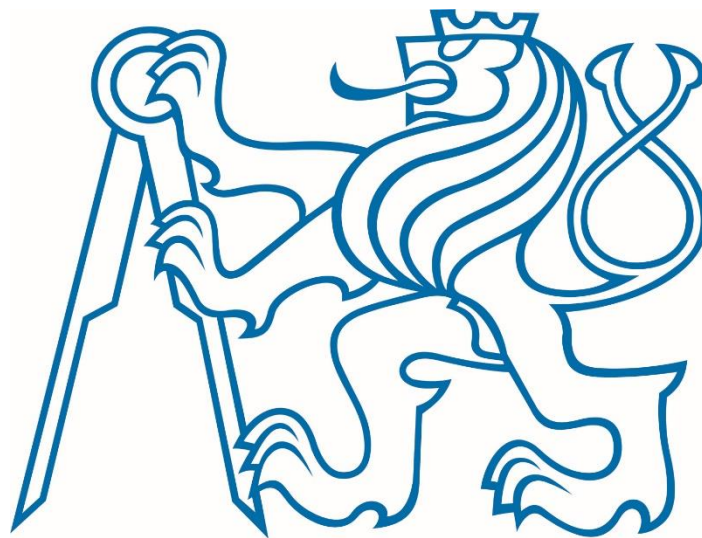


**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V PRAZE**

**FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY**



**Model kolejnicového urychlovače  
neferomagnetických kovových těles a  
jeho experimentální ověření**

Praha 2017

Autor: Tomáš Tichý

## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne:

Podpis:

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tichý** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **409263**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektroenergetiky**  
Studijní program: **Elektrotechnika, energetika a management**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Model kolejnicového urychlovače neferomagnetických kovových těles a jeho experimentální ověření**

Název diplomové práce anglicky:

**Model of rail accelerator of nonferromagnetic metal bodies and its experimental verification**

Pokyny pro vypracování:

1. Popište kolejnicový urychlovač a jeho infrastrukturu (napájecí a řídicí obvody)
2. Sestavte dostatečně přesný model urychlovače
3. Proveďte pro zadaná vstupní data jeho řešení vhodnou numerickou metodou
4. Získané výsledky ověřte měření na existujícím zařízení

Seznam doporučené literatury:

- [1] Seth Fletcher: Navy Tests 32-Megajoule Railgun. Popular Science, February 2008.
- [2] <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/emrg.htm>
- [3] <http://www.powerlabs.org/railgun2.htm>
- [4] Ivo Doležel: Electromagnetics and related coupled problems - elektronické učební texty.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**prof. Ing. Ivo Doležel CSc., ÚE AVČR**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **13.02.2017**

Termín odevzdání diplomové práce: **26.05.2017**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) práce

\_\_\_\_\_  
Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

\_\_\_\_\_  
Podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## 2. Poděkování:

Především bych rád poděkoval vedoucímu práce, prof. Ing. Ivu Doleželovi, CSc., který mi po celou dobu psaní práce dával velmi podnětné a užitečné rady, bez kterých by práce neskončila úspěchem. Profesor Doležel vedl práci velmi profesionálně, a to i přes svou časovou zaneprázdněnost a nepříjemné zdravotní problémy, které se mu Bohužel během psaní práce přihodily. Vedení pana profesora si velmi vážím a za jeho nasazení mu opravdu velmi děkuji.

Také bych chtěl poděkovat Ing. Lubomíru Musálkovi, Ing. Zdeňku Novákovi a doc. Dr. Ing. Janu Kynclovi za pomoc při modelování části problematiky a pomoc při revizi textové části práce.

Další poděkování patří vedoucímu Katedry elektrických pohonů a trakce, panu Ing. Janu Bauerovi, Ph.D. za nezištné půjčování osciloskopu. Také panu doktorovi patří dík za stykač, který mi věnoval pro výrobu předurýchlovače.

Za možnost realizování praktické části velmi děkuji panu plk. doc. Ing. Liboru Dražanovi, CSc., dále panu pplk. Ing. Romanu Vítkovi, Ph.D., a panu mjr. Ing. Františku Rackovi, Ph.D., z univerzity obrany, kteří mi kromě možnosti měření pomohli svou technikou a zachovanou trpělivostí v nelehkých situacích, k získání potřebných dat. Bez spolupráce se jmenovanými pány by se práce v současném rozsahu nemohla realizovat.

A v neposlední řadě bych chtěl poděkovat mé rodině a přítelkyni, za podstatnou podporu a trpělivost, kterou se mnou měli v průběhu psaní práce.

### **3. Anotace:**

Hlavní část práce pojednává o matematickém modelování kolejnicového urychlovače. Modely jsou rozděleny na model obvodový, model elektromagnetického pole, model mechanický, model ztrátový a celkový model, založený na bilanci energie. V obvodovém modelu jsou nalezeny prvky a jejich velikosti takové, aby výstupem byl proudový pulz, shodný s naměřenými hodnotami. Model elektromagnetického pole sleduje rozložení magnetického a proudového pole. Mechanický model zohledňuje oba zmíněné modely a výstupem je ústřední rychlost projektilu, a to jako bezztrátová ideální, nebo jako reálně postihnutelná se započítáním ztrát. Model založený na bilanci energie, počítá pak s jinou myšlenkovou možností řešení.

V dalších částech práce jsou naznačeny současně nejproblematictější části kolejnicových urychlovačů a známé druhy kolejnicových urychlovačů.

Dále je popsána série měření, která byla uskutečněna k získání nutných dat pro matematický popis. Také je popsána realizovaná možnost snímání polohy projektilu v hlavní během urychlování, výzkum různého provedení projektilů a nakonec je popsána konstrukce předurychlovače a vliv jeho použití na ústřední rychlost.

### **Annotation:**

The main part of this thesis deals with mathematical modeling of rail electromagnetic accelerator. Models are divided to the circuit model, mechanical model, model of electromagnetic field, model of losses and complex model of energy balance. Circuit model is intended for determining electrical equivalent elements and their sizes, according to the measured current. Model of electromagnetic field shows magnetic and current field distribution. Mechanical model takes both parts and its solution is muzzle velocity with or without losses. Complex model of energy balance is solved on different idea, than the presented models.

In further parts of the thesis, the present most problematic parts of rail accelerators are indicated, as well as the existing categories of rail accelerators.

Further, a series of measurement was described, which were realized for obtaining the necessary data for mathematical modeling. Described is also the realized possibility of recording the position of the projectile in the barrel in the course of acceleration, research of shapes of projectiles and, finally, the construction of pre-accelerator is described together with its influence on the muzzle velocity.

## 4. Klíčová slova

Elektromagnetický urychlovač, kolejnicový elektromagnetický urychlovač, KMED, railgun, problémy railgunu, projektily pro railgun, druhy railgunů, matematický model urychlovače, matematický model railgunu, náhradní obvod, velikost prvků náhradního obvodu, předurychlovač, pozice projektilu v hlavni

## Key words

Electromagnetic accelerator, electromagnetic rail accelerator, railgun, problems of railgun, projectiles for railgun, types of railguns, mathematical model of accelerator, mathematical model of railgun, alternative circuit, sizes of parts of alternative circuit, pre-accelerator, position of projectile in barrel,

## 5. Úvod:

Jelikož problematika elektromagnetického urychlování je prozatím z vědeckého hlediska stále ne zcela probádaná oblast, je rozhodně důvod se do této oblasti techniky ponořit a věnovat jí pozornost. Úspěšné elektromagnetické urychlování hmotných těles na velmi vysoké rychlosti totiž může v budoucích dobách lidstvu přinést mnohé výhody. Například mnoho uvedených zdrojů hovoří o kosmickém využití kolejnicových urychlovačů, a to jak při možnostech výstřelů nákladu ze zemského povrchu na oběžnou dráhu, tak například výstřelů z povrchu měsíce či jiných kosmických těles do okolního vesmíru nebo zpět na Zemi.

Samozřejmě, z principu účelu urychlení hmotného tělesa na vysoké rychlosti má elektromagnetické urychlování také značné vojenské využití, které na rozdíl od možného kosmického využití již funguje. Toto použití ovšem vneslo do problematiky značnou osvětu, neboť první elektromagnetické urychlovače byly tvořeny během světových válek a pak během války studené.

V dnešních dobách jsou psány vědecké články na toto téma a bylo uskutečněno několik v zásadě ojedinělých, ale velmi přínosných výzkumů. Světový stav současného elektromagnetického urychlování, je ovšem takový, že jsou definované zásadní problémy, vytvořeno několik myšlenkových modelů, ale praktická využití, kromě vojenského, zatím bohužel neexistují. Takřka všechny doposud vyrobené kolejnicové urychlovače, jsou zatím jen ve vědeckých laboratořích a jedná se o individuální kusy – tedy prototypy. I tak dosahují značných výsledků a urychlují tělesa na rychlosti jednotek kilometrů za sekundu.

V této práci bude především řešen možný zevrubný matematický popis systému z několika úhlů pohledu na problematiku. Také bude nastíněn možný model řešení pomocí Lagrangeových rovnic, či jiné možnosti řešení. Jako výstup by měl vzniknout matematický model zařízení, na kterém bylo prováděno experimentální ověřování, a dle časových možností bude snaha o doplnění současného zařízení o vhodné vylepšení a případné ověření.

## 6. Obsah:

1. Zadání	3
2. Poděkování	4
3. Anotace	5
4. Klíčová slova	6
5. Úvod	7
6. Obsah	8
7. Historické souvislosti a elektromagnetické urychlovače	10
8. Popis a princip obecného kolejnicového urychlovače	12
8.1. Základní princip kolejnicového urychlovače	12
9. Popis sledovaného zařízení	14
10. Druhy kolejnicových urychlovačů a způsoby urychlování těles	16
10.1. Dělení dle mechanického kontaktu projektilu, protékaného proudem	16
10.2. Dělení dle způsobu zprostředkování síly na střelu	16
10.3. Dělení dle napájecích zdrojů	17
10.4. Dělení dle mechanismu vybití napájecího zdroje	18
11. Přenášení proudu do projektilu	19
11.1. Přímý kontakt s kolejnicí	20
11.2. Kontakt kartáčový	21
11.3. PSL – pseudoliquid kontakt	21
11.4. Možné alternativy	22
12. Doplnkové části urychlovače	24
12.1. Předurychlovač	25
12.2. Výroba předurychlovače	26
13. Matematické modelování urychlovače	28
13.1. Modelování elektrické části	29
13.1.1. Odhad modelu	29
13.1.2. Pokročilejší model	33
13.2. Modelování elektromagnetického pole urychlovače	38
13.2.1. Modelování časově proměnného magnetického pole mezi kolejnicemi	38
13.2.2. Modelování stacionárního magnetického pole mezi kolejnicemi	40
13.2.3. Modelování stacionárního magnetického pole projektilu	41
13.2.4. Modelování stacionárního proudového pole projektilu	42
13.2.5. Modelování stacionárního magnetického pole projektilu a kolejnic	45



<b>13.3.</b>	<b>Modelování mechanické části urychlovače</b>	<b>46</b>
13.3.1.	Přiblížení mechanického modelu	47
13.3.2.	Pokročilejší mechanický model	48
13.3.3.	Mechanický model zohledňující magnetické pole kolejnic	51
13.3.4.	Vliv pole projektilu na silové působení	52
13.3.5.	Model se započítáním elektromagnetických polí kolejnic a projektilu	53
13.3.6.	Volba vhodného programu, popisující mechanické působení	54
<b>13.4.</b>	<b>Možné určování ztrát systému</b>	<b>56</b>
<b>14.</b>	<b>Možnost řešení jednotným modelem</b>	<b>60</b>
<b>14.1.</b>	<b>Výpočet pomocí Lagrangeových rovnic</b>	<b>60</b>
14.1.1.	Příklad sestavení Lagrangeovy funkce	61
<b>14.2.</b>	<b>Výpočet modelu pomocí bilance energie</b>	<b>63</b>
<b>15.</b>	<b>Realizovaná ověřovací měření</b>	<b>67</b>
<b>15.1.</b>	<b>Měření pro získání parametrů náhradního schématu</b>	<b>67</b>
<b>15.2.</b>	<b>Měření rychlosti vystřeleného objektu</b>	<b>70</b>
15.2.1.	Metoda snímání ústové rychlosti pomocí optické brány	70
15.2.2.	Metoda snímání ústové rychlosti pomocí ultrazvukového radaru	71
15.2.3.	Metoda snímání ústové rychlosti pomocí rychloběžné kamery	71
<b>15.3.</b>	<b>Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů</b>	<b>72</b>
15.3.1.	Projektil s kovovým přitlakem	72
15.3.2.	Projektil s kovovým přitlakem a stabilizačním prvkem	73
15.3.3.	Projektil poháněný zažehnutým výbojem	75
15.3.4.	Projektil se smíšeným plasmatickým vedením	76
<b>15.4.</b>	<b>Měření průběhu urychlování</b>	<b>78</b>
15.4.1.	Měření magnetického pole pomocí Hallových sond	78
15.4.2.	Měření magnetického pole pomocí cívek	79
15.4.3.	Měření polohy pomocí přerušného obvodu	80
15.4.4.	Měření polohy pomocí měrky polohy v hlavni	81
<b>15.5.</b>	<b>Měření vlivu předurychlení</b>	<b>83</b>
<b>16.</b>	<b>Závěrečná zhodnocení práce</b>	<b>84</b>
<b>17.</b>	<b>Použité zdroje</b>	<b>85</b>
<b>18.</b>	<b>Seznam příloh</b>	<b>89</b>
18.1.	Přiložené programy	89
18.2.	Přiložená videa	91
<b>19.</b>	<b>Seznam tabulek</b>	<b>92</b>
<b>20.</b>	<b>Seznam obrázků</b>	<b>93</b>

## 7. Historické souvislosti a elektromagnetické urychlovače

Elektromagnetismus byl ve větší a využitelnější míře v historii lidstvem zkoumán až v 19. století, kdy byl objeven Voltův sloup, Leydenská láhev a ostatní předchůdci prvků dnešních elektrických obvodů. Obecnou teorii elektřiny a magnetismu sepsal později ve svém pojednání roku 1873 skotský teoretický fyzik James Clerk Maxwell. Pro tuto práci bude – samozřejmě kromě Maxwellových rovnic – zásadní formulace působící síly působící na částice v elektromagnetickém poli, pocházející od nizozemského fyzika Hendrika Antoona Lorentze a v jednom ze svých možných tvarů je uvedena jako vztah (1.1).

Jako první známou podobu elektromagnetického urychlovače sestavil a v roce 1904 si nechal patentovat, norský fyzik Kristian Birkeland, který se zabýval silovým působením a pohybem nabitých částic v atmosféře. Urychlovač patrně sestavil z finančních důvodů, když jeho vědecká práce, týkající se polární záře, nebyla tehdejší světovou vědeckou obcí přijata. I když jsou patrné pokusy o sestavení elektromagnetického urychlovače dříve, než byly formulovány Maxwellovy rovnice. Konkrétně se první představení elektromagnetického urychlovače váže k roku 1844, kdy jistý pan Bennigfield zve na ukázkou akce jeho elektromagnetického urychlovače, zvaného SIVA. Objektivní důkaz o skutečném představení, zaznamenaném výstřelu, či zapsaný patent nebo vědecký článek ovšem chybí, a tak budeme pokládat za první konstrukci elektromagnetického urychlovače dílo Kristiana Birkelanda. To ovšem nefungovalo na principu railgunu, popsaného v kapitole 8.1 Základní princip kolejnicového urychlovače, ale na principu magnetické síly, kdy magnetické pole vytvořené cívkou urychlovalo projektil z feromagnetického materiálu. Dnes se takto povedené urychlovače označují za urychlovače typu coilgun. Birkeland se svým dělem dosahoval ústřední rychlosti okolo  $600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , avšak ani bojově, ani vědecky dále využito nebylo.

Další výzkum elektromagnetických urychlovačů probíhal během první světové války na francouzské straně. S bádáním započal André Louis Octave Fauchon-Villeplée roku 1916 a úspěšný prototyp prezentoval roku 1917. Po předvedení vynálezu před vědeckou obcí mu byly na další výzkum poskytnuty náležité finance a také mu byl připsán patent, který se stal podkladem pro mnohé práce dalších vědců v této oblasti. Po konci 1. světové války byl ovšem přísun financí zastaven a projekt ukončen. Urychlovač Fauchona Villeplého byl již první elektromagnetický urychlovač pracující na principu railgunu a dosahující ústředních rychlostí  $200 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  s projektilem o hmotnosti 50 g. Urychlovaná střela byla ve tvaru šipky, zhruba o délce 270 mm a šířce ramen 70 mm. Vyrobená byla z plastového čela, dřevěného jádra a měděných stabilizačních prvků, kde byl proud z kolejnic předáván. Po úspěšném testování této demonstrativní verze railgunu se Villeplée pustil do teoretických výpočtů většího projektu s cílem zkonstruovat railgun s délkou hlavně 30 m a urychlující 100 kg hmotný projektil na rychlost  $1600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Zařízení mělo při výstřelu spotřebovat zhruba 500 MJ energie, kterou mělo zajišťovat 14 generátorů. Celý systém pak měl být sestaven na železničním podvozku, avšak sestaven nebyl. I přesto se Villeplée výrazně podepsal na inovacích a nových objevech v oblasti kolejnicových urychlovačů, jako například uspořádání hlavně, chlazení, či napájecí zdroje a některé jeho nápady jsou použity na dnešních systémech. Celková Villeplého práce na kolejnicových urychlovačích vyvolala ve vědecké obci různé názory, ale mimo jiné již tehdy vyvstal nápad na realizaci kosmických aktivit pomocí railgunu.

Další známý historický posun v oblasti railgunů přišel až s druhou světovou válkou, kdy na straně Německa měla být zkonstruována zbraň na elektromagnetickém principu, urychlující 6 kg projektil na rychlost  $2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ , s opakovatelností střelby 72 ran za minutu. Tato zbraň měla sloužit jako protiletadlové dělo, nebyla však zkonstruována před koncem války, tedy vůbec. Konstrukci měli na starost vědci Dr. Otto Muck a Dr. Joachim Hänsler, kteří se zbraní zabývali od roku 1943 do konce války. Začali tím, že zopakovali experiment Fauchona Villeplého a shodli se s ním ve dvou zásadních problémech, které railgun provázejí. Tedy oblast napájení a oblast hlavně. Vývoji zdroje se poté pánové značně věnovali a jako nejlepší volbu vybrali rotační homopolární generátor. Následně zkoušeli i mnoho ostatních možností zlepšení, jako výrobu projektilů z mnoha materiálů – např. s příměsí wolframu, kolejnice z čisté mědi nebo projektil s přitlačnými pružinami. Otto Muck pak zkoušel použít kombinaci elektrického a tradičního výbušného pohonu. Hänsler dále dle zdroje [3] jako první použil urychlování se zakomponováním elektrického oblouku. Jelikož se vědcům nedařily experimenty dle teoretického očekávání, prováděli jich mnoho, a tedy zkoušeli mnoho možných variant provedení, jaké jsou například uvedeny výše, nebo vlivem nepříjemné indukčnosti přívodů použili první náznak konstrukce DES railgunu – viz kapitola 10. Druhy kolejnicových urychlovačů a způsoby urychlování těles. Dále se obdobně jako Fauchon Villeplée věnoval také Hänsler teoretickým výpočtům, kdy se mimo jiné dopočítal k předpokládané účinnosti vhodně sestaveného systému až 67 %. Se svým railgunem dosahovali ústředních rychlostí v rozmezí 920 až  $1200 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  v závislosti na použitém zdroji a následné konstrukci.

