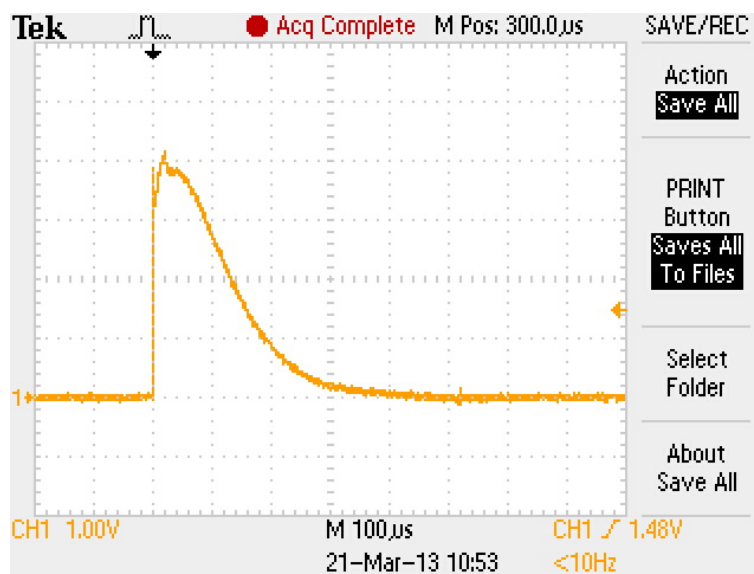


Obrázek 8.7: Projektil s průřezem 5 mm^2 a jeho modifikace.

8.2 Parametry PNZ

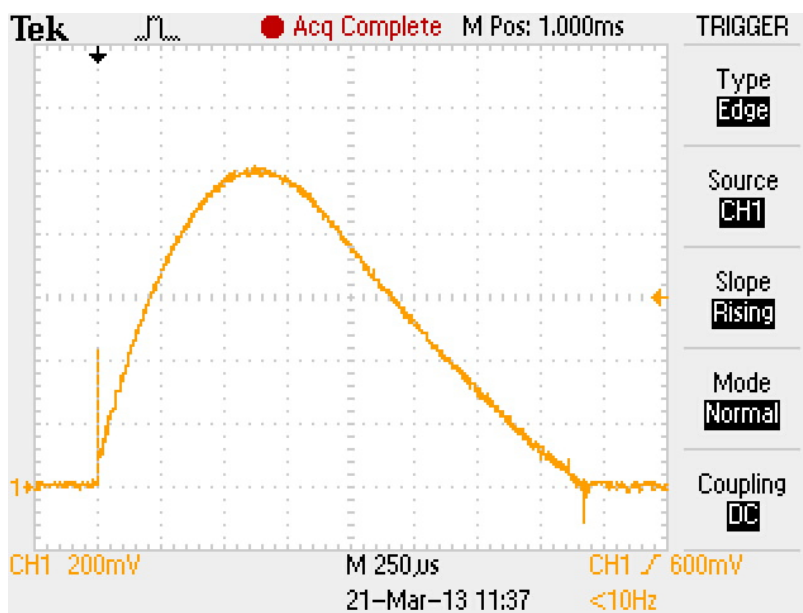
PNZ na bázi kapacitorové banky, se skládá z osmi $470\mu\text{F}$ kondenzátorů na 400 V zapojených paralelně. Dále obsahuje násobič napětí na 300 V, který nabíjí zmíněnou kapacitorovou banku. Byla zvolena velikost napětí 300 V z důvodu určité napěťové rezervy na kondenzátorech. Kapacitorovou banku lze do budoucna rozšířit o další paralelně zapojené kondenzátory s určitými úpravami pro její nabíjení a rychlé vybíjení. Schéma a popis jednotlivých prvků v obvodu PNZ jsou uvedeny v podkapitole 7.1–Parametry a simulace PNZ. Doba nabití kapacitorové banky odpovídá přibližně křivce na obrázku (7.4). Dále přikládám jednotlivé průběhy přechodových dějů, změřených na osciloskopu. Tyto křivky představují vybíjecí impulsy, které nám urychlují projektil.

