

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2018

Bc. Lucie Kadlecová



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## ELEKTROMAGNETICKÉ VÝKONOVÉ AKTUÁTORY

ELECTROMAGNETIC POWER ACTUATORS

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

**Bc. Lucie Kadlecová**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. Martin Folprecht**

**BRNO 2018**

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Studentka:** Bc. Lucie Kadlecová

**ID:** 164304

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2017/18

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Elektromagnetické výkonové aktuátory**

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Proveďte literární rešerši v oblasti výkonových aktuátorů určených k akceleraci kovových předmětů a pracujících na elektromagnetickém fyzikálním principu.
2. Základní typy aktuátorů vzájemně porovnejte z hlediska dosažitelných mechanických energií a z hlediska způsobů napájení.
3. Zvolený typ aktuátoru matematicky analyzujte, sestavte matematický model a simulací v Simulinku ověřte vlastnosti aktuátoru.
4. Zvolený typ aktuátoru navrhnete obvodově i konstrukčně, realizujte funkční vzorek a experimentálně ověřte jeho vlastnosti.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

- [1] Patočka M.: Magnetické jevy a obvody. VUTIUM, Brno, 2011.
- [2] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.1. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [3] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.2. Skriptum, FEKT, VUT Brno.
- [4] Patočka M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, sv.3. Skriptum, FEKT, VUT Brno.

**Termín zadání:**

**Termín odevzdání:** 22.8.2018

**Vedoucí práce:** Ing. Martin Folprecht

**Konzultant:**

**doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

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

## **Abstrakt**

Tato semestrální práce se zabývá literární rešerší a fyzikální analýzou výkonových aktuátorů pracujících na principu elektromagnetické akcelerace kovových předmětů. Cílem je matematická analýza a výroba vybraného typu elektromagnetického aktuátoru, konkrétně indukčního coilgunu.

## **Klíčová slova**

výkonový aktuátor, coilgun, railgun, elektromagnetická akcelerace, elektromagnetické dělo, magnetismus

## **Abstract**

This master thesis focuses on literature research of problematics linked to power actuators working on electromagnetic principle to accelerate metal projectiles. It's goal is mathematical analysis and constuction of selected type of electromagnetic power actuator – induction coilgun

## **Keywords**

Actuator, coilgun, railgun, electromagnetic propulsion, electromagnetic launch, magnetism

### **Bibliografická citace:**

KADLECOVÁ, L. *Elektromagnetické výkonové aktuátory*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 65 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Martin Folprecht.

## **Prohlášení**

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Elektromagnetické výkonové aktuátory jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušila autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhla nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědoma 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.

V Brně dne 22.srpna 2018

.....

podpis autorky

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Folprechtovi za pomoc při zpracování této diplomové práce a za hodiny strávené v laboratoři nad zařízením, o kterém jsme předpokládali, že vůbec nebude fungovat. Dále bych chtěla poděkovat mému původnímu vedoucímu diplomové práce doc. Dr. Ing. Miroslavu Patočkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 22.srpna 2018

.....

podpis autorky

# Obsah

1	Úvod .....	1
2	Základní typy elektromagnetických aktuátorů.....	3
2.1	Railgun – kolejnicové dělo.....	4
2.1.1	Princip funkce.....	4
2.1.2	Typy railgunů .....	5
2.2	Coilgun – cívkové dělo .....	8
2.2.1	Reluktanční coilgun.....	10
2.2.2	Indukční coilgun .....	11
2.3	Hybridní a jiné systémy.....	15
2.3.1	Rail-Coil hybridní elektromagnetické dělo .....	15
2.3.2	Helical launcher – „spirálové dělo“ .....	15
2.3.3	Reconnection gun .....	16
3	Matematická analýza základních typů elektromagnetických aktuátorů .....	17
3.1	Railgun .....	17
3.1.1	Limitace technologie railgun .....	18
3.2	Reluktanční coilgun .....	19
3.2.1	Limitace technologie reluktančního coilgunu.....	19
3.3	Indukční coilgun.....	20
3.3.1	Limitace technologie.....	21
4	Indukční coilgun - návrh.....	23
4.1	Základní geometrické rozměry .....	23
4.1.1	Výpočet vzájemné indukčnosti a jejího gradientu .....	23
4.1.2	Vlastní indukčnost statorové cívky a projektilu .....	26
4.1.3	Výpočet elektrických a mechanických veličin .....	26
4.1.4	Optimalizace .....	28
4.2	Simulace indukčního coilgunu pomocí softwaru MatLab Simulink.....	29
4.3	Identifikace parametrů náhradního zapojení coilgunu .....	29
5	První model a jeho konstrukce.....	34
5.1	Konstrukce zařízení .....	35

5.2	Problémy při realizaci.....	36
6	Druhý model a jeho konstrukce .....	41
6.1	Výsledky simulace .....	44
6.2	Měření na zařízení.....	47
7	Závěr .....	54
	Literatura .....	56
	Seznam symbolů, veličin a zkratk.....	60
	Seznam příloh.....	61
	Přílohy .....	62

## Seznam obrázků

Obrázek 1: Railgun - princip funkce [5].....	4
Obrázek 2: Šipkový projektil s přímým stykem[14].....	6
Obrázek 3: Projektil s kartáčovým stykem (vlevo použitý, vpravo nový) [15].....	6
Obrázek 4: Schématické znázornění plazmového pohonu [11].....	7
Obrázek 5: Porovnání systémů Breech-fed a DES railgunu [12] .....	8
Obrázek 6: Struktura coilgunu [18] .....	9
Obrázek 7: Princip reluktančního coilgunu [18].....	10
Obrázek 8: Dva typy vinutých projektilů[20].....	11
Obrázek 9: Princip funkce indukčního coilgunu [5] .....	12
Obrázek 10: Schematické znázornění pulzního coilgunu napájeného kondenzátorovými bateriemi [23] .....	13
Obrázek 11: Využití energie kondenzátoru předchozího stupně pro stupeň další [24].....	14
Obrázek 12: Schéma zapojení cívek třífázového traveling wave coilgunu [24] .....	14
Obrázek 13: Rail-Coil hybridní elektromagnetické dělo [25].....	15
Obrázek 14: Schéma reconnection gun se dvěma obdélníkovými cívkami [27] .....	16
Obrázek 15: Reconnection gun v podobě jedné vzduchové cívky [28].....	16
Obrázek 16: Schématické znázornění virtuálního nahrazení.....	19
Obrázek 17: Náhradní schéma indukčního coilgunu .....	20
Obrázek 18: Znázornění proudových filamentů pro potřeby výpočtu [31].....	23
Obrázek 19: Rozdělení reálných cívek na elementy pro výpočet vzájemné indukčnosti [31] .....	24
Obrázek 20: Znázornění geometrických veličin pro výpočet vlastní indukčnosti [6] .....	26
Obrázek 21: Náhradní zapojení transformátoru ve tvaru $\Gamma$ -článku [6].....	30
Obrázek 22: Sériová kombinace prvků měřených na RLC-metru při projektilu vloženém do statorové cívky .....	31
Obrázek 23: Paralelní kombinace prvků měřených na RLC-metru při projektilu vloženém do statorové cívky .....	32
Obrázek 24: Schéma zapojení obvodu indukčního coilgunu, první prototyp.....	35

Obrázek 25: Schéma budiče tyristoru.....	35
Obrázek 26: Závislost vzájemné indukčnosti $M(x)$ a gradientu $dM(x)$ na poloze projektilu .....	37
Obrázek 27: Průběh proudu statorovou cívku $i_s$ a proudu projektilem $i_p$ v závislosti na čase.....	37
Obrázek 28: Průběh napětí na statorové cívce $u(t)$ v závislosti na čase.....	38
Obrázek 29: Časová závislost velikosti síly působící na projektil a jeho rychlosti ..	38
Obrázek 30: Časová závislost zrychlení a projektilu .....	39
Obrázek 31: Závislost indukčnosti statorové cívky $L_1$ a projektilu $L_2$ na napájecí frekvenci (získáno měřením) .....	39
Obrázek 32: Závislost činitele vazby $k$ na napájecí frekvenci (získáno měřením) ..	40
Obrázek 33: Závislost odporu statorové cívky $R_1$ a projektilu $R_2$ na frekvenci (získáno měřením) .....	40
Obrázek 34: Elektrické schéma coilgunu, prototyp 2 .....	42
Obrázek 35: Druhý prototyp coilgunu, pohled z boku.....	42
Obrázek 36: Druhý prototyp coilgunu, pohled shora.....	43
Obrázek 37: Schematické znázornění umístění světelných bran.....	43
Obrázek 38: Fotografie testovaných projektilů.....	44
Obrázek 39: Průběh vzájemné indukčnosti $M(x)$ a gradientu vzájemné indukčnosti $dM(x)$ v závislosti na poloze projektilu v hlavni .....	45
Obrázek 40: Průběh statorového proudu $i_s$ a proudu projektilem $i_p$ na čase od výstřelu .....	45
Obrázek 41: Průběh napětí na statorové cívce v závislosti na čase od výstřelu.....	46
Obrázek 42: Průběh síly působící na projektil a průběh rychlosti v závislosti na čase od výstřelu .....	46
Obrázek 43: Závislost zrychlení a polohy projektilu na čase od výstřelu .....	47
Obrázek 44: Závislost primární indukčnosti $L_1$ a sekundární indukčnosti $L_2$ na frekvenci (získáno měřením) .....	47
Obrázek 45: Závislost primárního odporu $R_1$ a sekundárního odporu $R_2$ na frekvenci (získáno měřením) .....	48
Obrázek 46: Závislost činitele vazby $k$ na frekvenci (získáno výpočtem z měřených hodnot).....	48

Obrázek 47: Srovnání činitele vazby předpokládaného simulací a závislosti ověřené měřením .....	49
Obrázek 48: Průběh proudové vlny, projektil $a_p = 54\text{mm}$ (dural), záznam z osciloskopu .....	51
Obrázek 49: Průběh proudové vlny, projektil $a_p = 40\text{mm}$ (dural), záznam z osciloskopu .....	52
Obrázek 50: Průběh proudové vlny, projektil $a_p = 28\text{mm}$ (dural), záznam z osciloskopu .....	52
Obrázek 51 Průběh proudové vlny, projektil $a_p = 28\text{mm}$ (měď), záznam z osciloskopu .....	52

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty zvolené pro návrh coilgunu .....	23
Tabulka 2: Vypočtené parametry statorové cívky a projektilu .....	34
Tabulka 3: Vypočtené parametry obvodu .....	34
Tabulka 4: Vypočtené parametry statorové cívky a projektilu .....	41
Tabulka 5: Vlastnosti projektilů .....	44
Tabulka 6: Výsledky měření rychlosti projektilu .....	49

# 1 ÚVOD

Elektromagnetické výkonové aktuátory jsou pohonné jednotky, měnící elektrickou energii na energii kinetickou. Tato práce se zabývá typem aktuátoru, který se v anglické literatuře nazývá *electromagnetic launcher*, neboli elektromagnetické dělo. Jde o systémy využívající elektrickou energii k urychlení a vystřelení projektilu a lze říci, že jejich využití je především ve zbraňových systémech budoucnosti, jelikož poskytují vyšší teoreticky dosažitelnou rychlost projektilu než současné systémy na principu uvolňování chemické energie a následném rozpínání plynů. Nicméně, nelze říci, že využití principů funkce elektromagnetických děl je pouze u zbraňových systémů, teoreticky je možné princip aplikovat pro pohon vlaků, nebo dopravníkových pásů.

Podíváme-li se do historie vývoje zbraní, zjistíme, že vždy bylo cílem dosáhnout co nejvyšší rychlosti projektilů, případně dopravních prostředků. Tato snaha všech historických vědců vedla lidstvo od pěstí k oštěpům, lukům, katapultům a balistám. Tyto mechanické zbraně však byly omezeny maximálním množstvím uložené energie a nejnákladnější systémy této etapy byly obřích rozměrů.

Následně byl k urychlování projektilů využíván střelný prach. Jeho nespornou výhodou, oproti mechanickým systémům, bylo velké množství uložené energie v relativně malém objemu. Jejich technologickým limitem byla a je maximální rychlost rozpínání plynů uvolněných při chemické reakci, a to je rychlost zvuku.

Pro překonání této hranice byly vynalezeny projektily s vlastním palivem s pohonem reaktivního typu, což vedlo až k jednomu z největších úspěchů vědy a to cestám do vesmíru.

Nicméně, pohony založené na uvolňování chemické energie z paliva mají svoje nepřekonatelné problémy. Palivo musí být skladováno, přepravováno a vždy existuje riziko neočekávané exploze. Nemluvě o poměru váhy nákladu určeného k přepravě a paliva k tomu potřebného. Vezměme si například raketoplán k cestám do vesmíru, kde užitečný náklad tvoří pouze 1% z celkové hmotnosti zařízení.

Systémy využívající elektromagnetickou energii k urychlení projektilu nebo nákladu jsou dalším logickým krokem, neboť předchozí uvedené principy funkce narazily nebo narážejí na svoje technologické limity. Nespornou výhodou elektromagnetických děl je, že maximální možná dosažitelná rychlost nákladu je omezena pouze materiálovými vlastnostmi a rychlostí světla. Neobsahují chemickou výbušnou směs vytvářející potenciální riziko pro operátora. Projektil se skládá téměř výhradně z užitečného nákladu. Velikost přepravovaného předmětu se může pohybovat od gramových peletek po vzdušné či vesmírné dopravní prostředky.

Může se zdát, že vývoj těchto zařízení nevedl vždy ke světlejším zítřkům, vždy však došlo i k posunu na poli matematiky, fyziky a chemie, který vedl společnost k dalším objevům a zlepšení životní úrovně lidí, ať už mluvíme o nových materiálech,

které byly původně pro vojenské užití, ale dnes zachraňují životy ve službách policistů a hasičů, nebo o dnes už běžných domácích spotřebičích a elektronice.

Cílem této práce je zpracovat rešerši dostupných materiálů vztahujících se k tématu elektromagnetických aktuátorů, jejich základní typy matematicky analyzovat a nejvhodnější typ obvodově navrhnout a zkonstruovat.

## 2 ZÁKLADNÍ TYPY ELEKTROMAGNETICKÝCH AKTUÁTORŮ

Elektromagnetická děla můžeme rozdělit do tří základních typů, které budou v práci dále podrobně analyzovány:

- a) *Railgun*, neboli kolejnicové dělo. Základním prvkem jsou dvě kolejnice napájené elektrickým proudem, přičemž projektil urychlovaný Lorentzovou silou slouží jako jejich propojení.
- b) *Coilgun*, neboli cívkové dělo. Na hlavní tvořené nevodivým materiálem jsou uloženy cívky napájené elektrickým proudem. Projektil je tvořen buď vodivým nebo feromagnetickým materiálem a je buď vtahován nebo odpuzován magnetickým polem spínaných cívek.
- c) *Hybridní systém a jiné systémy*. Využívá jak principu funkce railgun i coilgun, případně využívá jiného fyzikálního principu.

Každý z těchto typů má své výhody i nevýhody. Railgun je vývojově starší kvůli nižší výpočtové náročnosti, nicméně je třeba proudů v řádu stovek kA pro urychlování i malých projektilů o hmotnosti několika gramů. [1].

Coilgun má oproti railgunu několik výhod, které jej předurčují k všestrannějšímu využití. Projektil není fyzicky spojen s hlavní, a tudíž nedochází k opotřebení kontaktů. Teoreticky je možné vystřelování i projektilů velkých rozměrů. Další výhodou coilgunu je při stejné velikosti proudu až 100krát větší vyvíjená síla na projektil než u railgunu, čímž odpadá nutnost vytváření zdroje schopného dodávat vysoké proudy. Možná účinnost coilgunu je větší než 50%. Po celou dobu výstřelu je možné efektivně kontrolovat rychlost projektilu díky samostatně napájeným cívkám, které jsou na sobě nezávislé. Cenou za tyto výhody je potom nutnost přesně synchronizovaného spínání a vypínání hlavních cívek [2].

Co se týče hybridních systémů, spojují princip coilgunu, kde cívky jsou hlavním momentotvorným prvkem a vodivé, napájené kolejnice, jako v případě railgunu, slouží k napájení cívky v projektilu a ke komutaci cívek umístěných na hlavní. Existují i děla pracující na principu lineárních krokových motorů [3] a mnoho dalších.

Nyní budou podrobněji popsány jednotlivé typy elektromagnetických děl a principy jejich funkce.

## 2.1 Railgun – kolejnicové dělo

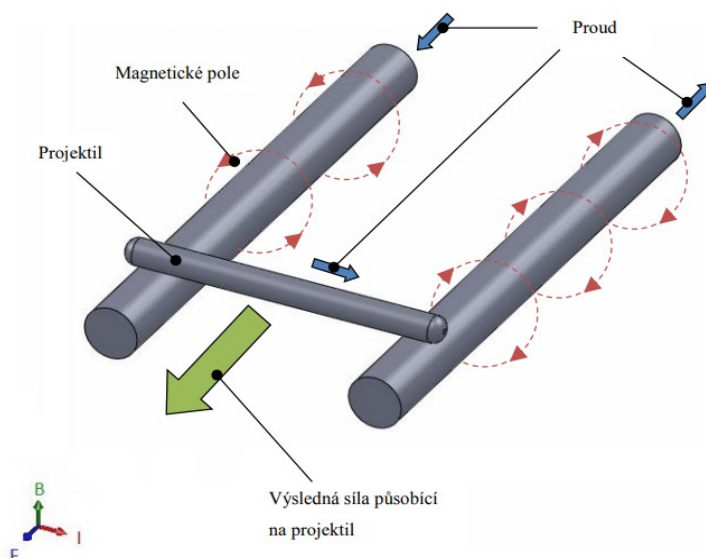
Výzkum railgunu byl započat už za 1. světové války ve Francii, kdy roku 1917 André Louis Octave Fauchon-Villeplée prezentoval funkční prototyp. Byl mu přiznán patent a poskytnuty finance na další výzkum. S koncem 1. světové války však zanikla nutnost tak štědrého financování vojenského výzkumu a vývoj byl zastaven. Villepléeho railgun dosahoval úst'ových rychlostí 200 m/s, projektil byla šipka s měděnými křídélky o hmotnosti 50 g.

Tento výzkum byl obnoven se začátkem 2. světové války v Německu, railgun měl sloužit jako protiletdecké dělo. Projektil měl vážit 6 kg, úst'ová rychlost měla dosahovat 2 km/s s kadencí 72 ran za minutu. Toto zařízení nebylo do konce světové války zkonstruované.

Dále se vývojem zabýval především Dr. Richard A. Marshall a jeho tým až ke konci 60. a na začátku 70. let 20. století. Z výsledků jejich výzkumu čerpají vědci dodnes. [4].

### 2.1.1 Princip funkce

Jak už bylo naznačeno, základním prvkem railgunu jsou dvě kolejnice protékané proudem, jež propojuje aktivní část projektilu a tím vytváří zkrat a uzavírá obvod. Projektil má kolem sebe vlastní magnetické pole, které reaguje s magnetickým polem kolejnic vznikem Lorenzovy síly ve směru rovnoběžně s kolejnicemi, jak je naznačeno na Obrázek 1.



Obrázek 1: Railgun - princip funkce [5]

Lorenzova síla je vyjádřena níže uvedenou rovnicí, která shrnuje silové působení elektromagnetického pole na nabitou částici.

$$\vec{F} = Q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1.1-1)$$

Kde první člen je vyjádřením elektrostatické Coulombovy síly, která působí na náboj  $Q$  umístěný v elektrickém poli  $E$  a vektorový součin druhého členu vyjadřuje právě Lorenzovu sílu působící na náboj, který se pohybuje v magnetickém poli  $B$ . [6] V tomto případě lze Coulombovu sílu zanedbat a Lorenzovu sílu zapsat v dalším tvaru pomocí proudové hustoty  $J$  a magnetické indukce  $B$  jako:

$$\vec{F} = \iiint_0^V \vec{J} \times \vec{B} dV \quad (2.1.1-2)$$

Tento tvar je vhodnější pro popis fyzikálního principu railgunu. Fyzikálně tedy můžeme situaci popsat jako nabitou částici pohybující se v magnetickém poli kolejnic. Ty jsou napojeny na zdroj proudu. Vzhledem k tomu, že projektil slouží jako propojení kolejnic, je tím zaručena jeho proudová hustota  $J$ . Vektorový součin ve vztahu udává směr síly, která bude kolmá jak na směr magnetické indukce, tak proudové hustoty. Jedná se však o ideální případ, který nastává jen za jistých podmínek. Změny ve směru působící síly může způsobit například nepravidelná geometrie projektilu nebo oblast kontaktu projektilu a kolejnice. Dalším vlivem ovlivňujícím směr síly může být i interakce magnetického pole samotného projektilu a okolního magnetického pole kolejnic.

Proud protékající kolejnicemi je potom zdrojem magnetického pole  $B$ . To lze vyjádřit z Biot-Saartova zákona jako magnetickou indukci  $B$ , ve vzdálenosti  $R$  od vodiče, protéká-li jím proud  $I$ :

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi R} \cdot 2 \quad (2.1.1-3)$$

Násobení dvojkou vyjadřuje fakt, že se jedná o dva vodiče protékané proudy opačných směrů. [6].

## 2.1.2 Typy railgunů

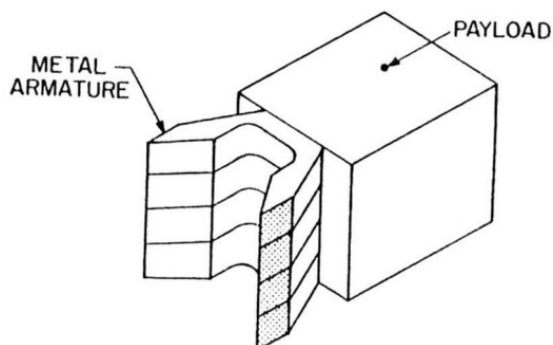
Systémy railgun lze členit podle vícero kritérií. Hlavními jsou provedení kontaktů, způsobu přenosu energie na střelu, typ napájecího zdroje a způsob napájení zařízení.

### 2.1.2.1 Provedení kontaktů projektilu

Problematika kontaktního styku projektilu s kolejnicemi je natolik obsáhlá, že by si zasloužila vlastní publikaci. Nicméně, jsou základní tři typy kontaktů, které se v současné době pro railgun používají.

Prvním typem kontaktu je přímý styk kovových částí projektilu s kolejnicemi. Tyto kluzné styky jsou problematické. Vzhledem k tomu, že kontakty prochází proudy velikosti kA, dochází k zahřívání nejen třením, ale i úbytky na přechodovém odporu. Dochází k měknutí a tání materiálů, které jsou následně v tekuté podobě taženy pod projektilem, kde dochází k zachycování bublinek vzduchu a dalšímu zhoršování kvality kontaktu. Zároveň dochází k velkému opotřebením kolejnic. [8] Pokud není kolejnice nová, tj. není rovná, ale její povrch je deformovaný, dochází navíc

k zapalování oblouku při průletu hlavní. Projektily jsou často tvarované do C nebo šipkového tvaru, historicky byly používány kontakty s pružinovým přitlakem. [9]



**Obrázek 2: Šipkový projektil s přímým stykem[14]**

Druhým typem kontaktu je kartáčový komutátor, jehož předností je rozdělení do mnoha malých vláken místo jednoho kontaktu s velkou plochou. Při velké proudové hustotě protékající skrz projektil může docházet k utavení dílčích částí, což může vést ke znečištění hlavní. Nebylo prokázáno, že by kartáčový kontakt zmenšoval opotřebení kolejnic než projektily s přímým stykem. [5] [14] [15]



Figure 2. DBAGS cube projectiles: new (right) and fired (left)

**Obrázek 3: Projektil s kartáčovým stykem (vlevo použitý, vpravo nový) [15]**

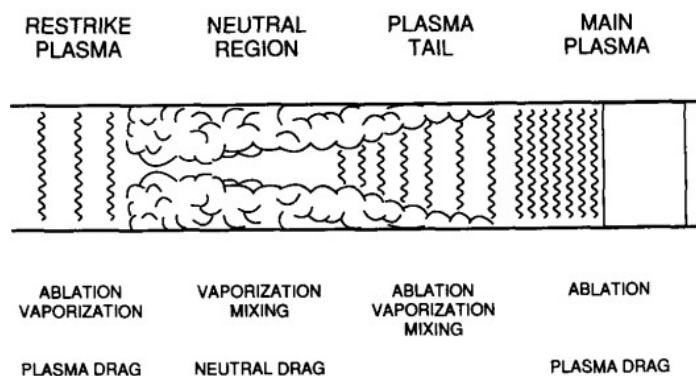
Třetím typem je tzv. PSL – pseudoliquid kontakt. Jde o projektil tvaru obdobného jako projektil C, pouze s větším množstvím paralelních větví tvořených pružnými kovovými plátky. Pro dostatečný přitlak je nutné použít stlačeného plynu před výstřelem. Tento kontakt je zatím stále ve vývoji, ale slibuje použití pro těžší střely.

### 2.1.2.2 Přenos energie na střelu

Už z fyzikální interpretace Lorenzova zákona je zřejmé, že existuje více způsobů přenosu síly na střelu, přičemž je především o tvar projektilu.

Je však možné za letícím projektilem zapálit elektrický oblouk, který projektil dále urychluje. Tento princip je znám jako plazmový pohon. Tímto typem pohonu se zabývá literatura [10] a [11]. U tohoto typu projektilu je tělo projektilu nevodivé a na týlu je připevněna tenká fólie vodivého materiálu, která při průchodu proudy vytvoří

elektrický oblouk. Ten je plný nabitých částic, na které v magnetickém poli generovaném kolejnicemi působí Lorenzova síla, která vytlačuje oblak ionizovaného plynu zároveň s projektilem z hlavně.