Významným se dále stává až výzkum prováděný na konci 60. a hlavně průběhu 70. let 20. století fyzikem Dr. Richardem A. Marshalllem a jeho týmem. V roce 1968 se jeho skupině podařilo sestavit největší homopolární generátor na světě, který použili pro napájení railgunu a poté dosáhli urychlení třígramového projektilu na rychlosti  $6 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Jelikož se Marshall zabýval railguny prakticky celý život, vymyslel řadu zlepšení a takřka všechny z jeho nápadů a výsledků jeho výzkumů se na dnešních systémech používají. Například používal plasmatického pohonu za projektil, vymyslel tvarovaný projektil, zobrazený na obrázku *O. 7.1*, či projektil typu PSL, popsány v kapitole 11. Přenášení proudu do projektilu, a řešil širokou problematiku ohledně přenášení proudu do projektilu. Pokoušel se snížit degradaci kolejnic vlivem výstřelů a popsat chování částí systému při výstřelu. Také o railgunech sepsal mnoho vědeckých článků – z mnohých bylo při psaní této práce čerpáno – a jednu publikaci s názvem: Railguns: Their Science and Technology, kde je většina problematiky detailně popsána. Z výsledků celoživotního výzkumu Dr. Marshalla je průběžně čerpáno v celé práci a informace jsou po částech uváděny.

V pozdější době se zkoumalo dále a byla vylepšena řada materiálů, uspořádání, ale i zdrojů, z nichž se nejčastěji používají kondenzátory, nebo kompulzátory. Nevědecky používaný, avšak stále nedokonalý railgun je ve výzbroji US Navy, který je dle zdroje [4] schopný dostřelit do vzdálenosti až 400 km.

Mnoho vědců také připouští možnost výstřelu do vesmíru pomocí railgunu, jak například uvádí zdroj [5] nebo [6], neboť od vývoje railgunů se slibuje účinnost až 90 %. Možné by také bylo umístění railgunu na měsíci, či stanici ISS. Vše je ovšem zatím hudba budoucnosti.

## 8. Popis a princip obecného kolejnicového urychlovače

Obecných elektromagnetických urychlovačů je známo více druhů, případně následných poddruhů. Každý z nich přitom poměrně logicky využívá silové působení elektromagnetických polí. Některé druhy urychlovačů hmotných těles jsou založeny spíše na využití magnetických sil. Takovéto urychlovače jsou zejména coilguny, které jsou založené na principu vzájemné interakce magnetických polí urychlovače a projektilu, případně na rozdílné reluktanci projektilu a okolí. Pro coilguny se využívají projektily z feromagnetických materiálů – typicky oceli. Ty jsou vlivem působení magnetického pole urychlující cívky vtahovány, obdobně je tomuto principu známo u vybraných elektrických přístrojů – typicky stykačů.

Kolejnicové urychlovače využívají ovšem interakci magnetického pole a proudového pole, k vytvoření Lorentzovy síly. Přesnější objasnění principu funkce bude shrnuto v následující podkapitole.

### 8.1 Základní princip kolejnicového urychlovače

Railgun – v češtině nazývaný kolejnicový urychlovač, kolejnicové elektromagnetické dělo, nebo zkratkou KMED – jak již název vypovídá, urychluje částice mezi dvěma kolejnicemi. Kolejnice i samotná urychlovaná částice je protékána elektrickým proudem, který při dané geometrii kolejnic zároveň vytváří magnetické pole, potřebné pro silové působení. Matematicky je tento jev pro makroskopické hmotné částice popsán Lorentzovým zákonem. Pro popis funkce railgunu bude nyní vhodný tvar:

$$\vec{F} = \iiint_0^V \vec{J} \times \vec{B} dV \quad (8.1_1)$$

Dle výše uvedeného tvaru Lorentzova zákona je tedy k funkci urychlovače zapotřebí interakce mezi proudovým polem a magnetickým polem. Praktická situace vypadá tak, že mezi kolejnicemi je umístěna pohyblivá vodivá částice s elektricky přiléhavým kontaktem k oběma kolejnicím. Kolejnice jsou pak připojeny, ideálně ke zdroji konstantního proudu, čímž je zaručena existence proudové hustoty  $\mathbf{J}$  v projektilu. Proud, který protéká skrz urychlované těleso, rovněž protéká přívodními kolejnicemi. Tato situace je pak příčinou vzniku magnetického pole  $\mathbf{B}$  v prostoru mezi kolejnicemi. Velikost magnetického pole je závislá na prostředí, velikosti protékaného proudu a geometrii uspořádání kolejnic a projektilu. Ilustrativně lze uvést vztah pro výpočet osově symetrického magnetického pole v ose mezi dvěma vodiči zanedbatelně malého kruhového průřezu, kterými protéká proud navzájem opačným směrem, jako:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 * I}{2 * \pi * r} * 2 \quad (8.1_2)$$

kde  $r$  je vzdálenost jednoho vodiče a středu osy mezi vodiči. Situace je znázorněna na obrázku O.8.1. Násobení vztahu dvojkou na konci výrazu zohledňuje fakt, že vznik pole je zapříčiněn dvěma vodiči, protékanými proudy opačných směrů.

Pokud by proudy protékaly vodiči souhlasně, a výsledné pole mezi kolejnicemi by bylo oslabováno a v jejich ose by indukce byla dokonce nulová. Při konstrukci vědeckých railgunů se můžeme rovněž setkat s externím zdrojem magnetického pole. Tento typ railgunu lze pak připodobnit ke stejnosměrnému motoru s cizím buzením, kdy jsme schopni vlastnostmi soustrojí manipulovat pomocí svorkového napětí, proudu do obvodu kotvy a proudu do budícího magnetického obvodu.

Pokud se vrátíme k Lorentzovu zákonu, povšimněme si, že existence vektorového součinu v tomto vztahu nám udává směr síly, který bude kolmý na vektory  $\mathbf{J}$  (proudová hustota protékající urychlovaným tělesem) a  $\mathbf{B}$  (magnetické pole, vytvořené proudovou hustotou  $\mathbf{J}$ , tekoucí urychlovanou částicí a kolejnicemi). Pokud vezmeme v úvahu ideální stav, tak v případě vztahu (8.1\_2), který vyjadřuje velikost magnetické indukce zanedbatelně tenkého vodiče, bude vektor magnetické indukce na určitém poloměru od středu vodiče konstantní. Vektor znázorňující velikost magnetické indukce bude tedy v tomto ideálním případě kolmý na vektor proudové hustoty. Ze vztahu (8.1\_1), vyjadřujícího Lorentzovu sílu, je pak patrné, že vlivem vektorového součinu bude výsledek, tedy síla, kolmá na oba vektory zároveň. Lze tedy určit směr pohybu projektilu, který bude v ideálním případě kolmý na vektory proudové hustoty a magnetického pole zároveň.

V reálném provedení je ovšem uvedený teoretický příklad zřídka platný. Jde spíše o lokální oblasti, ve kterých se skutečnost těmto ideálům může přibližovat, jako například oblast u středu projektilu. V obecném případě ovšem může nabývat vektor proudové hustoty mnoha směrů – typicky v oblasti změny geometrie projektilu, nebo v oblasti přechodu proudu z kolejnice do projektilu, která vykazuje přechodový odpor, a tedy jistou anizotropii prostředí, či může dojít k zavírání vlivem časově krátkého budícího pulzu. Obdobně to bude s magnetickým polem, neboť projektil si pole vytváří sám a přímo nad oblastí projektilu – tedy značného průtoku proudu může být vektor magnetické indukce pole nejasného směru. Z těchto uvedených důvodů bude proto vhodné vyjadřovat Lorentzovu sílu v souladu se vztahem (8.1\_1), výpočet pomocí objemového integrálu by totiž měl tyto skutečnosti zahrnovat.

Princip funkce railgunu je tedy poměrně jednoduchý, obecně známý a je například uveden v počátečních kapitolách zdroje [7], kde je vysvětlován princip silového působení na vodiče v elektrickém stroji. V případě stroje jsou ovšem vodiče protékající proudem pevně uloženy v drážkách, ať již statoru, nebo rotoru a silové působení tedy přebírá větší celek. V případě railgunu síla působí na elektricky vodivý prvek, který je urychlován jako samostatný celek – viz obrázek O.8.2.

Ten může nabývat různých velikostí a hmotností, dle požadovaného využití railgunu. Typicky railguny pro vědeckou činnost urychlují částice menších rozměrů a hmotností na velmi vysoké rychlosti – viz experimenty Richarda Marshalla, uvedené v kapitole 10. Druhy kolejnicových urychlovačů a způsoby urychlování těles. Oproti tomu railguny pro armádní využití urychlují několikakilogramové střely, ovšem požadavek vysoké ústové rychlosti zůstává. Nejznámější a veřejně prezentovaný armádní railgun, který je ve výzbroji US Navy, dle zdroje [8] a [9], urychluje střelu na rychlosti nad  $2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ . Hmotnost urychlovaného projektilu se přitom pohybuje okolo 20 kg.

## 9. Popis sledovaného zařízení

V této kapitole bude nastíněn způsob ovládání, popis částí a technické parametry konkrétního zařízení, na kterém bylo prováděno měření. Jedná se o impulsní zdroj vyrobený firmou Oprox, a.s, jehož výstup je vedený na měděné kolejnice, tvořící hlaveň urychlovače. Fotografie zařízení je pak na obrázku *O.9.1*, nákres hlavně je k nahlédnutí na obrázku *O.9.2*, v řezu pak na obrázku *O.9.3*. Jedná se o dvě měděné kolejnice, uchycené do plastového rámu, který je po každých 10 cm zpevnován šrouby, čímž by mělo být zabráněno nechtěným pohybům kolejnic, jakož i jejich tepelné deformaci, popsané dále.

Samotný impulsní zdroj je tvořen následujícími částmi:

- 3 Nabíjecí transformátory 400V/ ~ 12kV (E300/63-5)
- Nabíjecí odpory
- 3 Kondenzátorové baterie, tvořené 5 paralelními kondenzátory o jmenovité kapacitě 1000  $\mu$ F a dle testovacího certifikátu změřeným  $\tan\delta = 10^{-4}$ . Test byl prováděn v roce 2014
- Soustava měděných plochých vodičů
- Jiskřiště pro každou kondenzátorovou baterii
- Měřicí transformátor proudu pro každou kondenzátorovou baterii
- Vybíjecí odporů, pro odvedení zbytkového náboje po výstřelu
- Řídící elektronika
- Uživatelské rozhraní

Elektrické parametry zdroje jsou:

- Napájecí napětí 230 V 50Hz pro řídicí systémy, 400V 50 Hz pro výkonovou část
- Napětí na svorkách kondenzátorů maximální 7.4 kV
- Výstupní proud z jedné sekce maximální 120 kA

Veškeré řízení chodu systému má na starosti vestavěný mikrokontroler. Ten kromě zajištění řízení vysokovýkonných operací, jako je nabíjení, výstřel a vybití baterií, bezdrátově komunikuje s uživatelským rozhraním v notebooku, které slouží pro řízení procesu. Schématické znázornění funkcí mikrokontroleru je vyobrazeno na obrázku *O.9.4*, kde jsou patrné jednotlivé části systému tímto kontrolerem ovládané. Většina logické komunikace by měla být zajištěna pomocí optických signálů, jak je z obrázku patrné, neboť vybíjení kondenzátorů doprovázejí značně velká časově proměnná magnetická pole, která mohou být zdrojem rušení. Jako uživatelské rozhraní slouží dodaný software, ve kterém je možno zadat požadovanou hodnotu napětí nabití kondenzátorů a časový posun odpalu jednotlivých sekcí. Dodavatel udává hodnotu odhadu přepočtu amplitudy výstupního proudu jako 16 kA na 1 kV nabití kondenzátorové baterie. Pro účely této práce ovšem s touto konstantou dále kalkulováno nebylo. Stavový diagram systému, stejný jako je použitý v řídicím softwaru zařízení, je vyobrazen na obrázku *O.9.5*.

Veškeré výše uvedené údaje byly pro účel práce převzaty z materiálů sestavených firmou Oprox, a.s., jako dodavatelem zařízení.

Ovládání systému tedy probíhá pomocí notebooku, v němž je nainstalovaný ovládací software, spolupracující se systémem. Jako první uživatel nastaví požadovanou hodnotu konečného nabíjecího napětí každé sekce kondenzátorové baterie a to v rozmezí 0 až 7 kV. Dále uživatel nastaví požadovaný časový posun mezi sepnutím jednotlivých sekcí. To může být nastaveno v rozmezí jednotek  $\mu\text{s}$ . Následně je nutné dojít s kódovací kartou ke komunikačnímu rozhraní urychlovače, kde se zadání požadovaných hodnot potvrdí přiložením karty. Tutéž kartu je nutné v časovém limitu přiložit ke komunikačnímu rozhraní notebooku a teprve poté začne proces nabíjení. Nabíjení systému se děje patrně přes nabíjecí transformátory a dle požadované hladiny konečného nabíjecího napětí je pak nutno čekat, neboť zařízení se nabíjí pomalu. Typicky pro nabití na hladinu 1 kV se čeká cca 30 s. Po úspěšném nabití je zařízení připraveno k výstřelu a čeká na pokyn zadávaný opět v notebooku. Při potvrzení výstřelu se spustí odpočet 10 s, po kterých sepne jiskřiště. Proudový obvod se tak uzavře a dojde k výstřelu. Poté je na kondenzátory připojena soustava vybíjecích odporů, přes které dojde k jejich úplnému vybití. Před další manipulací je vhodné, aby obsluha pomocí zemnicí tyče provedla ověření vybití.

Celý systém je tedy značně autonomní, bez snadné možnosti zásahu při možných úpravách. Jednou z možností ovlivnění systému je systém jiskřiště. Proto bude nyní vhodné uvést jeho popis. Jiskřiště je uvedeno na obrázku *O.9.6* a je tvořeno řídicí cívku a dvěma kovovými ploškami. Při požadavku systému k výstřelu dojde k přiblížení plošek na přeskokovou vzdálenost a vzniku obloukového výboje mezi elektrodami, který by měl přenést proud do obvodu hlavně. Přiblížení ploch je řízeno pomocí přiložení napětí na řídicí cívku – obdobně jako se tomu děje například u stykačů. Kvůli možnému svaření kontaktních ploch se tyto plochy nepřibližují na dotyk, ale pouze na takovou vzdálenost, aby byl možný přeskok a vznik proudového kanálu.

Zahoření oblouku s sebou nese samozřejmě všechny důsledky, jako je opotřebovávání ploch vlivem bombardování náboji, optické a akustické efekty atd. Jelikož se bude jednat o obloukový výboj s vysokou koncentrací nosičů náboje – tj. vysokou proudovou hustotou, předpokládá se malý úbytek napětí na jiskřišti v sepnutém režimu. Tato vlastnost obloukového výboje je uvedena ve zdroji [10]. Vzhledem k vysokým hodnotám přenášeného proudu a předpokládanému malému úbytku napětí byl dále přijat předpoklad, že toto uspořádání bude pravděpodobně vykazovat nízký elektrický odpor. Tato skutečnost bude dále využita v kapitole o modelování elektrické části urychlovače.

Jak je již zmíněno, celé zařízení je poměrně uzavřené a bylo by značně obtížné některé vybrané změny řešit přímo v programu mikrokontroléru, či jeho úpravou. Proto při možném experimentálním ověřování nabytých zkušeností, či testování některých předpokladů, může být právě řídicí systém jiskřiště snadnou možností získání informace o nadcházejícím výstřelu, neboť nejen že signál k sepnutí jiskřiště je počáteční krok, kterým započne veškerá pro práci podstatná elektrická činnost systému, ale také je řídicí systém ovládán pomocí nízkého napětí, které může být posléze snadno zpracováno například dalšími měřicími a posléze logickými členy.

## 10. Druhy kolejnicových urychlovačů a způsoby urychlování těles

Jelikož kolejnicové urychlovače nejsou v současné době masově či komerčně využívány, neexistuje striktní postup na jejich dělení. Navíc díky absenci sériové výroby a distribuce je téměř každý urychlovač prototypem a je konstruován nejčastěji pro ověřování nových vědeckých principů v této oblasti. V principu je ovšem několik základních způsobů provedení, dle kterých urychlovače pracují, a ty budou nyní popsány.

### 10.1. Dělení dle mechanického kontaktu projektilu, protékaného proudem

Jak je zmíněno v kapitole Popis a princip obecného kolejnicového urychlovače o základním principu urychlovaný projektil je z principu funkce protékaný proudem. Dochází tedy k nutnosti kluzného a přitom velmi dobrého elektrického kontaktu. Obdobou zde může být komutátor stejnosměrného elektrického stroje s přiloženými kartáči, neboť na toto uspořádání jsou kladeny stejné nároky. Komutátor stejnosměrného stroje je značně problematická část, protože se mimo jiné od používání stejnosměrných strojů upouští. Jednou z více variant řešení problémů komutace je umělé zvýšení odporu přiléhajících kartáčů. Tento postup je ovšem pro railguny nevhodný, neboť by vedl ke snížení protékaného proudu a také ke zvýšeným ztrátám, a tím pádem i zmenšení působení výsledné síly.

Oproti tomu existuje v oblasti railgunů více možností kluzného kontaktu. Jelikož je problematika kluzného kontaktu u railgunů jedna z nezásadnějších, je této problematice věnována samostatná podkapitola. Jako základní rozdělení bych zde pouze zmínil přímý kontakt projektilu a hlavně a jako druhou používanou možnost kartáčový kontakt.

### 10.2 Dělení dle způsobu zprostředkování síly na střelu

Principů na využití Lorenzovy síly existuje více. Text zmíněný v předchozím odstavci a také podkapitole – 8.1 Základní princip kolejnicového urychlovače – týkající se principu, se týká přímého průtoku proudu projektilem a ten již byl principiálně popsán.

Další možností je zapálení elektrického oblouku za letícím projektil, kterýžto pak projektil urychluje. Tento princip je znám jako plasmový pohon, neboť za projektilem vzniká vlivem působení elektrického oblouku plasma. Tento jev je patrný po výstřelu projektilu jako plasmatický oblak. Takového způsobu pohonu využívá u svého urychlovače US Navy, kdy je po výstřelu oblak patrný. Tato situace je ukázána na obrázku *O.10.2.1*.