Na obrázku (8.8) lze vidět charakteristický vybíjecí impuls. Lze vyčíst, že jeho doba trvání je přibližně $400\ \mu\text{s}$ ($100\ \mu\text{s}$ na dílek) a jelikož jsme měřili proudový impuls jako úbytek napětí na odporu o velikosti $1\ \text{m}\Omega$, pro zjištění špičky musíme impuls přepočítat, a činí tak přibližně $4\ \text{kA}$ ($1\ \text{V}$ na dílek, poté $4\ \text{V}/1\ \text{m}\Omega = 4\ \text{kA}$). Špička impulsu je pro náš malý experiment dostatečně vysoká, ale doba trvání impulsu je malá, a projektil tak nemá dostatečnou setrvačnost na větší urychlení. Tento impuls byl naměřen bez přídavné indukčnosti.



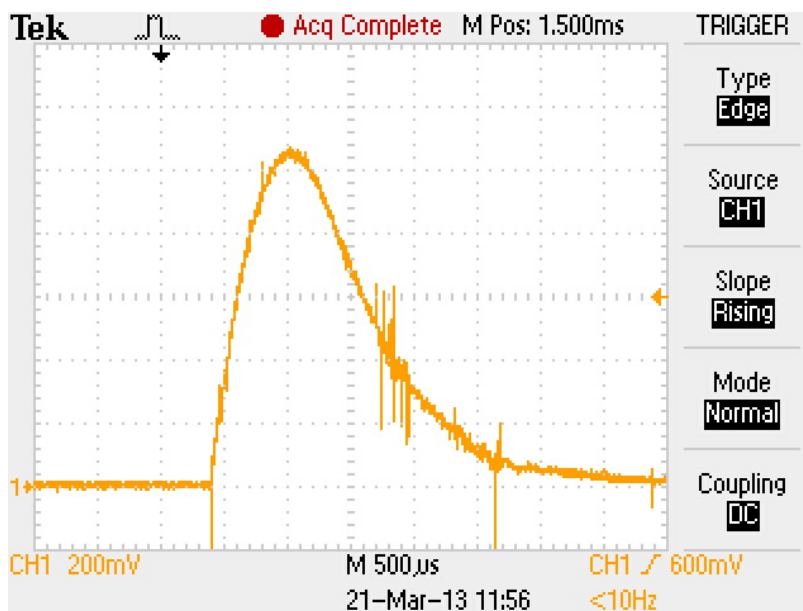
Obrázek 8.8: Vybíjecí impuls bez přídavné indukčnosti.

Přidáním indukčnosti řádově jednotek až desítek μH můžeme impuls prodloužit, ale na úkor velikosti jeho amplitudy. Jak je vidět na obrázku (8.9), po přidání indukčnosti $40\ \mu\text{H}$ je nyní délka impulsu přibližně $2\ \text{ms}$ ($250\ \mu\text{s}$ na dílek) a amplituda $1\ \text{kA}$ ($200\ \text{mV}$ na dílek, poté $1\ \text{V}/1\ \text{m}\Omega = 1\ \text{kA}$). Nyní máme pětkrát delší impuls o amplitudě $1\ \text{kA}$ a odpovídá přibližně křivce na obrázku (7.2), kde máme ve schématu přidanou indukčnost $40\ \mu\text{H}$. Křivky se trochu od sebe liší, neboť musíme připočítat ještě indukčnost kabelů a samotného EM Railgunu.



Obrázek 8.9: Vybíjecí impuls s přidanou indukčností pro EM Railgun prototyp.