Obrázek 4: Schématické znázornění plazmového pohonu [11]

### 2.1.2.3 Typ napájecího zdroje

Pro napájení railgunu je nejvhodnější zdroj s rychlým nárůstem amplitudy proudu. První kolejnicové dělo bylo napájeno homopolárním generátorem schopným dodávat po krátký čas velké proudy. Další možností jsou akumulátorové baterie, které se kvůli své omezené výstupní hodnotě proudu příliš nepoužívají. V současné době jsou používané rotační generátory, a to především ve výzkumech americkou armádou pro použití na lodích. Výhoda jejich užití spočívá v možnosti rychle opakovat výstřely. Nicméně, tyto zdroje mají ze své povahy velkou vlastní indukčnost, která zamezuje rychlému nárůstu proudu.

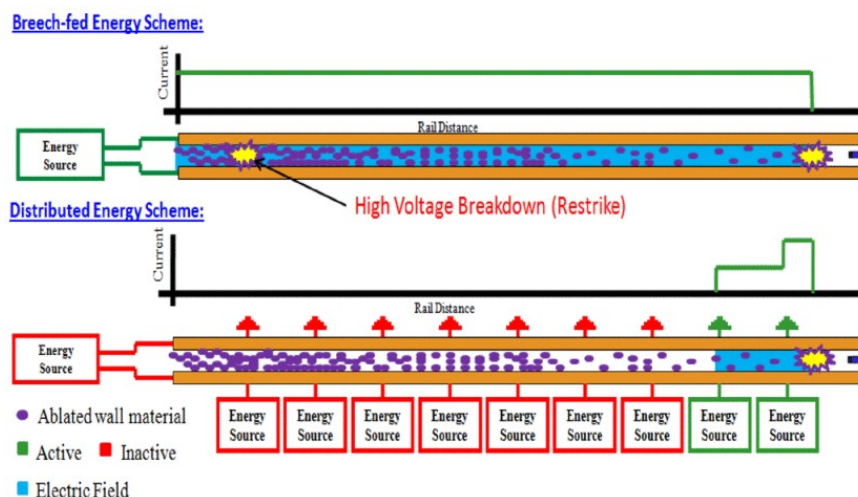
Variantou efektivní i relativně ekonomickou je napájení z kondenzátorových baterií, protože jsou schopny dodat v impulzu velký proud při malé vlastní indukčnosti. Pro tyto své vlastnosti se často využívají v laboratořích. Nicméně pro urychlení několika kilového projektilu zabírají kondenzátorové baterie prostor i několika lodních kontejnerů.

### 2.1.2.4 Způsob napájení

Při použití výše uvedených zdrojů energie je možné napájení realizovat několika způsoby. Jednou z variant je vybití veškeré energie zdroje najednou v okamžiku vypálení projektilu. Toto zapojení je vhodné pro systémy s krátkými kolejnicemi. Takto sestavený railgun se nazývá Breech-Fed railgun. Se vzdáleností od místa zapojení zdroje je proud omezován elektrickým odporem kolejnic; další nevýhodou je nevyužití celého potenciálu magnetického pole. Výhodou je snadná manipulace a jednoduché řízení.

Pro zvýšení účinnosti je vhodné, aby bylo magnetické pole soustředěno pokud možno do místa, kde se právě projektil nachází. Zdroj je tedy rozdělen na několik menších částí, které jsou vybíjeny postupně se zohledněním aktuální polohy projektilu. Tyto railguny jsou nazývány DES railgun (Distributed energy storage). Kondenzátory jsou umístěny podél hlavně pro zmenšení parazitních jevů. [12] [13]

Na níže uvedeném obrázku je patrný rozdíl mezi oběma způsoby napájení. Tento obrázek byl převzat z literatury [12], která se zabývá právě porovnáním obou způsobů napájení pro railguny s plazmovým pohonem. Vrchní polovina obrázku znázorňuje Breech-fed systém, spodní polovina právě DES systém. Modře znázorněno rozložení elektrického pole, zeleně jsou právě aktivní energetické zdroje, červeně neaktivní. Fialově je znázorněn materiál uvolnění z kolejnic.



Obrázek 5: Porovnání systémů Breech-fed a DES railgunu [12]

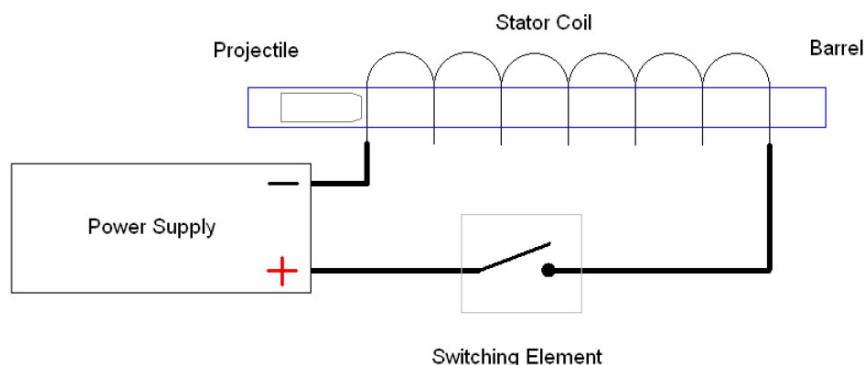
## 2.2 Coilgun – cívkové dělo

Výzkum coilgunu započal už ve 30. letech minulého století. Jeho výzkumem se zabýval prof. Northrup na univerzitě Princeton, kde sestavil diskrétní mechanicky synchronizovaný systém, který měl mít potenciál vystřelovat projektily vysokými rychlostmi. Prof. Northrup předpokládal využití pro vynášení nákladů na oběžnou dráhu Země. [2]

Principu coilgunu nebylo věnováno příliš pozornosti až do 80. let. Důvodů je několik. Mezi ně patřila především výpočtová náročnost, neboť dochází ke komplexním interakcím mezi projektilem, hlavní a zdrojem energie. Tyto interakce mají povahu elektromagnetických vazeb a jsou často velice obtížně řešitelné analyticky. Dalším z problémů, se kterým se vědci potýkali, byl nedostatek vhodných spínacích prvků a potřeba velice přesné synchronizace spínání. Naštěstí vývoj polovodičových součástek a řídicí elektroniky výrazně pokročil a kvůli svým neoddiskutovatelným výhodám oproti railgunu (z nichž některé byly uvedeny v kapitole 2) se vývoj cívkových děl dostává v posledních letech do popředí. Nicméně, problémy s přesnou detekcí polohy projektilu a s tím svázané synchronizace spínání cívek stále zůstávají.

Vzhledem k tomu, že existuje mnoho typů coilgunu, které se liší i v principu funkce, budou jednotlivé typy rozebrány samostatně. Ať už se však jedná o jakýkoliv, základní struktura zůstává stejná. Coilgun se skládá z hlavně (barrel), statorové cívk

(stator coil), projektilu (projectile), spínacích prvků (switching element) a zdroje energie (power supply); jak můžeme vidět na obrázku níže:



**Obrázek 6: Struktura coilgunu [18]**

Coilguny můžeme třídit především podle druhu zrychlení projektilu – zda-li je projektil do cívky vtahován, či je z ní vypuzován a dále podle způsobu řízení akcelerace: pak je dělíme na coilguny synchronní, typ postupné vlny, nebo pulzní. Dalšími kritérii mohou být materiál projektilu – feromagnetický, vodivý či nevodivý, nebo typ napájecího zdroje. [16]

#### **a) Projektil vtahován do cívky**

Těmto typům coilgunů se říká reluktanční coilgun. Projektil je v tomto případě feromagnetický a je na principu elektromagnetu vtahován do cívky.

#### **b) Projektil vypuzován z cívky**

Tento typ coilgunu se nazývá indukční. Vlivem elektromagnetického pole cívky se ve vodivém projektilu indukuje proud opačného směru a elektromagnetické pole tímto proudem vytvořené vytváří v interakci s polem cívky odpudivou sílu.

#### **c) Synchronní řízení a traveling wave (postupná vlna)**

Tento typ řízení je možné nejlépe přirovnat ke klasickému třífázovému motoru, kdy jsou cívky zapojeny do skupin podle fází a tak i spínány, což v hlavní vytváří časově proměnné elektromagnetické pole, na které reaguje projektil pohybem. Vzhledem k tomu, že je žádoucí projektil urychlit, je třeba časově proměnná frekvence pole, což vede na myšlenku použití vektorového řízení motorů.

#### **d) Pulzní řízení**

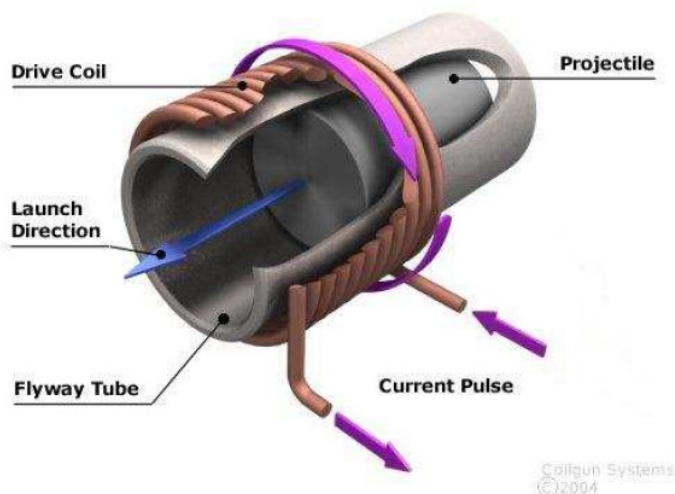
Každá cívka je napájena a spínána zvlášť v závislosti na poloze projektilu v hlavní jedním proudovým pulzem. K vytvoření těchto pulzů se používají kondenzátorové baterie.

### e) Napájecí zdroj

V případě coilgunu synchronního je napájení střídavé povahy, jehož frekvence musí být dobře regulovatelná, vhodné je tedy použití polovodičových střídačů. V případě pulzních coilgunů se používá kondenzátorových baterií, které jsou po výstřelu dobity z vhodného zdroje stejnosměrného napětí.

## 2.2.1 Reluktanční coilgun

Principiálně nejjednodušší typ coilgunu. Projektil je plný, z feromagnetického materiálu. V okamžiku sepnutí cívky, vytváří proud silné magnetické pole, které vtahuje projektil do cívky. Tato zařízení pracují s unipolárními proudovými pulzy, nejčastěji dodávanými z kondenzátorových baterií. Tím se vytváří RLC rezonanční obvod, který musí být správně zatlumen dostatečnou velikostí elektrického odporu pro vytvoření unipolárního pulzu. Tímto způsobem je projektil urychlen. Proudový impulz musí být ukončen dříve, než projektil dosáhne středu cívky. Pokud by ukončen nebyl, došlo by k tzv. „suck-back“ efektu. Síla, která urychluje projektil, působí do středu cívky. Pokud by cívkou stále procházel, i když se projektil nachází už středem cívky, byl by vtažen zpět.



Obrázek 7: Princip reluktančního coilgunu [18]

Existence suck-back efektu způsobuje, že tvar, délka trvání a načasování proudového pulsu je jedním z nejdůležitějších aspektů návrhu zařízení. Tato cívková děla jsou schopna urychlovat pouze feromagnetické materiály, pokud by byl projektil tvořen permanentním magnetem, je možné, aby byl projektil urychlován i vypuzováním.

Reluktanční se tento typ coilgunu nazývá podle děje, který umožňuje vytváření síly. Představme si, co se děje, budeme-li vsouvat železné jádro do solenoidu. Při vstupu feromagnetického materiálu do cívky, čímž se snižuje magnetický odpor prostředí (reluktance) uvnitř cívky. Nejnižší odpor prostředí pro siločáry mag. pole tvořeného cívkou nastává právě v prostředku cívky. Naopak lze říci, že cívka vtahuje projektil dovnitř, jelikož ten má menší magnetický odpor než okolní prostředí a tudíž svou přítomností zmenšuje magnetický odpor prostředí, který cívka pociťuje.

Podobně jako u reluktančního nebo krokového motoru je projektil vtahován do míst, kde je reluktance nejmenší. [19] [18].

Ačkoli je reluktanční coilgun principiálně nejjednodušší, stvořit jeho dynamický model je velmi obtížně. Do výpočtu musí být zahrnuta proměnná indukčnost cívky, stejně tak jako hysterezní křivka feromagnetického projektilu a jeho nasycení, které bude také časově proměnné. Zároveň, vzhledem k tomu, že cívky musí být napájeny tlumeným pulzem, musí být nevyužitá energie spotřebována jako teplo na odporu, čímž se snižuje účinnost celého zařízení.

## 2.2.2 Indukční coilgun

Jak už název napovídá, síla, která urychluje projektil je síla působící mezi polem vytvořeným statorovou cívkou a proudem indukovaným ve vodivém projektilu. Vzhledem k tomu, že tato interakce je relativně dobře popsitelná a prozkoumaná, je indukční coilgun v současné době nejvíce využívaným typem cívkových děl.

Statorové cívky jsou vinuté, podobně jako u reluktančního coilgunu, nicméně projektily mohou být jak ve formě plných válcových mezikruží z vodivého materiálu (například hliníková, nebo měděná trubka), tak mohou být i vinuté (cívka z měděného vodiče se zkratovanými konci, může být i vícevrstvá) [20]

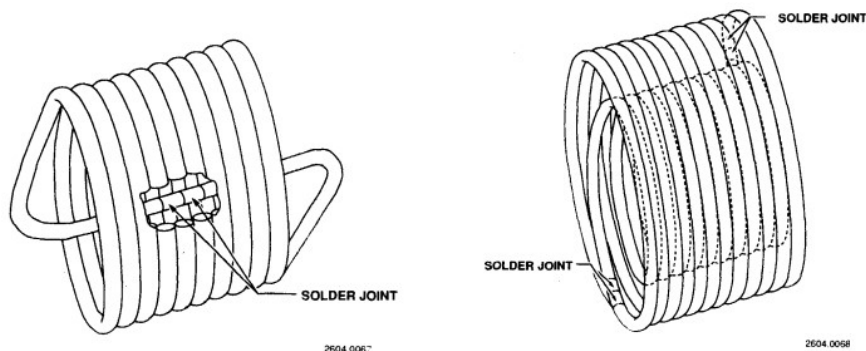


Figure 4. Multitrans armature shorted at center line

Figure 5. Multitrans armature shorted on surface

### Obrázek 8: Dva typy vinutých projektilů [20]

Schematické obvodové zapojení je principiálně stejně jako u reluktančního coilgunu. Indukční cívkové dělo může být napájeno buď pulzně z kondenzátorových baterií, nebo střídavě v případě řízení typu postupné vlny.

Fyzikální základ funkce indukčního coilgunu lze popsat Faradayovým indukčním zákonem, Lenzovým principem a Lorenzovou silou.

Faradayův indukční zákon říká, že napětí indukované do smyčky je úměrné derivaci spřaženého toku podle času:

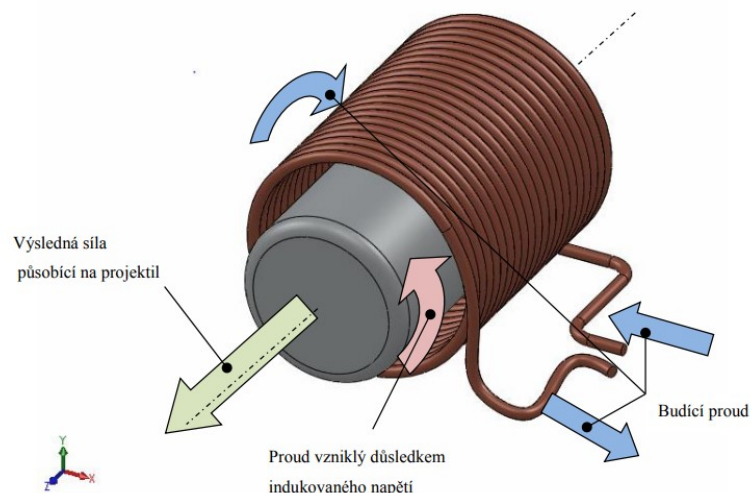
$$u = - \frac{d\Psi(t)}{dt} \quad (2.2.2-1)$$

kde  $u$  je indukované napětí a  $\Psi$  je spřažený tok. Záporné znaménko je dáno právě Lenzovým principem, že indukovaný proud do smyčky bude působit proti poli, které jej vyvolalo. [6] Aplikujeme-li tento zákon právě na coilgun, pak časově proměnný spřažený tok je vyvolán proudem procházejícím ve statorové cívce a napětí vznikající

na zkratovaném projektilu vytváří proud. Tento indukovaný proud je pak původce spřaženého toku projektilu, který působí proti poli vytvářenému cívkou.

Lorenzova síla již byla uvedena rovnicemi (2.1.1-1) a (2.1.1-2) a je to původce síly urychlující projektil. Stejně jako v případě railgunu, na indukovaný proud procházející projektilem můžeme nahlížet jako na nabitou částici nacházející se v magnetickém poli cívky, na niž působí síla, závisající (zanedbáme-li Coulombovu sílu) na velikosti náboje, magnetické indukce a rychlosti, kterou se částice pohybuje.

Kombinací těchto fyzikálních principů získáváme představu o podstatě síly, která urychluje projektil. Podíváme-li se na problém z pohledu magnetického pole, závit na krátko (pod kterým si lze projektil představit) vytváří svým indukovaným polem magnetický izolant, který brání v průchodu siločar magnetického pole generovaného cívkou, a tudíž bude vznikat odpudivá síla, protože siločáry magnetického pole „chtějí“ být uzavřené.



**Obrázek 9: Princip funkce indukčního coilgunu [5]**

Vzhledem k tomu, že síly působící mezi statorovou cívkou a projektilem jsou vždy odpudivé, vyvstává opět problém s načasováním spínání cívek. Aby projektil letěl správným směrem, musí síla začít působit až za středem statorové cívky, jinak by se projektil vydal opačným směrem (a mohl např. poškodit zařízení nebo zranit operátora). Indukční coilgun má však nespornou výhodu oproti reluktančnímu dělu: nezáleží na čase vypnutí cívky. U reluktančního coilgunu bylo pro správný chod zařízení klíčové včasné vypnutí cívky, aby se předešlo „suck-back“ efektu. U indukčního coilgunu problém vypnutí řešit nemusíme. Toto je výhodné především kvůli vztahu velké indukčnosti (statorové cívky) a spínacích polovodičových prvků. Vzhledem k tomu, že se projektily mají pohybovat značnou rychlostí, je nejdůležitější rychlá změna stavu. Čas sepnutí současných polovodičových prvků je značně kratší, než čas vypnutí (tím více, spíná-li se indukčnost).

### 2.2.2.1 Pulzní indukční coilgun

Pulzní coilgun je zařízení nejčastěji napájené kondenzátorovými bateriemi. Po sepnutí spínacího prvku dochází k vybití kondenzátorů do statorové cívky a vytvoření

RLC rezonančního proudového pulzu. Tato zařízení jsou nejčastěji víceúrovňová – na hlavní je umístěno více těchto RLC obvodů. Statorové cívky jsou spínány v takových časových intervalech, aby proměnné magnetické pole v hlavní odpovídalo skutečnému pohybu projektilu a urychlovalo ho. Takovýto systém je možný vidět schematicky znázorněný na obrázku níže [23]:

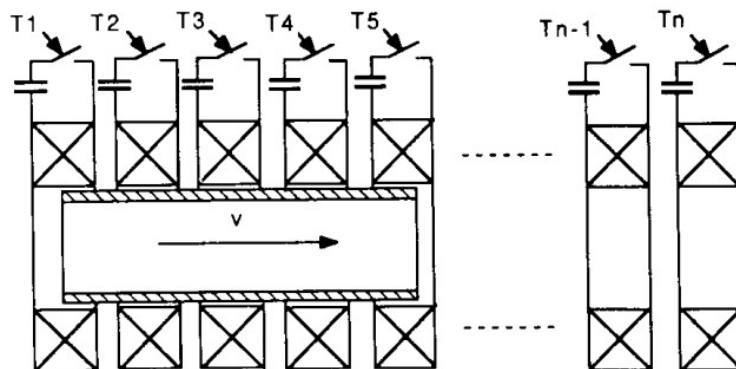
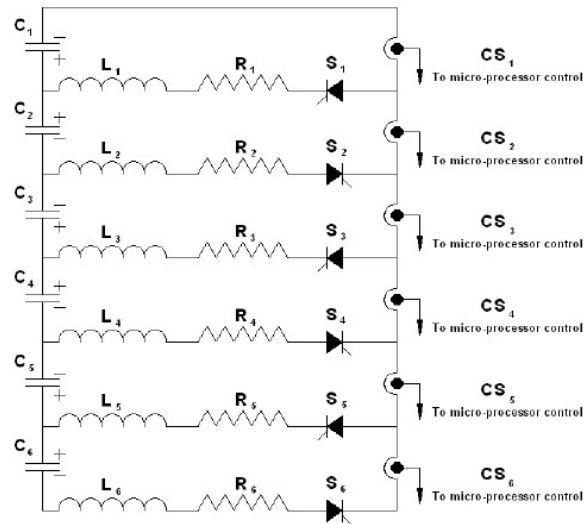


Fig. 1. Sketch of multisection capacitively driven coil launcher.

**Obrázek 10: Schematické znázornění pulzního coilgunu napájeného kondenzátorovými bateriemi [23]**

Projektil se pohybuje rychlostí  $v$  a po průchodu každým stupněm je mu uděleno zrychlení odpovídající síle vytvořené interakcí mezi sepnutou statorovou cívku a projektil. Vzhledem k tomu, že se projektil pohybuje se vzrůstající rychlostí, není třeba tak dlouhého proudového impulsu. Změnou velikostí indukčnosti cívky a kapacity kondenzátoru lze vhodně nastavit frekvenci rezonančních pulzů. S touto frekvencí souvisí i podoba projektilu, chceme-li použít projektil z plného materiálu. Principiálně není třeba, aby byl projektil plný válec, ale pouze trubka o síle stěny stejně velké, jako je hloubka vniku magnetického pole pro použitou frekvenci rezonančního pulzu a daný materiál.

Vzhledem k tomu, že při průchodu projektilu jedním stupněm se nezužítkuje všechna energie uložená v kondenzátoru, je možné ji využít pro další stupeň, jak je uvedeno například v literatuře [24], z níž byl přejet následující obrázek, kde je tento nápad naznačen v obvodové podobě:

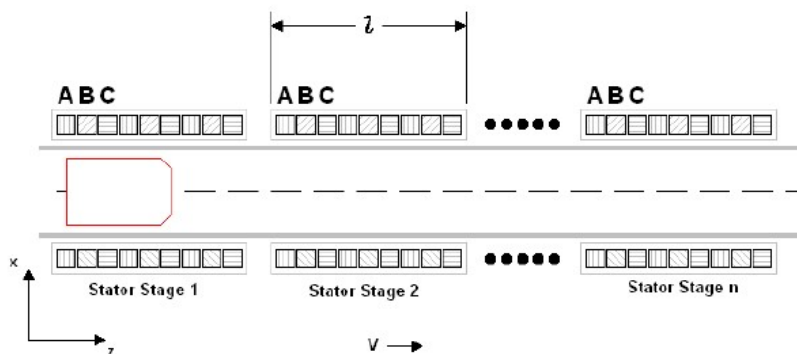


**Obrázek 11: Využití energie kondenzátoru předchozího stupně pro stupeň další [24]**

$L_1-L_6$  jsou indukčnosti statorových cívek jednotlivých stupňů,  $C_1-C_6$  představují kondenzátorové baterie náležící jednotlivým statorovým cívkám.  $S_1-S_6$  jsou spínací prvky stupňů a odpory  $R_1-R_6$  představují ztráty v obvodu a energii použitou pro urychlení projektilu. Takovéto kaskádní zapojení umožňuje energií zbylou z jednoho stupně nabít další kondenzátory dalšího stupně. Tato metoda může být využita i u reluktančního coilgunu, kde může sloužit k eliminaci „suck-back“ efektu, protože proud cívkou v tomto případě zaniká s průchodem proudem nulou. [18]

### 2.2.2.2 Traveling wave indukční coilgun

Tento typ cívkového děla je svým principem velice podobný asynchronnímu motoru. Statorové cívky nejsou napájeny pulzy jako v předchozím případě, ale sinusovým proudem, který musí postupně nabývat vyšších frekvencí pro reflexi zrychlování projektilu. Tato zařízení mohou být i vícefázová. Cívky jsou navinuty ve skupinách, pro jeden stupeň cívky všech fází, jako je naznačeno na obrázku 12 (zapojení třífázové – A, B, C).



**Obrázek 12: Schéma zapojení cívek třífázového traveling wave coilgunu [24]**

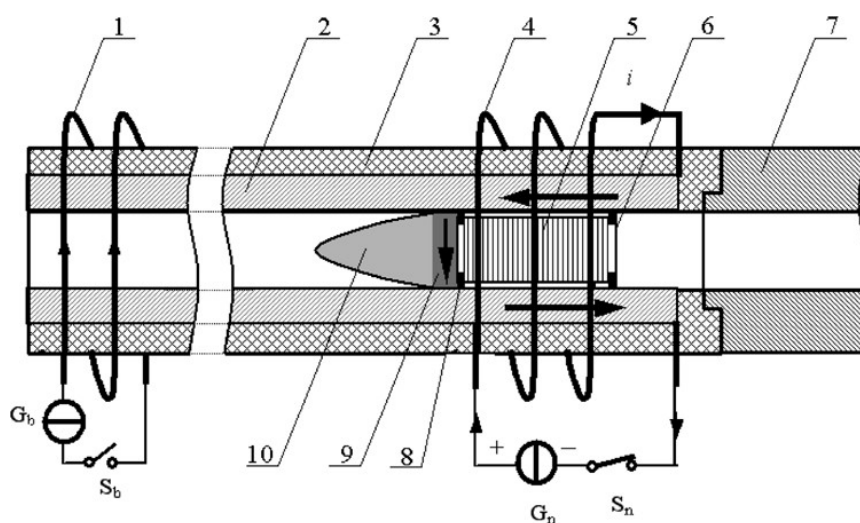
Výsledkem takového zapojení je elektromagnetické pole pohybující se ve směru osy z jistou rychlostí. Toto pole indukuje proud v projektilu a ten je pak vypuzován cívkou. Dokud existuje rozdíl v rychlosti pohybu pole a projektilu, bude se v projektilu

indukovat časově proměnný proud, který bude reagovat na vnější proměnné pole zrychlováním projektilu; stejně jako u asynchronního motoru se projektil pohybuje se skluzem vzhledem k synchronní rychlosti pole. Dosáhne-li projektil synchronní rychlosti, přestane zrychlovat a bude se dále pohybovat stejnou rychlostí. [25]

## 2.3 Hybridní a jiné systémy

### 2.3.1 Rail-Coil hybridní elektromagnetické dělo

Jak už název napovídá, jedná se o elektromagnetické dělo, které využívá jak principu coilgunu tak i railgunu. Kolejnice jsou tvořené nemagnetickým, ale dobře vodivým materiálem a zároveň společně s izolační výztuhou hlavně co nejtenčí pro dobrou vazbu mezi statorovými cívkami a projektilem.