Způsob urychlení pomocí zapálení oblouku za projektil je dle [11] vhodné pro urychlování na vyšší rychlosti a taktéž je vhodné při použití proudových pulzů větších amplitud. Při tomto způsobu pohonu bývá použit projektil z elektricky nevodivého materiálu, který má na své zadní straně nanesen/připevněn vodivý materiál, sloužící k zapálení obloukového výboje.

Tento způsob pohonu byl mimo jiné experimentálně použit Richardem A. Marshalllem okolo roku 1979, který o něm pojednává v jednom ze svých článků – mimo jiné zdroj [11]. Shrnutí závěrů pro tento způsob pohonu, který byl vyzkoumán:

Elektricky nevodivý projektil musí být schopen vydržet značně vysoké tlaky a teploty. V prováděném experimentu uvádí typické hodnoty:

Tlak: 70 MPa , Teplota: 50 000 K při napájení proudem o amplitudě 300 kA.

To ovšem po dobu trvání okolo 1 ms.



Pokud budou tyto předpoklady splněny, pravděpodobně nedojde k roztavení urychlovaného tělesa v hlavni, čili výstřel bude úspěšný. Při splnění požadavků na projektil budou při použití tohoto způsobu pohonu mnohem menší třecí ztráty, neboť netrváme na dobrém kontaktu mezi projektilem a kolejnicí. Zdroj uvádí, že pokud plasma pronikne netěsností mezi projektilem a kolejnicí, samo zanikne, neboť zde nejsou tak vhodné vodivostní podmínky. Plasmový pohon si tak údajně zajistí vlastní utěsnění. Oproti tomu zdroj [12] uvádí, že při zapálení plasmatu za projektilem jsou požadavky na těsnost systému, neboť plasmový oblak žene projektil vpřed. Dle Marshalla také bude údajně mnohem menší eroze kolejnic, neboť nedochází k přivařování projektilu k hlavni. To zdroj uvádí zejména v oblastech vyšších rychlostí –  $1 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  a více. V článku [13] je ale uvedena tato kritická rychlost jako  $700 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , čili tato hranice rychlosti, kdy dochází k opotřebování kolejnic, patrně nebude konstantní. Lze ale přijmout obecný předpoklad, že čím rychleji se projektil bude pohybovat, tím méně bude docházet k poškození kolejnic. Zdroj dále uvádí, že v místech konce hlavně, kde projektil dosahuje vysokých rychlostí, není znatelné poškození kolejnic. Viditelné poškození je pouze v místech zapálení oblouku, což je v souladu s předchozím tvrzením.

### **10.3 Dělení dle napájecích zdrojů**

Ideálním zdrojem pro napájení railgunu by byl ideální zdroj proudu s možností rychlého nárůstu amplitudy. Pro účely urychlování hmotných částic na konečné délce hlavně ovšem postačí, aby se ideálnímu zdroji zdroj praktický přiblížil na čas, po který bude částice v hlavni urychlována. Další možné rozdělení je tedy dle použitých zdrojů napájení a jejich uspořádání. První elektromagnetický urychlovač – viz kapitola 7. Historické souvislosti a elektromagnetické urychlovače – byl napájen pomocí homopolárního generátoru s induktivním meziúložišťem, který je schopen po krátké časy dodat značně veliký proud při nízkém napětí a poměrně malém vnitřním odporu. Další, dnes již příliš nepoužívaný zdroj pro elektromagnetické urychlovače, jsou akumulátory. Ty jsou ovšem omezeny hodnotou výstupního proudu a dnes se jako přímý zdroj nepoužívají. Další historicky používané zdroje byly rotační měniče, jako například dynamo za druhé světové války. Obdobné zdroje tedy na bázi rotačních generátorů velikých proudů se pro napájení railgunů dodnes používají. Je to zejména tam, kde jsou kladeny požadavky na rychlou opakovatelnost výstřelů – tedy pro vojenské účely. Nutno podotknout, že tyto rotační zdroje vykazují v porovnání s ostatními zdroji poměrně vysokou indukčnost a brání tedy rychlým nárůstům proudu. Rovněž jejich provedení a zapojení do obvodu je komplikovanější než u konkurenčních zdrojů a vykazují tak vyšší vnitřní odpor.

Dnes patrně nejrozšířenější variantou je napájení railgunů z kondenzátorových baterií. Na krátký časový okamžik se při správném provedení velmi blíží zdrojům s ideálními parametry. Rovněž dostupnost, ať již z finančního, či kvantitativního hlediska, se nabízí pro realizaci napájení railgunu v nejedné technické laboratoři. Pro představu velikosti je vhodné uvést, že railguny urychlující  $18 \text{ kg}$  projektily na rychlosti do  $2 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  mají kondenzátorové baterie uložené v několika námořních kontejnerech. Pro ilustraci je uveden obrázek *O.10.3.1*, kde v pozadí hlavně je naskládáno několik kontejnerů kondenzátorových baterií.

Další, avšak méně známou a nepříliš využívanou možností je napájení railgunu pomocí cívky se stlačeným magnetickým polem. Princip tkví v mechanické kompresi indukčnosti, kterou protéká proud, což vede k proudovému nárůstu. Při každém generování proudového pulzu, ovšem dochází k destrukci indukčnosti a i správné časové řízení a provedení tohoto zdroje je značně náročné. Zdroj [11] ovšem předkládá, že tento způsob napájení je pro railguny realizovatelný.

## **10.4 Dělení dle mechanismu vybití napájecího zdroje**

Pokud je tedy railgun napájen jednou z výše uvedených možností, zůstává ještě prostor pro různé varianty uspořádání.

Zprvé je možné provést vybití celého energetického úložiště v jeden časový okamžik na počátku hlavně. Tento druh railgunu se nazývá Breech-Fed railgun, neboť energie je dodávána pouze v místě závěru zbraně. Výsledný proudový pulz pak tvarem odpovídá obrázku *O.10.4.1* a následná rychlost projektilu pak průběhu na obrázku *O.10.4.2*.

Tento způsob napájení je vhodný pro systémy s krátkou hlavní, neboť v případě dlouhé hlavně je proud zbytečně omezen rezistancí kolejnic a plně se nevyužije pro protékání projektilem. Obdobná nevýhoda je i v případě magnetického pole, které je u railgunů typu Breech-Fed zčásti nevyužito, neboť je rozloženo podél celé hlavně. Tedy i v místech, kde se již projektil nenachází. Výhoda ovšem tkví ve snadné manipulaci s hlavní – možností manipulace nezávisle na zdroji. Proto se tento typ railgunu používá zejména pro vojenské účely.

Pokud je k dispozici větší množství vzájemně nezávislých kondenzátorů, lze provést vybíjení s časovým posunem, při zohlednění letu projektilu v hlavní. Railguny s postupným vybíjením jsou dle [13] označeny jako DES railgun, což znamená Distributed energy storage system. Taktéž tento typ bývá označen jako multi energy stored system. Princip tkví v postupném vybíjení rozložené kondenzátorové baterie podél hlavně. Pro vyvarování se parazitním ztrátám bývají kondenzátory rozloženy v průběhu hlavně. Tento druh railgunu je ukázán na obrázku *O.10.4.3*. Výhoda využití rozloženého dodávání energie tkví v možnosti nenapájet celou kolej v okamžiku, kdy už je projektil od místa dodání energie velmi vzdálený. Tato uspořádání dosahují vyšších účinností než jednodušší Breech-fed railguny. Zdroj [6] ovšem uvádí, že účinnost dobře provedeného DES railgunu může dosahovat 80–90 % oproti uváděným 50 % v případě breech fed railgunu. To je zejména pro omezení rezistance kolejnic, neboť je napájen vždy jen kratší kus kolejnice a dále v mírnějších požadavcích na zdroj, protože je použit větší počet méně výkonných zdrojů. Sníženy jsou tím nároky na zdroj, jakož i parazitní vlastnosti. Oproti tomu vzniká požadavek na přesnější řízení systému a také hrozí vzájemné ovlivnění sekcí. Ty ovšem lze do zařízení “nezávisle” na sobě dodávat, či ubírat.

Tento systém napájení by bylo v jednom z měření vhodné vyzkoušet, a proto byl v rámci předpřípravy sepsán program:

### *Optimal\_odpal\_Cas\_rucni*

Pro objasnění je ovšem vhodné dodat, že je počítána ústřední rychlost projektilu v závislosti na časovém posunu dvou proudových pulzů, dodávaných do railgunu. Pro ilustrativní příklad byl zvolen vzájemný posun pulzů 2 ms. Vypočtená bezeztrátová výstupní rychlost projektilu je pak vyobrazena na obrázku *O.10.4.4*, kde je rovněž patrný zlom na časové hodnotě 2 ms. Jedná se o bezeztrátový ideální výpočet.

## 11. Přenášení proudu do projektilu

Při praktickém využití, ať již pro armádní či vědecké účely, se v případě railgunů vyšších výkonů používají projektily na bázi podkaliberních střel. Toto uspořádání v praxi vypadá tak, že urychlovaný předmět je vložen do obalu zajišťujícího optimální výstřel z railgunu. Vyobrazení urychlovaného tělesa ve tvaru šipky, později vloženého do vodivého obalu, je ukázáno na obrázku *O.11.1*. Jelikož tato práce je zaměřená výhradně na elektrickou část a princip urychlování tělesa v hlavni, budeme se nadále zabývat urychlováním pouze tohoto obalu, či struktury tento obal připomínající. O vnější balistice vystřeleného objektu tato práce nepojednává.

Co se týče materiálů používaných pro urychlování, dle článku [12] se používají především hliníkové slitiny. Je to z důvodů menších hustot, než dosahuje měď. Je ovšem nutné dělat kompromis mezi elektrickou vodivostí materiálu, jeho hustotou, mechanickou pevností a teplotou tání. O výběru vhodného materiálu pro výrobu urychlovacího obalu by se proto dalo napsat mnoho textu, převážně z oblasti fyziky pevných látek a fyziky povrchů. Tato práce se problematice výběru vhodného materiálu věnuje pouze okrajově, ovšem dle [14] se problematikou výběru materiálu americké námořnictvo zabývá od roku 2003 a je otázka, zda zcela ideální materiál v současné době existuje.

Pro známé kolejnicové urychlovače se používá několika druhů skluzných kontaktů mezi projektilem a kolejnicí, přičemž každý způsob má své výhody i nevýhody. Tradiční postupy budou v následujících podkapitolách popsány. Taktéž budou popsány možnosti netradičního přenosu proudu, které budou v provedených měřeních ověřeny.

Obecně ovšem platí, že oblast skluzného kontaktu mezi projektilem a kolejnicí je jedna z nejproblematictějších částí urychlovače a není doposud uspokojivě vyřešena. Například US Navy se dle [14] zdráhá širšímu nasazení railgunů, neboť se ukázala neúnosná potřeba výměny hlavní při častém opakování výstřelů.

Při výstřelu z elektromagnetického urychlovače obvodem, a tedy i urychlovaným vodivým projektilem protékají značně veliké proudy – typicky řádově desítky až stovky kA. Jelikož projektil i vodící kolejnice vykazují elektrický odpor, vznikají v obvodu mimo jiné tepelné ztráty. Při současném pohybu projektilu mezi vodícími kolejnicemi tak nastávají jevy jako přivařování projektilu ke kolejnicím během jeho cesty hlavní. Negativní výsledek tohoto jevu je patrný na obrázcích *O.11.2*, *O.11.3* a nejlépe pak na *O.15.4.1*, kde je patrné opotřebení hlavně a projektilu vlivem přivařování. Tento efekt se dle zdrojů [11] a [3] nazývá GOUGING – volně přeloženo jako děrování do kolejnic a projektilu, a jak praví [16], lze tento jev omezit vhodnou volbou materiálu projektilu a kolejnice.

Při deformovaném povrchu třecích ploch (pokud nejsou kolejnice zcela nové – nepoužívané, lze vždy předpokládat, že jejich povrch bude deformovaný) rovněž vzniká obloukový výboj mezi projektilem a kolejnicí. Jelikož jde o oblouk s vysokou energií, a tedy i teplotou, ovlivňují procesy na elektrodách (projektil a vodící kolejnice) mechanický stav elektrod. Dochází zde zejména k ohřevu, vypařování materiálu a bombardování elektrony, či ionty – dle polarity elektrod. Vznikají zde pak jevy obdobné plazmovému povlakování.

Pro účely klasického railgunu jsou tyto jevy ovšem nežádoucí, neboť vedou k opětovné deformaci povrchu. Tento jev je patrný na obrázku *O.11.4*, kde je detailně vyobrazený vystřelený projektil se smíšeným plasmatickým vedením-popsán v kapitole 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů - mezi nímž a kolejnicí hořel elektrický oblouk.

Deformace povrchu mohou v neposlední řadě vznikat i působením tepelných ztrát. Tepelné ztráty mohou ovšem vznikat i vlivem tření kontaktu o kolejnici. Třecí síla může být proměnná vzhledem k poloze projektilu. Čistě z pohledu mechaniky bude patrně menší při pohybu projektilu ve vyšších rychlostech než na začátku děje, kdy projektil stojí. Za druhé bude vzhledem k rozložení proudové hustoty v projektilu působit přítláčná Lorentzova síla dle stejného mechanismu, jako žene projektil vpřed, neboť jde o těleso protékané proudem, které se nachází v magnetickém poli. Síla pohánějící projektil vpřed, jakož i předpokládaná působící přítláčná síla je vyobrazena na obrázku *O.11.5*. Optimální vzdálenost a přítlak mezi projektilem a kolejnicí je samozřejmě předmětem mnoha studií. Například dle výzkumu Richarda Marshalla, citovaném ve článku [12], je optimální přítlak cca 10 N/kA.

Vyprodukované teplo, ať již mechanismem přítláčné síly, nebo průchodem proudu, působí negativně na velikost protékaného proudu a dále na mechanické opotřebení kolejnic. Jak praví zdroj [11], po výstřelech s vysokou amplitudou proudu došlo k zohýbání kolejnic po demontáži z mechanických úchytů hlavně. Rovněž při dosahování vysokých teplot kolejnic ztrácí povrch svou pevnost, a je tedy náchylnější k deformacím.

Z výše zmíněných problémů tedy můžeme vyvodit požadavky na uspořádání projektilu a hlavně. Mezi zásadní požadavky patří:

*Nízký elektrický odpor uspořádání*

*Konstrukce s optimální přítláčnou silou projektilu a kolejnice*

*Schopnost materiálu nepodléhat erozi při vyšších teplotách*

Na základě zmíněných a výše odůvodněných požadavků se pro kolejnicové urychlovače používá mnoho druhů projektilů. V této oblasti se vedou neustálé výzkumy, jejichž výstupy jsou často patenty na používání originální geometrie projektilu, či použití unikátních materiálů. Pokud se zaměříme na kontakt kolejnice a projektilu, tak mezi tradiční – známé – uspořádání patří:

### **11.1. Přímý kontakt s kolejnicí**

Jedná se o prostý kontakt tvarovaného kovového projektilu s kolejnicí. Tvarovaný projektil je vyobrazen na obrázku *O.11.1.1*, kdy se jedná o projektil do urychlovače US Navy. Nejčastěji se používá charakteristické prohnutí do tvaru C, jak uvádí zdroj [16] a [12]. Dále je používán druh projektilu zvaný šípový, který byl vynalezen Richardem A. Marshalllem v 70. letech 20. století, vyobrazený na obrázku *O.11.1.2*. Před projektily šípového a C typu byl používán například projektil německého konstruktéra Joachima Hänslera, který využíval pružinový přítlak. Projektily C a šípového typu bývají často používány při pohonu pomocí plasmového oblouku. To je vidět na obrázku *O.10.2.1*, kde je za vylétnutým projektillem tohoto typu vystřeleným z railgunu US Navy patrný plasmový oblouk.

U tohoto druhu kontaktu lze docílit dobrého kontaktu mechanickými vlastnostmi materiálu projektilu, jakož i elektrických parametrů. Projektil s tímto druhem kontaktu ovšem může podléhat erozi a to zejména v okrajových částech projektilu, jak je vidět na obrázku *O.11.1.3*, převzatého z článku [12] a uvedeného v práci [16]. V později vytvořeném modelu rozložení proudové hustoty je patrné zvýšení proudové hustoty v počátku a konci projektilu, což je tedy s obrázkem *O.11.1.3* v souladu.

Je samozřejmě možné použít přímý kontakt projektilu a kolejnice s jiným uspořádáním. Například ve zdroji [11] je uveden projektil šípového typu, vyobrazený na obrázku *O.7.1*, kde je znázorněna i cesta proudové hustoty skrze tento projektil. Jak tentýž zdroj uvádí, je možné použít v jednom projektilu těchto struktur více. Praktické použití tohoto typu projektilu je vyobrazeno na obrázku *O.11.1*.

Před výstřelem projektilu tohoto typu je ovšem vždy vhodné zbavit se povrchové koroze, neboť uskladněný kovový materiál může v mikroskopických oblastech snadno oxidovat a vytvářet tak nežádoucí drobné izolační vrstvy.

Pro projektil tohoto typu je nutné dobře určit požadovanou přitlačnou sílu mezi projektilem a kolejnicí – např. jak je zmíněno výše, dle Richarda Marshalla je optimální přitlak 10 N/kA. Nevhodnou volbou přitlaku může dojít k nevratné destrukci povrchu kolejnic, případně k neúspěšnému výstřelu projektilu. Na stávajícím zařízení je této problematice věnovaná bakalářská práce uvedená jako zdroj [17]. Projektily tvarované do šípu, či typu C, mohou být prováděny jako dělené – na obrázku *O.11.1.2*. Je to z důvodu lepší reakce skluzného kontaktu na lokální nerovnosti na vodících kolejnicích.

## **11.2. Kontakt kartáčový**

Tento kontakt využívá pružný přitlak mnoha tenkých vodivých vláken a kolejnice. Kontakt se tak stává dobře elektricky vodivým a zároveň zde nejsou tak významné třecí ztráty. Snaha je nahradit konečně dělený projektil s přímým přitlakem nekonečným počtem malých kontaktů. Možný problém může nastat s vysokou proudovou hustotou, tekoucí skrz jednotlivá vlákna, která se jako oddělené kousky mohou výrazně zahřívat. Roztavení těchto částí může být pak zdrojem znečištění hlavně.

Kartáčový kontakt byl při vývojích railgunů poměrně detailně zkoumán, jako možnost náhrady přímého přitlaku. Experimentálnímu ověření kartáčového přitlaku se například věnuje zdroj [18], ze kterého je převzat obrázek *O.11.2.1*, ukazující projektil před výstřelem a po výstřelu.

Dle článku [12] se ovšem neprokázala výhodnost kartáčového kontaktu oproti přímému kontaktu, neboť k opotřebování kolejnic, jakož i k tavení částí projektilu, dochází v obdobné míře jako při použití přímého kontaktu.