Dále záleží hlavně na přechodovém odporu, který se při každém výstřelu podstatně mění, a ovlivňuje tak tvar křivky. Impuls na obrázku (8.10) je změřen při pokusech na druhém modelu EM Railgunu, kde délka impulsu je 3 ms a amplituda 1 kA. V praktické části se při pokusech tyto impulsy o amplitudě 1 kA moc neosvědčily. Délka impulsu je již vyhovující, ale velikost špičky je tentokrát moc malá a projektil nevyletí, jen se trochu posune.



Obrázek 8.10: Vybíjecí impuls s přidanou indukčností pro EM Railgun druhý model.

8.3 Výsledky testů

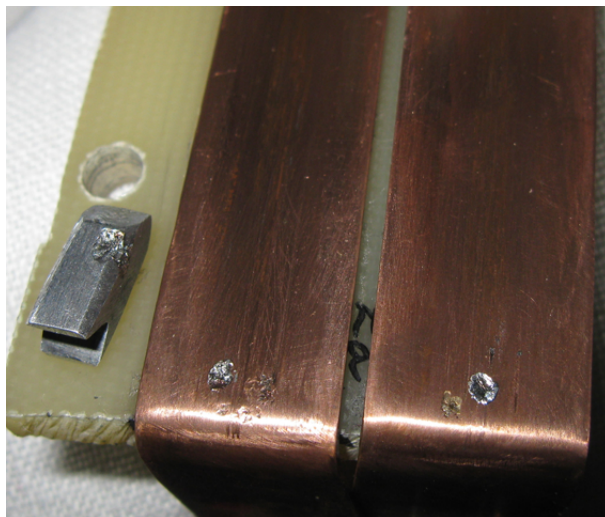
První testy proběhly na prototypu s proudovým impulzem o amplitudě 4 kA a bylo vyzkoušeno několik variant projektilu s průřezem 1 cm². Jako první jsme testovali samotný kvádr z hliníku. U něj důsledkem nedostatečnému kontaktu s kolejnicemi, a tedy důsledkem vzniku elektrického oblouku, došlo ke svaření s kolejnicemi. Jako druhý byl použit projektil s měděnými kartáčky, který se povedlo urychlit, i když jen k ústí hlavně. Lze to přičíst k velkým ztrátám na přechodu mezi kolejnicemi a projektilem a k nižší energii, kterou dodávám EM Railgunu. Pro lepší kontakt je nutné vyrobit takový projektil, který by měl výborný kontakt a nezpomaloval se tak moc důsledkem tření o kolejnice. Na obrázku (8.11) můžete vidět výsledek po svaření projektilu s kolejnicemi.



Obrázek 8.11: Výsledek prvního testu na prototypu.

Další testy již ukázaly lepší výsledky. Použili jsme projektil s lépe vyrobenými kartáči. S energií 169 J se povedlo vystřelit projektil maximálně do vzdálenosti 40 cm. Malý dostřel je ovlivněn i hmotností projektilu (4 g) vzhledem k energii, která ho urychluje a nedokonalosti přiléhajících kartáčů ke kolejnicím. Snaha kompenzovat nedostatečný kontakt mezi kolejnicemi a kartáči elektrovodivou pastou nevedla k lepším výsledkům.

Testy na druhém modelu s proudovým impulzem 4 kA ukázaly lepší výsledky než u prototypu díky menším rozměrům projektilu, a tedy i jeho hmotnosti (0,4 g). I když při prvních pokusech se projektil také svařil s kolejnicemi důsledkem špatného kontaktu (použití hranol hliníku), jak je vidět na obrázku (8.12). Použitím projektilu s kartáčky a pružinového injektoru, který vtlačí projektil mezi kolejnice, se zabránilo tomuto svaření a výsledkem bylo vystřelení projektilu na vzdálenost 90 cm.



Obrázek 8.12: Výsledek testu na druhém modelu.