Obrázek 13: Rail-Coil hybridní elektromagnetické dělo [25]

1 - zastavující cívka; 2 - kolejnice; 3 - izolace; 4 - statorová cívka; 5 - cívka projektilu; 6 - podpůrný kroužek; 7 - injektor; 8 - podpůrný kroužek; 9 - propojení kolejnic; užitečný náklad

Princip funkce je následující. V okamžiku, kdy projektil mine střed cívky je sepnut spínač, který umožní vybití vysoce výkonného zdroje zároveň do kolejnic i do statorové cívky zapojených v sérii. Tím prochází proud jak kolejnicemi a projektilem (čímž je na projektil vytvářena síla jako u railgunu) tak i statorovou cívkou, která interaguje s cívkou v projektilu (síla vytvářena jako u coilgunu). Níže je uvedeno schematické znázornění tohoto principu. [25]

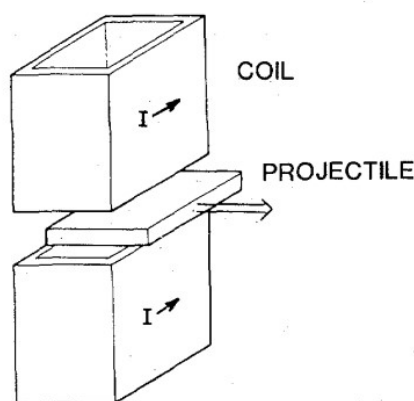
### 2.3.2 Helical launcher – „spirálové dělo“

Je také jistým hybridem mezi systémy railgun a coilgun. V tomto případě (na rozdíl od příkladu předchozího) je využíván kolejnicový systém pro stejnosměrné buzení cívky na projektilu. Tento způsob buzení projektilové cívky zvláště má výhodu především v tom, že projektil může být z cívky jak vypuzován, tak do ní přitahován, což záleží pouze na směru proudu v projektilové cílce. Jeho nevýhoda však spočívá v opotřebení kartáčů. [18]

### 2.3.3 Reconnection gun

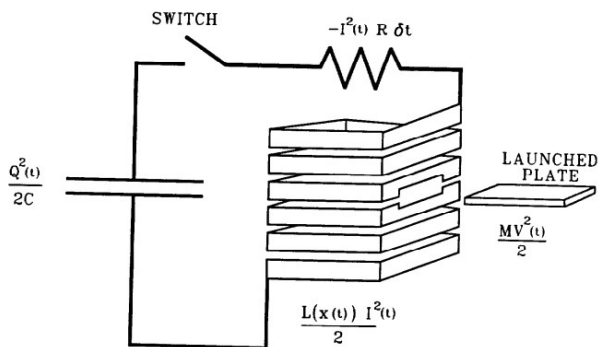
Označuje se také jako deskové, talířové nebo přepojovací dělo. Existuje vícero zařízení se stejným názvem, uveďme dvě geometrie:

- a) Dvě cívky obdélníkového tvaru jsou umístěny podle Obrázek 14. Dokud bude projektil přesně lícovat s oběma cívkami, nebude se dít nic, působí jako magnetický izolant (závit nakrátko v magnetickém poli). Pokud se ovšem vychýlí z této polohy, začne probíhat magnetická rekonekce siločar magnetických polí obou cívek. Ty chtějí být co nejkratší, proto začnou projektil z cívky vypuzovat a tím ho urychlí. [27]



Obrázek 14: Schéma reconnection gun se dvěma obdélníkovými cívkami [27]

- b) Druhou možností je využít ne dvou, ale pouze jedné cívky s otvorem pro vystřelení projektilu. Opět je principem magnetická rekonekce, nyní však jde o rekonekci siločar uvnitř vzduchové cívky. [28]



Obrázek 15: Reconnection gun v podobě jedné vzduchové cívky [28]

### 3 MATEMATICKÁ ANALÝZA ZÁKLADNÍCH TYPŮ ELEKTROMAGNETICKÝCH AKTUÁTORŮ

Jak již bylo řečeno, matematická analýza elektromagnetických děl je obtížná vzhledem k počtu interakcí mezi jednotlivými aktivními částmi těchto zařízení. V této části práce budou položeny alespoň teoretické základy potřebné k návrhu a vzájemnému porovnávání jednotlivých typů elektromagnetických děl.

#### 3.1 Railgun

Na railgun lze z čistě elektrického hlediska nahlížet (za předpokladu, že zdrojem je kondenzátorová baterie) jako na RLC obvod. Tím lze sestavit rovnici, která pokrývá elektrické chování této zbraně:

$$U_0 = L \cdot \frac{di(t)}{dt} + R \cdot i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad [30] \quad (3.1-1)$$

K objasnění vlastností magnetického pole railgunu začneme opět s Lorenzovým zákonem (rovnice 2.1.1-1):

$$\vec{F} = Q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1.1-1)$$

K jejímu vyřešení je třeba znát právě magnetickou indukci  $B$ , kterou lze spočítat, jak již bylo uvedeno, pomocí Biot-Savartova zákona:

$$d\vec{B} = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{4\pi R^2} \quad (2.1.1-1)$$

kde  $d\vec{B}$  je magnetická indukce v bodě, tvořená proudem  $I$  na elementu  $d\vec{l}$ , který je od elementu vzdálen na vzdálenost  $R$  a  $\vec{r}$  je jednotkový vektor v tomto bodě, směřující stejným směrem jako element proudový.

Pro orientační výpočet vlastností railgunu lze využít následující postup, při kterém pro výpočet síly vyjdeme z energie magnetického obvodu. Představme si kolejnici railgunu o poloměru  $r_0$  a ve vzdálenosti  $R_0$  od jejího středu druhou kolejnici. Magnetická indukce je definována jako:

$$B(r) = \mu_0 \cdot \frac{I}{2\pi r} \quad (3.1-2)$$

kde  $B$  je magnetická indukce ve vzdálenosti  $r$  od vodiče, jímž protéká proud  $I$ . Spřažený magnetický tok lze potom odvodit takto:

$$d\psi = B(r)dS = B(r)ldr \quad (3.1-3a)$$

$$d\psi = \int_{r_0}^{R_0} \frac{\mu_0 I l}{2\pi r} dr \quad (3.1-3b)$$

$$d\psi = I \frac{\mu_0 l}{2\pi} [\ln r]_{r_0}^{R_0} = I \frac{\mu_0 l}{2\pi} \cdot \ln \frac{R_0}{r_0} \quad (3.1-3c)$$

Veličina  $l$  značí délku. Energie magnetického pole je definována jako:

$$W_{el} = \frac{1}{2} \psi I \quad (3.1-4)$$

Z čehož lze spočítat působící sílu:

$$F = \frac{\partial W_{el}}{\partial l} = \frac{I^2 \mu_0}{4\pi} \cdot \ln \frac{R_0}{r_0} \quad (3.1-5)$$

Pokud bychom si zvolili hodnoty  $r_0 = 5\text{mm}$ ,  $R_0 = 20\text{mm}$  a protékající proud  $I = 10\text{kA}$ , vyjde působící síla  $F = 13,8\text{N}$ . I z tohoto zjednodušeného výpočtu vyplývá, že pro získání síly v řádech desítek Newtonů je třeba desítek kA.

### 3.1.1 Limitace technologie railgun

Jak již bylo naznačeno, největším problémem technologie railgun je potřeba velké hodnoty proudu pro získání relativně malé působící síly. Tento nedostatek je třeba kompenzovat buď velkou délkou kolejnic, nebo právě vysokými proudy. Zároveň je nutno použít projektilů o malé hmotnosti (několik gramů), aby projektil dosahoval vysokých rychlostí, které jsou většinou od těchto zařízení požadovány. Dle [1] je navíc účinnost pouze v řádech jednotek %.

Dalším problémem je například vzájemné silové působení dlouhých kolejnic navzájem, kde elektromagnetické síly při vysokých proudech dosahují značných hodnot. Je tudíž nutné kolejnice velmi pevně ukotvovat, což snižuje možnosti využití v praxi.

Jednou z největších překážek je potom rychlé opotřebení kolejí. Projektil se musí celou dobu vystřelování dotýkat obou kolejí – měď klouže o měď. Koleje nejsou nikdy úplně rovné, proud tudíž neprochází celým povrchem kontaktu, ale pouze malými proudovými můstky. To způsobuje natavování kolejí a další zhoršování kontaktního styku. V jisté fázi letu se projektil může vzdálit od kolejnice a přerušit tak přímý vodivý kontakt s ní. V tom okamžiku vzniká elektrický oblouk v místě přerušeného kontaktu, který dále poškozuje koleje. [32]. V literatuře [11] se lze potom dočíst, že ani railguny s plazmovým pohonem nejsou řešením, pokud se nepodaří eliminovat proud procházející druhým obloukem, který se tvoří z ionizovaného plynu v hlavni.

V současnosti brání využití railgunu v praxi i nemálo ekonomických, logistických a ekologických problémů. Railgun je oproti konvenčnímu dělu, které je sestaveno de facto pouze z ocelové hlavně, výrobek, kde je velká spotřeba barevných (a drahých) kovů. Celková konstrukce je složitá, vyžaduje častější údržbu a je více poruchová než současně systémy. Nevyřešeným problémem zůstává elektromagnetické rušení vznikající při výstřelu, které může ovlivnit např. řídicí elektroniku plavidel nebo vozů, na nichž by railgun byl nainstalován.

## 3.2 Reluktanční coilgun

Matematickou analýzu reluktančního coilgunu lze postavit na definičním vztahu pro magnetickou energii:

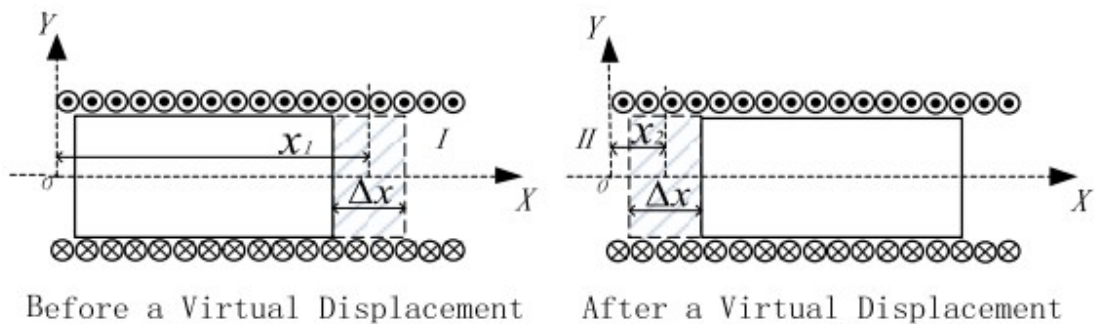
$$w_m = \frac{1}{2} B \cdot H = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2\mu} B^2 \quad [30] \quad (3.2-1)$$

kde  $w_m$  je magnetická energie,  $B$  je magnetická indukce,  $H$  je magnetická intenzita a  $\mu$  je permeabilita materiálu.

Pro další postup se používá metody „virtuálního nahrazení“. Pokud je cívka dostatečně dlouhá a závity vinuty dostatečně tenké vrstvě, lze použít vztah pro solenoid a potom lze pro intenzitu magnetického pole v ose cívky napsat rovnici:

$$H = \frac{1}{2} ni = \frac{l - x}{\sqrt{(l - x)^2 + R^2}} + \frac{x}{\sqrt{x^2 + R^2}} \quad [30] \quad (3.2-2)$$

kde  $n$  je počet závitů cívky na jednotkovou délku,  $i$  je proud cívku,  $l$  je délka cívky,  $x$  je relativní pozice uvnitř cívky a  $R$  je její poloměr.



Obrázek 16: Schématické znázornění virtuálního nahrazení

Na obrázku lze vidět schématické znázornění virtuálního nahrazení, přičemž se pro obě polohy spočtou intenzity magnetického pole. Pro výpočet celkové magnetické energie je zapotřebí objemového integrálu:

$$\Delta W_m = \int \int \int [(\mu - \mu_0) \cdot (H_1^2 - H_2^2)] \cdot dV \quad [30] \quad (3.2-3)$$

Derivací tohoto vztahu se dostáváme k elektromagnetické síle, který ovšem není vhodný pro výpočet poloh, kdy se jádro nachází daleko od jádra:

$$F_m = \frac{d\Delta W_m}{dx} = \frac{1}{2} (\mu - \mu_0) \cdot (H_1^2 - H_2^2) \cdot A \quad [30] \quad (3.2-4)$$

Jako poslední zbývá výpočet indukčnosti. Ta je závislá na poloze (a tím nepřímou) i na čase a její výpočet lze najít např. v literatuře [19], nicméně vždy je kvůli značné nelinearitě BH křivky doporučeno použít pro její výpočet metodu konečných prvků.

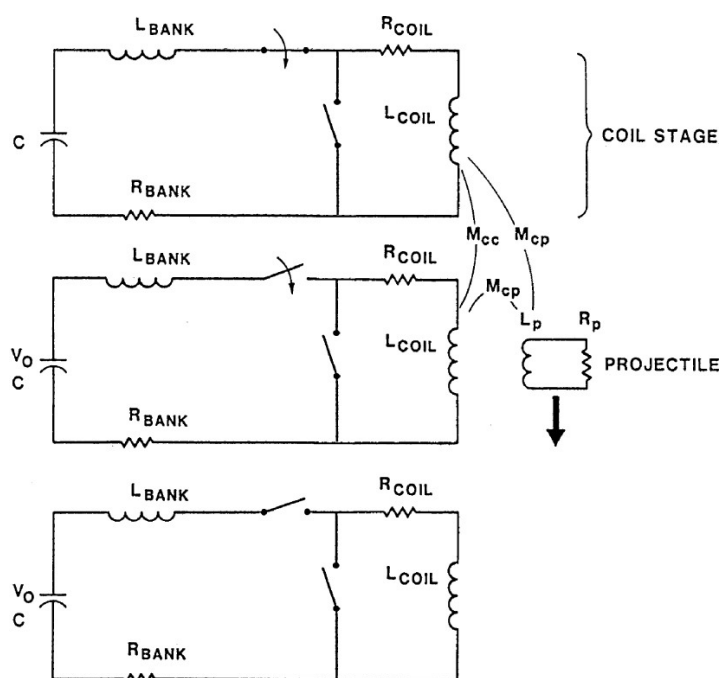
### 3.2.1 Limitace technologie reluktančního coilgunu

Tato technologie nabízí mnoho zajímavých možností, kupříkladu využití jakéhokoli feromagnetického materiálu jako střeliva. Zásadním problémem této technologie jsou

materiálové vlastnosti projektilu. Použije-li se projektil např. z jednoho kusu železa, tak zatímco je vtahován magnetickým polem cívky, dochází zároveň k jeho vypuzování kvůli vířivým proudům, které v něm vznikají. Naopak použití feritů je také nevýhodné, kvůli jejich křehkosti. Několik elementárních problémů je společných s indukčním coilgunem; budou rozebrány v následující kapitole.

### 3.3 Indukční coilgun

V této kapitole budou uvedeny vztahy a postupy, které by měly vést k vytvoření matematického modelu v prostředí MatLab Simulink. Obtíž analýzy coilgunu je především v provázanosti všech veličin a jejich závislost na poloze projektilu a tím pádem i na čase.



Obrázek 17: Náhradní schéma indukčního coilgunu

$C$ ,  $L_{BANK}$  a  $R_{BANK}$  jsou označení kapacity, indukčnosti a odporu samotné baterie kondenzátorů.  $R_{COIL}$  je odpor statorové cívky a  $L_{COIL}$  je její indukčnost.  $L_P$  a  $R_P$  je označení indukčnosti a odporu projektilu. Mezi projektilem a statorovými cívkami existuje vzájemná indukčnost  $M_{CP}$  a to jak mezi cívkou stupně, u které se právě projektil nachází, tak i mezi cívkou stupně předchozího a stupně následujícího. Dále existuje vzájemná indukčnost mezi statorovými cívkami  $M_{CC}$ .

Vezměme si nejprve situaci statickou, kdy máme dvě cívky v jisté vzdálenosti od sebe. Tuto situaci můžeme popsat pomocí II. Kirchhoffa zákona. Pro statorovou cívku bude platit, že je napájena napětím  $u$ , má elektrický odpor  $R_S$ , vlastní indukčnost  $L_S$  a prochází jí proud  $i_S$ . Obdobně pro projektil platí, že má elektrický odpor  $R_P$ , vlastní indukčnost  $L_P$  a prochází jí proud  $i_P$ . Proudů jsou časově závislými veličinami, stejně jako rychlost  $v$ . Statorová cívka má s projektilem vzájemnou indukčnost  $M_{SP}$ . Můžeme potom napsat dvě rovnice, z nichž první reprezentuje jednu statorovou cívku a druhá projektil:

$$u = i_S R_S + L_S \frac{di_S}{dt} - M_{SP} \frac{di_P}{dt} - i_P v \frac{dM_{SP}}{dx} \quad [20] \quad (3.3-1)$$

$$0 = -i_P R_P - L_P \frac{di_P}{dt} + M_{SP} \frac{di_S}{dt} + i_S v \frac{dM_{SP}}{dx} \quad [20] \quad (3.3-2)$$

V rovnici (3.1-2) je  $u = 0V$ , protože se jedná o závit na krátko a na něm nevzniká úbytek napětí. Tyto rovnice se v integrálním tvaru dají sestavit v MatLab Simulink. Je zjevné, že nejproblematictější bude výpočet vzájemné indukčnosti  $M_{SP}$  a jejího gradientu  $\frac{dM_{SP}}{dx}$ .

Další rovnicí esenciální pro sestavení matematického modelu je vyjádření síly působící na projektil. Dle [30] se tato síla dá vyjádřit následující rovnicí s použitím Newtonových zákonů:

$$F = i_S i_P \frac{dM_{SP}}{dx} = m \frac{dv}{dt} \quad [30] \quad (3.2-3)$$

Máme tedy tři diferenciální rovnice, které je třeba pro analýzu indukčního coilgunu vyřešit.

### 3.3.1 Limitace technologie

Hlavním limitačním faktorem této technologie je vazba mezi primární – statorovou cívku a sekundární cívku – projektil. Na vzájemné indukčnosti a jejím gradientu závisí velikost síly urychlující projektil. Tento fakt znesnadňuje návrh geometrických rozměrů cívek.

Další problém, který znesnadňuje uvedení všech těchto technologií do praktického užití je jejich cena. Je třeba sofistikovaných obvodů pro řízení výstřelu, což celá zařízení prodražuje, nemluvě o velkokapacitních kondenzátorech a barevných kovech potřebných pro provoz.

Nevýhodou je také potřeba kompaktního zdroje energie – baterií pro opětovné nabití kondenzátorů po výstřelu. Zároveň zařízení generuje výrazné elektromagnetické rušení, které může ovlivnit další přístroje.

Při opakovaném výstřelu nastává problém se zahříváním statorových vinutí [30]. Většina výzkumů se zaměřuje na maximální účinnost jednoho výstřelu, kde není třeba se příliš zabývat oteplením vinutí a proudovou hustotou ve vodičích, která může dosáhnout značných hodnot. Při mnoha opakovaných výstřelech s vysokou kadencí už oteplování vinutí může znamenat značný problém. S podobnou situací se setkáváme i u projektilů, kde proudy navíc nezanikají s rostoucí vzdáleností od cívky (která může být vypnuta po průchodu první půlvlny proudu), ale jsou udržovány vlastní indukčností projektilu. V okamžiku impaktu pak může být projektil značně zahřátý a tudíž měkký. Limitujícím faktorem je i působení elektrodynamických sil, kdy se bortí projektil a rozpíná cívka (u indukčního coilgunu; naopak u reluktančního coilgunu). Vzhledem k vysokým hodnotám proudů, které se vyskytují u coilgunů, působení elektrodynamických sil znesnadňuje konstrukci cívky, kdy je třeba klást

důraz nejen na to, aby se cívka neroztrhla, ale i na fakt, že vzájemné posuny vodičů jednotlivých závitů vůči sobě může způsobit prodření izolace a zapříčinit mezizávitový zkrat. Dle literatury [33] jsou malé projektily limitovány oteplením a se zvyšující se hmotností se začíná více než oteplení projevovat vliv elektrodynamických sil.

## 4 INDUKČNÍ COILGUN - NÁVRH

V předchozí kapitole byly uvedeny základní diferenciální rovnice, z nichž budeme vycházet pro vytvoření modelu v MatLab Simulink. Je však třeba znát hodnoty odporů a indukčností, abychom mohli tento výpočet provést.

### 4.1 Základní geometrické rozměry

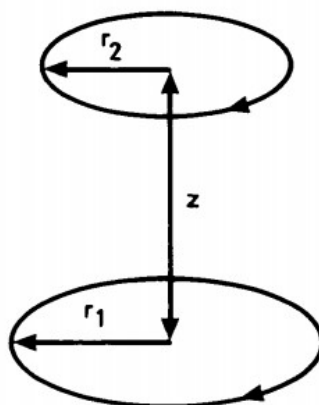
Pro konkrétní návrh geometrie coilgunu bylo třeba nejdříve zvolit požadovanou výstupní energii projektilu, předpokládanou účinnost, velikost napětí na kondenzátoru a rozměry hlavně, projektilu a statorové cívky, které byly následně iteračně upraveny, tudíž zatím nebudou uvedeny.

Tabulka 1: Hodnoty zvolené pro návrh coilgunu

Výstupní energie	$W$	40J
Předpokládaná účinnost	$\eta$	30%
Napětí kondenzátoru	$U_0$	max. 450V

#### 4.1.1 Výpočet vzájemné indukčnosti a jejího gradientu

Pro potřeby výpočtu vzájemné indukčnosti budeme čerpat z literatury [31], kde je uvedena metoda výpočtu vzájemné indukčnosti pomocí dvou koaxiálních proudových filamentů:



Obrázek 18: Znázornění proudových filamentů pro potřeby výpočtu [31]

Jejich vzájemnou indukčnost lze vyjádřit mnoha způsoby, byla zvolena rovnice vycházející přímo z Maxwellových rovnic. Dle literatury [34] je vyjádřena jako:

$$m = \mu_0 \sqrt{r_1 r_2} \left\{ \left( \frac{2}{k} - k \right) K(k) - \frac{2}{k} E(k) \right\} \quad [34] \quad (4.1.1-1)$$

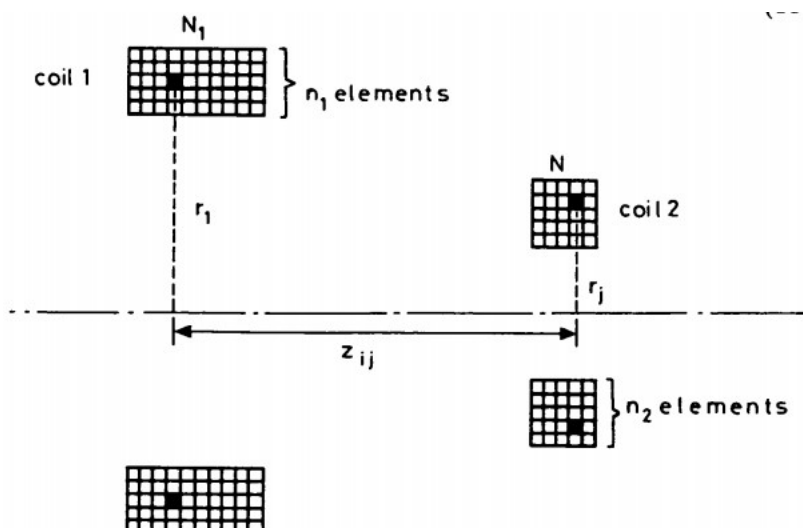
kde  $K(k)$  a  $E(k)$  jsou eliptické integrály prvního a druhého typu,  $r_1$  a  $r_2$  náležejí rozměrům cívky podle Obrázek 18 a  $k$  je funkcí těchto rozměrů podle:

$$k^2 = \frac{4r_1r_2}{z^2 + (r_1 + r_2)^2} \quad [34] \quad (4.1.1-2)$$

Dále pro výpočet gradientu vzájemné indukčnosti je třeba rovnici (3.1.1-1) parciálně derivovat podle  $z$ :

$$\frac{\delta m}{\delta z} = \frac{\mu_0 k z}{4(1 - k^2)\sqrt{r_1 r_2}} \{2(1 - k^2)K(k) - (2 - k^2)E(k)\} \quad [31] \quad (4.1.1-3)$$

Pro aplikaci této rovnice na cívku reálných rozměru byla použita *Lyleho metoda* [34] vhodná pro výpočet vzájemné indukčnosti koaxiálních cívek. Její princip spočívá v rozdělení cívky na obdélníkové elementy, jako na obrázku níže. Následně se spočítá vzájemná indukčnost (a příp. její gradient) pro každou kombinaci elementů  $n_i$  a  $n_j$ , kde  $n_i$  označuje jednotlivé elementy vnější cívky a  $n_j$  jednotlivé elementy cívky vnitřní.