## **11.3. PSL – pseudoliquid kontakt**

Tento princip kontaktu vynalezl opět Richard A. Marshall okolo roku 2006. Jedná se o obdobu kontaktu typu C, který je ovšem dělený do mnoha paralelních větví. Jednotlivé paralelní kusy jsou vyrobeny z tenkých vodivých fólií s dobrou mechanickou ohebností. Dle Marshalla byly použity tenké plátky hliníkové slitiny.

Dále je nutné před výstřelem vpustit do týlu náboje stlačený plyn, který způsobí tlak dostačující na přitlačení vodivých plátek ke kolejnicím.

Tento druh projektilu je patrně stále ve vývoji, neboť o něm lze nalézt jen velmi málo dostupných informací. Dle [12] je také nejasná aplikace tohoto druhu projektilu pro větší rozměry projektilu.

#### **11.4. Možné alternativy**

Jako možné alternativy bych rád především uvedl některá možná vylepšení stávajících řešení, která v této oblasti při psaní práce vznikla.

Cílem snažení je oddělení proudové cesty od mechanického vedení projektilu. Pokud by se tento záměr povedl, nemuselo by nás trápit mechanické poškození kolejnic, popsané výše. Proudová cesta by byla zajištěna i při nehladkém povrchu kolejnic a mechanicky by přitom nerovnost kolejnic nezpomalovala projektil nadměrnou třecí silou. Přesnost střelby by také neměla být zásadně ovlivněna, neboť ta by byla zajištěna odděleným mechanickým kontaktem.

Jako první možnost se jeví projektil v některých místech izolovat od vodících kolejnic a proudovou cestu zajišťovat pomocí obloukového výboje, stejně jako je na stávajícím zařízení zajištěné spínání pomocí jiskřiště. Obdobný druh projektilu je patentovaný v americkém patentu pod označením US 4467696 A, kde jde o druh railgunu, který kombinuje přenos proudu do projektilu pomocí plasmatu a vlastní vodivosti projektilu. V případě zmíněného patentu jde ovšem o celý systém railgunu.

Schematicky vyobrazený projektil s odděleným mechanickým kontaktem je na výkresu s názvem obrázek *O.11.4.1*. Zelenou barvou jsou znázorněny mechanické stabilizační prvky, modrou pak cínová vrstva s připájeným měděným tenkým vodičem – oranžová. Myšlenka zasazení do hlavně a naznačeného hořícího oblouku, znázorněného fialově, je pak vyobrazena na obrázku *O.11.4.2*. Tento druh projektilu byl prakticky realizován a při jednom z měření byla jeho funkce otestována. Při jedné z prvních realizací byly použity kusy dřeva, přilepené na projektilu menší šířky, než byly projektily používané při ostatních měřeních. Pro zajištění vodivého kontaktu před vznikem oblouku jsou na měděnou plošku projektilu připájeny z obou stran vodivé drátky. Zbývá pájka se pak může při hoření oblouku teplem uvolňovat a vytvářet tak výboji přijatelnější prostředí pro jeho existenci. Elektrický odpor tohoto oblouku by pak měl být poměrně nevýrazný – ideálně srovnatelný s tradičním skluzným kontaktem. Pokud by se funkčnost tohoto typu projektilu osvědčila, mohl by pak odpor oblouku nahradit předřadné odporníky za kondenzátorovou baterií na stávajícím zařízení.

Výsledky testu a zjištěné poznatky jsou uvedeny v kapitole 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů. Vyobrazení provedení tohoto typu projektilu před výstřelem je uvedeno na obrázku *O.15.3.4.1*.

Pokud by se experimentálně výše uvedený projektil osvědčil, mohlo by další variantou být použití magnetického pole k levitaci náboje. Obdobně jako je tomu např. v případě vlaků Maglev, které se pohybují na magnetickém polštáři. Toto řešení je zatím pouze spekulace, ale pokud by se výše uvedený transport proudu osvědčil, bylo by možné třecí ztráty mezi projektilem a kolejnicí takřka eliminovat.

Další možnou alternativou se jeví použití projektilu s rozložením proudové hustoty. Při pohledu na obrázek *O.7.1* je patrné, že většina proudové hustoty protéká týlem urychlovaného tělesa, pokud je izotropně a homogenně konstruováno. Pro zlepšení rozložení teploty a s tím souvisejícího zmenšení odporu by bylo vhodné homogenní rozložení proudu v celém objemu projektilu, vedoucího proud. S tím souvisí i zlepšení magnetického pole, rozprostřeného nad projektilem. Jak již bylo řečeno v kapitole 8.1 Základní princip kolejnicového urychlovače, magnetické pole je generováno kolejnicemi. Pro maximalizaci síly – tj. integrálu (8.1\_1) by bylo vhodné homogenní rozložení magnetického pole nad projektilem. Proto by bylo zajímavé zkonstruovat projektil, který by měl neizotropní příčné složení z hlediska elektrického odporu. Část proudu by se pak mohla využít pro vytvoření homogenního magnetického pole nad větší částí projektilu.

Samozřejmě by se vlivem proměnného – tedy většího – odporu zvýšily tepelné ztráty v projektilu a v celém obvodu by pak patrně poklesl proud. Je ovšem otázkou, jestli by se mezi těmito dvěma extrémy nedal nalézt kompromis, při kterém by se ve finále zvýšila ústňová rychlost.

Homogenizace magnetického pole by případně mohlo splňovat i zkratování ústí hlavně pro vytvoření proudové smyčky, která by vytvořila potřebné magnetické pole. Proud by se pak však patrně rozdělil na část tvořící magnetické pole a část protékající projektilem. Vhodné by tak nejspíše bylo vytvoření proudového děliče, na kterém by se dala měnit velikost, popřípadě čas toku proudu, tvořícího magnetické pole.

Možná alternativa by spočívala v řízeném zapálení oblouku v oblasti ústí hlavně. Vzniklá plasma by pak měla větší elektrický odpor než vodivý projektil, tudíž by patrně mohlo dojít k rozdělení proudu na dvě části. Rovněž by mohlo vlivem Lorentzovy síly dojít k výtlačku plasmu ven z ústí hlavně, čímž by čelem přestal téci proud tvořící magnetické pole. Vzdáleností zkratovacího drátku od ústí hlavně by tak šel řídit čas, po který proud přes ústí poteče.

Celá idea je ovšem nyní pouze spekulace, kterou by bylo vhodné dle časových možností při měření ověřit. Po zjištění výsledku a případném potvrzení tohoto nápadu by se teprve dalo překročit k vlastní optimalizaci.

Dále je možné, že v průběhu psaní práce, či při opakování experimentů bude ještě objeven jiný možný způsob řešení této nedořešené problematiky kontaktu projektilu a vodící kolejnice. Proto je možné, že další možné řešení, nebo zlepšení současného navrhovaného projektilu bude uvedeno dále v následujících kapitolách.

## 12. Doplnkové části urychlovače

Obecný princip urychlovače byl popsán v kapitole 8. Popis a princip obecného kolejnicového urychlovače a dle teoretických fyzikálních principů by tedy za urychlovač šlo považovat zařízení, které obsahuje vhodně zapojené kolejnice, mezi kterými je možné volně pohybovat zkratovací spojkou s dobrým elektrickým kontaktem, přičemž soustava by byla napájena ideálním zdrojem proudu značného výkonu. To jest ryze teoretický popis problematiky, ovšem v praxi by takovýto systém obsahoval mnoho zbytečných nedokonalostí, a proto je v praktickém provedení urychlovač doplněn o několik pomocných systémů.

Jedním z příkladů mohou být vybíjecí odporů, kterými je vybavené zařízení, na kterém byly prováděny experimenty – viz kapitola 9. Popis sledovaného zařízení. Jde o soustavu odporů, na něž je připojena kondenzátorová baterie po provedeném výstřelu a do kterých je vybit zbytkový náboj. Tento doplňkový systém však není primárně určen pro zlepšení vlastností při výstřelu a má ryze bezpečnostní charakter, proto zde dále rozebírán nebude.

Urychlovač ovšem může být doplněn například o soustavu pomocných měřících obvodů, které mohou sloužit jako výrazná pomoc při urychlování. Takovýmto doplňkem může být například systém optických bran, které mohou sloužit k lokalizaci projektilu – viz kapitola 15.2 Měření rychlosti vystřeleného objektu. Tento systém může být užitečný k vhodnému spínání jednotlivých sekcí u DES railgunu – viz kapitola 10. Druhy kolejnicových urychlovačů a způsoby urychlování těles – neboť jsme schopni lokalizovat projektil během jeho letu hlavní. K sepnutí obvodu následující sekce dojde tedy bezpečně až po vletu projektilu do této části. Případně může být v řídicím, či měřícím obvodu přednastavený vhodný časový posun.

Nezbytný je tento systém například u konkurenčních urychlovačů, pracujících na principu indukčnosti – typicky zařízení označované jako coilgun, či gaussgun, kdy je nutné v určité poloze projektilu v hlavní zajistit naopak vypnutí proudu, tekoucího budícím obvodem. V případě railgunu by tento systém byl vhodný k určení časového vývoje polohy projektilu v hlavní. S touto znalostí by pak bylo možné určit tepelné ztráty vznikající v obvodu.

Dle zdroje [14] je ovšem i jiná možnost určení polohy. Urychlované těleso za sebou totiž vleče magnetické pole. Je tedy možné na hlaveň umístit senzory magnetického pole v daných vzdálenostech a měli bychom opět získat průběh polohy projektilu v závislosti na čase. Tento způsob určení polohy byl v jednom z měření také použit a výsledky experimentu jsou popsány v kapitole 15.4 Měření průběhu urychlování.

Dále může být u sofistikovanějších urychlovačů pracujících ve vyšších hladinách energie použito nespočetné množství doplňkových systémů. Například dle zdroje McNab [12] je v případě plasmového pohonu nutné utěsnění hlavně, jakož i závěru a ostatních doléhajících částí. Dle zdrojů [13] a [11] ovšem toto utěsnění nezbytné není, ale i tak je pro plasmový pohon nutné zajistit doplňkové prvky, jako například časované ventily pro přívod plynu, potřebného pro vznik plasmatu.



## **12.1 Předurýchlovač**

Zajímavou doplňkovou částí je ovšem předurýchlovač, proto se mu budeme věnovat podrobněji. Jde o zařízení, které ještě před tokem proudu skrz projektil tento projektil rozpožbuje. Ve výkonnějších případech railgunů se využívá předurýchlení v kolejnicích z nevodivého materiálu, které plynule navazují na kolejnice vodivé. Často je systém vybaven optickou bránou, která je umístěna mezi navazující segmenty. Příslušný logický člen po přerušení světelného paprsku – tedy úspěšném předurýchlení projektilu – zajistí průchod proudu obvodem. Takového mechanismu například využíval urychlovač budovaný v EZU Běchovice a často je tento systém využíván v případě plasmatického pohonu, způsobeného explozí drátku.

V případě kartáčového kontaktu, či přímého kontaktu hraje ovšem předurýchlení také významnou roli. Pokud projektil v hlavni těsně před průchodem proudu stojí, je vlastně vytvořen dokonalý zkrat. Jelikož ovšem nejde o jeden kus vodiče – myšleno projektil zároveň s kolejnicí – bezpochyby budou existovat místa s lokálními drobnými nerovnostmi, která nebudou dokonale vodivě spojena. Zde může vzniknout obloukový výboj – viz kapitola 11. Přenášení proudu do projektilu – a ten může způsobit například přivaření projektilu ke kolejnici, minimálně však deformaci povrchu kolejnice a projektilu. Jelikož také těleso vlivem setrvačnosti stojí na místě, je při strmém nárůstu amplitudy proudu pravděpodobné, že dojde k úplnému, či jen částečnému, nebo dočasnému svaření obou kusů. Zbylá energie z proudového pulzu se pak kromě urychlení využije na vývoj síly potřebné k “odlepení” projektilu od kolejnice. I pokud bychom však zabránili svaření projektilu a kolejnice, maximální velikosti proudu by se využilo pouze pro překonání setrvačnosti, neboť za krátké časy, jako je doba nárůstu čela proudového peaku, se mechanické hmoty projektilu nemohou z nulové rychlosti pohnout. Amplitudy proudu a maximální možné vyvinuté síly by tedy bylo využito k rozpožbování projektilu na velmi malou rychlost. Proto je předurýchlovač nezbytnou částí railgunů vyšších energií.

Samotný předurýchlovač pak může být vytvořen v několika variantách, přičemž patrně nejpoužívanější jsou předurýchlovače pracující na principu stlačeného plynu. Tím může být vzduch, nebo dle [16] dusík. V případě plasmového pohonu to pak může být přímo pracovní plyn, například argon.

Další možností a pro účely provedení experimentu vhodnější jsou předurýchlovače pracující na mechanickém principu. V tomto případě dojde tedy k mechanickému posunu projektilu a je tedy nutný přímý kontakt ramena předurýchlovače a projektilu. Tento způsob by proto byl patrně horší při nutnosti pneumatického utěsnění hlavně. Nejsnazší je konstrukce předurýchlovače s využitím energie stlačené pružiny, obdobně jako je tomu například u elektrických ochranných prvků. V rámci práce byl v této oblasti na stávajícím zařízení možný inovativní vývoj, a tak je vývoji předurýchlovače věnována následující podkapitola.

## **12.2 Výroba předurychlovače**

Jak již bylo řečeno v předchozí podkapitole, předurychlovač je významnou doplňkovou částí urychlovače. Jelikož sledované zařízení předurychlovač neobsahovalo, vyvstal během psaní této práce nápad o pokus inovovat stávající zařízení o konstrukci jednoduššího předurychlovače.

Jak je popsáno v předchozí podkapitole, pro railguny nižších energetických hladin, bez nutnosti utěsnění, je možné použít mechanické urychlení, jehož nejsnazší provedení je v podobě akumulované energie ve stlačené pružině. Vzhledem k použitelnosti na stávajícím zařízení vyvstal požadavek na možnost elektronického ovládání, které by bylo možné sjednotit s ovládáním stávajícího zařízení. Proto byl tento předurychlovač vyroben pomocí stykače, kterýžto je jako mechanický spínací prvek možné elektricky snadno ovládat. Jako základ konstrukce posloužil starší vyřazený stykač, darovaný pro účely práce Ing. Janem Bauerem Ph.D, z katedry elektrických pohonů a trakce. Při zkoumání stavu a funkčnosti stykače byl sledován značně nízký zdvih a při ručním přitlaku na pohyblivou část se síla vytvořená pružinami jevila jako značně malá na dobré předurychlení. Přitom bylo ovšem také zjištěno, že pohyblivé díly stykače v sepnutém stavu je poměrně náročné oddělit. Čili pravděpodobně bylo možné nahradit stávající pružiny silnějšími, aniž by došlo k rozpojení magnetického obvodu.

Stykač byl tedy rozebrán a jednotlivé díly pilkou upraveny tak, aby bylo dosaženo většího zdvihu. Jelikož bylo nutné dodržet pokud možno pohyb v jedné ose, byl pozůstatek stykače přidělán na dřevěnou konstrukci, na které byly rovněž přilepeny prvky, zajišťující pokud možno jednoosý pohyb. Dále byla upravená opačná část stykače, tedy dno. Konkrétně byla vybroušena místa pro stávající zaražení pružin a byla tak možná táhnout pružinu dále za dno stykače. Ve vhodné vzdálenosti pak byly přivrtány pravoúhlé úchyty, do kterých byly zasazeny vodící prvky pružin, vyrobené z obroušené závitové tyče. Konce vodících trnů obroušeny nebyly a pomocí matky byly připevněny k úchytům. Další matka pak slouží ke zvolení polohy konce pružiny – tj. je možné měnit přitlak, a jelikož jsou ve stykači přítlačné pružiny dvě, bylo této vlastnosti využito pro kalibraci symetrického přitlaku na obě ramena pohyblivé části stykače. Touto sérií zákroků, trvajících jedno nedělní odpoledne, byl jednak zvětšen zdvih na 6 cm a také zvýšena síla následné akce, způsobená výměnou pružin.

Systém ovšem není díky vyššímu zdvihu zcela autonomní a to konkrétně při nátahu pružin. Jelikož se zvětšeným zdvihem prodloužila vzdálenost vzduchové mezery magnetického obvodu stykače, je nutné ruční natažení pružin, přiblížení částí obvodu a teprve následné přiložení napětí na řídicí svorky. Předurychlovač v tomto stavu drží pružiny ve stlačené poloze a urychlovací rameno v zadní pozici. Při odebrání řídicího napětí ze svorek řídicí cívky, dojde k zániku přítlačné síly a pružiny vystřelí rameno, stabilizované v jednom směru vpřed ve vzdálenosti maximálního zdvihu.

Do pohyblivého ramena předurychlovače, které je tvořeno plastovou konstrukcí, plnící úlohu dřívější separace vodivých částí, byl navrtán a připevněn metrický šroub M3, včetně matky na druhé straně – tj. v plastové konstrukci. Na toto čelo pohyblivé části pak byla nasazena kovová trubka dané velikosti, vybroušená do vhodného tvaru, dosedajícího na čelo.

Do kovové trubky pak byly nepohyblivě vloženy dřevěné, elektricky nevodivé části – v našem případě soustava špejlí, které již mají za úkol mechanicky působit na projektil v hlavni. Také by měly dostatečně izolačně oddělovat vysokonapěťový obvod urychlovače od obvodu stykače.

Po zhotovení mechanické konstrukce a jejím zevrubném otestování bylo dále nutné vytvoření řídicího obvodu, který měl za úkol spolupracovat se stávajícím zařízením a ve vhodnou chvíli před sepnutím jiskřiště rozepnout řídicí obvod stykače – předurychlovače – a tím mechanicky projektil urychlit. Pro tyto účely bylo zvoleno řízení pomocí mikroprocesoru a za konkrétní typ byl vybrán typ Arduino Uno, neboť pro ovládání tohoto zařízení se nepředpokládá nutnost rychlých kmitočtů, programovací prostředí je značně uživatelsky přátelské a zařízení je i s příslušenstvím snadno dostupné.

Pro navázání komunikace se stávajícím zařízením bylo uskutečněno několik pokusů o zachycení logického signálu ovládajícího jiskřiště, kterým by mohl být vyhodnocen včasný zásah předurychlovače. Tato cesta se ovšem jevila jako neúspěšná. Proto byla hledána další možnost synchronizace a ta se naskytla přímo v silovém ovládacím obvodu jiskřiště.

Po rozmyšlení zevrubné činnosti programu, popsaného konkrétně dále, bylo k procesoru přidáno několik prvků – konkrétně jeden odporový dělič a dvě ovládaná relé. Konkrétní zapojení je pak ukázáno na obrázku *O.12.2.1*.

Nyní tedy bude popsána konkrétní činnost přiloženého programu s názvem *ridici\_program\_arduino*, kterýmž procesor ovládá předurychlovací systém. Po zapnutí procesoru se sepne relé 1 – v obrázku označeno jako Rel 1, přivádějící napětí na ovládací svorky předurychlovače, a rozepne relé 2 – v obrázku označené jako Rel 2, a znemožní tedy přivedení řídicího pulzu na jiskřiště. Předurychlovač zatím ovšem nevykonává žádnou činnost, neboť spínač S1 je rozepnutý. Obsluha provede nejprve natažení pružin předurychlovače a přiblížení magnetického obvodu zbylého stykače. Poté obsluha ručně sepne spínač S1 a předurychlovač je přidržen v sepnutém stavu. Dále nastaví polohu potenciometru R4, která odpovídá prodlevě mezi akcí předurychlovače a akcí jiskřiště. Doba je nastavitelná v rozmezí 0 a 500 ms.