Testy s proudovým impulzem 1 kA neukázaly na obou modelech EM Railgunu žádné výrazné výsledky. Projektil se v hlavni jen lehce posune a nevyletí. I když délka impulzu je již optimální, jeho amplituda je moc malá. Pro lepší výsledky by bylo zapotřebí navrhnout PNZ dodávající napětí aspoň kolem 1 kV. Z toho vyplývá nutnost dalších kapacitorů, které by se zapojily sérioparalelně pro dosažení potřebného napětí a celkové kapacity a samozřejmě vytvořit zdroj stejnosměrného napětí, jenž by nabíjel nově sestavenou banku. Tím se výrazně zvýší energie potřebná pro urychlení projektilu.

Je nutno poznamenat, že v návrhu PNZ byl v okruhu, kde vzniká proudový impulz, mechanický spínač. Na něm vznikaly velké ztráty a došlo i nakonec k jeho mechanickému zničení. Problém lze vyřešit spínáním okruhu pomocí polovodičových součástek, jako jsou tranzistory a tyristory. Takovéto součástky s potřebnými parametry jsou cenově dosti nákladné. Existuje i jiná možnost jak spínat obvod, a to mechanicky samotným projektillem. Jakmile se dotkne vodivý projektil kolejnic, obvod se uzavře. Z tohoto důvodu také využívám pružinového injektoru, který projektil vtlačí mezi kolejnice.

Orientační výpočet magnetické síly F_m , která působí na projektil, lze spočítat pomocí vzorce s indukčním gradientem L' , jak již bylo dříve uvedeno:

$$F_m = \frac{1}{2} L' I^2 \quad (8.1)$$

Kde:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{(R+r)^2}{R^2} \right) \quad (8.2)$$

Magnetická síla a indukční gradient jsou spočítány při špičkové hodnotě proudu 4 kA pro projektil s průřezem 5 mm²:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{(5 \cdot 10^{-4} + 5 \cdot 10^{-3})^2}{(5 \cdot 10^{-4})^2} \right) = 9,59 \cdot 10^{-7} \text{ [H/m]} \quad (8.3)$$

$$F_m = \frac{1}{2} L' I^2 = \frac{1}{2} (9,59 \cdot 10^{-7} \cdot 4000^2) = 7,67 \text{ [N]} \quad (8.4)$$

Magnetická síla a indukční gradient spočítané pro projektil s průřezem 1 cm²:

$$L' = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{(5 \cdot 10^{-4} + 0,01)^2}{(5 \cdot 10^{-4})^2} \right) = 1,218 \cdot 10^{-6} \text{ [H/m]} \quad (8.5)$$

$$F_m = \frac{1}{2} L' I^2 = \frac{1}{2} (1,218 \cdot 10^{-6} \cdot 4000^2) = 9,74 \text{ [N]} \quad (8.6)$$

Magnetická síla je tedy závislá na indukčním gradientu, který je počítán jen z rozměrů kolejnic a projektilu. Jelikož byl stanoven při výpočtu indukčního gradientu předpoklad, že kolejnice odpovídají tvarově vodiči o kruhovém průřezu, zatím co skutečné kolejnice mají průřez obdélníkový, jsou výsledky magnetické síly opravdu jen orientační.

Kapitola 9

Závěr

Jedna třetina diplomové práce je věnována rešerši EM Railgunu, obsahující jeho historii, fyzikální princip, popis hlavních částí EM Railgunu, jeho problematiku a aktuální vývoj s vizí do budoucna.

Podle matematického modelu byla vytvořena simulace a ověřen tak princip EM Railgunu. Dosažené výsledky mag. síly jsou pro špičkovou hodnotu proudového impulsu 2,9 N a rychlost projektilu, jenž je vypočítaná přes zrychlení, činí 2 m/s.

V praktické části byly vytvořeny dva modely EM Railgunu. Prototyp měl z důvodu větších rozměrů horší výsledky. První pokusy vedly k nezdaru, poněvadž byl použit samotný hranol z hliníku, jenž byl moc těžký a z důvodu nepřiléhajícího kontaktu s kolejnicemi, se k nim přivařil. Projektil s kartáči se povedlo vystřelit na vzdálenost 40 cm s rychlostí, která byla podstatně menší než stanovila simulace. Důvodem je poměrně malá energie, potřebná na jeho urychlení a hlavně přítomné třecí síly, které jsou nedílnou součástí praktického modelu oproti simulaci, kde ji neuvažujeme.