**Obrázek 19: Rozdělení reálných cívek na elementy pro výpočet vzájemné indukčnosti [31]**

Nyní budeme uvažovat každou jednotlivou dílčí část jako proudový element. Cívku 1 rozdělíme na  $n_1$  elementů radiálně a  $N_1$  elementů axiálně. Obdobně rozdělíme cívku druhou na  $n_2$  elementů radiálně a  $N_2$  elementů axiálně. Vzájemnou indukčnost mezi  $i$ -tým elementem cívky 1 a  $j$ -tým elementem cívky 2 vypočteme dle vztahu (4.1.1-1) a označme ji potom jako  $m_{ij}$ . Celková vzájemná indukčnost těchto dvou cívek je potom dle lit. [34] dána jako průměr příspěvků od všech kombinací  $m_{ij}$  násobeno součinem skutečných závitů jednotlivých cívek. Skutečné závity cívky 1 označme jako  $N_a$  a závity cívky 2 jako  $N_b$ . výraz pro výpočet vzájemné indukčnosti lze tedy napsat jako:

$$M_{12} = \frac{N_a N_b}{N_1 N_2 n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1 \cdot N_1} \sum_{j=1}^{n_2 \cdot N_2} m_{ij} \quad [34] \quad (4.1.1-5)$$

Obdobným postupem lze získat i gradient vzájemné indukčnosti:

$$\frac{dM_{12}}{dz} = \frac{N_a N_b}{N_1 N_2 n_1 n_2} \sum_{i=1}^{n_1 \cdot N_1} \sum_{j=1}^{n_2 \cdot N_2} \frac{\delta m_{ij}}{\delta z} \quad [31] \quad (4.1.1-6)$$

Pro číselné vyjádření vzájemné indukčnosti a jejího gradientu byl použit program MatLab. Skript s výsledným řešením tohoto problému lze najít v příloze této práce. Zde bude uvedeno pouze stručné shrnutí postupu.

Výsledné sumace bylo dosaženo pomocí několika vnořených cyklů *for*. *For* je funkce, která zajišťuje zvolený počet cyklických opakování stanovených instrukcí. Popis bude uveden dle jednotlivých cyklů, počínaje tím nejvíce vnějším po ten nejvíce vnitřní. První (tedy vnější) cyklus *for* zajišťuje posouvání projektilu v ose cívky. Toto bylo označeno jako poloha projektilu  $x$ . Tato poloha je definována jako vzdálenost středů statorové cívky a projektilu. Poloha  $x = 0$  m je tedy místo, kde středy cívek splývají a cívky jsou vystředěné.

Druhý a třetí cyklus *for* sloužil pro radiální posun výpočtu, tedy změnu  $r_1$  a  $r_2$  (viz rovnice (4.1.1-1), (4.1.1-2) a (4.1.1-3)). Tento posun byl definován následovně:

```
for i= 1:n1
    r1=(ds/2)+(krok_bs/2)+(i-1)*krok_bs;
```

(4.1.1-7)

kde  $i$  je stanovený počet opakování – tj. radiální počet elementů,  $r_1$  je vzdálenost středu daného elementu od osy cívky,  $krok\_bs$  je radiální vzdálenost středů elementů a  $ds$  je vnitřní průměr cívky. Obdobně byl proveden posun pro elementy projektilu.

Ve čtvrtém byl definována změna elementů axiálně, byla tedy počítána jejich vzájemná vzdálenost  $z$  (viz rovnice (4.1.1-1), (4.1.1-2) a (4.1.1-3)). Praktické provedené je uvedeno níže:

```
for l=1:N1
    for o=1:N2
        zet(w,1) =as/2 -(krok_as/2)-(l-1)*krok_as;
        zet(w,2) =ap/2 -(krok_ap/2)-(o-1)*krok_ap;
        z=x+ zet(w,1) - zet(w,2);
```

(4.1.1-8)

Proměnné  $l$  a  $o$  označují počet opakování cyklu – tj. axiální počet elementů. Vzdálenost elementu od středu cívky byla zapisována do kontrolní matice *zet*. Veličina  $as$  je délka statorové cívky,  $ap$  je délka projektilu,  $krok\_as$  a  $krok\_ap$  označují axiální vzdálenost jednotlivých elementů statorové cívky a projektilu. Konečná vzdálenost  $z$   $i$ -tého a  $j$ -tého elementu byla tedy určena rozdílem vzdálenosti středů elementů od středů cívek, kterážto se přičítala k poloze projektilu  $x$ . V tomto pátém vnitřním cyklu byl proveden výpočet vzájemné indukčnosti a jejího gradientu. Výsledek se přičítal k do proměnných  $M_0$  a  $delta\_M_0$  čímž vznikla kýžená sumace.

Po proběhnutí výpočtů všech kombinací jednotlivých elementů cívek pro danou polohu  $x$  byly provedeny matematické operace dle rovnic (4.1.1-5) a (4.1.1-6) a tím byla získána vzájemná indukčnost a její gradient pro danou polohu.

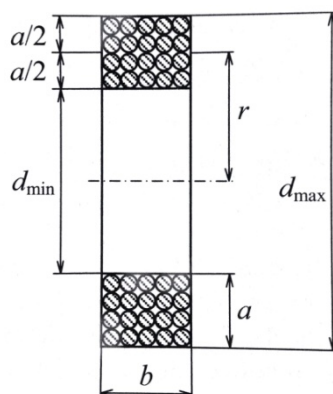
Tyto výsledky byly zapsány do matice a sumační proměnné  $M0$  a  $delta\_M0$  byly vynulovány. Pak se výpočet opakoval pro další polohu projektilu  $x$ .

### 4.1.2 Vlastní indukčnost statorové cívky a projektilu

Vlastní indukčnost cívky byla vypočtena podle [6] s využitím Wheelerovy rovnice:

$$L = 3,15 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{N^2 r^2}{6r + 9b + 10a} \quad [6] \quad (4.1.2-1)$$

kde  $r$ ,  $a$ , a  $b$  jsou geometrické rozměry cívky dle následujícího obrázku:



Obrázek 20: Znázornění geometrických veličin pro výpočet vlastní indukčnosti [6]

Indukčnost projektilu byla spočtena také podle literatury [6] s použitím rovnice pro vlastní indukčnosti jednovrstvé válcové vzduchové cívky:

$$L = \frac{0,41 \cdot N^2 r^2}{9r + 10l} \quad [\mu\text{H, cm, cm}] \quad [6] \quad (4.1.2-2)$$

Kde  $r$  je střední poloměr,  $l$  je délka cívky.

### 4.1.3 Výpočet elektrických a mechanických veličin

Pro předběžný výpočet elektrických a mechanických veličin jako kapacita kondenzátoru, doba trvání jedné půlvlny proudu a předpokládaná rychlost projektilu byl použit následující postup.

Nejprve byla spočtena maximální úst'ová rychlost  $v_{max}$  projektilu ze zvolené výstupní energie:

$$W = \frac{1}{2} m v^2 \quad (4.1.3-1a)$$

$$v_{max} = \sqrt{\frac{2W}{m}} \quad (4.1.3-1b)$$

Hmotnost  $m$  je hmotností projektilu, která byla spočtena z fyzických rozměrů a hustoty.

Jelikož impulzní síla je dle rovnice (3.2-3) rovna součinu proudů statoru a projektilu a velikosti gradientu vzájemné indukčnosti, byla odečtena vzdálenost  $l_{max}$ , ve které velikost gradientu vzájemné indukce klesne na 20%; ta byla použita jako vzdálenost

na které bude projektil urychlován. Potom za předpokladu konstantního zrychlení je doba urychlování projektilu  $t_{max}$ :

$$t_{max} = \frac{2l_{max}}{v_{max}} \quad (4.1.3-2)$$

Protože impulzní síla bude největší při maximální hodnotě proudových půlvln a v druhé (záporné) půlvlně bude už projektil příliš daleko (a gradient vzájemné indukce se bude blížit nule), může předpokládat, že k urychlení projektilu tedy dojde pouze v první půlvlně proudu a na vzdálenosti  $l_{max}$ , tudíž  $t_{max}$  bude půlperioda potřebného kmitání RLC obvodu tvořeného nabitým kondenzátorem sloužícím jako zdroj a satorové cívky. Ze známé vlastní indukčnosti satorové cívky  $L_s$  lze vypočítat potřebnou kapacitu kondenzátoru:

$$T = 2\pi\sqrt{LC} \quad (4.1.3-3a)$$

$$t_{max} = \frac{T}{2} \quad (4.1.3-3b)$$

$$C = \frac{t_{max}^2}{\pi^2 L_s} \quad (4.1.3-3b)$$

Ze zvolených hodnot výstupní energie  $W$  a účinnosti  $\eta$ , spočteme potřebnou energii zdroje – kondenzátoru  $W_s$  a dále jeho skutečné napětí  $U_0$ :

$$W_s = \frac{W}{\eta} \quad (4.1.3-4a)$$

$$U_0 = \sqrt{\frac{2W_s}{C}} \quad (4.1.3-4b)$$

Ze známých hodnot vlastní indukčnosti satorové cívky  $L_s$  a kapacity kondenzátoru  $C$  získáme impedanci obvodu  $Z_0$ , jejím poměrem s napětím  $U_0$  vyjde maximální možný proud obvodem:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (4.1.3-5a)$$

$$I_0 = \frac{U_0}{Z_0} \quad (4.1.3-5b)$$

Z geometrických rozměrů cívky činitele plnění  $k_p = 0,4$  a počtu závitů byl vypočten průřez vodiče, kterým bude cívka navinuta:

$$S_{Cu} = \frac{(D_s - d_s) \cdot a_s \cdot k_p}{2N_s} \quad (4.1.3-6)$$

kde  $D_s$  je vnější průměr cívky,  $d_s$  je vnitřní průměr cívky,  $a_s$  je axiální délka cívky a  $N_s$  je počet závitů satorové cívky. Z těchto známých hodnot lze vyčíslit odpor vinutí satorové cívky  $R_s$ :

$$R_s = \rho \cdot \frac{2\pi N_s r_s}{S_{cu}} \quad (4.1.3-7)$$

$\rho$  je měrný odpor mědi a  $r_s$  je střední průměr statorové cívky. Odpor projektilu byl spočten obdobným způsobem. Celý elektrický obvod musí dohromady splňovat podmínku:

$$\Delta u \ll U_0 \quad (4.1.3-8a)$$

$$\Delta u = R_s I_0 \quad (4.1.3-8b)$$

Úbytek napětí na vinutí musí být daleko menší než napájecí napětí.

#### 4.1.4 Optimalizace

Návrh konkrétních hodnot byl zdoluhavý zvláště vzhledem k mnoha protichůdným požadavkům. Vždy byly nejdříve zvoleny určité rozměry cívky  $D_s$ ,  $d_s$ , a  $a_s$  pro něž byla spočtena vzájemná indukčnost a její gradient na určitém intervalu hodnot  $x$ , což mělo simulovat posouvání projektilu oproti statorové cívce. Z grafu byla stanovena vzdálenost  $l_{max}$  a z ní doba půlperrody  $t_{max}$ . Dále se pomocí následujících dvou vztahů stanovila optimální velikost kapacity  $C$  a indukčnosti  $L_s$ .

$$C = \frac{2W_s}{U_0^2} \quad (4.1.4-1a)$$

$$L_s = \frac{t_m^2}{2\pi C} \quad (4.1.4-1b)$$

Počet závitů statorové cívky byl volen tak, aby se co nejlépe přibližoval této optimální velikosti vlastní indukčnosti. Potom se dopočítal zbytek hodnot pro zjištění celkového obrazu a především ověření důležité podmínky malého úbytku napětí. Následně byly měněny jak rozměry, tak počet závitů aby celý obvod plnil následující požadavky:

*a) Co největší vzájemná indukčnost a její gradient:*

Vzájemná indukčnost byla optimální vždy při určitém poměru vnějšího a vnitřního průměru statorové cívky. Pokud se vnější průměr dále zvětšoval, klesala vzájemná indukčnost, protože vnější vrstvy cívky pak měly velice malý činitel vazby a tvorbě vzájemné indukčnosti se nepodílely

*b) Úbytek na vinutí statorové cívky daleko menší než napětí na kondenzátoru*

Byla stanovena hranice maximálního úbytku  $0.2U_0$

*c) Optimální vlastní indukčnost statorové cívky*

Zde je limitace dána především dostupností materiálů a součástek. Jak již bylo uvedeno, napětí by mělo být maximálně do 450V, jelikož kondenzátory na toto napětí jsou lehce dostupné. Je-li vlastní indukčnost příliš malá, je potřebné napětí na kondenzátoru malé, což je výhodné. Nicméně proud potom velice strmě roste (až na desítky kA) a stejně tak i kapacita. Naopak, je-li vlastní

indukčnost příliš velká, je potřebné napětí neprakticky vysoké a proud, na kterém závisí velikost impulzní síly, příliš malý. Velká indukčnost navíc vyžaduje, aby cívka měla mnoho závitů, které se fyzicky „nevejdou“ do optimálních rozměrů cívky (ad. a)), pokud chceme zachovat podmínku malého úbytku napětí na vinutí cívky a rozumnou proudovou hustotu ve vodiči.

## 4.2 Simulace indukčního coilgunu pomocí softwaru MatLab Simulink

Podle rovnic (3.3-1) až (3.3-3) bylo sestrojeno schéma diferenciálních rovnic pomocí bloků dostupných v Simulinku. Pro tyto účely bylo třeba je upravit:

$$\frac{di_s}{dt} = \frac{1}{L_s} \left( u(t) - R_s i_s(t) + M(x) \frac{di_p(t)}{dt} + i_p(t) v \frac{dM(x)}{dx} \right) \quad (4.2-1a)$$

$$\frac{di_p}{dt} = \frac{1}{L_p} \left( -R_p i_p(t) + M(x) \frac{di_s(t)}{dt} + i_s(t) v \frac{dM(x)}{dx} \right) \quad (4.2-1b)$$

Obvod kondenzátoru je definován následující rovnicí (a její úpravou pro použití v Simulinku):

$$U_0 = \frac{1}{C} \int i_s(t) dt + R i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} \quad (4.2-1a)$$

$$\Delta u_{L_s} = L_s \frac{di_p}{dt} = U_0 - \frac{1}{C} \int i_s(t) dt - R i_s(t) \quad (4.2-1b)$$

Z hlediska obvodu nás zajímá napětí na cívce  $\Delta u_{L_s}$ , proto bylo vyjádřeno z rovnice. Veličina  $R$  zastupuje vnitřní parazitní odpor kondenzátoru a přívodů. Byl předběžně zvolen 100 mΩ.

Pro výpočet aktuální hodnoty  $M(x)$  a  $dM(x)/dx$  v závislosti na aktuální poloze  $x$  byl použit blok „Interpreted MATLAB Fcn“, fungující jako MatLab funkce „ppval“ pro určení hodnoty spline  $M(x)$  a  $dM(x)/dx$ , které byly vypočteny předem. Blok „Switch“ slouží k izolaci první půlvlny proudu statorové cívky a simuluje odpojení kondenzátoru. Konstanta „start“ udává počáteční polohu projektilu vůči středu statorové cívky, aby byl zajištěn správný směr pohybu projektilu. V příloze 1 je uvedeno simulinkové schéma, které bylo vytvořeno pro potřeby tohoto výpočtu. Lze jej nalézt i v elektronické příloze práce na DVD.

## 4.3 Identifikace parametrů náhradního zapojení coilgunu

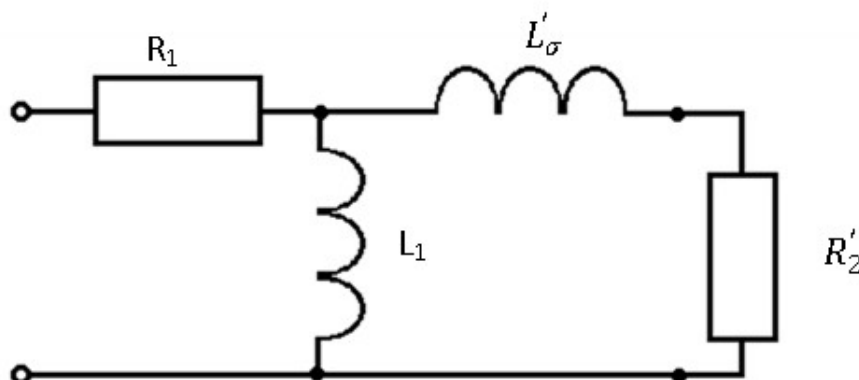
Vzhledem ke konstrukci indukčního coilgunu lze při analýze tohoto zařízení použít nejen diferenciálních rovnic uvedených v kapitole 3.3, ale i za použití teorie transformátoru nebo asynchronního motoru.

Pokud se bude na coilgun nahlížet jako transformátor, jde o transformátor napěťový, jelikož je typicky napájen z napěťového zdroje (kondenzátorů) a je zapojen

trvale se sekundárním vinutím nakrátko. O zmíněných diferenciálních rovnicích lze potom uvažovat jako Z-matici takového transformátoru. Tento přístup přináší možnosti ověřit platnost modelu pomocí náhradního zapojení, kde lze měřením identifikovat jednotlivé prvky, jako například vlastní indukčnost  $L_2$  a odpor  $R_2$  projektilu, které jsou přímo neměřitelné.

Při následující analýze je čerpáno převážně z literatury [6]. Následující postup identifikace parametrů náhradního zapojení transformátoru byl odvozen s pomocí doc. Miroslava Patočky.

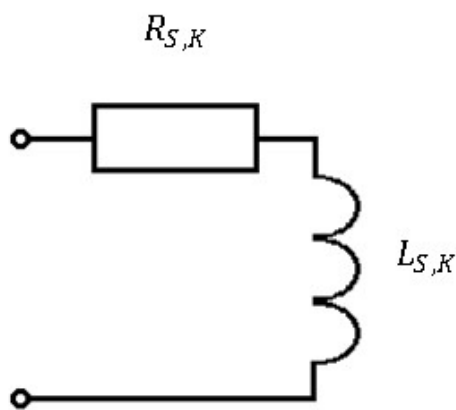
Náhradní zapojení transformátoru ve tvaru  $\Gamma$ -článku vypadá následovně:



**Obrázek 21: Náhradní zapojení transformátoru ve tvaru  $\Gamma$ -článku [6]**

$L_1$  je indukčnost primárního vinutí,  $R_1$  je odpor primárního vinutí,  $L'_\sigma$  je rozptylová indukčnost převedená na primární stranu,  $R'_2$  je odpor zátěže převedený na primární stranu. Při analýze coilgunu indukčnost primárního vinutí totožná s vlastní indukčností statorové cívky  $L_S$ , odpor  $R_1$  totožný s odporem vinutí statorové cívky. Tyto dvě veličiny lze přímo změřit RLC-metrem při nastavení na měření sériového odporu a sériové indukčnosti, pokud v cívce není projektil.

Pokud je do cívky vložen projektil, sekundární vinutí nakrátko, při měření sériového odporu a indukčnosti je měřen celý náhradní gama článek. Pro RLC-metr se ovšem jeví pouze jako sériová kombinace cívky a odporu následovně:



Obrázek 22: Sériová kombinace prvků měřených na RLC-metru při projektilu vloženém do statorové cívky

Impedanci toto zapojení lze vyjádřit dle rovnice (4.3-1):

$$Z_{s,k} = R_{s,k} + j\omega L_{s,k} \quad (4.3-1)$$

kde  $R_{s,k}$  vyjadřuje reálnou složku, tj. sériový odpor, celého  $\Gamma$ -článku a  $L_{s,k}$  je součástí imaginární složky, tj. sériová indukčnost celého  $\Gamma$ -článku.

Celkovou impedance  $\Gamma$ -článku lze odvodit a upravit do tohoto tvaru:

$$Z_{\Gamma} = R_1 + \frac{j\omega L_1 \cdot (j\omega L'_{\sigma} + R'_2)}{j\omega L_1 + j\omega L'_{\sigma} + R'_2} \quad (4.3-2a)$$

$$Z_{\Gamma} = R_1 + \frac{\omega^2 L_1^2 R'_2}{R_2'^2 + \omega^2 (L_1 + L'_{\sigma})^2} + j\omega L_1 \frac{R_2'^2 + \omega^2 L'_{\sigma} (L_1 + L'_{\sigma})}{R_2'^2 + \omega^2 (L_1 + L'_{\sigma})^2} \quad (4.3-2b)$$

Impedance  $Z_{s,k}$  a  $Z_{\Gamma}$  jsou si rovny. Vzhledem k tomu, že jde o dvě komplexní čísla, lze porovnat zvlášť reálné složky a zvlášť složky imaginární. Tím vznikne soustava dvou rovnic o dvou neznámých  $L'_{\sigma}$  a  $R'_2$ , přičemž  $R_1$  a  $L_1$  získáme změřením sériového odporu a impedance samostatné statorové cívky a  $R_{s,k}$  a  $L_{s,k}$  změřením sériového odporu a indukčnosti statorové cívky s vloženým projektilem.

$$Z_{s,k} = Z_{\Gamma} \quad (4.3-3)$$

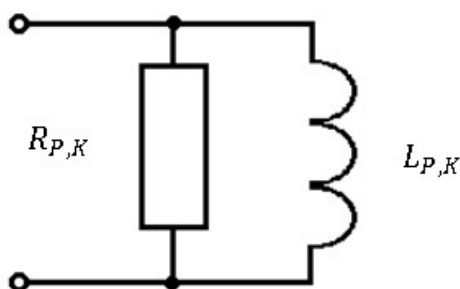
$$R_{s,k} = R_1 + \frac{\omega^2 L_1^2 R'_2}{R_2'^2 + \omega^2 (L_1 + L'_{\sigma})^2} \quad (4.3-4a)$$

$$L_{s,k} = L_1 \frac{R_2'^2 + \omega^2 L'_{\sigma} (L_1 + L'_{\sigma})}{R_2'^2 + \omega^2 (L_1 + L'_{\sigma})^2} \quad (4.3-4b)$$

Soustavu lze dále upravit. Z rovnice (4.3-4b) lze vyjádřit  $R_2'^2$  a dosadit do rovnice (4.3-4a). Po mnoha dalších úpravách vznikne kubická rovnice s neznámou  $L'_{\sigma}$ , jejíž

kořeny lze dosadit do zpět do vztahu pro  $R_2'^2$  a tak získat řešení těchto rovnic. Nicméně, tyto úpravy nevedou ke zjednodušení. Kubická rovnice s neznámou  $L'_\sigma$  je dlouhá, nepřehledná, téměř nic neříkající a k jejímu vyřešení je zapotřebí výpočetního softwaru. V MatLabu lze získat kořeny přímo z této neupravené podoby pomocí funkce „solve“ nebo „vpasolve“.

RLC-metr dokáže změřit kromě sériového odporu a indukčnosti i paralelní odpor  $R_p$  a indukčnost  $L_p$ . Z těchto hodnot, měřených s vloženým projektilem, lze pomocí obdobných úprav získat tytéž výsledky. Impedance  $Z_\Gamma$  zůstává stejná, stačí upravit impedanci paralelní kombinace odporu a indukčnosti změřenou RLC-metrem



**Obrázek 23: Paralelní kombinace prvků měřených na RLC-metru při projektilu vloženém do statorové cívky**

$$Z_{p,k} = \frac{j\omega R_p L_p}{R_p + j\omega L_p} \quad (4.3-5a)$$

$$Z_{p,k} = \frac{\omega^2 R_p L_p^2}{R_p^2 + \omega^2 L_p^2} + j\omega L_p \cdot \frac{R_p^2}{R_p^2 + \omega^2 L_p^2} \quad (4.3-5b)$$

Srovnáním reálných složek a imaginárních složek  $Z_{p,k}$  a  $Z_\Gamma$  zvlášť získáme podobnou soustavu rovnic.

$$R_1 + \frac{\omega^2 L_1^2 R_2'}{R_2'^2 + \omega^2 (L_1 + L'_\sigma)^2} = \frac{\omega^2 R_p L_p^2}{R_p^2 + \omega^2 L_p^2} \quad (4.3-6a)$$

$$L_1 \frac{R_2'^2 + \omega^2 L'_\sigma (L_1 + L'_\sigma)}{R_2'^2 + \omega^2 (L_1 + L'_\sigma)^2} = L_p \cdot \frac{R_p^2}{R_p^2 + \omega^2 L_p^2} \quad (4.3-6b)$$

Při dalším upravování této rovnice vznikne opět kvadratická rovnice s neznámou  $R_2'$ . Nicméně vyjadřování  $L'_\sigma$  vede na polynom čtvrtého stupně. Opět je třeba k řešení využít výpočetního systému.

Oba dva postupy jsou naprosto rovnocenné a dávají stejné výsledky. Pokud jsou  $R_2'$  a  $L'_\sigma$  známé je třeba dalších vztahů pro získání kýžených hodnot vlastní indukčnosti sekundárního vinutí (projektilu)  $L_2$  a jeho odporu  $R_2$ . Nejprve je třeba převést  $R_2'$  a  $L'_\sigma$  se čtvercem převodu zpět na sekundární stranu. Vzhledem k tomu, že stále neznáme indukčnost sekundárního vinutí, lze použít přibližný vztah pro převod:

$$K_{U,21} = k \cdot \frac{N_2}{N_1} = k \cdot \frac{N_P}{N_S} \quad [6] \quad (4.3-7)$$

$k$  je činitel vazby, jehož velikost lze získat z měření vlastní indukčnosti statorové cívky a měření se sekundárním vinutím nakrátko (vložený projektil):

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{1,K}}{L_1}} = \sqrt{1 - \frac{L_{s,k}}{L_1}} \quad [6] \quad (4.3-8)$$

Veličiny  $R'_2$  a  $L'_\sigma$  převedené zpět na sekundární stranu budou mít velikost

$$L_\sigma = K_{U,21}^2 \cdot L'_\sigma \quad (4.3-9)$$

[6]

$$R_2 = K_{U,21}^2 \cdot R'_2 \quad (4.3-10)$$

Odpor proudovodné dráhy projektilu vyjde přímo z rovnice (4.3-10). Zbývá indukčnost projektilu. Ta se vypočte z  $L_\sigma$  pomocí následujícího vztahu:

$$L_\sigma = L_2(1 - k^2) \quad (4.3-11a)$$

[6]

$$L_2 = L_P = \frac{L_\sigma}{1 - k^2} \quad (4.3-11b)$$

Tímto jsou určeny parametry náhradního schématu a vyjádřena vlastní indukčnost projektilu a odpor projektilu z hodnot získaných měření.