Tím práce obsluhy končí a systém je nadále autonomní. Způsobem popsaným v kapitole 9. Popis sledovaného zařízení nadále obsluha vykoná běžné úkony před výstřelem a logický systém urychlovače vše provede stávajícím způsobem. Když je zařízení připraveno k výstřelu, vyšle obvod stávajícího řízení urychlovače pokyn k sepnutí jiskřiště. Relé Rel 2 je ovšem rozepnuté a k výstřelu nedojde. Zato je procesorem na pinu A0 pomocí děliče napětí sejmut řídicí signál pomocí vhodného vzorkování. Jakmile procesor řídicí signál bezpečně zachytí, dojde k rozepnutí relé Rel 1 a tím k akci předurychlovače a mechanickému působení na projektil. Dále procesor čeká po dobu předem nastavitelnou potenciometrem R4 a sepne relé Rel 2, které zapříčiní akci jiskřiště a tím dojde k výstřelu.

Pro ilustraci je přiloženo video s názvem *funkce předurychlovače*, popisující činnost systému v nelaboratorních podmínkách, kdy je jiskřiště nahrazeno žárovkou. Doba čekání je pro ilustraci nastavena na 500 ms. Zapojení a testování vlivu zařízení na střelbu je rozebráno v samostatné podkapitole 15.5 Měření vlivu předurychlení. Instalovaný předurychlovač je vidět na *O.12.2.2*.

### 13. Matematické modelování urychlovače

Matematický model urychlovače je vytvořen kvůli možnosti teoretického výpočtu vybraných veličin, popisu systému a výpočtu účinnosti systému. V modelu by ovšem měla být možnost zobrazení i časových průběhů sledovaných veličin. Například změna dráhy projektilu v čase, nebo časový průběh působící síly. Ideální model by měl být takový, aby pro zadané vstupní napětí, na které je nabita kondenzátorová baterie, byl jeho výstup ústřední rychlost tělesa o dané hmotnosti a rozměrech. Idea je vytvoření jednotného modelu, který by se skládal ze tří – pro výpočet oddělených – ale posléze spolupracujících částí, neboť problematiku lze definovat ve třech odlišných oblastech a to:

#### *Model elektromagnetického pole*

Kteréžto sice popisuje sám o sobě celý problém, ale popis ryze pomocí náboje a toku v celém systému by byl velmi obtížný. Proto pomocí simulace elektromagnetického pole bude popsána zejména problematika magnetické indukce a problematika proudového pole v oblasti projektilu a kolejnic. Výstupy z této simulace by pak měly být podkladem pro následující výpočty – především v oblasti urychlení, ve kterémž modelu budou připraveny prvky pro započítání rozložení magnetického pole v oblasti nad tělesem a proudové hustoty uvnitř urychlovaného tělesa.

#### *Model elektrické části urychlovače*

Tento model si klade za cíl vypočítat průběhy obvodových veličin, které se v obvodu mohou vyskytovat. Zejména se bude model soustředit na výpočet velikosti a tvaru proudu protékajícího obvodem. Pro účely výpočtu bude model vycházet z energie uložené v ideálním kondenzátoru, nabitém na volitelnou hladinu napětí. Samotný model pak bude popisovat především oblast hlavně a projektilu.

#### *Model pro popis urychlování tělesa*

Který bude ideálně využívat obou výše zmíněných modelů k určení mechanického chování urychlovaného tělesa. Jeden ze vstupů tohoto modelu by měl být časový průběh proudu v systému, ze kterého bude spočítána působící síla. Ten by ovšem měl být k dispozici z modelu elektrické části. Pro zpřesnění by pak bylo vhodné přidání rozložení magnetického a proudového pole v prostoru projektilu, což je ovšem možné získat z modelu elektromagnetického pole.

Jako finální výstup by měl tedy být model pro popis urychlování tělesa, který by měl podávat informace o konečné velikosti rychlosti urychlovaného tělesa. Tento model, jako ostatně veškeré další, by měl dostatečně korespondovat se zákonem zachování energie. Tuto skutečnost lze vyjádřit jednou rovnicí, která ukazuje přelévání a disipaci energie mezi jednotlivými částmi systému. Při dostatečně přesném vyjádření časových průběhů dostatečného počtu jejích členů – buď pomocí výše zmíněných modelů, nebo experimentem – by pak rovnice mohla poskytovat informaci o členech obtížně dopočítatelných, či měřitelných, jako například časový průběh tepelných ztrát v systému. Dle časových možností se tímto způsobem vyjádření, řešení a ověření modelů problematiky budeme zabývat dále.

## **13.1 Modelování elektrické části urychlovače**

Matematický model elektrické části je sestavován pro získání teoretických průběhů elektrických veličin, působících při urychlování projektilu. Zejména se budeme soustředit na získání reálného průběhu proudu protékajícího skrze projektil, neboť tento proud projektil urychluje. Pokud by se matematický model elektrické části povedlo dostatečně přesně sestavit, bylo by možné jeho výsledky zkombinovat s modelem mechanickým. Vstupním parametrem by pak bylo pouze napětí, na které jsou kondenzátory nabity, a výstupem pak teoretická ústřední rychlost projektilu. Soustředit se tedy budeme na výpočet velikosti a tvaru protékajícího proudu.

K získání potřebných údajů o proudu je možné model pojmout z hlediska problematiky elektromagnetického pole, nebo elektrických obvodů. Pokud bychom se rozhodli pro model popisující problematiku na základě elektromagnetického pole, bylo by nutné ve vhodném 3D simulátoru polí provést celkovou numerickou simulaci problematiky a to včetně možných okolních prvků – např. konstrukce systému, poloha, okolní předměty atd. Pokud by se model podařilo zhotovit, byla by to nejpřesnější a jednodušší možnost matematického popisu systému. Rovněž by se zpřesnil i následný výpočet ústřední rychlosti, neboť model vytvořený na základě elektromagnetického pole by nepočítal integrální veličiny, jako indukčnost a kapacitu, a zabýval by se pouze tokem nábojů, resp. proudové hustoty, potřebné pro výpočet síly působící na projektil. Vytvoření a výpočet takovéto simulace by však byl časově výrazně náročnější, než je limit pro odevzdání této práce. Proto bylo po konzultaci s vedoucím rozhodnuto o zhotovení modelu na základě obvodových prvků.

Snahou modelu tedy bude simulovat reálný obvod pomocí vhodného zapojení ideálních prvků odporu, kondenzátoru a indukčnosti a řešit přechodný děj pro získání proudu v systému při vybití ideální kondenzátorové banky.

### **13.1.1 Odhad modelu**

V první fázi zhotovování modelu byl proveden zejména odhad prvků, které by se v obvodu mohly vyskytovat. Dle znalosti elektrického schématu systému byl přijat předpoklad, že obvod bude tvořen především činným odporem a indukčností. Tento předpoklad odpovídá i zdroji [20], ve kterém je náhradní schéma obdobného systému uvedeno.

Vodící kolejnice zkratované projektilem v systému tedy budeme v první fázi modelovat RL prvkem o fixní velikosti, tak jak je zobrazeno na obrázku *O.13.1.1.1*. Pro odhad velikosti prvků byl ze znalosti rozměrů přívodů vypočítán odhad počáteční velikosti odporu a indukčnosti. Při započítání materiálové konstanty pro vodivost mědi, jako:  $57 \cdot 10^6$  S/m, vyšel prvotní odhad odporu jako:  $0.33 \text{ m}\Omega$ . Obdobným velmi hrubým odhadem byla vypočtena statická indukčnost, jako:  $1.06 \cdot 10^{-6}$  H. Tyto hodnoty byly pak dosazeny do obvodu vykresleném na *O.13.1.1.1*, pro něž byla stanovena rovnice:

$$U_0 - L * i'(t) - R * i(t) - \frac{1}{C} \int i(t) dt = 0 \quad (13.1.1_1)$$

Tato rovnice je kvůli obsahujícímu integrálu hůře řešitelná, proto provedeme ryze matematickou úpravu a celou rovnici dle času zderivujeme. Tím odbouráme integrál a získáme příznivější tvar:

$$L * i''(t) + R * i'(t) + \frac{i(t)}{C} = 0 \quad (13.1.1_2)$$

Řešení této rovnice bylo dále vypočteno s následujícími počátečními podmínkami:

$$i'(0) = \frac{U_0}{L} \quad (13.1.1_3)$$

$$i(0) = 0 \quad (13.1.1_4)$$

Kde  $U_0$  bylo pro účel výpočtu stanoveno jako 1 kV. Počáteční podmínky by tedy šly interpretovat jako:

Na počátku děje neteče obvodem proud a počáteční změna proudu je rovna podílu napětí na kondenzátorech při začátku děje a indukčnosti uspořádání kolejnic a projektilu. Vzhledem k malé vypočtené indukčnosti se tato změna předpokládá výrazná – tj. strmý nárůst řešení.

Po vyřešení rovnice byl získán průběh proudu vyobrazený na obrázku 0.13.1.1.2. Na vyřešeném průběhu jsou patrné výrazné oscilace proudu, které se ovšem při měření neprojevovaly. Proto byl přijat předpoklad, že zevrubně vypočtené hodnoty součástek budou nepřesné, či budou v obvodu ještě jiné prvky, nebo kombinace obou zmíněných skutečností.

Začneme tedy u možnosti změny velikosti prvků v obvodu. Rovnice obvodu, jakož i její obecné řešení, zůstanou stejné. Změní se pouze řešení partikulární, tedy doplníme jiné hodnoty konstant – v našem případě součástek, a počátečních podmínek – obsahujících počáteční napětí, které však ponecháme stejné. Pro snadnější optimalizaci a hledání parametrů součástek byl sepsán program *vypocet\_L\_R\_obvodu 23*, který je myšlenkově sestaven následovně:

V úvodní části jsou do programu importovány sejmuté průběhy proudu, snímané při poloze zkratovací spojky na počátku hlavně. Pro možnost korelace bylo měření pro tuto polohu opakováno pětkrát, celkem tedy zkoumáme pět různých průběhů. Po importování jsou určeny amplitudy těchto proudů a hodnoty proudu v charakteristických zvolených časech. V případě dále vykreslovaných průběhů jsou to časy 0.26 ms, 0.5 ms a 0.8 ms.

Dále je již obecně vypočítána diferenciální rovnice obvodu (13.1.1\_1). V dalším kroku je již hledané partikulární řešení rovnice, a sice pomocí fixně zadané hodnoty napětí na kondenzátorech a velikosti kondenzátorové baterie. Další potřebné hodnoty – tj. velikost součástek R a L, jsou pomocí funkce *manipulate* dosazovány dynamicky v zadaném rozsahu. V našem případě:

$$10^{-4} < R < 10^{-1} \Omega$$

$$10^{-8} < L < 10^{-4} H$$

Prvním úspěchem programu bylo, že se zadanými hodnotami  $R = 0.33 \text{ m}\Omega$  a  $L = 2.1 \cdot 10^{-8} \text{ H}$  vyšel průběh ekvivalentní s obrázkem *O.13.1.1.2*. Byl tedy přijat předpoklad, že výsledky obdržené z programu budou pravděpodobně věrohodné, a je tedy možné pokračovat v dalším bádání.

Již byl zmíněn výstup z programu, který je při zadaných hodnotách ve shodě s obrázkem *O.13.1.1.2*. To je ovšem pouze část výstupu z tohoto programu. Celý výstup je balíček následujících objektů:

Jako první je vyobrazen graf hodnot se sejmutým průběhem proudu při měření zkratovaných kolejnic na počátku, do kterého je zasazen graf se spočítaným průběhem proudu. Dále následují dvojice hodnot proudu v maximu, v čase 0.26 ms, 0.5 ms a 0.8 ms, přičemž první hodnota je vypočítaná z rovnice obvodu – tedy se změnou prvků  $R$  a  $L$  pohyblivá, a druhá je průměr z hodnot jednotlivých měření v maximu a v daných časech. Dále jsou výstupem grafy, ve kterých jsou tečkami znázorněné velikosti proudu v maximu a daných časech. V těch samých grafech se nachází i pohyblivá přímka, v závislosti na aktuálním  $R$  a  $L$ , která znázorňuje velikost vypočítaného proudu v daném čase.

Zcela optimální by tedy bylo, kdyby graf sejmutých hodnot a průběh vypočítaného proudu korespondovaly, číselné velikosti proudu vypočítaného a průměru sejmutých hodnot v maximu a daných časech byly s dostatečnou přesností v souladu a přitom přímka a body, znázorňující určité velikosti proudu, by tvořily dostatečně přesný proklad.

Při snaze dosáhnout takového stavu byla objevena oblast velikosti  $R$  a  $L$ , při níž se sejmuté průběhy a teoreticky vypočítané nápadně přibližují. Tomu se děje při hodnotách okolo:  $R = 72 \text{ m}\Omega$  a  $L = 2.4 \cdot 10^{-6} \text{ H}$ . Pro přesnější hledání byla oblast výběru prvků  $R$  a  $L$  zúžena na:

$$0.01 < R < 0.15 \Omega$$

$$10^{-8} < L < 1 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

A při tomto rozpětí hledaného odporu a indukčnosti byly nalezeny hodnoty:

$$\mathbf{R = 0.0749 \Omega}$$

$$\mathbf{L = 1.93924 \cdot 10^{-6} \text{ H}}$$

Hodnota odporu s teoreticky vypočtenou hodnotou  $0.33 \text{ m}\Omega$  nekorresponduje, ale do teoreticky vypočtené hodnoty byl započítáván pouze odpor hlavně a nejbližšího uspořádání, což v praktickém provedení zařízení není zdaleka jediný činný odpor, který by šel na zařízení v proudové cestě najít a v následujících řádcích bude zajisté o činném odporu v obvodu zmínka.

S hodnotou indukčnosti je až pozoruhodné, jak byl stanoven odhad pomocí zevrubného výpočtu statické hodnoty indukčnosti, ačkoliv nepřesnosti indukčností vzhledem k měření bývají považovány za rizikovou oblast. Možné vysvětlení může tkvět v okolí počítané cívky. Tím je totiž vzduch, který se vzhledem k sycení magnetickým polem chová lineárně, na rozdíl od feromagnetických materiálů, používaných k výrobě průmyslových cívek.

Každopádně tyto dva údaje ukazují na přítomnost činného odporu a indukčnosti o zmíněných velikostech. Celý výstup programu je pak vidět na obrázku *O.13.1.1.3*. Následující výpočty, ať již jakkoliv sofistikované, by měly obsahovat prvky, z nichž bude možné poskládat činný odpor a indukčnost o uvedených hodnotách, neboť průběh teoreticky spočtený s takovou hodnotou prvků je plně v souladu s měřením, při poloze projektilu na počátku kolejnic. Funkce, popisující časový vývoj proudu při nabití baterie na 1 kV, je tedy:

$$i(t) = -7796.79 (-0.000664376 + 1.99994 e^{-35846.3 t} - 1.99928 e^{-2777.12 t}) \quad (13.1.1_4)$$

A s touto funkcí pak bude pracováno v dalších modelech.

Další hledání nastalo v případě, kdy projektil, či zkratovací spojka je umístěna na konci kolejnic. Parametry indukčnosti a odporu by se tedy měly změnit. Pro tento případ byl sepsán program s názvem *vypocet\_L\_R\_obvodu\_23\_konec*, který vychází ze stejného myšlenkového toku jako program *vypocet\_L\_R\_obvodu\_23*, a je použito stejného schématu. Pro polohu zkratovací spojky na konci hlavně, jsou tedy nalezeny hodnoty:

$$R = 0.0774 \Omega$$

$$L = 2.7068 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

Výsledná funkce, charakterizující protékání proudu v čase při nabití kondenzátorové baterie na 1kV, tedy bude:

$$i(t) = -8000.44 (-0.000647464 + 1.99992 e^{-25906.8 t} - 1.99928 e^{-2759.9 t}) \quad (13.1.1_5)$$

A přílišně se neliší od funkce proudu, který protékal při zkratované hlavni na počátku. Rozdíl je ovšem patrný v amplitudě a oblasti okolo špičky. Tento fakt je v souladu s měřením, neboť pokud se podíváme na výstupy z jednotlivých programů, číselné hodnoty průměrných veličin proudu v daných časech se navzájem liší zejména v maximu a v čase 0.26 ms, tedy počátečních děje. Zde se hodnoty chovají poměrně logicky, tedy v případě zkratu na začátku jsou hodnoty proudu vyšší než při zkratu na konci hlavně. Oproti tomu při časových hodnotách 0.5 a 0.8 ms, tedy v době týlu, jsou naopak hodnoty proudu v případě zkratu na konci hlavně vyšší.

Tento pozoruhodný výsledek byl zkontrolován s vedoucím práce a byl přijat předpoklad, že s rostoucí vzdáleností projektilu od počátku narůstá indukčnost uspořádání, jakož i odpor. Otázkou je, jak dramatický nárůst bude a zda bude na obvod mít větší vliv nárůst indukčnosti, nebo odporu.

Pro ověření chování systému a závěrů předchozích programů byl sepsán program *porovnaní\_tylu*, který bude ještě popsán v kapitole 15.1 Měření pro získání parametrů náhradního schématu. Program zobrazuje naměřené výsledky sejmutého proudu při počáteční poloze projektilu, vykreslovanou modře, a při poloze projektilu v ústí hlavně, vykreslovanou červeně. Také výstup zobrazuje přímku znázorňující proklad, získaný vhodnou volbou prvků – tedy výstupy funkcí (13.1.1\_4) a (13.1.1\_5) v daných časech. Výstup z programu je vidět na obrázku *O.13.1.1.4*.



Dále tedy byla určena změna indukčnosti a odporu v obvodu jako rozdíl daných veličin při zkratování kolejnic v ústí a na počátku. Odečtem byly získány následující hodnoty:

$$\Delta R = 0.0774 - 0.0749 = \mathbf{2.5 \text{ m}\Omega}$$

$$\Delta L = (2.7068 - 1.93924) * 10^{-6} = \mathbf{0.7744 * 10^{-7} \text{ H}}$$

Jelikož průběhy proudů v obou případech jsou si značně podobné, byl přijat předpoklad lineárního chování systému. Tedy funkci, vyjadřující průběh indukčnosti i odporu se vzdáleností projektilu od počátku hlavně, patrně můžeme vyjádřit jako lineární funkci. Pro indukčnost bude mít funkce tvar:

$$L(x) = 1.93924 * 10^{-6} + 7.6756 * 10^{-9} * x \quad (13.1.1\_6)$$

Pro odpor pak:

$$R(x) = 0.0749 + 25 * 10^{-6} x \quad (13.1.1\_7)$$

Tyto dva vztahy tedy vyjadřují velikost indukčnosti a odporu v náhradním schématu při cestě projektilu mezi kolejnicemi. Vzhledem ke krátké dráze kolejnic ovšem nevyšly změny dramatické – změna indukčnosti v řádu  $10^{-9}$  H a změna odporu v řádu  $10^{-6}$  H. Nedramatické změny byly předpokládány, proto budou nejspíše správné.