Druhý přesnější model s menšími rozměry dosahoval lepších výsledků. Díky menším rozměrům projektilu s kartáči, a tedy i jeho hmotnosti, se zvýšil dostřel EM Railgunu ze 40 cm na 90 cm.

Výsledky simulace a praktické části nelze mezi sebou porovnávat. Modely EM Railgunů i přes lepší zpracování, nebudou mít výsledky odpovídající simulaci, poněvadž je zde problém přiléhání kontaktu projektilu s kolejnicemi, a vzniká tak velký přechodový odpor, který se neustále mění s každým pokusem vystřelit projektil. Přítlak kartáčků projektilu lze zvětšit pomocí zvýšení hmotnosti projektilu, ale na druhou stranu se zvýší třecí síly a projektil je nakonec daleko více zpomalen. Musí se proto zvolit takový poměr hmotnosti projektilu a přítlaku kartáčků ke kolejnicím, aby se dosáhlo pozorovatelných výsledků.

Z citovaných zdrojů lze vyčíst, že pro daleko lepší výsledky by bylo zapotřebí obráběcích strojů schopných vyrobit dokonalé rozměry jak projektilů, tak i rozchodu mezi kolejnicemi. Dále bude zapotřebí PNZ, schopného dodat proudový impuls o špičkové hodnotě řádově 100 kA s dobou trvání (3–10) ms. Nutností již bude injektor na bázi stlačeného vzduchu. Rozměry EM Railgunu by se pohybovaly okolo (1–2) m s bezoxydovými měděnými kolejnicemi odpovídajících rozměrů. Takového projektu bych se rád v budoucnu zúčastnil.