## 5 PRVNÍ MODEL A JEHO KONSTRUKCE

Vzhledem k teoretickým poznatkům byla nejprve statorová cívka provedena jako kotoučová, která splňovala nejdůležitější kritérium pro dosažení co největší síly působící na projektil a to velký gradient vzájemné indukčnosti, jelikož její axiální rozměry jsou malé. Gradient vzájemné indukčnosti je největší právě na okrajích cívky, kde magnetické pole tvořené cívkou není homogenní. Dlouhá cívka (solenoid) má uvnitř v okolí svého středu homogenní magnetické pole a gradient vzájemné indukčnosti je tedy nulový. Tato část cívky by nijak nepřispívala k urychlování projektilu – je zbytečná. Z tohoto hlediska jsou užitečné pouze okraje cívky a kotoučová cívka (právě proto že je krátká) výborně vyhovuje.

Na základě výpočtů uvedených v kapitole 4 byla navržena cívka, jejíž rozměry jsou uvedeny v následující tabulce společně se zvolenými rozměry projektilu:

**Tabulka 2: Vypočtené parametry statorové cívky a projektilu**

Statorová cívka			Projektil		
Vnější průměr cívky	$D_S$	130 mm	Vnější průměr	$D_P$	9 mm
Vnitřní průměr cívky	$d_S$	12 mm	Axiální délka	$a_P$	25 mm
Axiální délka cívky	$a_S$	30 mm	Vlastní indukčnost	$L_P$	1,78 nH
Počet závitů	$N_S$	84	Odpor proudovodné dráhy	$R_P$	3.28 $\mu\Omega$
Vlastní indukčnost	$L_S$	266,51 $\mu\text{H}$			
Odpor vinutí	$R_S$	37 m $\Omega$			
Průřez vodiče	$S_{Cu}$	8.48 mm <sup>2</sup>			

Dále byly stanoveny zbývající parametry elektrického obvodu:

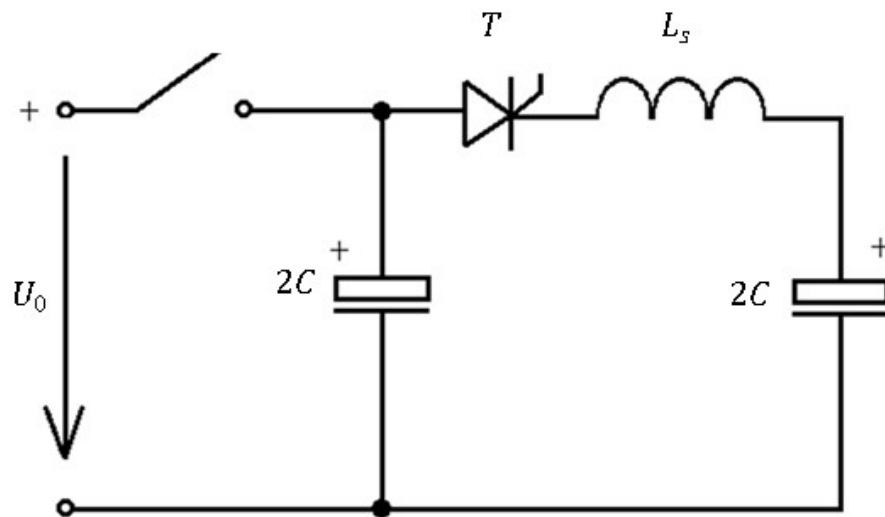
**Tabulka 3: Vypočtené parametry obvodu**

Elektrické parametry		
Kapacita kondenzátoru	$C$	6,1 mF
Doba půlperrody	$t_{max}$	4 ms
Napětí kondenzátoru	$U_0$	450 V
Maximální proud	$I_0$	1,15 kA
Úbytek napětí	$\Delta u$	60 V
Procentuální úbytek napětí	$\Delta u_{\%}$	14%
Kmitočet napájecího impulsu	$f$	238Hz

Návrh cívky byl proveden pomocí skriptu *navrh\_geom\_rozmeru.m*, který součástí elektronické přílohy práce na DVD.

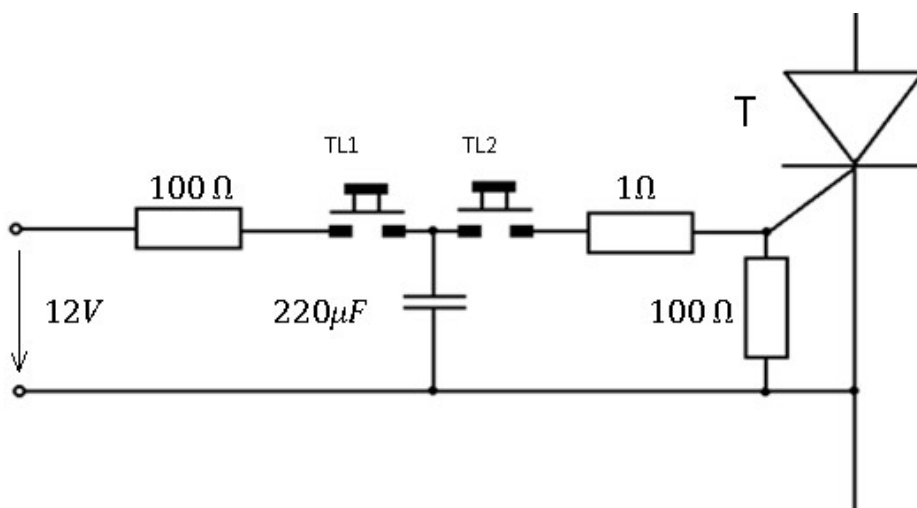
## 5.1 Konstrukce zařízení

Pro spínání obvodu byl použit tyristor IR 180RKI80. Dále byly použity dvě baterie elektrolytických kondenzátorů o celkové kapacitě 3,5 mF. První baterie kondenzátorů byla před výstřelem nabitá na 450V. Sepnutím tyristoru došlo k jejímu vybití do cívky a následnému nabití druhé baterie kondenzátorů o stejné kapacitě zapojené antisériově. Kondenzátorová baterie byla nabíjena z laboratorního stolu pomocí šestipulzního usměrňovače a autotransformátoru z třífázové sítě.



Obrázek 24: Schéma zapojení obvodu indukčního coilgunu, první prototyp

Pro tyristor byl navržen následující budič, který byl napájen ze stabilizovaného laboratorního zdroje +12V. Tlačítkem TL1 byl nabit kondenzátor 220  $\mu\text{F}$  z laboratorního zdroje a tlačítkem TL2 byl vybit, čímž se vytvořil zapalovací impuls pro tyristor.



Obrázek 25: Schéma budiče tyristoru

Hlaveň coilgunu byla vyrobena z plexisklové trubky o vnějším průměru 12 mm a tloušťce stěny 1 mm. Celková délka hlavně byla 0,5m. Dále byl vyroben opěrný systém, který sloužil k uchycení součástí a celkové stabilitě zařízení.

Cívka byla navinuta měděným vodičem obdélníkového průřezu 2,5x5 mm<sup>2</sup>. Projektil byl vyroben jako plný měděný váleček o výše uvedených rozměrech.

## 5.2 Problémy při realizaci

Zkouška funkčnosti zařízení ukázala kardinální nedostatky při návrhu a modelování. Rychlost projektilu byla prakticky neměřitelná, projektil se po odpálení posunul vždy o vzdálenost v řádech několika milimetrů.

Pro zjištění chyby bylo přistoupeno k měření vlastností soustavy cívka-projektil. Jelikož na coilgun lze nahlížet jako na napěťový transformátor se sekundárním vinutím nakrátko, bylo použito následujícího vztahu pro zjištění velikosti činitele vazby:

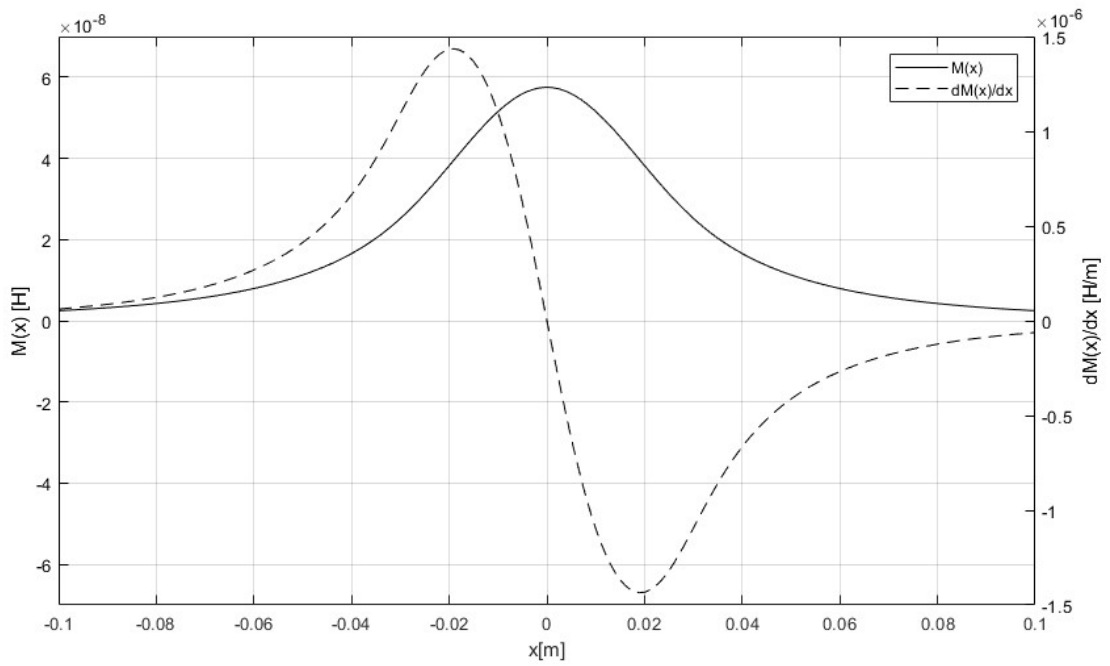
$$k = \sqrt{1 - \frac{L_{1,k}}{L_1}} \quad [6] \quad (4.3-8)$$

kde  $k$  je činitel vazby mezi primárním a sekundárním vinutím (tj. statorovou cívku a projektil),  $L_{1,k}$  je indukčnost měřená při sekundárních svorkách nakrátko a  $L_1$  je indukčnost primárního vinutí. V tomto případě je indukčnost primárního vinutí zastoupena indukčností statorové cívky a indukčnost  $L_{1,k}$  je měřitelná jako indukčnost statorové cívky, je-li uvnitř vložen projektil (sekundární vinutí nakrátko). Tyto hodnoty byly změřeny RLC-metrem. Výsledný činitel vazby  $k$  měl velikost pouze 0,13, avšak činitel vazby vypočtený ze simulovaných hodnot pomocí vztahu  $M = k\sqrt{L_1L_2}$  nabýval hodnoty 0,45.

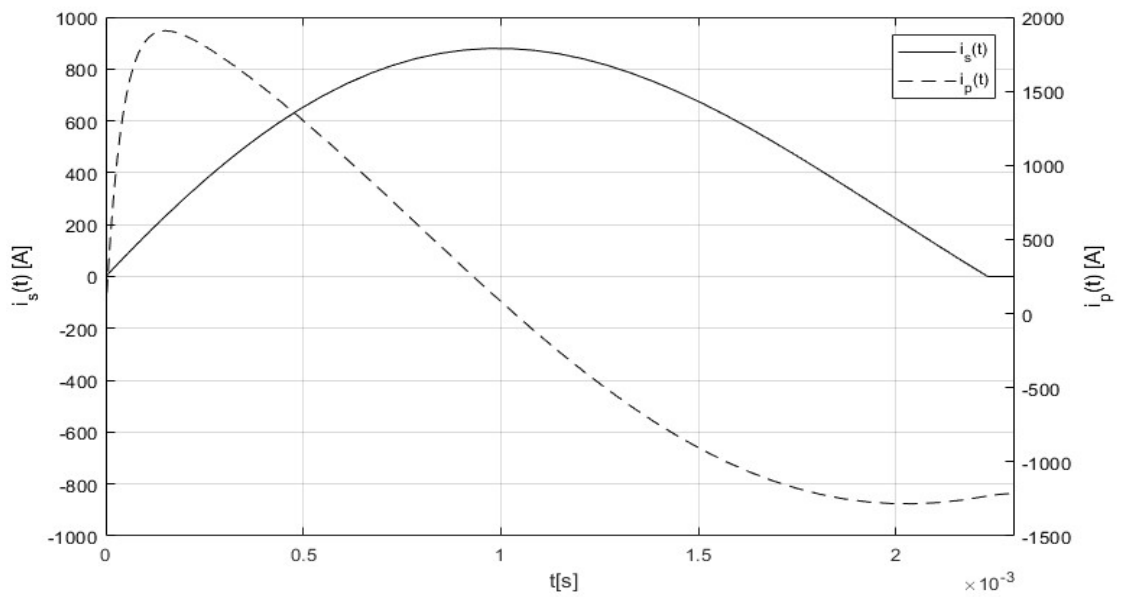
Tímto byly odhaleny chyby v matematickém modelu. První chybou byla špatná interpretace literatury [31], kde nejasně označené veličiny vedly k chybnému použití jinak správného vztahu pro výpočet vzájemné indukčnosti. Ta vycházela o celý řád vyšší, než ve skutečnosti. Výpočet byl zkontrolován a upraven dle literatury [34]. Další chybou bylo dosazení nesprávných jednotek pro výpočet vlastní indukčnosti projektilu. Následkem těchto chyb simulinkový model naznačoval urychlení projektilu na 50 m/s. Po opravení modelu byla maximální rychlost projektilu vyčíslena na 0,3 m/s, což odpovídalo reálným výsledkům při odzkoušení zařízení.

Dalším důležitým poznatkem je fakt, že kotoučová cívka *není vhodná* pro konstrukci coilgunu. Vnější závit cívky jsou již příliš daleko od projektilu a nepřispívají zlepšení vazby, nýbrž ji ještě zhoršují.

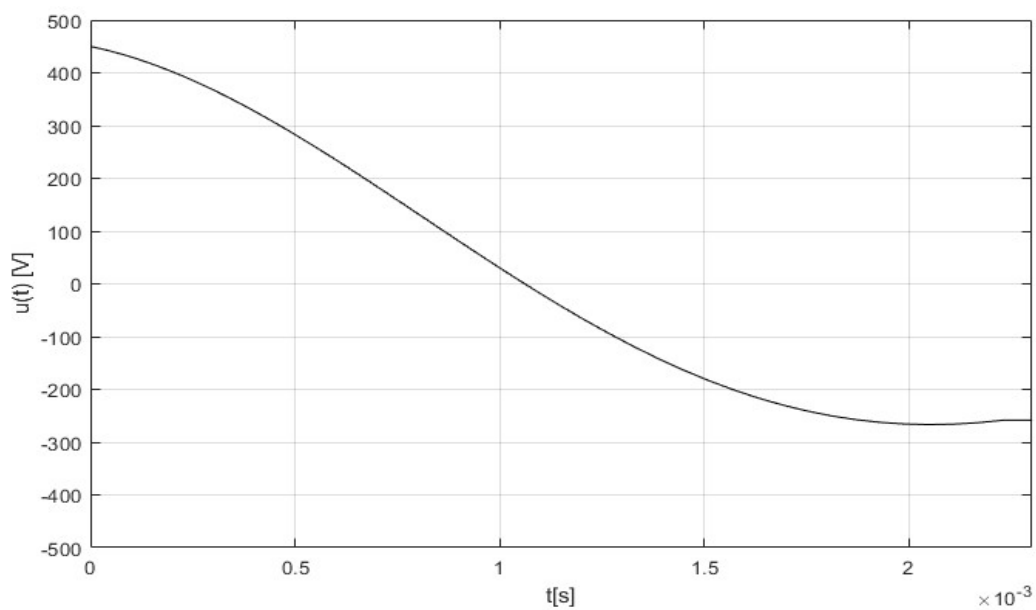
Níže jsou uvedeny výsledky již opravené simulace. Tyto průběhy byly získány pomocí MatLab Simulink modelu *Simulink\_model.slx*, který je součástí elektronické přílohy práce na DVD. Takto navržené zařízení nemohlo fungovat dle původních očekávání.



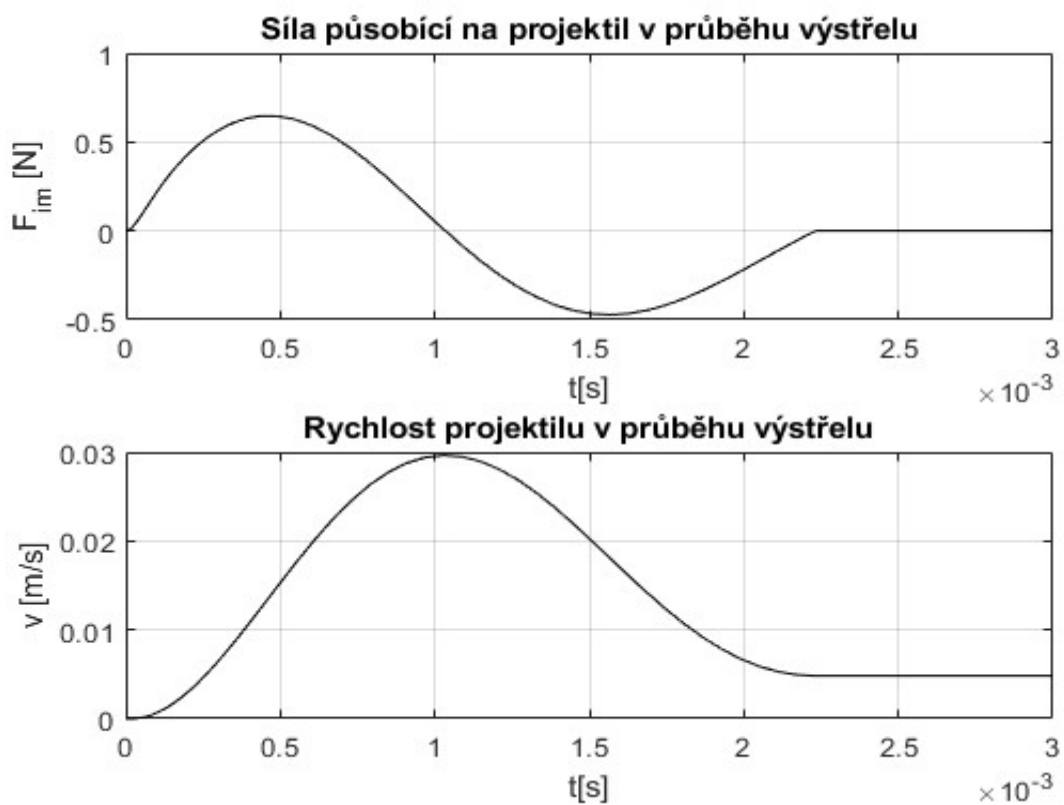
Obrázek 26: Závislost vzájemné indukčnosti  $M(x)$  a gradientu  $dM(x)$  na poloze projektilu



Obrázek 27: Průběh proudu statorovou cívkou  $i_s$  a proudu projektillem  $i_p$  v závislosti na čase



Obrázek 28: Průběh napětí na statorové cívce  $u(t)$  v závislosti na čase



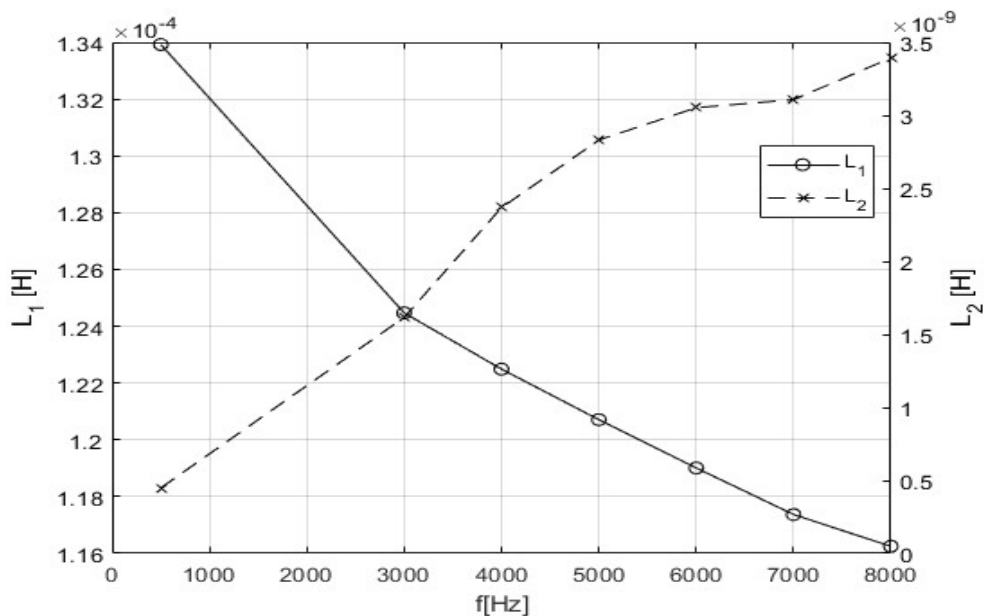
Obrázek 29: Časová závislost velikosti síly působící na projektil a jeho rychlosti



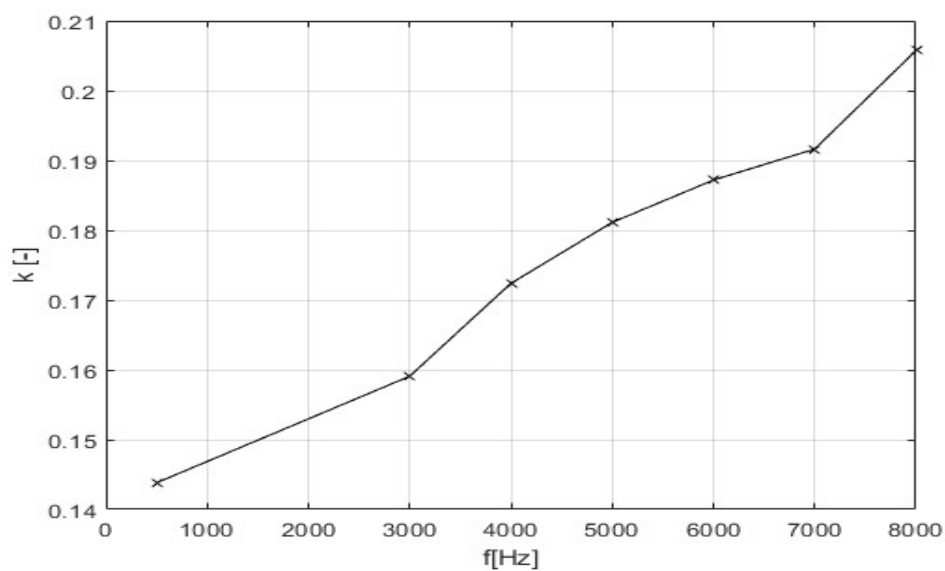
**Obrázek 30: Časová závislost zrychlení a projektilu**

Měření bylo provedeno pomocí RLC-metru, jak bylo nastíněno v kapitole 4.3; dle stejné kapitoly byly provedeny i výpočty. Nyní budou uvedeny frekvenční závislosti identifikovaných parametrů obvodu a činitele vazby  $k$  mezi projektilem a satorovou cívkou. Lze si povšimnout, že činitel vazby se zvyšuje s rostoucí frekvencí, nicméně na frekvenci, na které pracovalo zařízení je vazba velmi nízká, méně než 0,14. Na Obrázek 33 je vidět změna odporů satorové cívky a projektilu v závislosti na kmitočtu vlivem skinefektu.

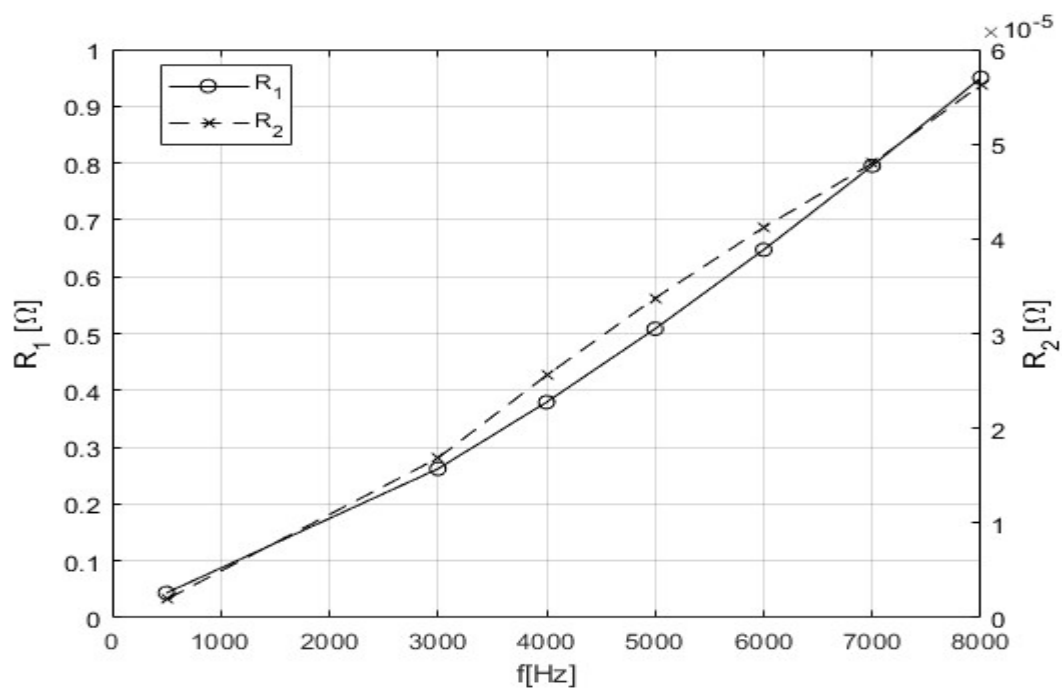
V příloze 2 jsou uvedeny tabulky měřených a vypočtených hodnot. Tomu odpovídá soubor *prototyp1\_mereni.mat*, kde jsou uvedeny hodnoty. Pro výpočet byl použit skript *identifikace\_parametru.m*. Oba soubory jsou přiloženy na DVD, které je součástí práce.