### 13.1.2 Pokročilejší model

Pojďme se ještě detailněji podívat na elektrické schéma celého zařízení. Jelikož jsou po výstupu z kondenzátorů na stávajícím zařízení v cestě proudu patné odporníky a také spínací jiskřiště, bude nejspíše nutné přidat do obvodu další prvky. Těmi by mohla opět být kombinace odporu a indukčnosti. Jelikož do předřadných odporníků nelze pohlédnout, nemůžeme s jistotou konstatovat jejich bifilární provedení pro potlačení indukčnosti. Proto bude raději do náhradního obvodu indukčnost dodána. Přirozeně bude do schématu dodán i činný odpor.

Dále je v proudové cestě spínací jiskřiště, jehož funkce je již popsána v kapitole 9. Popis sledovaného zařízení. Zde bude z hlediska funkce zmíněno pouze, že při příkazu uživatele k výstřelu dojde k přiblížení obou kontaktních ploch jiskřiště, kde vlivem přeskočení dojde k zapálení obloukového výboje a následnému přenosu náboje.

Pro model nyní bude podstatné vhodné nahrazení hořícího oblouku obvodovými prvky. Po zjišťování problematiky okolo vodivých plasmatických kanálů byly přijaty předpoklady, že oblouk lze pro takto krátké vzdálenosti modelovat především činným odporem. Ten pak patrně bude mít velmi nelineární volt-ampérovou charakteristiku a se zvyšující se amplitudou proudu bude ekvivalentní odpor nižší, což lze i interpretovat pomocí zdroje [10]. Po konzultaci s vedoucím práce jsme ovšem dospěli k názoru, že pro účely sestavení náhradního obvodu bude dostatečné nahrazení činným, časově neproměnným odporem konečné velikosti. Ten bude vyjadřovat jak odpor vinutí odporníků, tak oblouku, jakož i cca 30 cm kabelu, přenášející proud skrze měřící transformátor. Neboť tyto skutečnosti jsou z pohledu proudu v sérii a jejich odpor lze tedy sečíst.

Tento náhradní obvod, s přidanou indukčností a činným odporem, je vyobrazen na obrázku *O.13.1.2.5*, a jeho náhradními prvky tedy jsou:

C1 – Kondenzátorová baterie

L1 – Parazitní indukčnost odporového vinutí

R1 – Odpor vinutí předřadného odporníku a oblouku na jiskřišti

RH – Odpor přívodů, kolejnic a projektilu

LH – Indukčnost uspořádání kolejnic a přívodů

Kondenzátorová baterie, v obvodu zanesena jako C1, je pro účel výpočtu považována za ideální. V praxi to samozřejmě platit nebude, ale pro urychlování je důležitý především výstupní proud, který bychom měli namodelovat i bez exaktní znalosti parazitní indukčnosti zdroje. Navíc pokud bude parazitní indukčnost kondenzátorové baterie velká, ve výpočtu se to projeví ve vyšší hodnotě L1, která se předpokládá zařazená v sérii s parazitní indukčností baterie. Indukčnosti předřadného odporu a parazitní indukčnosti kondenzátorové baterie by se tedy měly ve výpočtu projevit ve velikosti náhradní součástky L1.

Dále byla zanedbána parazitní kapacita, která se v obvodu hlavně zajisté také bude nacházet. Ve schématu obvodu na obrázku *O.13.1.2.1* je tento parazitní kondenzátor zakreslen čárkovanou čarou. Tato kapacita bude zajisté větší při koncové poloze projektilu, neboť kolejnice, které jsou od sebe vzdálené 10 mm, vytvoří při své 1m délce strukturu připomínající kondenzátor. Dle zevrubného odhadu, obdobně provedeného v případě prvotního určování indukčnosti, byla velikost tohoto parazitního kondenzátoru stanovena na  $26 \cdot 10^{-12} \text{F}$ . V jednom z průběžně sestavovaných programů byl tento kondenzátor orientačně zahrnut a na výstupním pulzu proudu bylo pouze vidět mírné "roztřepení". Tvar ani velikost pulzu přitom změněny nebyly. Byl tedy přijat předpoklad, že na výpočet působící síly, a tedy i následné určení ústové rychlosti, tento parazitní kondenzátor nebude mít stěžejní vliv. Jelikož by tedy docházelo ke značnému komplikování výpočtů, při velmi nevýrazném zpřesnění průběhu, nebyl parazitní kondenzátor do výpočtu obvodu na obrázku *O.13.1.2.1* započítáván.

Nyní bude vhodné opět učinit odhad velikosti jednotlivých prvků obvodu dle obrázku *O.13.1.2.1*. K tomu slouží program s názvem *vypocet\_L\_R\_obvodu\_25*. Jeho struktura je velmi obdobná předchozímu programu s názvem *vypocet\_L\_R\_obvodu\_23*. První část s importováním, jakož i s vybráním několika dat sejmutého průběhu v daných časech a maximu, je stejná. Následně se ovšem program liší rovnicí obvodu, neboť jsou přidány dva prvky navíc. Rovnice pro tento obvod, vyobrazený na obrázku *O.13.1.2.1*, tedy zní:

$$L1 * i'(t) + R1 * i(t) + LH * i'(t) + RH * i(t) + \frac{1}{c} \int i(t) dt - U_0 = 0 \quad (13.1.1_8)$$

Abychom se při řešení zbavili nepříjemného integrálu proudu, byla rovnice ještě jednou zderivována. Stejně tak bylo činěno v případě výpočtu rovnice (13.1.1\_1) a (13.1.1\_2), která je již uvedená ve tvaru po druhé derivaci a charakterizuje obvod vyobrazený na obrázku

O.13.1.1.1. Řešení rovnice (13.1.1\_8) bylo vypočteno s následujícími počátečními podmínkami:

$$i'(0) = \frac{U_0}{L1+LH} \quad (13.1.1_9)$$

$$i(0) = 0 \quad (13.1.1_{10})$$

Je uváděna i podmínka pro první diferenciál, neboť jak je zmíněno výše, řešení bylo hledáno až po zderivování rovnice (13.1.1\_8) a to ve tvaru:

$$L1 * i''(t) + R1 * i'(t) + LH * i''(t) + RH * i'(t) + \frac{i(t)}{C} = 0 \quad (13.1.1_{11})$$

Tato rovnice je tedy opět řešena a pomocí funkce manipulate jsou v řešení hledané velikosti jednotlivých prvků. Nyní je ovšem možné pohybovat se čtyřmi proměnnými prvky, kterými jsou: L1, R1, LH, RH, jejich interpretace je popsána výše. Krom části výpočtu shodným s programem *vypocet\_L\_R\_obvodu 23* je v tomto programu navíc dopočítávána energie, uvolněná při ději.

Nejprve je spočítán průběh napětí na kondenzátorové baterii, jako:

$$Uc = Uc(0) - \frac{1}{C} \int_0^t i(\tau) d\tau \quad (13.1.1_{12})$$

Což je obecně platný vztah pro napětí na kondenzátoru. Znaménkem minus je naznačen děj vybíjení a napětí by tedy mělo klesat.

Dle výpočtu tedy máme k dispozici napětí na kondenzátorové baterii a proud z ní tekoucí. Nic tedy nebrání ve výpočtu energie uvolněné při ději, kterou spočteme jako:

$$En = \int_{t_0}^{tkon} Uc(t) * i(t) dt \quad (13.1.1_{13})$$

Kde čas  $t_0$  je brán jako počátek děje – v našem případě je roven nule, a  $t_{kon}$  je čas, za který děj s jistotou skončil. Jak napovídá program *vypocet\_L\_R\_obvodu 23*, při parametrech zvolených v souladu s měřením, skončí děj v čase okolo 2 ms. Abychom dosáhli dostatečné rezervy a byla přitom možnost volit prvky v širším rozsahu, je ve výčtu zvolen konečný čas o řád vyšší, tedy  $t_{kon} = 10$  ms. Energie a s ní spojené napětí jsou počítány v každém kroku při zvolené velikosti prvků pomocí funkce manipulate.

Dále je v programu vypočítaná energie uložená v kondenzátoru před začátkem děje, jako:

$$En = \frac{1}{2} * C * U^2 \quad (13.1.1_{14})$$

Tato energie se v průběhu děje uvolní, čehož bude využito v dalších myšlenkách, ale nyní je důležité, že by měla korespondovat s energií vypočtenou dle vzorce (13.1.1\_13) při vhodném

dosazení velikosti jednotlivých součástí. Energie spočtená oběma způsoby je pak také výstup z programu *vypocet\_L\_R\_obvodu\_25*.

Celkový výstup programu *vypocet\_L\_R\_obvodu\_25* je stejný jako výstup z programu *vypocet\_L\_R\_obvodu\_23* až na zmíněnou energii, která je ve výstupu na třetím místě, hned za porovnáváním teoretického a vypočteného průběhu proudu a napětí. Dále se výstupy neliší.

Jako první pokus pro ověření funkčnosti programu bylo testováno, zdali program dodá stejné výstupní hodnoty při vstupních součástkách zvolených tak, aby jejich velikosti v součtu daly dohromady součástky, které byly vstupem do programu *vypocet\_L\_R\_obvodu\_23*. Když tak bylo učiněno, výstup programu byl skutečně shodný s předchozím programem. Navíc byla oproti předchozímu programu nově spočtena energie, která vycházela ve výrazné shodě s energií dopočtenou dle 5.10. Konkrétně:

2587 J – dle vztahu (13.1.1\_13)

2590 J – dle vztahu (13.1.1\_14)

Čili lze konstatovat, že program *vypocet\_L\_R\_obvodu\_25* funguje pravděpodobně správně a můžeme tedy překročit k aplikaci.

Jelikož jsou ovšem všechny obvodové prvky situované v sérii, lze prostou úpravou vytknutí upravit rovnici (13.1.1\_8) na tvar:

$$(L1 + LH) * i'(t) + (R1 + RH) * i(t) + \frac{1}{c} \int i(t) dt - U_0 = 0, \quad (13.1.1_{15})$$

případně vložit součet indukčností a odporů do jednoho prvku. Tím po druhé derivaci dostaneme rovnici (13.1.1\_1). Lze ovšem hledat výstupní proud dle výstupů z měření v kombinaci více prvků, a pokud jejich velikost v součtu bude stejná, jako byla stanovená v programu *vypocet\_L\_R\_obvodu\_23*, bude výstupní proud ve shodě s proudem pozorovaným při měření.

Přidaná hodnota programu je v možnosti ověření energie a také v možnosti oddělení indukčnosti a odporu hlavně a ostatních částí – typicky obvodu zdroje, jako jsou přívodní vodiče, odpor předřadných odporníků a jejich indukčnost atd. Tohoto oddělení se můžeme pokusit pomocí napětí, které by krom proudu mělo korespondovat s naměřenými hodnotami. V jednom ze série měření bylo totiž krom proudu také měřeno napětí na jiskřišti proti zápornému pólu kondenzátorové baterie.

Jelikož jde v následných matematických modelech zejména o velikost a tvar proudu, budeme se při hledání velikostí součástí soustředit zejména na proud a napětí budeme brát spíše jako zevrubný ukazatel. Výstup programu pro zkratované kolejnice na počátku je k nahlédnutí v obrázku *O.13.1.2.2*. Při pohledu na výstup programu je tedy patrné, že průběh proudu je s naměřenými hodnotami v pořádku. Jak je již zmíněno, napětí na jiskřišti, vystupující jako druhá položka, je spíše orientační ukazatel, ale tvarově zevrubně koresponduje s naměřenými daty. Další položka výstupu je vypočítané napětí na kondenzátorové baterii při vybíjecím ději. Z tohoto průběhu a průběhu proudu je následně dopočítávána energie, která je uvedena jako pátý výstup v pořadí. Jak je vidět, energie vzájemně korespondují, když jsou vypočteny dvěma

způsoby – dle (13.1.1\_13) a (13.1.1\_14). Ještě před výstupem spočtených energií je ovšem list, ve kterém je zobrazen celkový odpor uspořádání a celková indukčnost. Je vidět, že jsou tyto výsledky velmi podobné předchozímu programu *vypocet\_L\_R\_obvodu* 23. A dále jsou již známé velikosti proudů ve zvolených časech a hodnota vypočtené funkce v tomto čase. Nutno dodat, že těchto hodnot bylo dosaženo při nastavených vstupních datech:

$$R1 = 0.07125 \Omega$$

$$L1 = 1.07 \cdot 10^{-6} \text{ H}$$

$$RH = 0.00171 \Omega$$

$$LH = 7.2703 \cdot 10^{-7} \text{ H}$$

Model tedy ukazuje na skutečnost, že indukčnost a odpor připojeného obvodu hlavně jsou řádově menší než parametry napájecího zdroje. V případném zlepšení systému by tedy bylo vhodné zaměřit se spíše na obvod zdroje a nikoliv na obvod hlavně, neboť z velikostí prvků vyplývá, že v obvodu zdroje budou ztráty větší. Jelikož ovšem model přinesl průběh proudu ve shodě s měřením, byla zasazena do počáteční podmínky (13.1.2\_9) informace, že počáteční napětí nabitě kondenzátorové baterie je 7 kV. Výstupní průběh proudu z programu byl také v souladu s měřením, jak je vidět na obrázku *O.13.1.2.3*. Proto byl model prohlášen za úspěšný. Výsledný namodelovaný časový průběh hledaného proudu při výstřelu tedy je:

$$i(t) = -55791 (-0.0006499 + 1.99994 e^{-37755 t} - 1.9993 e^{-2845 t}) \quad (13.1.1_{15})$$

Další zpřesnění obvodového modelu tedy nebude potřeba, neboť při změně parametrů odporu a indukčnosti hlavně v závislosti na poloze projektilu, jak uvádějí vztahy (13.1.1\_6) a (13.1.1\_7), nebyl výstupní proud prakticky vůbec změněn. Pozorování bylo prováděno tak, že do hodnot součástek uvedených výše byla zanesena velikost prvků RH a LH při koncové poloze projektilu v hlavni. Ke zpřesnění vypočteného proudu tedy nedošlo, ale výpočet rovnice by se značně zkomplikoval. Výstupním prvkem z tohoto modelu tedy bude zejména časový tvar proudu. V případě potřeby ovšem může z obvodu vystoupit také časový průběh napětí na kondenzátorové baterii při vybíjecím ději, tak jak je například doložena energie dle (13.1.1\_13).

Model elektrické části obvodu byl tedy přijat jako dostatečný, neboť bylo nalezeno náhradní schéma obvodu a velikosti jeho prvků. Při porovnání tohoto modelu se změřeným průběhem proudu se průběhy značně shodují. Model elektrické části a jeho výstupní proud tedy může být použit pro zahrnutí do ostatních zpracovávaných modelů systému.

## 13.2 Modelování elektromagnetického pole urychlovače

Pro modelování elektromagnetického pole v okolí urychlovače – a pro účely práce především uvnitř v projektilu – nebyl již sepisován kód v solveru mathematica, ale byl zvolen veřejně dostupný program pro řešení dvoudimenzionálních úloh Agros 2D, ze kterého je možné data exportovat a v solveru mathematica s nimi dále pracovat. Bylo tak voleno z předpokládané větší přesnosti, než které by se dosáhlo sepsáním vlastního kódu a také z důvodu časového tlaku. V případě důkladného zjišťování rozložení magnetického a proudového pole by ovšem bylo vhodné sepsat vlastní program pro řešení polí. Ideálně by tento program měl pracovat na bázi jiné výpočetní metody než program Agros 2D. Například by bylo možné použití momentové metody, nebo pro odhad superrelaxační metody. Výstup z tohoto ručně sepsaného programu by se pak měl zevrubně shodovat s hodnotami vypočtenými programem Agros 2D. Z důvodů časového nedostatku byl ovšem tvořen model elektromagnetických polí pouze v programu Agros 2D, přičemž byla modelována magnetická a proudová pole daných uspořádání.

Samotných vytvořených modelů bylo více, přičemž byly zaměřené na modelování rozložení proudové hustoty v projektilu a magnetického pole v projektilu. Výstupy z těchto programů byly pak dosazovány do matematických modelů mechanické části, neboť pro určení působící síly je podstatné znát velikost a ideálně i rozložení proudové hustoty a magnetické indukce v urychlovaném tělese – viz vztah (8.1\_1).

Program Agros 2D nabízí (mimo jiné) modelování stacionárního proudového pole, stacionárního magnetického pole a dynamického magnetického pole, čím byl sepsán první program s názvem *B\_koleje\_cas*.

### 13.2.1 Modelování časově proměnného magnetického pole mezi kolejnicemi

Jako jeden z prvních programů byl sepsán program *B\_koleje\_cas*, ve kterém se řeší případ magnetického pole dvou paralelních kolejnic, které jsou umístěny ve vakuu. Jelikož zvolený program nenabízí hledání řešení v trojrozměrném případě, je pole hledané v kolmém řezu. Pro prostor dostatečně vzdálený od počátku a konce kolejnic, je to ovšem více než dostatečné přiblížení. Situaci znázorňuje obrázek *O.13.2.1.1*.

Samotný výpočet pole probíhá podle rovnice:

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu} * (\operatorname{rot}(\vec{A}) - \vec{B}_r) \right) - \sigma * \vec{v} \times \operatorname{rot} \vec{A} + \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} = \vec{J}_{ext} \quad (13.2.1_1)$$

Pro úspěšný výpočet je tedy nutné zadat následující parametry těles:

$\mu$  – relativní permeabilita

$\sigma$  – vodivost

$v$  – rychlost částice ve směrech  $x$  a  $y$

$B_r$  – remanentní magnetická indukce tělesa

$J_{ext}$  – proudová hustota napájecího proudu

Jelikož náš problém neobsahuje jisté prvky, rovnici (13.2.1\_1), lze zjednodušit. Soustava například neobsahuje těleso s remanentní magnetickou indukcí. Výpočty dále ukazují, že pohybový člen je proti členu transformačnímu malý. Přijetím tohoto předpokladu se rovnice (13.2.1\_1) zjednoduší na tvar:

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu} * (\operatorname{rot} \vec{A}) \right) + \sigma \frac{d\vec{A}}{dt} = \vec{J}_{ext} \quad (13.2.1_2)$$

Zbýlými členy tedy jsou:

$\mu$  – relativní permeabilita

$\sigma$  – vodivost

$J_{ext}$  – externě dodaná proudová hustota

Na základě těchto dodaných hodnot systém spočítá v daném místě magnetický vektorový potenciál  $A$ , ze kterého lze vyjádřit magnetickou indukci jako:

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A} \quad (13.2.1_3)$$

Za parametry prostředí, jako vodivost a permeabilita, dosadíme hodnoty příslušných materiálů – pro měděné kolejnice:

$$\mu - 0.99999 \text{ (-)} \quad (13.2.1_4)$$

$$\sigma - 56 * 10^6 \text{ (S*m}^{-1}\text{)} \quad (13.2.1_5)$$

Také zvolíme okrajovou podmínku úlohy. Tou s dostatečnou přesností zvolíme hodnotu  $A=0$ , na dostatečně vzdálené hranici od uspořádání. Správně zvolenou vzdálenost poznáme tak, že velikost vypočtené hledané veličiny se v daném místě s mírným pohybem hranice už nemění. Pro jistotu ovšem můžeme polohu krajní oblasti spíše zvětšit.