Literatura

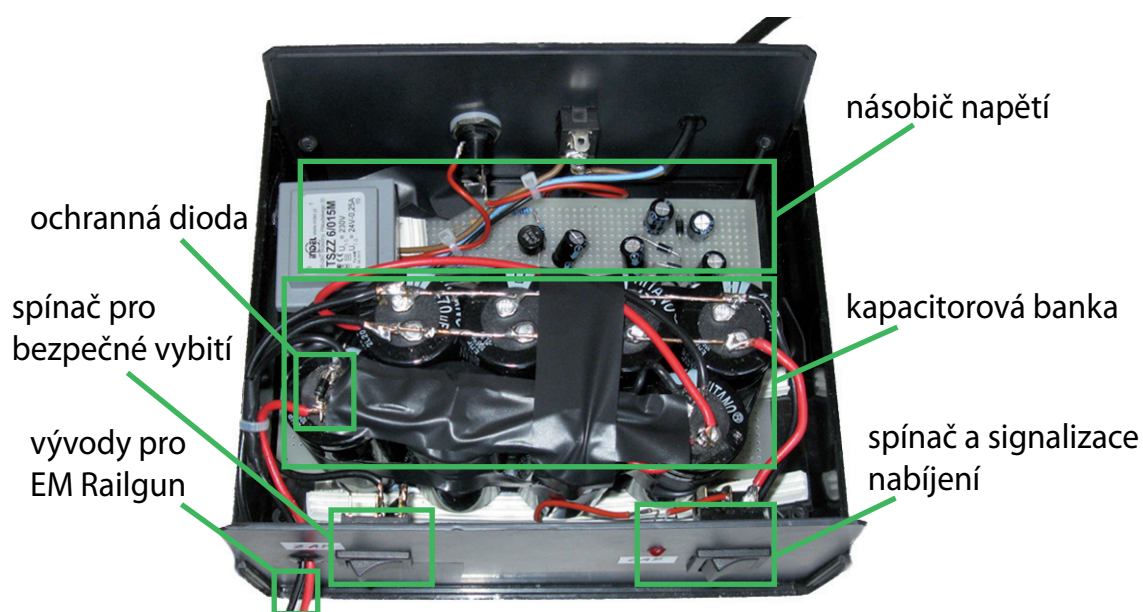
- [1] Ian R. McNab. *Early Electric Gun Research* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on, vol.35, no.1, pp.250–261, Jan 1999 [cit. 10.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/20.738413. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=738413&isnumber=15929>
- [2] Egeland, Alv. *Birkeland's Electromagnetic Gun: A Historical Review* [online]. Plasma Science, IEEE Transactions on, vol.17, no.2, pp.73–82, Apr 1989 [cit. 10.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/27.24611. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=24611&isnumber=928>
- [3] Richard A. Marshall. *Railgunnery: Where have we been? Where are we going?* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on, vol.37, no.1, pp.440–444, Jan 2001 [cit. 19.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/20.911872. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=911872&isnumber=19688>
- [4] Willem J. Kolkerl, Francis Jamet. *Electric Energy Gun Technology: Status of the French–German–Netherlands Programme* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on, vol.35, no.1, pp.25–30, Jan 1999 [cit. 19.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/20.738370. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=738370&isnumber=15929>
- [5] S. Hundertmark, M. Schneider, G. Vincent. *Payload Acceleration using a 10 MJ DES Railgun* [online]. Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on, vol., no., pp.1–5, 15–19 May 2012 [cit. 19.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/EML.2012.6325116. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6325116&isnumber=6324992>
- [6] I. R. McNab, F. Stefani, M. Crawford, M. Erengil, C. Persad, S. Satapathy, H. Vanicek, T. Watt, and C. Dampier. *Development of a Naval Railgun* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on, vol.41, no.1, pp. 206–210, Jan. 2005 [cit. 12.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TMAG.2004.839285. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1381538&isnumber=30122>
- [7] F. C. Beach, I.R. McNab. *Present and Future Naval Applications for Pulsed Power* [online]. Pulsed Power Conference, 2005 IEEE, vol., no., pp.1,7, 13–17 June 2005

- [cit. 27.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/PPC.2005.300462. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4084142&isnumber=4084141>
- [8] I.R. McNab. *Launch to space with an electromagnetic railgun* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on , vol.39, no.1, pp.295,304, Jan 2003 [cit. 28.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TMAG.2002.805923. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1179826&isnumber=26497>
- [9] Allan S. Feliciano. *The Design and optimization of a power supply for a one-meter electromagnetic railgun* [online]. Naval Postgraduate School Monterey, California, December 2001 [cit. 22.02.2013]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?Location=U2&doc=GetTRDoc.pdf&AD=ADA401080>
- [10] Jeff Maniglia, Jordan Smiroldo, Alex Westfall, and Guy Zohar. *Design, Fabrication, and Testing of an Electromagnetic Rail Gun for the repeated testing and simulation of Orbital Debris Impacts* [online]. California Polytechnic State University, San Luis Obispo, CA 93401, 2011 [cit. 01.03.2013]. Dostupné z: <http://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1059&context=aerosp>
- [11] Ian R. McNab, M. T. Crawford, S. S. Satapathy, F. Stefani, T. J. Watt. *IAT Armature Development* [online]. Plasma Science, IEEE Transactions on , vol.39, no.1, pp.442–451, Jan. 2011 [cit. 11.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TPS.2010.2082568. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5621924&isnumber=5680667>
- [12] M. Sajjad Bayati, Asghar Keshtkar, S. V. Al Din Makki. *Analyzing the Current Distribution, Magnetic Field and Inductance Gradient at the Circular Rail in Comparison to Rectangular Rail* [online]. Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on , vol., no., pp.1–5, 15–19 May 2012 [cit. 27.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/EML.2012.6325014. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6325014&isnumber=6324992>
- [13] Asghar Keshtkar. *Effect of rail dimension on current distribution and inductance gradient* [online]. Electromagnetic Launch Technology, 2004. 2004 12th Symposium on , vol., no., pp. 359–362, 25–28 May 2005 [cit. 27.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/ELT.2004.1398106. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1398106&isnumber=30395>
- [14] Matthew J. Siopis, Richard W. Neu. *Materials Selection Exercise for Electromagnetic Launcher Rails* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on , vol.PP, no.99, pp.1, leden 2013 [cit. 27.02.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TMAG.2013.2243460. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6423286&isnumber=4479871>