**Obrázek 31: Závislost indukčnosti satorové cívky  $L_1$  a projektilu  $L_2$  na napájecí frekvenci (získáno měřením)**



Obrázek 32: Závislost činitele vazby  $k$  na napájecí frekvenci (získáno měřením)



Obrázek 33: Závislost odporu statorové cívky  $R_1$  a projektilu  $R_2$  na frekvenci (získáno měřením)

## 6 DRUHÝ MODEL A JEHO KONSTRUKCE

Na základě poznatků z konstrukce prvního zařízení byla kompletně změněna celá geometrie coilgunu. Základním požadavkem bylo dosažení co nejvyššího činitele vazby mezi statorovou cívkou a projektil. Empiricky byly zvoleny následující parametry. Vlastní indukčnosti a odpory statorové cívky a projektilu byly dopočteny a ověřeny měřením (viz kapitola 6.2), vlastní indukčnost statorové cívky byla vzhledem ke své geometrii spočtena dle vztahu 4.1.2-2). Výpočty byly provedeny pomocí MatLab skriptu *navrh\_prototyp2.m*.

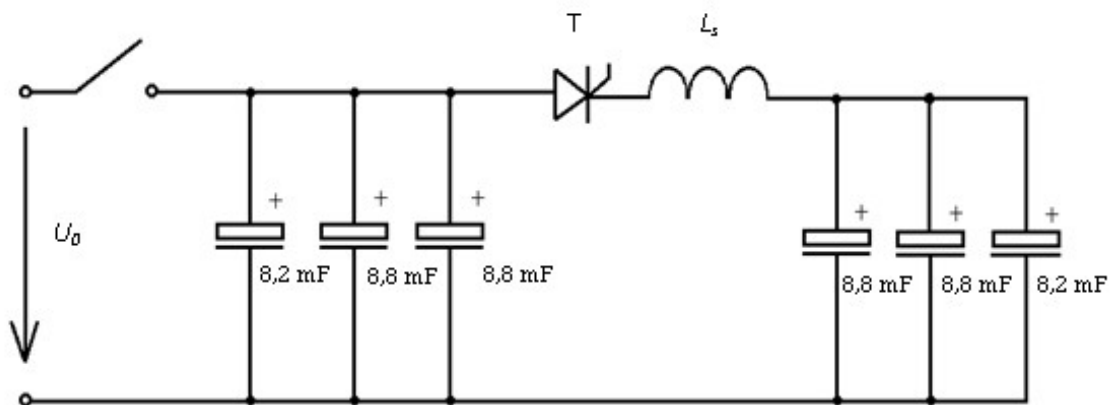
**Tabulka 4: Vypočtené parametry statorové cívky a projektilu**

Statorová cívka			Projektil		
Vnější průměr cívky	$D_s$	50 mm	Vnější průměr	$D_p$	35 mm
Vnitřní průměr cívky	$d_s$	40 mm	Vnitřní průměr	$d_p$	30 mm
Axiální délka cívky	$a_s$	54 mm	Axiální délka	$a_p$	54 mm
Počet závitů	$N_s$	19	Vlastní indukčnost	$L_p$	15,77 nH
Vlastní indukčnost	$L_s$	10,09 $\mu$ H	Odpor proudovodné dráhy	$R_p$	8,39 $\mu\Omega$
Odpor vinutí	$R_s$	3,8 m $\Omega$	Maximální vzájemná indukčnost	$M(x)$	0,254 $\mu$ H
Průřez vodiče	$S_{Cu}$	12,5 mm <sup>2</sup>			

Elektrické parametry		
Kapacita kondenzátoru	$C$	12,9 mF
Doba půlperrody	$t_{max}$	1,13 ms
Napětí kondenzátoru	$U_0$	450 V
Maximální proud	$I_0$	10 kA
Úbytek napětí	$\Delta u$	87 V
Procentuální úbytek napětí	$\Delta u_{\%}$	13%
Kmitočet napájecího impulzu	$f$	441Hz

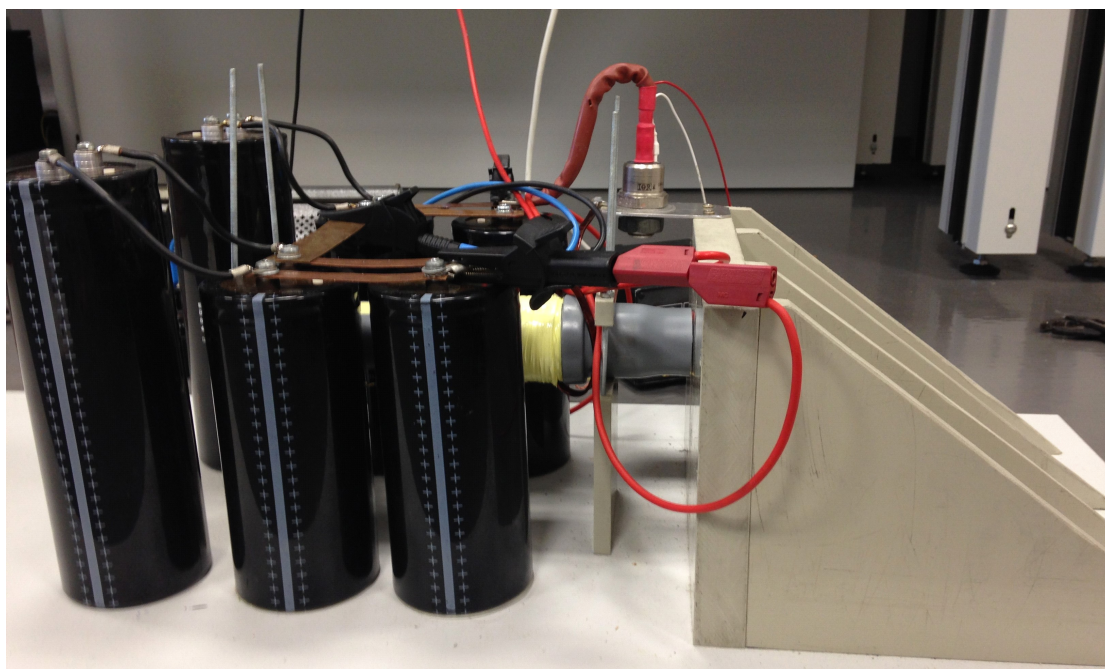
Cívka byla navinuta měděným vodičem obdélníkového průřezu 2,5x5 mm<sup>2</sup>. Projektil byl vyroben z trubky ze slitiny hliníku (Dural), jeho měrný elektrický odpor byl změřen Ohmovou metodou  $\rho_{Dural} = 3,484 \cdot 10^{-8} \Omega$ m. Hlaveň byla vyrobena z novodurové trubky.

Pro obě dvě kondenzátorové baterie bylo použito po třech paralelně propojených kondenzátorech o kapacitách 8,8mF, 8,8mF a 8,2mF, celková kapacita obou antisériově zapojených baterií je tedy  $C=12,9$ mF.

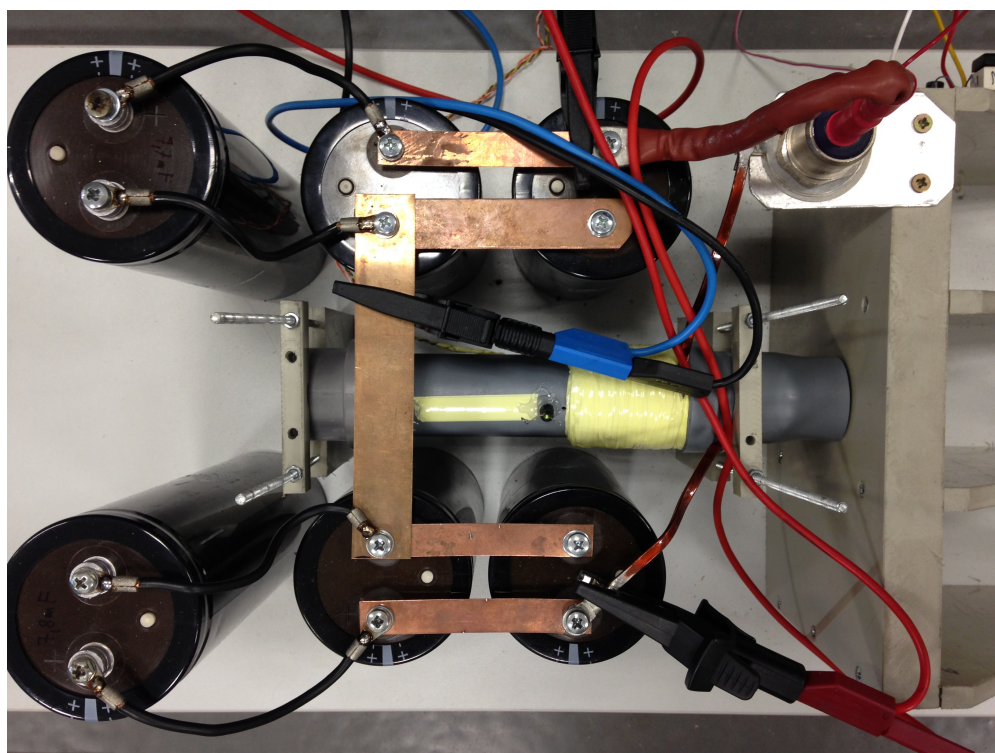


**Obrázek 34: Elektrické schéma coilgunu, prototyp 2**

Ostatní části obvodu (tyristor, budič tyristoru a opěrná konstrukce) zůstaly zachovány z prvního zařízení. Propojovací vodiče kondenzátorů tvoří měděné pásky, připojovací vodiče kondenzátorů větších rozměrů byly vyrobeny z měděných kabelů s oky.

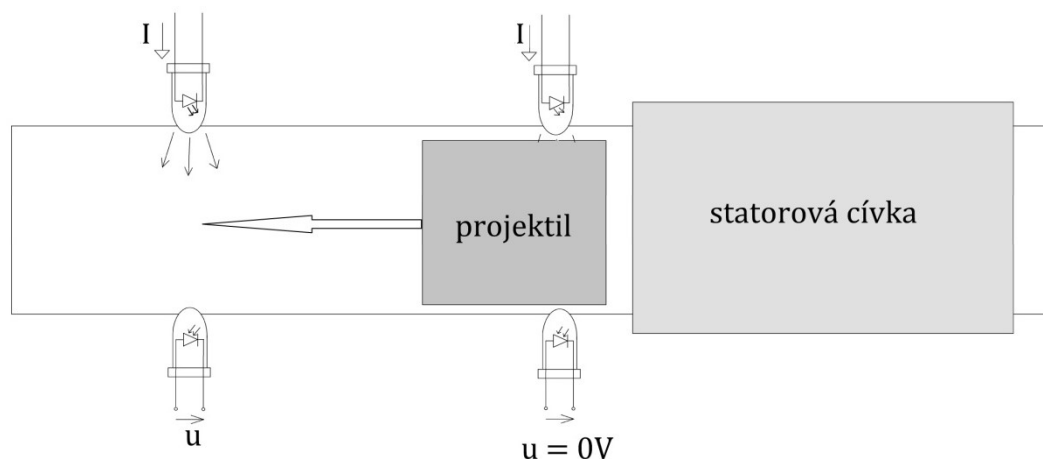


**Obrázek 35: Druhý prototyp coilgunu, pohled z boku**



**Obrázek 36: Druhý prototyp coilgunu, pohled shora**

V hlavní vyvrtány otvory pro světelné brány, které sloužily k měření rychlosti projektilu. Ty byly realizovány pomocí dvojic LE diod umístěných ve vzdálenosti 60 mm od sebe. V obou dvojicích byla vždy jedna dioda napájena ze stabilizovaného zdroje a osvětlovala druhou diodu, umístěnou naproti ní, která pracovala v režimu fotodiody a pokud byla zcloněna, objevil se jí na vývodech pokles napětí. Při průletu projektilu přes světelnou bránu byla fotodioda zastíněna, což vyvolalo pokles napětí. Obě fotodiody byly připojeny na jeden z kanálů osciloskopu. Potom bylo možné odečtením rozdílu času poklesu napětí na obou fotodiodách a ze známé vzdálenosti obou fotodiod určit rychlost projektilu. Nicméně, rušení způsobené magnetickým polem při výstřelu znemožňovalo určit čas poklesu napětí na fotodiodě blíže statorové cívky. Místo poklesu napětí na fotodiodě blíže k cívce byl nakonec použit jako referenční časový bod zapalovací impuls tyristoru.

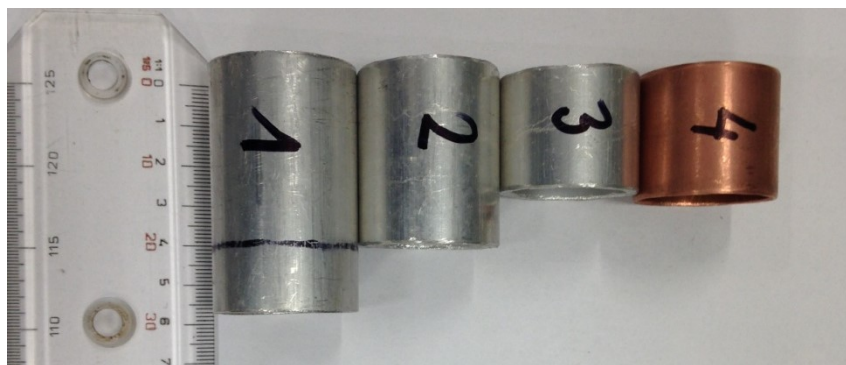


**Obrázek 37: Schematické znázornění umístění světelných bran**

Pro zajímavé srovnání byly nakonec vyrobeny 4 projektily. Tři byly vyrobeny z duralu o různých délkách a jeden z mědi. Srovnání dosažených rychlostí různých projektilů je uvedeno v kapitole 6.2

**Tabulka 5: Vlastnosti projektilů**

Označení projektilu	Materiál	Délka	Hmotnost
		[mm]	[g]
1	dural	54	38
2	dural	40	29
3	dural	28	20
4	měď	28	48



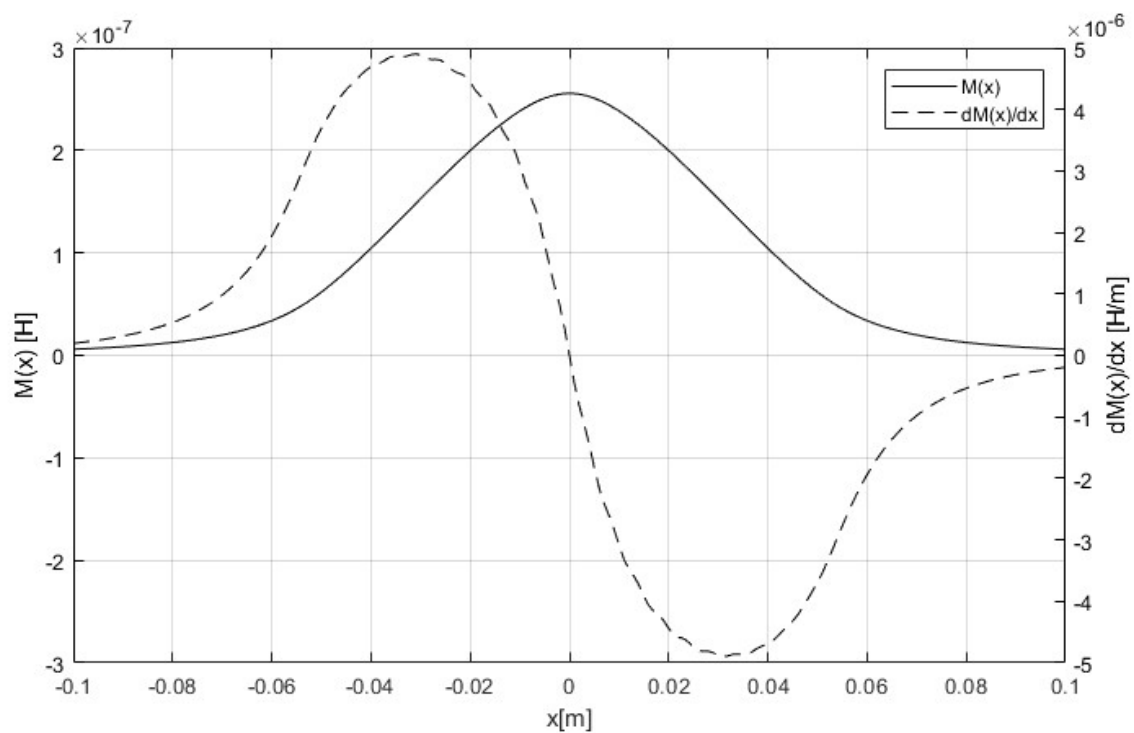
**Obrázek 38: Fotografie testovaných projektilů**

## 6.1 Výsledky simulace

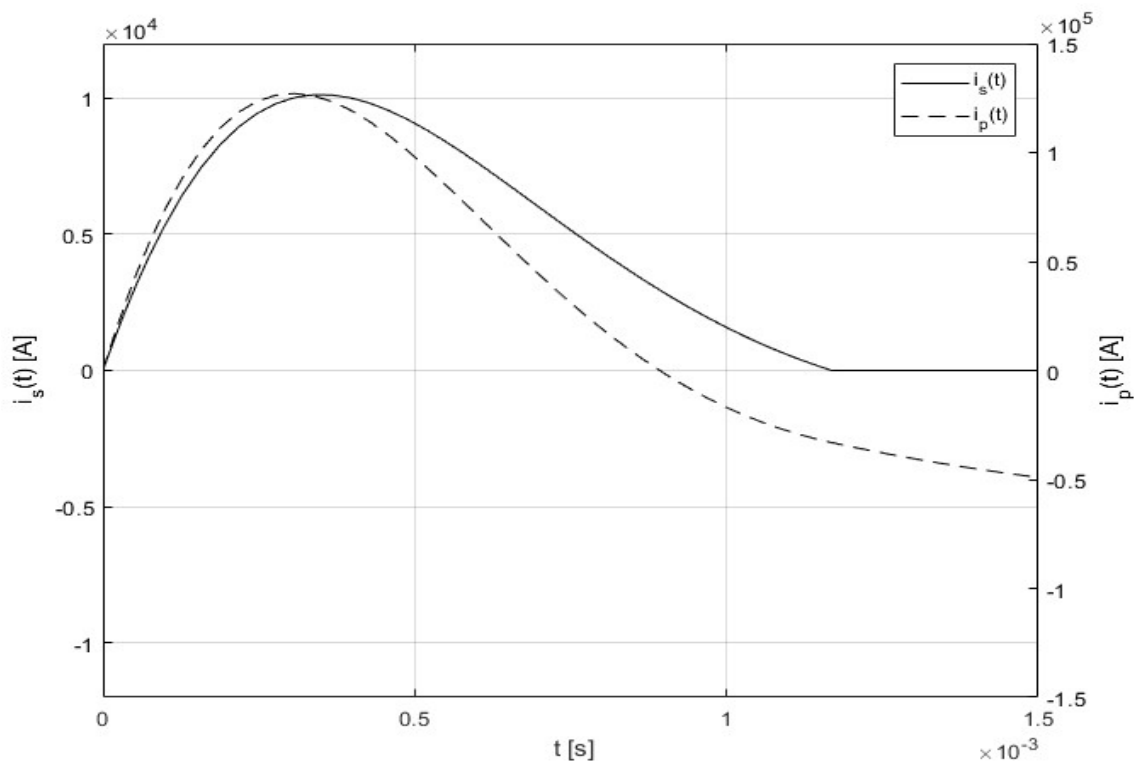
Simulace byla provedena pro projektil 1 o axiální délce  $a_p = 54\text{mm}$ . Projektily 2-4 byly vyrobeny až po zkonstruování zařízení pomocí simulinkového modelu v elektronické příloze této práce.

Graf vzájemné indukčnosti a gradientu vzájemné indukčnosti lze srovnat s obrázkem Obrázek 26, zobrazujícím tutéž závislost pro první prototyp s kotoučovou statorovou cívkou. V prvním případě byl průběh gradientu vzájemné indukčnosti strmější a užší, což bylo důvodem k realizaci statoru jako kotoučové cívky. Nicméně v druhém realizovaném případě, kterého se týká i níže uvedený graf, nabývá vzájemná indukčnost vyšších hodnot a vazba mezi projektilem a statorovou cívkou je mnohem lepší. Maximální činitel vazby v tomto případě je  $k = 0,64$ , což je téměř 5x více než u prvního zařízení.

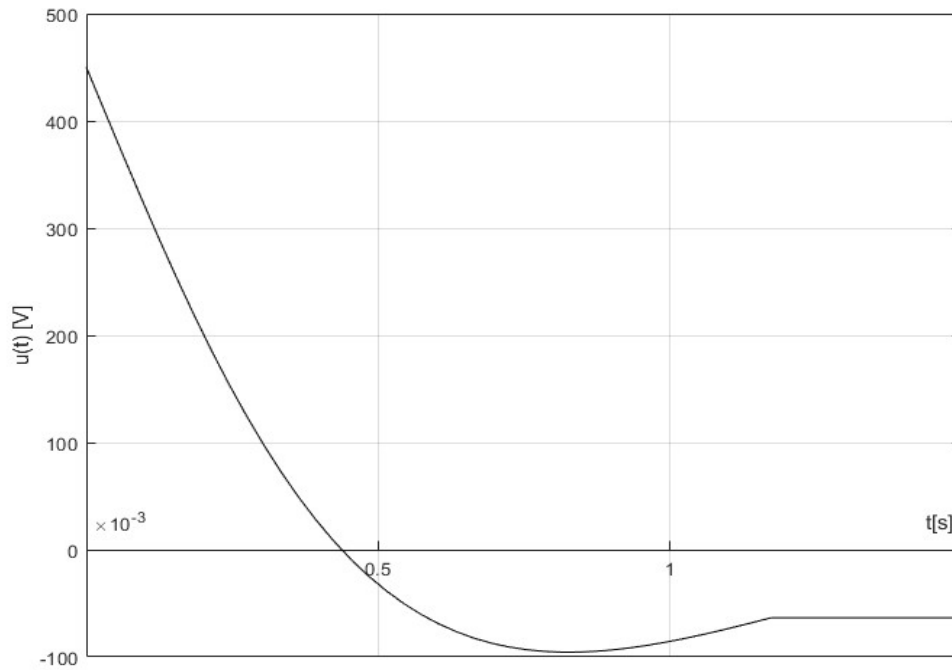
Předpokládaný maximální proud statorovou cívkou je 10kA a maximální předpokládaná rychlost projektilu je 15m/s (viz obr. Obrázek 42)



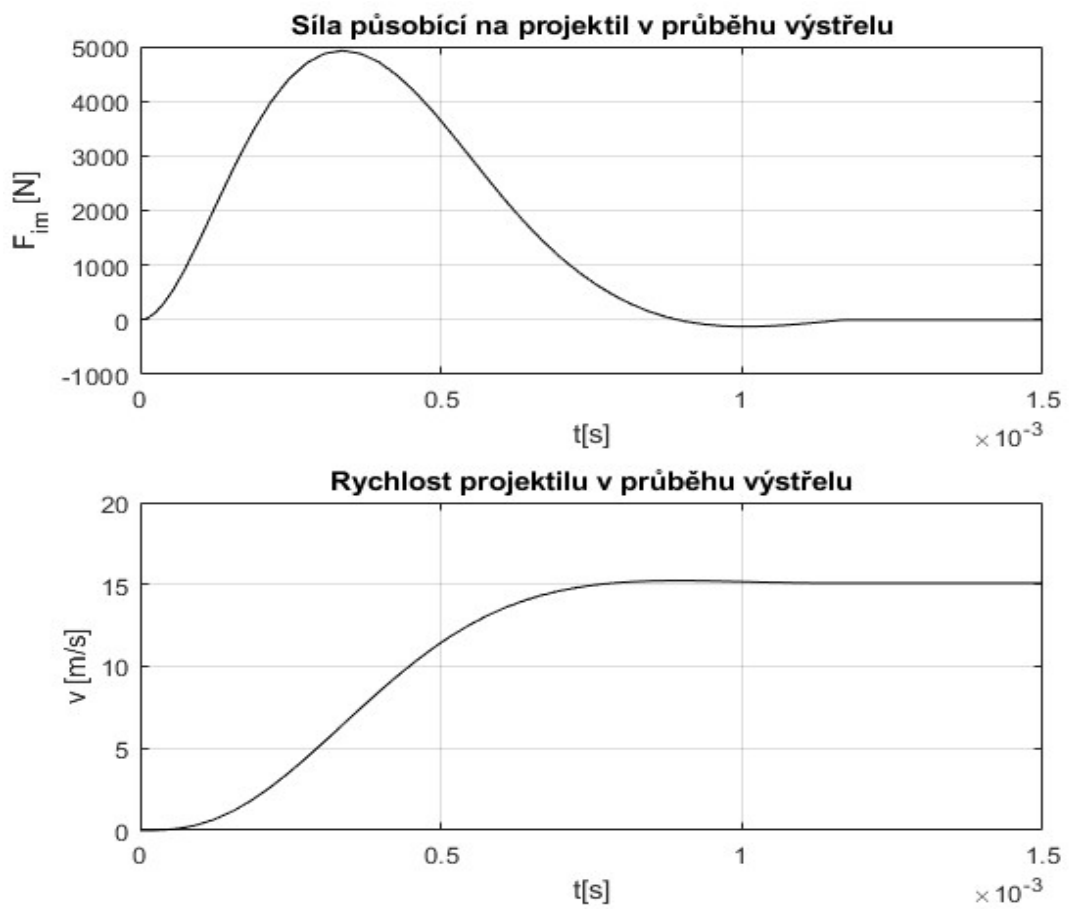
Obrázek 39: Průběh vzájemné indukčnosti  $M(x)$  a gradientu vzájemné indukčnosti  $dM(x)$  v závislosti na poloze projektilu v hlavni