Jako zdrojovou veličinu  $J_{ext}$  zvolíme proudovou hustotu, kterou vypočteme ze znalosti plochy kolejnic a časového průběhu pulzu, vypočtené modelem elektrického obvodu. Dosazovaná funkce bude:

$$J_{ext}(t) = -6.53 * 10^8 (-0.00054 + 1.99 e^{-21624 t} - 1.99 e^{-3090 t}) \quad (13.2.1_6)$$

Tato funkce je dosazená jako kladný pulz do levé kolejnice a jako pulz s opačným znaménkem do pravé kolejnice. V programu je zadán čas, ve kterém chceme najít řešení dané úlohy, proto s rezervou volíme čas 4 ms. Program pak provede výpočet pole ve zvoleném počtu – v případě tohoto programu 50 kroků, při čemž vzorkování probíhá dle zvolení uživatele nelineárně – dle extremality funkce. Vypočtené magnetické pole pro čas maxima proudové hustoty je pak zobrazeno na obrázku O.13.2.1.2.

Jelikož se ovšem vypočtené pole ani odhadem neblíží zevrubně vypočtené hodnotě dle (8.1\_2), byl zhodnocen výpočet jako chybný. Chyba byla dalekosáhle hledána, až po konzultaci s vedoucím práce bylo rozhodnuto, že chyba bude ve špatně dosazené geometrické oblasti zadané proudové hustoty, neboť při takto rychlých jevech se zajisté projeví skin efekt kolejnic a proudová hustota je přitom dosazována homogenně do celého příčného řezu. Této teorii také přispívá skutečnost, že v prostoru kolejnice je značně velká proudová hustota indukovaná časovou změnou pole. Poměr indukované složky a buzené složky se s časem mění. Průběh indukované proudové hustoty pro čas blízký maximu, v závislosti na geometrii je patrný na obrázku O.13.2.1.3. Celková proudová hustota se tedy bude rovnat součtu externě dodávané proudové hustoty a indukované časovou změnou a pro čas blízký maxima je zobrazena na O.13.2.1.4. Tato oblast indukovaného proudu je ovšem pro každý čas jiná. Numerické řešení pak výpočet nasměruje nesprávným směrem, neboť násilím dosazujeme nereálný případ homogenního rozložení dodávané proudové hustoty. Tuto teorii nesprávného výsledku potvrdil i jeden z tvůrců softwaru doc. Pavel Karban, který dále konstatoval, že výpočetní zvolený software Agros 2D obecně časově proměnnou problematiku včetně indukovaných proudů řešit neumí.

### 13.2.2 Modelování stacionárního magnetického pole mezi kolejnicemi

Po selhání programu *B\_koleje\_cas*, který, jak bylo usouzeno, chybně znázorňoval časově proměnné magnetické pole mezi kolejnicemi, byl sepsán program *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*, znázorňující stacionární rozložení pole. Patrně tento model bude blízký realitě, neboť nás nezajímá rozložení pole uvnitř kolejnic, které vytvoří indukovaná složka proudové hustoty, ale z měření a modelu obvodové části víme, že kolejnicí poteče proud o dané velikosti, a pokud nás nezajímá rozložení pole uvnitř kolejnice, můžeme nejspíše dosadit proudovou hustotu homogenní. Rovnice, popisující statickou problematiku, se tedy na rozdíl od přechodného děje změní a z rovnice (13.2.1\_1) se stane rovnice:

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu} * (\text{rot } \vec{A}) \right) = \vec{J}_{ext} \quad (13.2.2_1)$$

Pro názornost lze rovnici přepsat, pomocí definice magnetického vektorového potenciálu (13.2.1\_3), a pozdější vyjádření magnetické indukce, pomocí permeability a intenzity magnetického pole, na známější tvar:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J}_{ext} \quad (13.2.2_2)$$

Touto úpravou jsme tedy získali 1. Maxwellovu rovnici, bez posuvného proudu. Při samotném výpočtu je tento vztah (13.2.1\_4) hůře použitelný než vztah (13.2.2\_1), proto je uveden jen pro názornost.

Materiálové parametry, jakož i okrajové podmínky, byly voleny stejně jako v programu *B\_koleje\_cas*, krom zdrojové funkce proudové hustoty, která bude v tomto případě zvolená konstanta. Pro tento program byla pro názornost doplněna geometrie řešené oblasti o plastovou konstrukci hlavně. Vyobrazení posléze počítané geometrie problému je na obrázku O.13.2.2.1. Jelikož nás nezajímá rozložení proudové hustoty uvnitř kolejnice a z naměřených hodnot víme, že kolejnicí protéká proud dané velikosti, můžeme dosadit homogenně rozloženou proudovou hustotu, tekoucí skrze celou kolejnici. Správně se měla dosazovat vyšší



proudová hustota do menší plochy řezu u povrchu kolejnice. Vždy by ovšem hodnota takto zvolené proudové hustoty měla plně korespondovat s naměřenými hodnotami proudu.

Jako první byla dosazena proudová hustota, odpovídající proudu v maximální hodnotě. Stejně jako v případě předchozího programu byla dosazena kladná proudová hustota do levé kolejnice a záporná do pravé kolejnice. Vypočtené rozložení pole je zobrazené na obrázku *O.13.2.2.2*. Jelikož vypočtená hodnota ve středu mezi kolejnicemi vychází 2 T, což řádově koresponduje s hodnotou vypočtenou pro zanedbatelně tenký vodič, dle 8.1\_2, byl program *B\_koleje\_rez\_z\_cadu* uznán za objektivní zdroj pro získání velikosti a rozložení vektoru magnetické indukce v oblasti.

Dále byl do doposud prázdného prostoru mezi kolejnicemi vložen prvek s parametry vodivosti a permeability mědi – dle (13.2.1\_4) a (13.2.1\_5) a byl tedy simulován projektil.

Pro následný výpočet síly je ovšem důležitý časový vývoj pole, který tento program nenabízí. Proto byl výpočet opakován pro různé velikosti konstantního proudu, které byly v časovém průběhu naměřeny. Pole bylo počítáno pro 10 hodnot proudu, které odpovídají daným časům. Konkrétně jsou rozepsaná data snímaných časů, buzených proudových hustot a vypočtených hodnot velikosti vektoru magnetické indukce ve středu projektilu v tabulce *Tab\_1*.

Hodnota magnetické indukce pak nebyla sledována jako jedna hodnota ve středu, ale byla odečítána matice, která znázorňovala rozložení magnetické indukce v oblasti celého projektilu. Odečítána byla Y-složka vektoru magnetické indukce, neboť ta se podílí na urychlování. Při odečítání dat bylo využito jedné ze symetrií problému a byla odečítána pouze data v jedné submatici. Z těch pak byla dopočítána ostatní data matice. Konkrétně symetrii zobrazuje obrázek *O.13.2.2.3*. Byly tedy odečítány pouze hodnoty v bílém poli.

Z těchto hodnot byl pak odečten časový vývoj, který je tedy prozatím v pouhých deseti krocích, neboť dle tabulky *Tab\_1* bylo odečteno rozložení magnetického pole pro 10 časových hodnot proudové hustoty, se kterými bylo dále pracováno v programech, počítajících mechanickou problematiku úlohy.

### 13.2.3 Modelování stacionárního magnetického pole projektilu

Jelikož projektil je činná část zařízení, kterou protéká celkový proud, musí také vytvářet nezanedbatelně velké magnetické pole a to bylo také modelováno. Bylo tak činěno v řezu, kdy byla v programu *B\_pole\_projektilu* dosazována do zakreslené příčky homogenně rozložená proudová hustota. Geometrie, včetně vyznačené činné oblasti, je na obrázku *O.13.2.3.1*. Do této oblasti tedy byla dosazena homogenně rozložená proudová hustota pro namodelovaný proud v čase maxima, která byla dosazena jako:

$$J_{\text{ext}} = 8.1 \cdot 10^9 \text{ (A}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (13.2.3_1)$$

Následně tedy byla v okolní oblasti vypočtena hodnota vektoru magnetické indukce, která je jako modul znázorněna na obrázku *O.13.2.3.2*. Na první pohled zarazí značně veliká hodnota magnetické indukce v okolí, která lokálně dosahuje hodnot až 6.5 T, v oblasti projektilu ovšem okolo 5.5 T v maximální hodnotě. Pozoruhodné je rozložení pole, kdy uprostřed projektilu je místo s prakticky nulovou velikostí magnetické indukce a na krajích hodnota šplhá do

maximálních hodnot. Jelikož se ovšem pole kolejnic chová velmi obdobně a podobné rozložení s klesající hodnotou magnetické indukce se předpokládá, patrně bude model v pořádku. Pro průběh modulu vektoru magnetické indukce byl sestaven graf, který snímá rozložení pole v oblasti před projektilem (levá část obrázku *O.13.2.3.2*), v jeho útrokách, a za projektilem (pravá část obrázku *O.13.2.3.2*). Tento graf je zobrazen na obrázku *O.13.2.3.3*.

Pro urychlování nás ovšem zajímá pouze svislá – tj.  $Y$  – složka vektoru. Ve výsledku výpočetního solveru jsme se tedy zaměřili pouze na  $Y$  složku vektoru magnetické indukce, kdy výsledek rozložení je zobrazen na obrázku *O.13.2.3.4*. Zajímavá je pochopitelně změna znaménka složky v místě středu projektilu. Pro detailnější vyhodnocení byl vytvořen graf průběhu  $Y$  složky v závislosti na vzdálenosti, při stejných rozměrech hranice jako v případě grafu na obrázku *O.13.2.3.3*. Tento graf rozložení  $Y$  složky se vzdáleností je tedy vyobrazen na obrázku *O.13.2.3.5*. S vedoucím práce byl tento výsledek konzultován a byl přijat závěr, že vzhledem k neutrální povaze  $Y$  složky pole projektilu se samotné pole projektilu na urychlování nebude podílet. Byl ovšem pro zajímavost počítán další případ, kdy spolu interagují magnetická pole kolejnic a projektilu. Nejprve ovšem bude nutné modelovat samotné proudové pole projektilu.

### 13.2.4 Modelování stacionárního proudového pole projektilu

Modelování proudové hustoty má pro úlohu také značný přínos, neboť pokud budeme znát v daných bodech prostoru projektilu velikosti vektorů magnetické indukce a proudové hustoty, budeme dle (8.1\_1) schopni dopočítat sílu, tlačící projektil kupředu.

Proudové pole bude počítáno také pro ustálený stav, neboť výpočet přechodného děje solver Agros 2D v proudovém poli nenabízí. Jelikož velikost proudu z naměřených hodnot známe, bude pro model podstatné zejména rozdělení proudové hustoty v projektilu. Patrně tedy postačí výpočet pole pro jeden čas, který nám poskytne dostatečný obrázek o rozložení.

Proudové pole je v solveru počítáno dle následující rovnice:

$$-\operatorname{div}(\sigma \operatorname{grad} \varphi) = 0 \quad (13.2.4_1)$$

Ta si lze pomoci jednoduchých úprav představit jako:

$$\operatorname{div} \vec{J} = 0 \quad (13.2.4_2)$$

To je jedna z rovnic proudového pole a je interpretovatelná jako Kirchhoffův zákon celkového proudu. Dle této rovnice budou tedy počítány veškeré dále uvedené programy pro výpočet rozložení proudového pole. Jako první byl sepsán program *J\_projektíl\_sam*.

V tomto programu je počítáno pole samotného projektilu, jehož rozměry jsou v souladu s obrázkem *O.15.3.1.2* a zakreslená geometrie v programu Agros 2D je na obrázku *O.13.2.4.1*. Z materiálových hodnot je nutné jako vstup zadat pouze vodivosti daných prvků, které byly voleny pro měď v souladu s (13.2.1\_4) a (13.2.1\_5). Dále je nutné na některých hranách zvolit pevné napětí, či zvolenou konstantní proudovou hustotu. Pro úspěšné řešení je opět nutné zvolit hledanou oblast, jejíž hranice má pevnou hodnotu okrajové podmínky. Tou volíme napětí rovné 0 V na hranici dostatečně vzdálené od řešeného objektu. V oblasti projektilu ovšem volíme konstantní homogenní proudovou hustotu, tekoucí jeho bočními hranami. Pozdější modely ukázaly jiné než homogenní rozložení proudové hustoty v místě vtoku proudu

do projektilu, ovšem pro přiblížení zadáme proudovou hustotu konstantní. Proudová hustota je dosazována jako kladná hodnota do levé kontaktní hrany projektilu a záporná do pravé kontaktní hrany. Aktivní hrany jsou znázorněny na obrázku *O.13.2.4.1* červenou a žlutou barvou. Konkrétní velikost proudové hustoty byla zadána jako velikost proudu v čase maxima změřeného proudu, dělená boční plochou, kterou proud do projektilu přitéká. Zadaná velikost je:

$$J = 5.7 \cdot 10^8 \text{ (A}\cdot\text{m}^{-2}) \text{ - pravá část projektilu} \quad (13.2.4\_3)$$

$$J = -5.7 \cdot 10^8 \text{ (A}\cdot\text{m}^{-2}) \text{ - levá část projektilu} \quad (13.2.4\_4)$$

Vypočtené pole v prostorovém zobrazení je vidět na obrázku *O.13.2.4.2*. Nutno upozornit, že jde pouze o prostorové zobrazení, ale samotný výpočet probíhal pouze jako plošný problém, dle obrázku *O.13.2.4.1*. Z *O.13.2.4.2* je patrné, že největší proudové hustoty je dosahováno v místech ohybu projektilu. Dle zhotoveného modelu až hodnot  $10^{10} \text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$ . Byl proto přijat zevrubný předpoklad, že největší síla bude působit právě na kraje projektilů v oblasti ohybu, neboť v těchto oblastech u kolejnic je také největší hodnota magnetické indukce. Po tomto zjištění byly spočteny Joulovy ztráty v místě čela projektilu, což program nabízí jako jednu z možností výstupu. Rozložení ztrát v místě ohybu je vidět na obrázku *O.13.2.4.3*. Místo ohybu bude tedy patrně nejvíce namáhané místo projektilu, neboť zde dochází díky vysoké proudové hustotě k největšímu silovému působení i k největšímu lokálnímu ohřevu tělesa.

Dále bylo tedy zkoumáno rozložení proudové hustoty v čele projektilu. Nejprve proběhlo vyhodnocení rozložení proudové hustoty v polovině projektilu. Zde je rozložení zcela homogenní, což dokládá obrázek *O.13.2.4.4*, na kterém je zobrazen graf průběhu proudové hustoty v závislosti na šířce projektilu. Pro stacionární problém lze tedy považovat rozložení proudové hustoty v projektilu za konstantu. Tato hodnota vypočtená programem Agros 2D značně koresponduje s hodnotou proudové hustoty vypočtenou analyticky pomocí změřeného proudu, přepočteného na rozměr čela projektilu. Konkrétně:

$$\text{Dle Agros 2D : } 7.9 \cdot 10^9 \text{ (A}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (13.2.4\_5)$$

$$\text{Dle analytického výpočtu: } 8.1 \cdot 10^9 \text{ (A}\cdot\text{m}^{-2}) \quad (13.2.4\_6)$$

Jelikož model pole ukázal homogenní rozložení, lze tedy patrně místo funkce rozložení proudové hustoty napříč projektilem použít analyticky spočtenou konstantu. Výpočet platí ovšem pro stacionární problematiku. Model časově proměnného pole ovšem není k dispozici.

Dále bylo modelováno proudové pole při zasazení projektilu do kolejnic a to v programu *J\_projektíl\_v\_kolejci*. Projektil byl ponechán se stejnými rozměry, jen k němu byly dodány kolejnice, které projektil obklopují. Proudová hustota již nevstupovala do bočních hran projektilu, ale do hran kolejnic. To je vidět z obrázku *O.13.2.4.5*, kde je zobrazená celá geometrie, dle které je pole počítáno. Materiálové konstanty jsou dosazené stejné jako v ostatních případech a jako zdroj je dosazená jiná proudová hustota, která je získána jako hodnota namodelovaného proudu v maximu, podělená vstupní plochou kolejnice. Konkrétně:

$$J = 4 \cdot 10^8 \text{ (A}\cdot\text{m}^{-2}) \text{ - pravá kolejnice} \quad (13.2.4\_7)$$

$$J = -4 \cdot 10^8 \text{ (A}\cdot\text{m}^{-2}) \text{ - levá kolejnice} \quad (13.2.4\_8)$$

Výstup programu v prostorovém zobrazení je vidět na obrázku *O.13.2.4.6*, kde je v objemovém zobrazení zaznamenané rozložení proudové hustoty. Pokud se podíváme na graf rozložení proudové hustoty ve středu čela projektilu, dojdeme k podobnému – tedy homogennímu rozložení, jako v případě předchozího programu *J\_projektíl\_sam*. Pokud se zaměříme pouze na X-složku vektoru proudové hustoty, její rozložení není sice dokonale homogenní, ale při pohledu na velikost maximální a minimální hodnoty – tedy v krajích má proudová hustota značně malý rozptyl. Toto rozložení je patrné na obrázku *O.13.2.4.7*. Lze tedy prohlásit, že X složka proudové hustoty dostatečně přesně koresponduje s modulem proudové hustoty a její rozložení lze zanedbat. Opět se ale jedná o ustálený stav systému a je otázkou, jestli toto tvrzení bude platit i pro reálné – dynamické – chování systému, ale patrně nebude, neboť se při rychlých změnách proudu zajisté projeví skinefekt, jak potvrdil program výpočtu magnetického pole *B\_koleje\_cas*.

Je zde ovšem patrná změna amplitudy, neboť v případě aktuálního programu *J\_projektíl\_v\_koleji* je hodnota proudové hustoty  $8.1 \cdot 10^9$  (A\*m<sup>-2</sup>), což plně koresponduje s analytickým výpočtem (*13.2.4\_6*). Z tohoto programu pak tedy byla odebírána data pro další výpočty mechanických modelů.