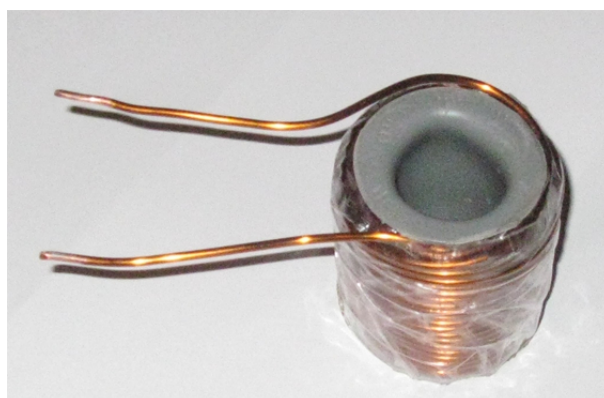
- [15] Ju Lan. *Design and Optimization of the Pulsed Power Supply System Used for Electromagnetic railgun* [online]. Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on , vol., no., pp.1–4, 15–19 May 2012 [cit. 01.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/EML.2012.6325159. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6325159&isnumber=6324992>
- [16] Radek Myška. *Zdroj proudového impulsu vysoké úrovně* [online]. bakalářská práce, Fakulta Elektrotechniky a Komunikačních technologií, Brno 2009 [cit. 01.03.2013]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/2996/Bakala%C5%99ka%20final.pdf?sequence=1>
- [17] Sam Barros. *PowerLabs Rail Gun Research* [online]. [cit. 01.03.2013]. Dostupné z: <http://www.powerlabs.org/railgun.htm>
- [18] J. McFarland, I. R. McNab. *A long-range naval railgun* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on , vol.39, no.1, pp. 289–294, Jan 2003 [cit. 12.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TMAG.2002.805924. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1179825&isnumber=26497>
- [19] S. Hundertmark, T. Kauffmann, G. Vincent. *Experimental Investigation of a UHF Radio Link to a Railgun Projectile* [online]. Plasma Science, IEEE Transactions on , vol.40, no.9, pp.2232–2236, Sept. 2012 [cit. 12.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TPS.2012.2205949. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6248729&isnumber=6297508>
- [20] Zizhou Su, Wei Guo, Bin Cao, Yanhui Chen, Kai Huang, Xia Ge. *The Study of the Simple Breech-fed Railgun Recoil Force* [online]. Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on , vol., no., pp.1–4, 15–19 May 2012 [cit. 17.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/EML.2012.6325017. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6325017&isnumber=6324992>
- [21] Ian R. McNab. *Progress on Hypervelocity Railgun Research for Launch to Space* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on , vol.45, no.1, pp.381,388, Jan. 2009 [cit. 17.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TMAG.2008.2008601. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4773566&isnumber=4773510>
- [22] O. Božić, P. Giese. *Aerothermodynamic Aspects of Railgun-Assisted Launches of Projectiles With Sub- and Low-Earth-Orbit Payloads* [online]. Magnetics, IEEE Transactions on , vol.43, no.1, pp.474,479, Jan. 2007 [cit. 17.03.2013]. Dostupné z: doi: 10.1109/TMAG.2006.887528. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4033027&isnumber=4033014>