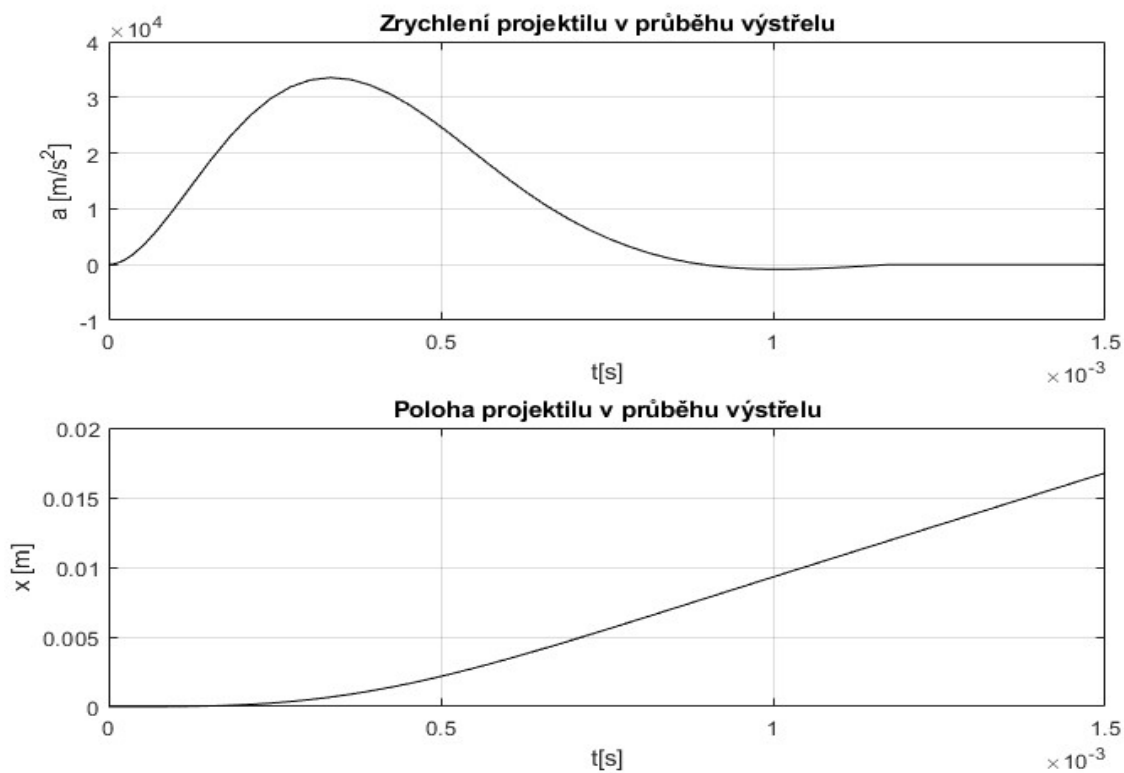
Obrázek 40: Průběh statorového proudu  $i_s$  a proudu projektilu  $i_p$  na čase od výstřelu



Obrázek 41: Průběh napětí na satorové cívce v závislosti na čase od výstřelu

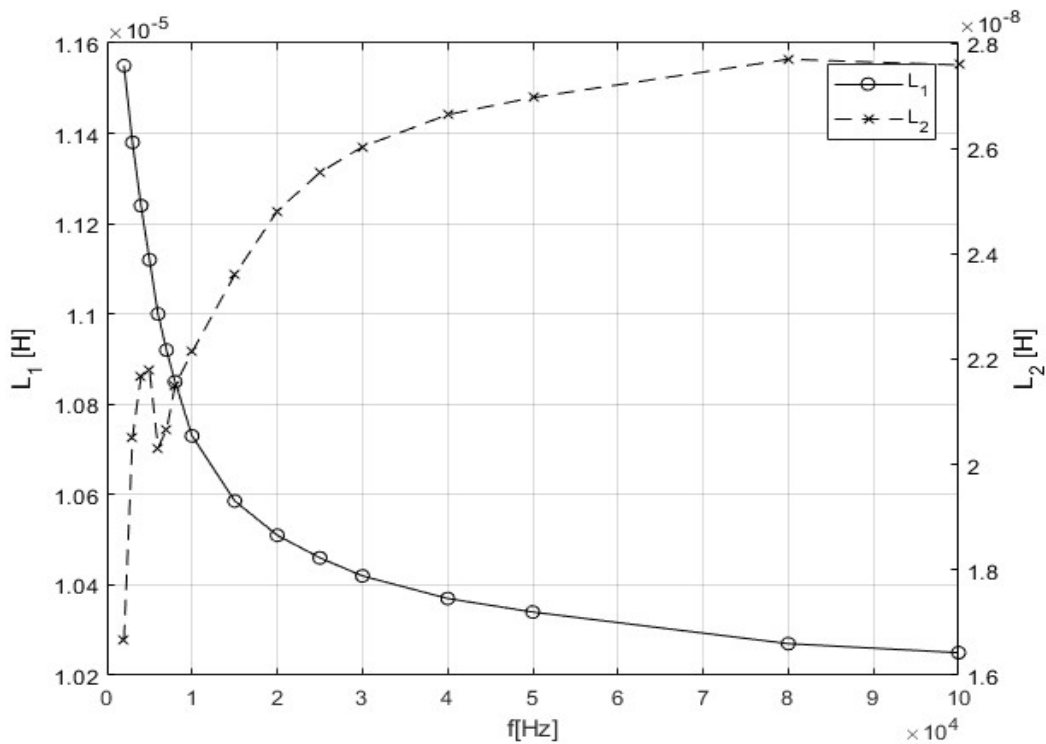


Obrázek 42: Průběh síly působící na projektil a průběh rychlosti v závislosti na čase od výstřelu

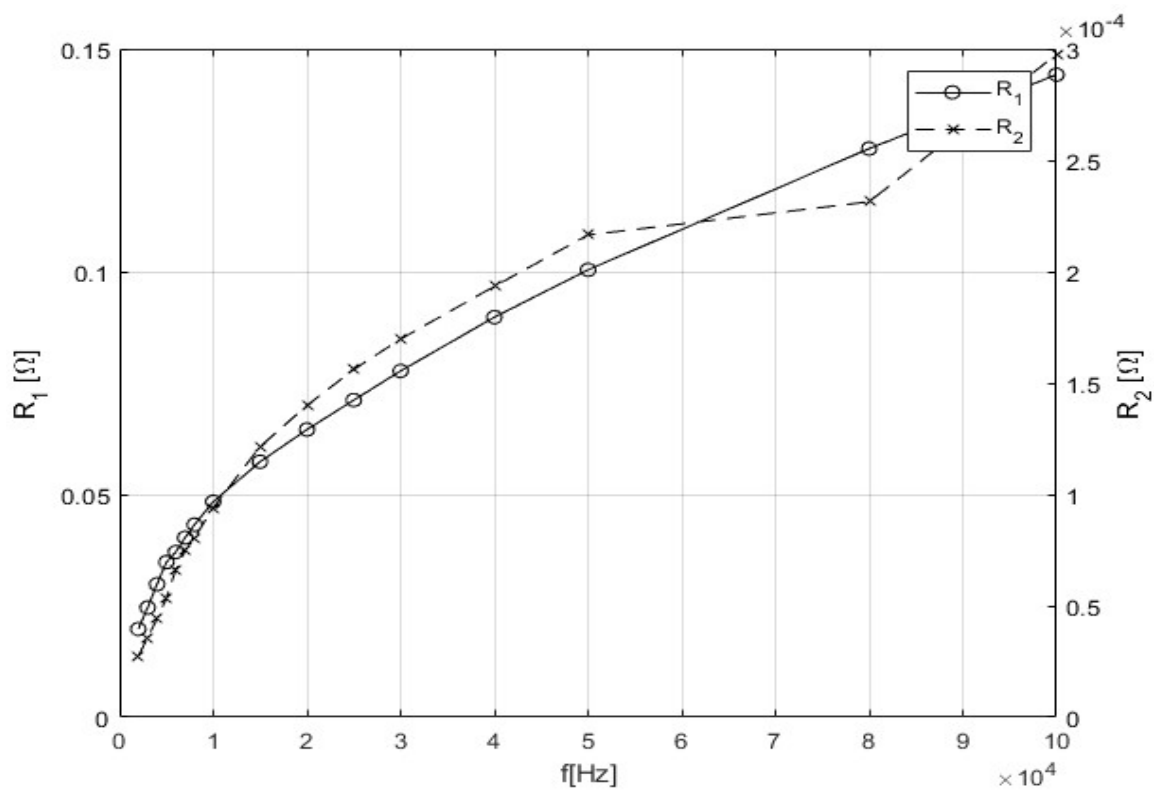


Obrázek 43: Závislost zrychlení a polohy projektilu na čase od výstřelu

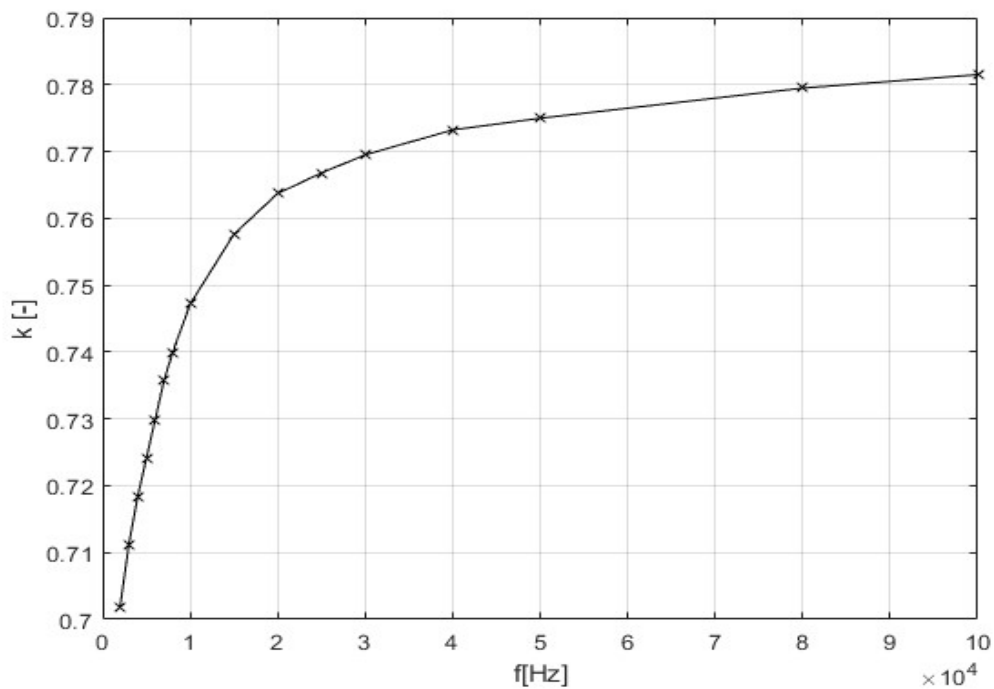
## 6.2 Měření na zařízení



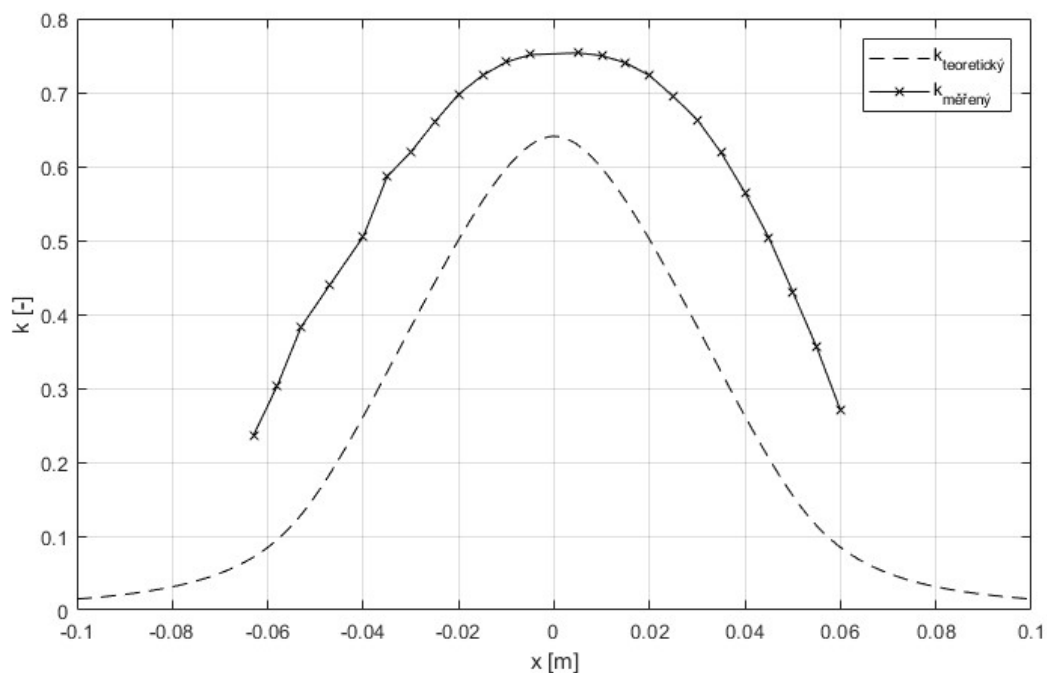
Obrázek 44: Závislost primární indukčnosti  $L_1$  a sekundární indukčnosti  $L_2$  na frekvenci (získáno měřením)



Obrázek 45: Závislost primárního odporu  $R_1$  a sekundárního odporu  $R_2$  na frekvenci (získáno měřením)



Obrázek 46: Závislost činitele vazby  $k$  na frekvenci (získáno výpočtem z měřených hodnot)



**Obrázek 47: Srovnání činitele vazby předpokládaného simulací a závislosti ověřené měřením**

Srovnání teoretických a měřených hodnot na obr. Obrázek 47 je zajímavé tím, že činitel vazby měřený pomocí RLC-metru je vyšší, než teoreticky spočítaný. Pravděpodobnou příčinou je frekvence, na které byla závislost měřena – 15kHz. Jak totiž lze vidět z obr. Obrázek 46 hodnota činitele vazby s rostoucím kmitočtem vzrůstá a nabývá tak vyšších hodnot než při teoretickém výpočtu nezohledňujícím kmitočty.

Následující tabulka zobrazuje výsledky měření rychlosti všech čtyř projektilů. Měření bylo provedeno několikrát. Pro projektily 1 a dva bylo provedeno měření s různými počátečními napětími kondenzátorů. Pro projektily 3 a 4 byla měřena rychlost pro různé počáteční polohy projektilu.

**Tabulka 6: Výsledky měření rychlosti projektilu**

Projektíl č. 1, $a_p = 54\text{mm}$ (Dural)									
$x$ [mm]	$U_0$ [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$d_D$ [mm]	$\Delta t$ [ms]	$v$ [m/s]	$E_C$ [J]	$E_K$ [J]	$\eta$ [%]
18	425	185	180	64	6,80	9,41	1281,29	1,68	0,72
18	235	125	90	64	17,00	3,76	312,18	0,27	0,38
18	100	37,5	55	64	46,80	1,37	59,66	0,04	0,28

Projektíl č. 2 $a_p = 40\text{mm}$ (Dural)									
$x$ [mm]	$U_0$ [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$d_D$ [mm]	$\Delta t$ [ms]	$v$ [m/s]	$E_C$ [J]	$E_K$ [J]	$\eta$ [%]
7	425	155	170	82	3,56	23,03	1022,33	7,69	3,30
7	160	75	55	82	11,40	7,19	428,28	0,75	2,27

Projektíl č. 3, $a_p = 28\text{mm}$ (Dural)									
$x$ [mm]	$U_0$ [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$d_D$ [mm]	$\Delta t$ [ms]	$v$ [m/s]	$E_C$ [J]	$E_K$ [J]	$\eta$ [-]
8	425	175	160	82	7,12	12,22	531,80	1,49	0,64
13	425	170	155	87	3,08	26,62	1211,63	7,09	3,04
15	425	170	165	77	3,02	26,49	1278,71	7,02	3,01
18	425	165	160	72	2,62	29,39	1223,24	8,64	3,71
20	425	175	160	75	2,70	27,78	1544,45	7,72	3,31
23	425	170	165	80	2,90	24,83	1278,71	6,16	2,65

Projektíl č. 4, $a_p = 28\text{mm}$ (měď)									
$x$ [mm]	$U_0$ [V]	$U_1$ [V]	$U_2$ [V]	$d_D$ [mm]	$\Delta t$ [ms]	$v$ [m/s]	$E_C$ [J]	$E_K$ [J]	$\eta$ [-]
8	425	190	150	82	11,26	7,73	1271,94	1,43	0,61
13	425	180	160	87	6,40	12,81	1290,00	3,94	1,69
18	425	175	160	77	5,58	13,80	1267,10	4,57	1,96
22	425	170	170	73	4,98	14,66	1313,22	5,16	2,21
23,5	425	160	160	70	5,10	14,02	1202,28	4,72	2,02
25	425	170	165	71,5	5,10	13,73	1278,71	4,52	1,94

- $x$  [mm] počáteční poloha projektílu, vzdálenost středů statorové cívky a projektílu
- $d_D$  [mm] nastavená vzdálenost hrany projektílu od diody druhé světelné brány
- $U_0$  [V] napětí, na které byla nabita první baterie kondenzátorů
- $U_1$  [V] napětí na první baterii kondenzátorů po výstřelu
- $U_2$  [V] napětí, na něž se po výstřelu nabila druhá baterie kondenzátorů
- $\Delta t$  [ms] rozdíl času náběžné hrany zapalovacího impulsu tyristoru a sestupné hrany poklesu napětí na fotodiodě druhé světelné brány
- $v$  [m/s] rychlost projektílu
- $E_C$  [J] energie kondenzátorů po výstřelu
- $E_K$  [J] kinetická energie projektílu
- $\eta$  [-] účinnost zařízení

Rychlost projektílu byla spočtena z volené počáteční vzdálenosti přední hrany projektílu a druhé světelné brány a času  $\Delta t$  měřeného pomocí osciloskopu

$$v = \frac{d_D}{\Delta t} \quad (6.1-1)$$

Energie kondenzátorů po výstřelu byla určena dle vztahu pro výpočet energie kondenzátoru. Jde o součet energií obou kondenzátorových baterií po výstřelu. Je třeba počítat s kapacitou jedné kondenzátorové baterie, tj  $C = 25,8 \text{ mF}$ .

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (U_1^2 + U_2^2) \quad (6.1-2)$$

Kinetická energie  $E_K$  byla spočtena dle vztahu (4.1.3-1a) pro výpočet kinetické energie. Účinnost zařízení  $\eta$  je pak dána poměrem kinetické energie a energie dodané

soustavě (tj. energie, kterou získala první kondenzátorová baterie nabitím před výstřelem).

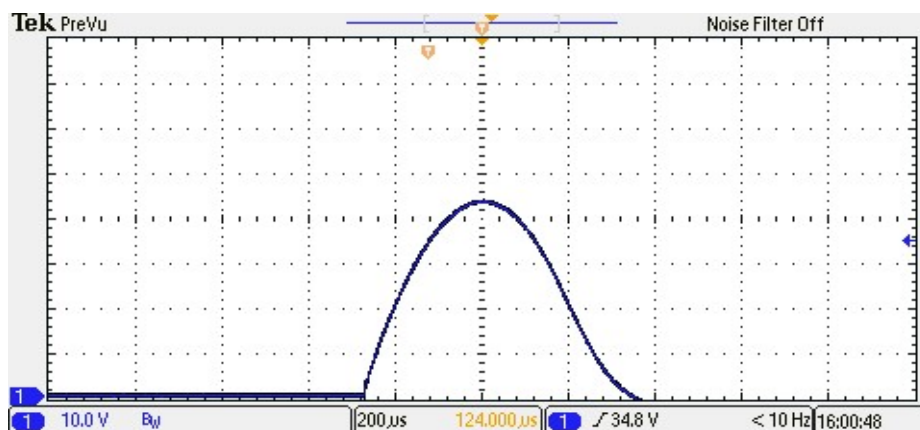
$$\eta = \frac{E_K}{\frac{1}{2}CU_0^2} \quad (6.1-3)$$

Při výpočtu účinnosti nebyla zohledněna energie, která po výstřelu zůstala nezužitkována v kondenzátorech. Nebyly určovány ztráty v zařízení a měření rychlosti projektilu vlivem rušení od silových obvodů bylo nepřesné a tudíž i změřená rychlost se může lišit od rychlosti reálné.

Nicméně, lze zjistit, který projektil pracoval s největší účinností. Jde o duralový projektil 3 s axiální délkou 28mm. Tato účinnost závisela velmi na poloze. Z tohoto lze usuzovat, že je vhodné konstruovat projektily, které jsou kratší, než polovina délky cívky. Celý projektil se pak nachází až za středem cívky, kde síla působí pouze jedním směrem. Pokud se část projektilu nachází před středem cívky, je vypuzována opačným směrem než zbytek projektilu a tím se zmenšuje síla působící na projektil. Zároveň část, co by případně z cívky vyčnívala, už příliš k urychlování projektilu také nepřispívá.

Pomocí osciloskopu byl pořízen záznam půlvlny proudu statorovou cívkou při výstřelu pro každý projektil. U každého záznamu budou uvedeny odečtené hodnoty. Měření bylo provedeno pomocí průvlekového proudového transformátoru s převodem 340A/1A, na jehož vývody byl připojen bočník s odporem 1,8Ω. Celkový převod skutečného proudu na měřené napětí je 189A/1V.

Důležitou skutečností, kterou je nutno uvést pro toto měření, je havárie spínacího tyristoru, která nastala při měření rychlosti projektilu. Jak bude níže uvedeno, proudy protékající obvodem dosahovaly i 7kA a použitý tyristor IR180RKI80 s parametry 180A/800V sice špičkově proud vydržel, nicméně po několika výstřelech opakovaných v rychlém sledu se tyristor vlivem strmosti nárůstu napětí při dobíjení kondenzátorové baterie prorazil. Pro další měření byl tedy použit třífázový stykač s paralelně propojenými proudovými drahami jednotlivých fází, za něj byla připojena paralelní kombinace dvou výkonových diod pro ochranu elektrolytických kondenzátorů proti přepólování.



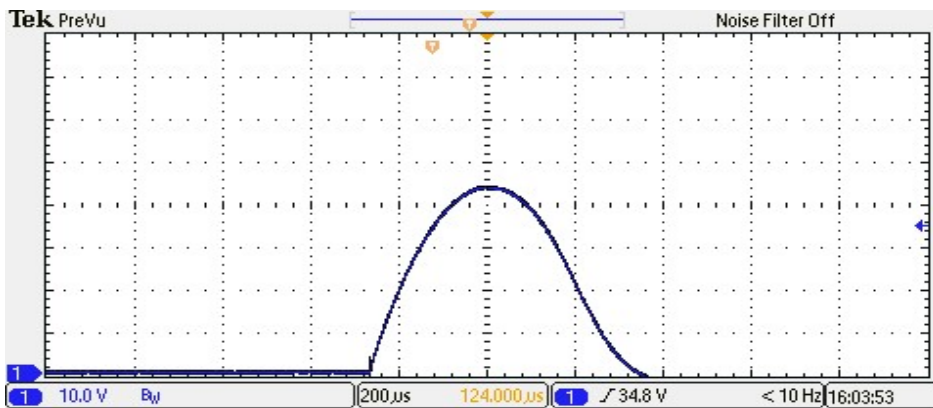
### Projektil 1

$$I_{max} = 8,316 \text{ kA}$$

$$t_{max} = 640 \mu\text{s}$$

$$f = 781 \text{ Hz}$$

Obrázek 48: Průběh proudové vlny, projektil ap = 54mm (dural), záznam z osciloskopu



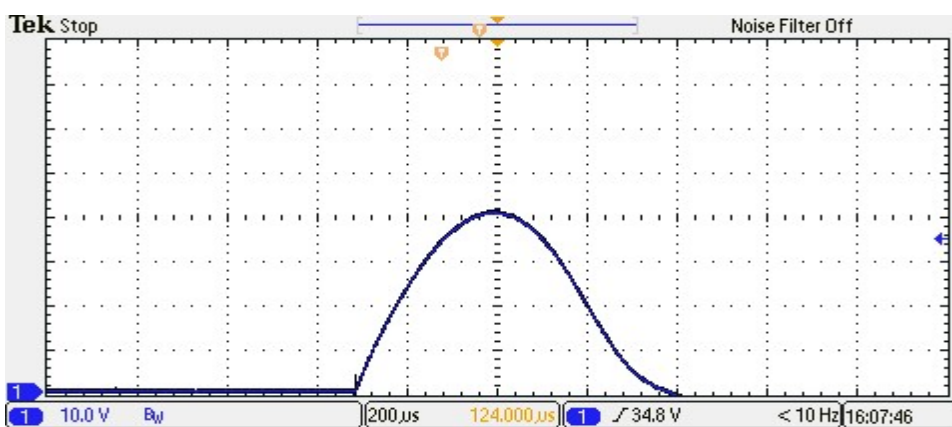
### Projektíl 2

$$I_{max}=8,314\text{kA}$$

$$t_{max} = 640\mu\text{s}$$

$$f = 781\text{ Hz}$$

Obrázek 49: Průběh proudové vlny, projektíl  $a_p = 40\text{mm}$  (dural), záznam z osciloskopu



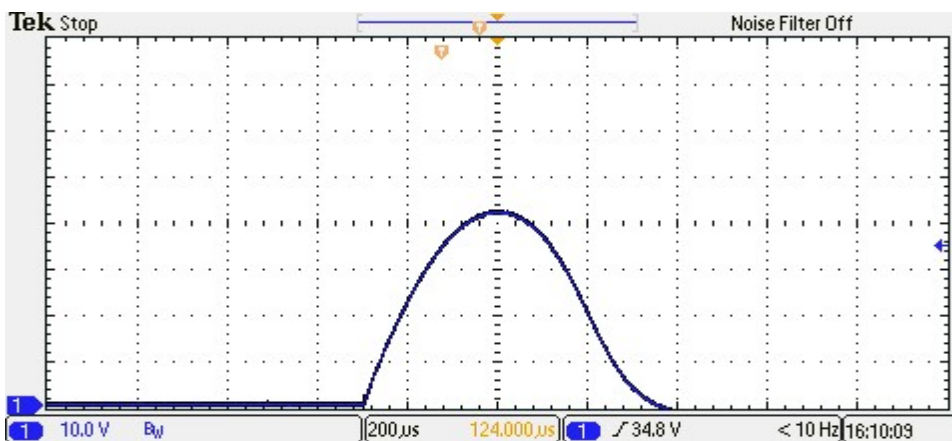
### Projektíl 3

$$I_{max}=7,556\text{ kA}$$

$$t_{max} = 720\mu\text{s}$$

$$f = 694\text{ Hz}$$

Obrázek 50: Průběh proudové vlny, projektíl  $a_p = 28\text{mm}$  (dural), záznam z osciloskopu



### Projektíl 4

$$I_{max}=7,938\text{ kA}$$

$$t_{max} = 680\mu\text{s}$$

$$f = 735\text{ Hz}$$

Obrázek 51 Průběh proudové vlny, projektíl  $a_p = 28\text{mm}$  (měď), záznam z osciloskopu

Ještě uvedme krátké srovnání teoreticky spočtených hodnot a hodnot získaných měření:

	Teoretické hodnoty	Měřené hodnoty
$L_s$	10,09 $\mu\text{H}$	11,55 $\mu\text{H}$
$L_p$	15,77 nH	16,66 nH
$R_s$	3,8 m $\Omega$	19,79 m $\Omega$
$R_p$	8,39 $\mu\Omega$	27,45 $\mu\Omega$
$I_0$	10 kA	8,3 kA
$f$	441 Hz	781 Hz
$v$	15 m/s	9,41 m/s

Nejdůležitějším faktorem způsobujícím rozdíly mezi výsledky simulace a měřenými hodnotami způsobovalo pravděpodobně zanedbání dvou faktorů. Jedním z nich je tření, které zpomaluje projektil, měřená rychlost je tedy nižší než rychlost vypočtená. V modelu také nebylo počítáno s vlivem skin efektu při vyšších frekvencích proudu. Vyšší odpor tak způsobuje větší úbytky na vodičích a zároveň tlumí rezonanční obvod, který kondenzátory a statorová cívka tvoří. Dále byla zanedbána parazitní indukčnost a odpor přívodů a propojek i ostatní parazitní jevy. Vlivem výměny spínacího prvku se mohla změnit celková indukčnost elektrického obvodu, což mohlo vést ke zkreslení a změně velikosti měřeného proudu.