Příloha A

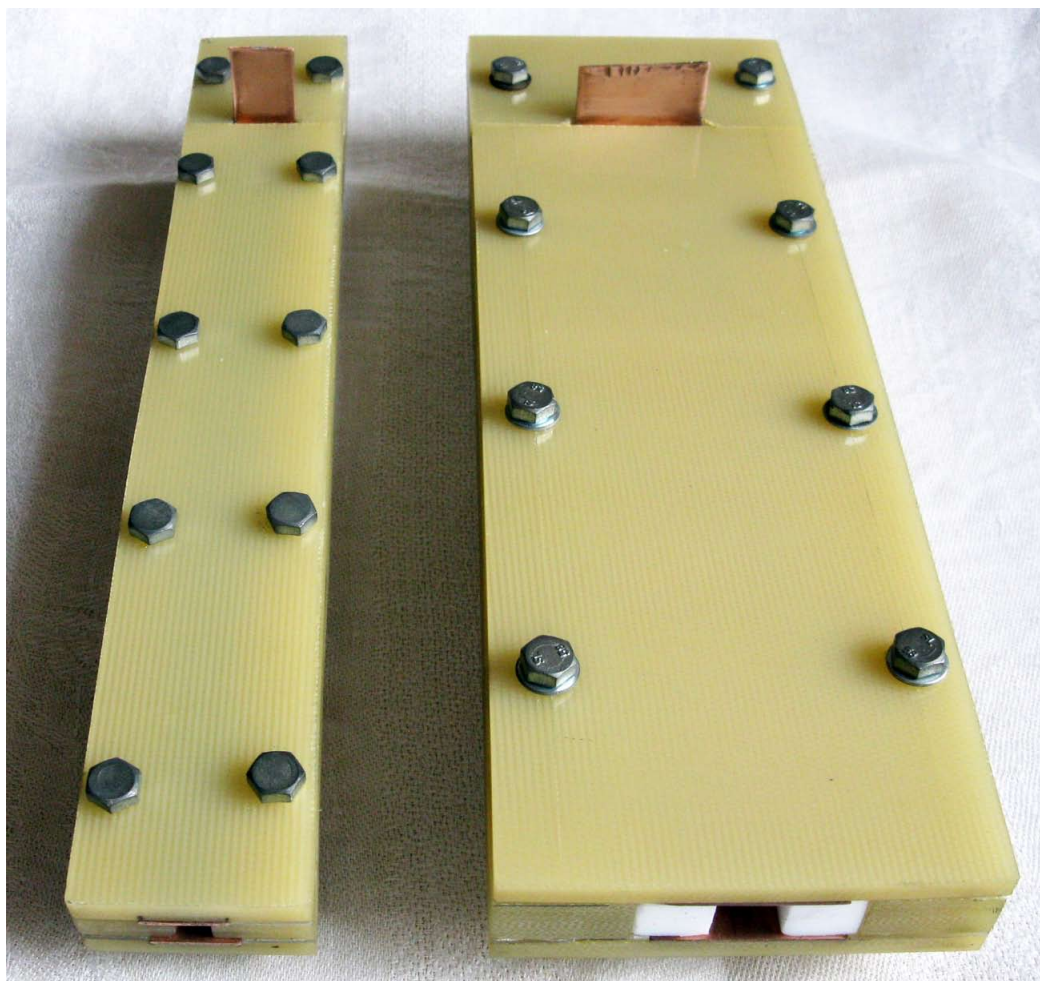
Doprovodné obrázky



Obrázek A.1: PNZ obsahující násobič napětí na 300 V, kapacitorovou banku s osmi $470\mu\text{F}$ kondenzátory na 400 V zapojenými paralelně, ochranou diodu, LED diodu indikující nabíjení a spínače pro nabití a bezpečné vybití kapacitorové banky.



Obrázek A.2: Cívka $40\mu\text{F}$ použitá pro tvarování vybíjecího impulsu.



Obrázek A.3: Porovnání modelů EM Railgunu, vpravo prototyp, vlevo druhý model.