Na závěr této kapitoly ještě porovnejme tento funkční indukční coilgun s konvenčními zbraněmi. Dle českého právního řádu jsou zbraněmi buď palné zbraně s energií náboje u ústí hlavně do 7,5J, nebo plynové zbraně (vzduchovky, paintball pistole, airsoft zbraně) s energií do 15J. Pokud bychom uvažovali projektil 3, jeho nejvyšší dosažená kinetická energie byla 8,64J.

Srovnáme-li ústové rychlosti, nejvyšší dosažená rychlost u zkonstruovaného zařízení byla 29,4 m/s. U konvenčních zbraní nezávisí ústová rychlost na zbraní, nýbrž na náboji. Při střelbě s nábojem 9x18mm Makarov lze dosáhnout ústové rychlosti 319 m/s. Typická ústová rychlost paintballové pistole je 90 m/s a airsoftové zbraně 60 m/s. Pro srovnání se zbraněmi podobné ráže musíme hledat spíše v kategorii granátometů, např. granátomet M203 používá náboje s ráží 40mm a ústovou rychlostí 76 m/s.

## 7 ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit literární řešerši v oblasti výkonových aktuátorů pracujících na principu elektromagnetické akcelerace kovových předmětů. Následně je matematicky analyzovat a nejvhodnější typ realizovat.

Zadané výkonové aktuátory se jinak nazývají elektromagnetická děla a dělí se převážně do tří skupin: elektromagnetická děla typu coilgun, railgun a hybridní elektromagnetická děla (či pracující na jiném principu). Tyto tři typy aktuátorů byly rozepsány v kapitole 2.

Elektromagnetická děla typu railgun lze třídit pomocí mnoha kritérií, a to podle typu kontaktů projektilu, způsobu přenosu energie na střelu, typu napájecího zdroje a způsobu napájení. Každá podskupina byla vysvětlena.

Elektromagnetická děla typu coilgun se dělí především na reluktanční coilguny pracující s feromagnetickým projektilem, který je vtahován do statorových cívek; a na indukční coilguny, jejichž projektil je tvořen nemagnetickým vodivým materiálem a je vypuzován ze statorových cívek. Indukční coilguny lze pak dělit podle způsobu napájení na pulzní coilguny, napájené proudovým impulzem, a traveling wave coilguny, napájené střídavě.

Třetí kapitola se zabývá matematickými podklady pro analýzu a případnou tvorbu numerických modelů jednotlivých typů elektromagnetických děl. Jsou zde uvedeny vztahy klíčové pro další návrh indukčního coilgunu.

Pro realizaci byl zvolen pulzně napájený indukční coilgun, jehož návrhu a sestrojení je věnována převážná část práce.

Ve čtvrté kapitole byla ukázána jedna z možných strategií použitelných při návrhu elektromagnetického děla typu indukční coilgun; včetně postupu numerického výpočtu vzájemné indukčnosti statorové cívky a pohybujícího se projektilu i simulace tohoto zařízení v softwaru MatLab Simulink. V této části práce byl také odvozen postup pro vytvoření náhradního schématu coilgunu v podobě  $\Gamma$ -článku za použití teorie transformátoru a výpočet vlastní indukčnosti projektilu a jeho odporu ze změřitelných hodnot.

V páté kapitole jsou prezentovány výsledky simulace a konstrukce prvního prototypu indukčního coilgunu. Po zkonstruování takto navrženého zařízení byly díky měření zjištěny chyby v modelu, z nichž největší vliv mělo chybné vypočtení vzájemné indukčnosti a jejího gradientu. Ukázalo se, že kotoučová cívka je pro konstrukci coilgunu nevhodná, kvůli velmi malému činiteli vazby. Vnější závit cívky jsou příliš daleko od projektilu a vazbu ještě zhoršují. Činitel vazby  $k$  nabýval maximálně hodnoty 0,13, což je naprosto nedostačující. Rychlost v tomto případě dosahovala mizivých velikostí, posun projektilu před jeho zastavením byl v jednotkách milimetrů, ačkoli dle simulace byly rychlosti relativně vysoké. Tyto chyby byly identifikovány a opraveny. Výsledky opravené simulace odpovídaly

pozorování. Rychlost projektilu byla 0,2m/s, což odpovídalo reálnému výsledku zkoušek.

Na základě zkušeností a poznatků z konstrukce prvního prototypu byla vytvořena nová a vhodnější geometrie coilgunu; výsledky simulace i měření na tomto zařízení jsou prezentována v kapitole 6. Statorová cívka byla zkonstruována jako dvojvrstvá, dlouhá 54mm činitel vazby dosahoval hodnot 0,78. Byly testovány 4 různé projektily o průměru 35mm, tři různých délek z duralu a jeden z mědi.

Nejvyšších rychlostí dosahoval projektil 3 z duralu o délce poloviny délky statorové cívky. Dosažená rychlost projektilu závisela na jeho počáteční poloze v hlavni. Nejvyšší dosažená rychlost tohoto projektilu  $v = 29,4$  m/s (kinetická energie  $E_K = 8,64$ J ). Stejně dlouhý projektil z mědi dosahoval rychlostí o něco nižších (max 14,7m/s). Model dobře odpovídal skutečností ověřeným měřením. Odchytky byly způsobeny především zanedbáním tření působícího na projektil, zanedbání vlivu skinefektu na odpor vodičů a parazitní indukčnosti a odporu přívodů a propojek.

Dalším krokem ve vývoji tohoto zařízení by pravděpodobně byla adaptace buď na projektily nesoucí nálož o hmotnostech kilogramů, nebo naopak miniaturizace a optimalizace na osobní využití. Oba tyto případy použití by vyžadovaly systém skládající se z více statorových cívek. Přestože i jednocívkový systém, jako ten prezentovaný, dosahoval dobrých výsledků, k praktickému využití má tato technologie stále daleko.

# Literatura

- [1] TALAKE, S. G. et al. *Railgun. Defence Science Journal*, [S.l.], v. 44, n. 3, p. 257-262, jan. 2013. ISSN 0976464X. Available at: <<http://publications.drdo.gov.in/ojs/index.php/dsj/article/view/4179/2439>>. Date accessed: 01 Jan. 2018. doi:<http://dx.doi.org/10.14429/dsj.44.4179>.
- [2] KOLM, H. a P. MONGEAU. *Basic principles of coaxial launch technology. Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1984, 20(2), 227-230 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109/TMAG.1984.1063050. ISSN 0018-9464.
- [3] PING ZHENG, SHUKANG CHENG, LIYI LI, HONGXING WU a YING WANG. Research on the relation between the propulsive force and magnetic system of the coil launcher based on the mechanism of hybrid switched reluctance motor. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2003, 39(1), 116-119 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109/TMAG.2002.805876. ISSN 0018-9464.
- [4] MCNAB, I.R. *Early electric gun research. Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1999, 35(1), 250-261 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109/20.738413. ISSN 0018-9464.
- [5] SVOBODA, Pavel. *Návrh dvoustupňového magnetického děla*. Plzeň, 2014. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Kindl, Vladimír.
- [6] PATOČKA, Miroslav. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice*. V Brně: VUTIUM, 2011. ISBN 978-80-214-4003-6.
- [7] ZIELINSKI, A. a D. HILDENBRAND. Observation and simulation of armature contact performance in the cannon-caliber electromagnetic gun. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1997, 33(1), 157-162 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109/20.559935. ISSN 0018-9464.
- [8] FAIR, H.D. *Advances in Electromagnetic Launch Science and Technology and Its Applications. Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2009, 45(1), 225-230 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109 /TMAG.2008.2008612. ISSN 0018-9464.
- [9] MCNAB, Ian R, M T CRAWFORD, S S SATAPATHY, F STEFANI a T J WATT. *IAT Armature Development. Plasma Science, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2011, 39(1), 442-451 [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109/TPS.2010.2082568. ISSN 0093-3813.
- [10] Keefer, Dennis, et al. *Railgun Plasma Armatures*. TENNESSEE UNIV SPACE INST TULLAHOMA CENTER FOR LASER APPLICATIONS, 1996.

- [11] PARKER, J.V. *Why plasma armature railguns don't work (and what can be done about it)*. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. None, 1989, 25(1) [cit. 2018-01-02]. DOI: 10.1109/20.22574. ISSN 0018-9464.
- [12] KARHI, R. W., D. A. WETZ, J. J. MANKOWSKI a M. GIESSELMANN. *Theoretical and Experimental Analysis of Breech Fed and 40-Distributed Energy Stage Plasma Arc Railguns*. *Plasma Science, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2012, 40(10), 2637-2645 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TPS.2012.2189416. ISSN 0093-3813.
- [13] ZIZHOU SU, WEI GUO, BIN CAO, YANHUI CHEN, KAI HUANG a XIA GE. *The study of the simple breech-fed railgun recoil force*. In: *Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on* [online]. IEEE, 2012, s. 1-4 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/EML.2012.6325017. ISBN 978-1-4673-0306-4.
- [14] MCNAB, Ian R, M T CRAWFORD, S S SATAPATHY, F STEFANI a T J WATT. *IAT Armature Development*. *Plasma Science, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2011, 39(1), 442-451 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TPS.2010.2082568. ISSN 0093-3813.
- [15] *DTIC Online* [online]. Copyright © [cit. 3.1.2018]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a152129.pdf>
- [16] ANDREWS, J.A. *Coilgun structures*. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1993, 29(1), 637-642 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/20.195650. ISSN 0018-9464.
- [17] WAINDOK, A. a G. MAZUR. *A mathematical and physical models of the three-stage reluctance accelerator*. In: *Electrodynamics and Mechatronics, 2009. SCE 11 '09. 2nd International Students Conference on* [online]. IEEE Publishing, 2009, s. 29-30 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/ISCON.2009.5156100. ISBN 978-1-4244-3897-6.
- [18] DANIELS, Braam Maxim. *Design and Construction of Pulsed Linear Induction Motor*. Cape Town, 2007. Disertační práce. University of Cape Town.
- [19] ZHU, Bofeng, Junyong LU, Jie WANG a Shicheng XIONG. *A Compulsator Driven Reluctance Coilgun-Type Electromagnetic Launcher*. *IEEE Transactions on Plasma Science* [online]. 2017, 45(9), 2511-2518 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TPS.2017.2731624. ISSN 0093-3813.
- [20] ANDREWS, J.A. a J.R. DEVINE. *Armature design for coaxial induction launchers*. 5. *IEEE symposium on electromagnetic launcher technology* [online]. None, 1991, 27(1) [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/20.101109. ISSN 0018-9464.
- [21] FAIR, H. *Electromagnetic propulsion: A new initiative*. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1982, 18(1), 4-6 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TMAG.1982.1061789. ISSN 0018-9464.

- [22] FAIR, H. Electromagnetic propulsion: A new initiative. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1982, **18**(1), 4-6 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TMAG.1982.1061789. ISSN 0018-9464.
- [23] HE, J., E. LEVI, Z. ZABAR a L. BIRENBAUM. Concerning the design of capacitively driven induction coil guns. *Plasma Science, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1989, **17**(3), 429-438 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/27.32251. ISSN 0093-3813.
- [24] ZABAR, Z., Y. NAOT, L. BIRENBAUM, E. LEVI a P.N. JOSHI. Design and Power Conditioning for the Coil-Gun. *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 1989, **25**(1), 627-631 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/20.22613. ISSN 00189464.
- [25] ELLIOTT, D.G. Traveling-wave induction launchers. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1989, **25**(1), 159-163 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/20.22526. ISSN 0018-9464.
- [26] YANG SHIRONG, WANG YING, CUI SHANBAO, PANG GUOHUA, LI XUQIONG a WANG WEI. A novel type rail-coil hybrid electromagnetic launcher. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2005, **41**(1), 266-267 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TMAG.2004.839277. ISSN 0018-9464.
- [27] COWAN, M., E. CNARE, B. DUGGIN, R. KAYE a T. TUCKER. The reconnection gun. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1986, **22**(6), 1429-1434 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TMAG.1986.1064637. ISSN 0018-9464.
- [28] HUMMER, C. R.; HOLLANDSWORTH, C. E. *A single-stage reconnection gun*. ARMY RESEARCH LAB ABERDEEN PROVING GROUND MD, 1992.
- [29] MCKINNEY, K. a P. MONGEAU. Multiple stage pulsed induction acceleration. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1984, **20**(2), 239-242 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/TMAG.1984.1063089. ISSN 0018-9464.
- [30] WILLIAMSON, S. a A. SMITH. Pulsed coilgun limits. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1997, **33**(1), 201-207 [cit. 2018-01-03]. DOI: 10.1109/20.559951. ISSN 0018-9464.
- [31] WILLIAMSON, S. a P. LEONARD. Analysis of air-cored tubular induction motors. *IEE Proceedings B. Electric Power Applications* [online]. 1986, **133**, 285-290 [cit. 2018-01-03]. ISSN 0143-7038.
- [32] MCNAB, I.R., F. STEFANI, M. CRAWFORD, et al. Development of a naval railgun. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 2005, **41**(1), 206-210 [cit. 2018-05-21]. DOI: 10.1109/TMAG.2004.839285. ISSN 0018-9464.
- [33] BECHERINI, G., M. RAUGI a A. TELLINI. Thermal and mechanical stress in induction coilguns. *Magnetics, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1999, **35**(1), 130-135 [cit. 2018-05-21]. DOI: 10.1109/20.738390. ISSN 0018-9464.

- [34] ROSA, Edward B a Frederick W GROVER. *Formulas and tables for the calculation of mutual and self-inductance*. 3d ed. Washington: Govt. print. off., 1916.

# Seznam symbolů, veličin a zkratk

$a_s$	axiální délka statorové cívky	(mm,m)
$a_p$	axiální délka projektilu	(mm,m)
$B$	magnetický indukce	(T)
DES	Distributed energy storage	
$C$	kapacita	(F)
$D_s$	vnější průměr statorové cívky	(mm, m)
$d_s$	vnitřní průměr statorové cívky	(mm, m)
$D_p$	vnější průměr projektilu	(mm, m)
$d_p$	vnitřní průměr projektilu	(mm, m)
$dM/dx$	gradient vzájemné indukčnosti	(H/m)
$\Delta u$	úbytek napětí	(V)
$E$	intenzita elektrického pole	(Vm <sup>-1</sup> )
$F$	síla	(N)
$I$	elektrický proud	(A)
$i_p$	proud projektilu	(A)
$i_s$	proud statorovou cívkou	(A)
$J$	proudová hustota	(Am <sup>-2</sup> ; Amm <sup>-2</sup> )
$\gamma$	hustota mědi	8960 kg/m <sup>3</sup>
$L_p$	vlastní indukčnosti projektilu	(H)
$L_s$	vlastní indukčnost statorové cívky	(H)
$L_1$	indukčnost stat. Cívky měřená bez projektilu	(H)
$L_2$	Měřená indukčnost projektilu	(H)
$L_{S,K}$	Indukčnost cívky měřená sériově; s projektilem	(H)
$L_{P,K}$	Indukčnost cívky měřená paralelně; s projektilem	(H)
$k$	Činitel vazby	(-
$m$	hmotnost	(g)
$M$	vlastní indukčnost obecně	(H)
$M_{SP}$	vzájemná indukčnost statorové cívky a projektilu	(H)
$\mu_0$	permeabilita vaakua	4 $\pi$ x 10 <sup>-7</sup> Hm <sup>-1</sup>
$N$	počet závitů cívky	(-)
$n$	počet elementů ve výpočtu vzájemné indukčnosti	(-)
$\psi$	spřažený magnetický tok	(Wb)
PSL	pseudoliquid kontakt	
$Q$	náboj	(C)
$r$	vzdálenost, poloměr	(m)
$T$	perioda	(s)
$t$	čas	(s)
$R_p$	elektrický odpor projektilu	( $\Omega$ )
$R_s$	odpor statorové cívky	( $\Omega$ )
$\rho$	měrný odpor mědi	1,7·10 <sup>-8</sup> $\Omega$ m
$u$	napětí	(V)
$v$	rychlost	(kms <sup>-1</sup> ; ms <sup>-1</sup> ; kmh <sup>-1</sup> )
$V$	objem	(m <sup>3</sup> )
$z$	vzdálenost proudových filamentů	(m)

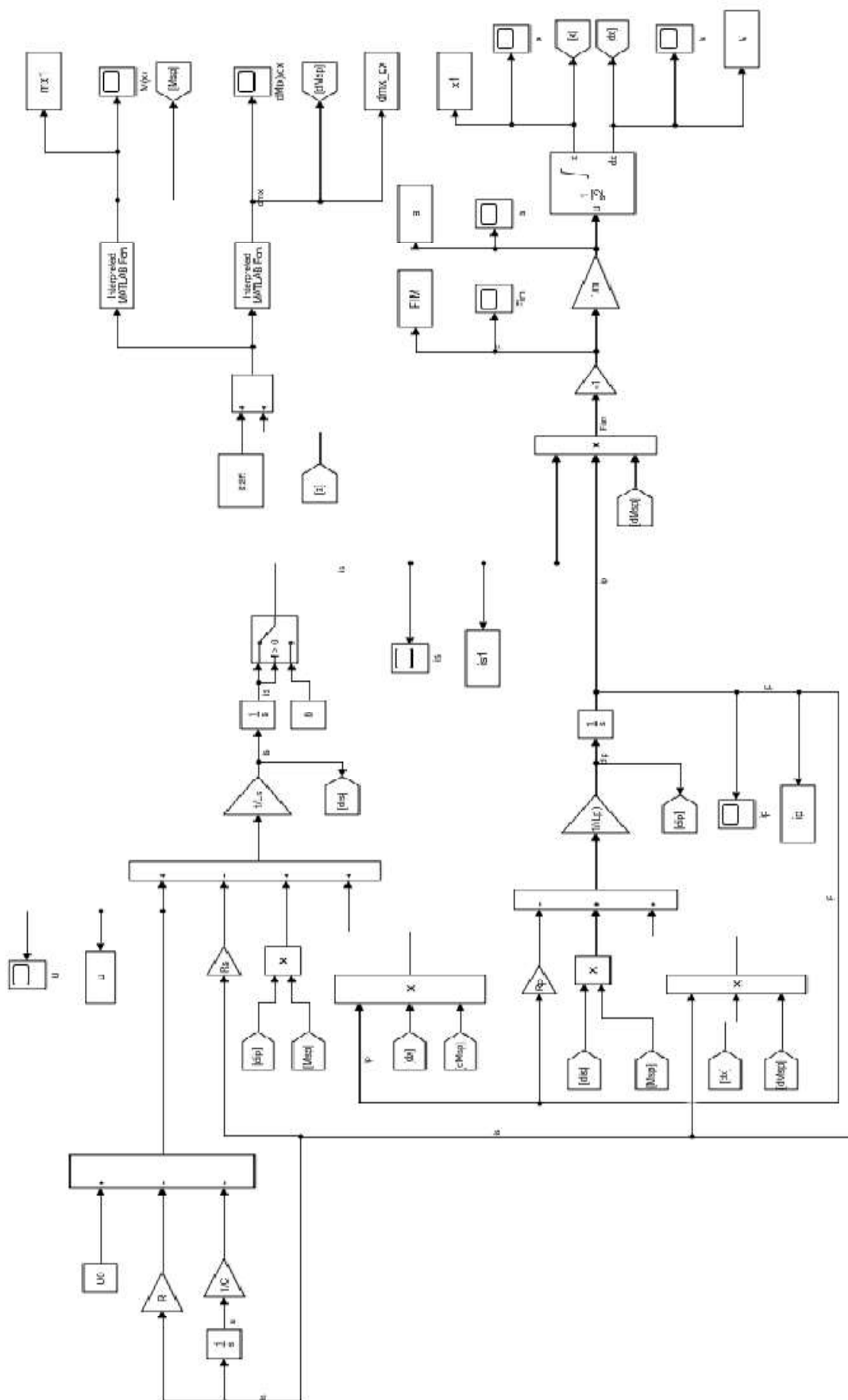
# Seznam příloh

- Příloha 1. Schéma modelu v MatLab Simulink
- Příloha 2. Tabulka změřených a vypočtených hodnot pro první prototyp coilgunu (grafy na obrázcích Obrázek 31-Obrázek 33)
- Příloha 3. Tabulka změřených a vypočtených hodnot pro druhý prototyp coilgunu, projektil č. 1, axiální délka 54mm (grafy na obrázcích Obrázek 44-Obrázek 46)
- Příloha 4. DVD s výpočty v MatLab a MatLab Simulink

# Přílohy

# Příloha 1.

## Schéma modelu v MatLab Simulink



## Příloha 2.

Tabulka změřených a vypočtených hodnot pro první prototyp coilgunu  
(grafy na obrázcích Obrázek 31-Obrázek 33)

f [Hz]	L <sub>1</sub> [μH]	R <sub>1</sub> [mΩ]	L <sub>s</sub> [μH]	R <sub>s</sub> [Ω]	L <sub>p</sub> [μH]	R <sub>p</sub> [Ω]	L <sub>2</sub> [nH]	R <sub>2</sub> [μΩ]	k [-]
500	133,92	43,66	131,15	0,05	133,10	3,44	0,45	1,94	0,14
3000	124,47	262,04	121,32	0,29	123,24	18,43	1,62	16,86	0,16
4000	122,49	379,26	118,85	0,41	121,11	22,05	2,37	25,59	0,17
5000	120,71	508,39	116,75	0,55	119,36	25,06	2,83	33,75	0,18
6000	119,01	647,49	114,84	0,70	117,81	27,62	3,05	41,19	0,19
7000	117,37	795,15	113,06	0,85	116,38	24,86	3,11	47,97	0,19
8000	116,25	949,86	111,33	1,02	115,00	31,82	3,39	56,25	0,21

Hodnoty a postup výpočtu dostupný v souborech *prototyp1\_mereni.mat* (hodnoty) a *identifikace\_parametru.m* (postup výpočtu) v elektronické příloze 1.

### Příloha 3.

Tabulka změřených a vypočtených hodnot pro druhý prototyp coilgunu, projektil  
č. 1, axiální délka 54mm (grafy na obrázcích Obrázek 44Obrázek 46)

f [Hz]	L <sub>1</sub> [μH]	R <sub>1</sub> [mΩ]	L <sub>s</sub> [μH]	R <sub>s</sub> [Ω]	L <sub>p</sub> [μH]	R <sub>p</sub> [Ω]	L <sub>2</sub> [nH]	R <sub>2</sub> [μΩ]	k [-]
2000	11,55	19,79	5,86	26,24	6,54	0,24	16,66	27,45	0,70
3000	11,38	24,61	5,62	32,50	6,13	0,39	20,52	35,74	0,71
4000	11,24	29,84	5,44	39,48	5,88	0,53	21,66	44,13	0,72
5000	11,12	34,79	5,29	46,52	5,69	0,64	21,78	53,34	0,72
6000	11,00	37,08	5,14	52,18	5,51	0,79	20,32	66,29	0,73
7000	10,92	40,30	5,01	57,37	5,35	0,92	20,66	74,66	0,74
8000	10,85	43,22	4,91	61,49	5,22	1,06	21,50	80,54	0,74
10000	10,73	48,36	4,74	69,71	5,00	1,34	22,14	94,00	0,75
15000	10,59	57,34	4,51	84,80	4,69	2,23	23,60	121,50	0,76
20000	10,51	64,56	4,38	95,96	4,52	3,28	24,81	139,95	0,76
25000	10,46	71,17	4,31	106,00	4,42	4,44	25,54	156,07	0,77
30000	10,42	77,72	4,25	115,52	4,35	5,69	26,03	169,76	0,77
40000	10,37	89,78	4,17	132,78	4,25	8,44	26,64	193,41	0,77
50000	10,34	100,41	4,13	148,47	4,18	11,47	26,96	216,48	0,77
80000	10,27	127,61	4,03	178,89	4,06	21,26	27,69	231,35	0,78
100000	10,25	144,21	3,99	210,55	4,02	29,99	27,58	297,56	0,78

Hodnoty a postup výpočtu dostupný v souborech  
*prototyp2\_mereni\_s\_projektilem\_54mm.mat* (hodnoty) a *identifikace\_parametru.m*  
(postup výpočtu) v elektronické příloze 1.