Například při určování ztrátové síly bylo vhodné znát rozložení proudové hustoty v rameni – u kraje projektilu. Takové rozložení proudové hustoty je zobrazené na obrázku *O.13.2.4.8* a jedná se o znázornění proudové hustoty, vtékající do projektilu – respektive jsme s to určit, jakou částí ramene projektilu teče jaký proud. Zajímavé je, že maximum vtéká krajními oblastmi a především pak čelní oblastí. Samozřejmě to opět platí pro ideální případ, kdy předpokládáme homogenní přítlak projektilu ke kolejnicím, bez přechodového odporu. Případně tato situace bude platit i v případě homogenního přechodového odporu. Ovšem dle kapitoly 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů je měření špatně opakovatelné právě z důvodů nestejného ohýbání projektilů, či jejich umístění mezi kolejnicemi. Spočtený případ tedy bude pravděpodobně realitě značně vzdálen.

Z výstupu – i když ideálního případu lze ovšem usoudit několik závěrů. Například, že oblast přechodu kolejnice a projektilu bude opravdu značně namáhaná oblast. Konkrétní rozložení proudové hustoty, a tedy i namáhání jednotlivých částí bude záviset na aktuálním projektilu, jeho rozměrech, nedokonalostech a přechodovém odporu. Obecně lze ovšem konstatovat, že místo první a poslední části přítlaku projektilu budou místa s největší proudovou hustotou, tedy i s největším tepelným a obecně ztrátovým působením.

Dále jde z vyhotovených modelů usoudit, že místo ohybu projektilu bude nejnamáhanější místo, co se týče ztrát a tepelného působení. Tuto situaci ještě zhorší skutečnost, že rozložení proudové hustoty v místě ohybu je patrně největší z celé oblasti přechodu. Vhodné by tedy bylo oddálení ohybu projektilu od místa kontaktu, či částečná izolace oblasti s ohybem s cílem snížení lokálních tepelných ztrát průtokem proudu přímo z kolejnice, či její blízké návaznosti.

### 13.2.5 Modelování stacionárního magnetického pole projektilu a kolejnic

Po objevení značně nehomogenního pole v oblasti projektilu, kdy Y složka vektoru magnetické indukce, v programu *B\_pole\_projektilu*, vykazuje kladnou a zápornou část, vyvstala myšlenka modelování interakce magnetického pole kolejnic a projektilu. Proto byl sepsán program *Bpole\_projektilu\_a\_koleji*, ve kterém je tato interakce řešena. Jedná se o program, který řeší magnetické pole, takže parametry prvků výpočtu byly s ohledem na materiály voleny ve shodě s minulými programy. Při modelování interakce se ovšem jedná o třírozměrný problém, neboť pole projektilu a kolejnice jsou vzájemně otočeny o 90° a nelze je tedy modelovat jako např. řez v jedné rovině, neboť by vždy jedno z polí (projektilu, nebo kolejnic) muselo vystupovat z vyšetřované plochy. Zvolený solver pro výpočet polí ovšem nabízí možnost řešení pouze dvoudimenzionální problematiky, což bylo doposud ideální např. pro řezy projektilem, či kolejnicemi. Pro tento druh problému je ovšem vytvoření programu nesnadné a nelze problém řešit přímo.

Nápad ale vyvstal při prohlídce vlastností materiálů při výpočtu magnetického pole. Objekty vytvářející magnetické pole je totiž možné zadávat pomocí proudové hustoty, nebo permanentního magnetu. Vyvstal tedy nápad utvořit takové uspořádání, ve kterém bude patrný pohled na svislý řez projektilem a magnetické pole kolejnic bude simulováno permanentním magnetem.

Geometrie je volená v příčném řezu projektilu, stejně jako v programu *B\_pole\_projektilu*, ovšem nad projektilem je umístěn dostatečně dlouhý objekt, jenž je zdrojem magnetického pole. Tento objekt ovšem nepřesahuje projektil, neboť se předpokládá, že aktivní plocha kolejnic – tedy zdroje magnetického pole – končí místem, ve kterém se předává proud do projektilu. Dále je tento objekt přidán do spodní části geometrie – tj. pod projektil, abychom při odečtu mohli využít triku se symetrií problému.

Při samotném výpočtu bylo postupováno tak, že byla nastavena hodnota magnetické indukce permanentních magnetů taková, aby v Y souřadnici aktuálního vyšetřovacího bodu korespondovala s programem *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*. Takovéto rozložení Y složky vektoru magnetické indukce, pro čas 78  $\mu$ s, které koresponduje s velikostí magnetické indukce ve středu, dle programu *B\_pole\_projektilu*, je vyobrazeno na obrázku *O.13.2.5.1*. Když bylo takovéto pole nalezeno, byla do projektilu dosazena proudová hustota, příslušící danému času. Finální rozložení magnetického pole, pro čas 78  $\mu$ s, je na obrázku *O.13.2.5.2*. Z tohoto programu pak byly opět odečítány body, reprezentující indukci v daných místech. Spíše než o absolutní velikost pole jde ovšem o pochopení principů interakce. Při urychlování tedy patrně dojde k narušení magnetické neutrální osy projektilu. Pole kolejnic pak patrně způsobí rozvážení sil, které má za důsledek převahy síly jednoho znaménka.

Velikost rozvážení a “vytlačení” magnetické neutrály z projektilu již závisí na magnetickém poli kolejnic a projektil by ji tak neměl ovlivňovat. Proto po konzultaci s vedoucím bylo usouzeno započítávat pouze samotné pole kolejnic, neboť to je hybatelem síly. Výstupní program rozložení pole tedy bude program *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*.

### 13.3 Modelování mechanické části urychlovače

Cílem mechanického matematického modelu je snaha stanovit ústovou rychlost střely, o dané hmotnosti, případně geometrii, přičemž vstupní hodnota bude proud, vytékající z kondenzátorové baterie. Tento proud byl nejprve odhadován a po odměření série měření a vyhotovení matematického modelu elektrické části byl jako vstup dosazen proud, který byl získán jako výstup z programu *vypocet\_L\_R\_obvodu 25*, po dosazení příslušných prvků obvodu a dosazení počátečního napětí 7 kV. Před finální podobou, matematického modelu, byla vytvořená série podprogramů, která měla vést k vysněnému cíli. Všechny programy ovšem budou vycházet z Lorentzovy rovnice síly, která je uvedena v jednom ze svých tvarů jako vzorec (8.1\_1). V kapitole 8. Popis a princip obecného kolejnicového urychlovače je tento vztah uveden a je částečně popsán. Princip silového působení tkví ve vzájemné interakci elektrického a magnetického pole. Na vodič protékáný proudem působí v magnetickém poli síla daná právě vztahem (8.1\_1). Ten však platí obecně, ale při zjednodušení uspořádání, kdy je možné integrovat proudovou hustotu a počítat s proudem, tekoucím daným směrem, jakož i homogenním magnetickým polem, se lze zbavit trojného integrálu i vektorového součinu a získáme tvar:

$$F = \int_{l=0}^{l=L} I * B * dl \quad (13.3_1)$$

Při přímé dráze tekoucího proudu v homogenním magnetickém poli se pak lze rovněž zbavit i integrálu, neboť veličiny se v integračních limitech nemění. Lze tedy psát:

$$F = I * B * l \quad (13.3_2)$$

Což je jeden z možných tvarů vyjádření Lorentzova zákona síly. Pro odhad výpočtu působící síly je ale při zjednodušení uspořádání dostatečný.

Zde uvedené mechanické programy mají za výstup ovšem ústovou rychlost. Dle druhého Newtonova zákona, tedy ze síly určené pomocí Lorentzova zákona síly, v jakémkoliv tvaru, a znalosti hmotnosti urychlovaného tělesa, budeme s to určit výslednou rychlost, která vznikne jako následek působící síly. Konkrétní vztah je uveden:

$$\vec{v} = \frac{1}{m} * \int_{t_0}^{t_{kon}} \vec{F}(t) * dt \quad (13.3_3)$$

Čili celý mechanický model se bude zakládat na rovnicích (13.3\_1) a (13.3\_3), které budou pro výpočty různě modifikovány. Nutno ovšem podotknout, že oba uvedené vztahy jsou v bezztrátové formě. Rychlost vypočtená z těchto vztahů bude tedy platit pro ideální bezztrátový systém. Pro ztrátový systém bude nutné rovnici (13.3\_3) doplnit o ztrátovou sílu a aerodynamické ztráty. Ztrátová rovnice pak bude mít tvar:

$$\vec{v} - \gamma \vec{v}^2 = \frac{1}{m} * (\int_{t_0}^{t_{kon}} \vec{F}_h(t) * dt - \int_{t_0}^{t_{kon}} \vec{F}_z(t) * dt) \quad (13.3_4)$$

Určení ztrát systému, o kterém bude řeč později, je ovšem značně obtížná věc, i z důvodů nesnadného opakování měření na stávajícím zařízení, popsaného v kapitole 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů. Většina psaných programů bude ovšem zpočátku psána jako teoretická bezztrátová varianta.

### 13.3.1 Přiblížení mechanického modelu

Pro počáteční odhady chování systému byl vytvořen odhad matematického modelu, který je k práci přiložen pod názvem: *Mech\_model\_1*. Jeho výpočet síly je založený na zjednodušeném vztahu, konkrétně (13.3\_2), kde je počítáno s homogenním magnetickým polem a konstantním tokem proudu nekonečně tenkého vodiče o konečné délce  $l$ .

Jako vstup programu slouží proud vypočtený modelem elektrické části, uvedený jako vztah (13.1.1\_15). Tento proud je navzorkován v daných časech od 0 do 2 ms. Dále je vypočtena magnetická indukce pro konkrétní hodnotu proudu v jednom čase. Jelikož se jedná o přiblížení, bylo počítáno s nekonečnými a nekonečně tenkými vodiči, kterými protéká zvolený proud. Vztah pro výpočet magnetické indukce je uvedený jako (8.1\_2) a popsán zjednodušením, při kterém byl výpočet prováděn, je uvedeno v kapitole 8. Popis a princip obecného kolejnicového urychlovače. Za poloměr je volen rozměr 5 mm, neboť ten ukazuje do středu mezi kolejnicemi. Výsledné pole je pak voleno jako homogenní, nad celou oblastí mezi kolejnicemi o velikosti udané vzorcem (8.1\_2), kdy za  $r$  je dosazeno zmíněných 5 mm. Pole je společně s proudem proměnné v čase a v místě amplitudy dosahuje magnetické indukce 6 T. Vzhledem k velikosti protékaného proudu byla tato hodnota přijatá pro odhad přípustná.

Pro jeden časový okamžik tak získáváme dvojici proud a magnetická indukce. Podle Lorentzovy síly ve tvaru (13.3\_2) je pak za předpokladu kolmosti proudové hustoty a vektoru magnetické indukce v součinu s délkovým elementem charakterizující projektil počítána síla, působící na projektil jako prostý součin, přičemž za délkový element je dosazena šířka projektilu – tedy rozměr protékaný proudem.

Tak se děje pro každý časový okamžik a získáme tedy časové působení síly na projektil, přijaté při řadě zmíněných zjednodušení. Nebyla tedy započítávána třecí, aerodynamická ani jiná ztrátová síla, působící na projektil v průběhu urychlování. Síla ani vektor magnetické indukce nejsou označovány jako vektory, neboť se s nimi v tomto případě počítá v absolutních hodnotách a jejich směr je zadán exaktně. Proto je pro výpočet podstatná pouze velikost.

Ze znalosti velikosti síly v daných časech je pak pro každý časový okamžik počítána velikost rychlosti, která je prostě numericky integrována lichoběžníkovou metodou, jako:

$$\Delta v_i = \frac{F_i}{m} * \left( \frac{1}{2} t_{i+1} - \frac{1}{2} t_{i-1} \right) \quad (13.3.1_1)$$

Aby byly vidět příspěvky každého integračního kroku, jsou kousky vždy sčítány. Výsledný průběh rychlosti, v průběhu působení síly, je pak vidět na obrázku O.13.3.1.1. Z obrázku je patrná rychlost, na kterou byl projektil urychlen a i z vypočteného výstupu programu je stanovena rychlost  $589 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Při experimentu, uvedeném ve zdroji [17] bylo dosahováno ústřední rychlosti střely okolo  $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  s obdobnými vstupními parametry. V tomto experimentu byl zkoumán vliv přítláčné síly projektilu na kolejnice, který se v přibližujícím modelu zanedbával. Proto byl po konzultaci s vedoucím tento model uznán za vhodné zevrubné přiblížení, které je pravděpodobně v souladu s experimentem.

### 13.3.2 Pokročilejší mechanický model

Po vytvoření přiblížení k finálnímu matematickému modelu ještě zcela nedozrál čas k sepsání finální podoby modelu. Proto bylo zapotřebí vytvoření dalšího modelu, který by měl zohledňovat jisté rozložení proudového a magnetického pole, působících na projektil. Ideálně tak, aby bylo možné posoudit i dynamické působení v průběhu letu projektilu hlavní. Jelikož byl ovšem sepsán program s názvem: *Mech\_model\_1*, byl stanoven předpoklad, že výstupy následujících programů by se od výše zmíněného programu neměly řádově lišit. Jako další vývojový krok byl tedy sepsán program *Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu*. Ten je již předpřipraven k dalším krokům, jako například zohlednění rozložení proudového a magnetického pole. V tomto programu je opět jako vstup proudový pulz, který je modelován v elektrické části modelu a je uveden jako vzorec (13.1.1\_15). Tento pulz je dále navzorkován do diskrétní podoby. Magnetická indukce je prozatím spočtena stejným odhadovým způsobem, jako v případě programu *Mech\_model\_1*. Abychom zohlednili rozložení proudového a magnetického pole, bude výhodnější zacházet s vektorem proudové hustoty a vektorem magnetické indukce, které budou prozatím stanoveny exaktně. Budou ovšem již zavedeny jako vektory a nikoliv jako skaláry s dohodnutým směrem působení. Čili pro působení síly, vyvolané těmito poli, bude výhodné používat vztah (8.1\_1).

Následně byl volen numerický postup řešení, a tak byla snaha provádět výpočet v dílčích elementech a výslednou sílu určit jako sumu sil působících na elementy. Dále bylo vhodné zavedení určitého zjednodušení, neboť všechny vlivy postihnout nelze a o hodně komplikovanější výpočet by mohl přivést jen o málo přesnější výsledky.

Výpočetní oblast byla v souladu se zjednodušením volena jako rovina, která příčně rozřízla projektil. Normála vedená z této vyšetřovací roviny byla tedy ve směru toku vektoru proudové hustoty. Jako prozatímní zjednodušení bylo přijato, že řez v jakémkoliv délce bude mít stejné rozložení proudového i magnetického pole. Tak tomu ovšem v reálném případě není a pro detailnější zohlednění polí by bylo vhodné udělat trojrozměrný model rozložení obou polí. Vyšetřovaná oblast by tak nebyla matice, ale tenzor třetího řádu. Na druhou stranu se nepředpokládá kritická změna parametrů vektoru magnetické indukce po příčné délce, vzhledem ke kolejnicím, neboť z podobného případu – rozložení magnetického pole mezi dvěma vodiči kruhového průřezu dle obrázku *O.8.1* – vyplývá, že v oblasti v blízkosti vodiče A bude silná magnetická indukce od vodiče A a slabá od vodiče B. V poloviční oblasti mezi vodiči bude indukce slabší od vodiče A i od vodiče B, avšak v součtu bude velikost podobná jako v blízkosti vodiče A. V blízkosti vodiče B bude problém indukce stejný jako v blízkosti vodiče A.

Na základě této úvahy byl přijat předpoklad, že magnetické pole se v průběhu příčné délky, vzhledem ke kolejnicím, zásadně měnit nebude, a tak byl pro program stanovován pouze jeden řez. Vztah pro výpočet síly se tak zjednodušil o prostorovou závislost a byl počítán pouze plošný problém – tedy příčný řez vzhledem k aktivní části projektilu.

Řez projektilem byl dále rozdělen na 10 vodorovných a 10 svislých podoblastí. Každé podoblasti byl pak přiřazen jeden vektor proudové hustoty, jeden vektor magnetické indukce a plocha elementu. Byly tak vytvořeny matice vektorů  $J$ ,  $B$ ,  $\Delta S$ , které pro tento program, nezahrnující rozložení pole, vypadají:



$$\mathbb{J} = \begin{pmatrix} (0, J, 0) & \cdots & (0, J, 0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (0, J, 0) & \cdots & (0, J, 0) \end{pmatrix} \quad (13.3.2\_1)$$

$$\mathbb{B} = \begin{pmatrix} (0, 0, B) & \cdots & (0, 0, B) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (0, 0, B) & \cdots & (0, 0, B) \end{pmatrix} \quad (13.3.2\_2)$$

$$\mathbb{S} = \begin{pmatrix} \left(\frac{S}{100}, \frac{S}{100}, \frac{S}{100}\right) & \cdots & \left(\frac{S}{100}, \frac{S}{100}, \frac{S}{100}\right) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \left(\frac{S}{100}, \frac{S}{100}, \frac{S}{100}\right) & \cdots & \left(\frac{S}{100}, \frac{S}{100}, \frac{S}{100}\right) \end{pmatrix} \quad (13.3.2\_3)$$

Kde  $J$  je proudová hustota vypočtená z proudu v daném čase a plochy řezu projektilem.

$B$  je hodnota magnetické indukce, vypočtená ve středu mezi kolejnicemi, při započítání zanedbatelně tenkého vodiče jako zdroje a  $S$  je celková plocha řezu.

Tento soubor matic je počítaný pro každý časový okamžik  $t$  při časovém vzorkování.

Následně je proveden výpočet matice síly, která udává sílu působící na daný element řezu v daném čase.

Výpočet probíhá:

$$\vec{f}_{i,j} = (\mathbb{J}_{i,j} \times \mathbb{B}_{i,j}) * \mathbb{S}_{i,j} * l \quad (13.3.2\_4)$$

Následně je vytvořena matice síly, která obsahuje elementární vektory síly, které působí na řezový element. V případě výše uvedeného zjednodušení, v podobě zanedbání rozložení proudového a magnetického pole, budou matice  $\mathbb{J}$  a  $\mathbb{B}$  obsahovat vektory navzájem kolmé. Tedy budou existovat pouze složky  $J_y$  a  $B_z$ . Potom uvedený vektorový součin zajistí, že síla působící na element bude mít pouze  $X$  složku, tedy  $f_x$ . Matice vektorů výsledné síly, tedy pro program *Rychlost\_pomoci\_maticesF\_pulz\_z\_obvodu*, bude vypadat:

$$\mathbb{f} = \begin{pmatrix} (f, 0, 0) & \cdots & (f, 0, 0) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ (f, 0, 0) & \cdots & (f, 0, 0) \end{pmatrix} \quad (13.3.2\_5)$$

V dalším kroku výpočtu, jsou z vektorů vybrány  $X$  složky síly, neboť ty se podílí na urychlování do požadovaného směru. Matice tedy již neobsahuje vektory, ale pouze jednotlivé prvky, znázorňující sílu na daný element. Matice síly tedy získá tvar:

$$\mathbb{F} = \begin{pmatrix} f & \cdots & f \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f & \cdots & f \end{pmatrix} \quad (13.3.2\_6)$$

Výsledná síla v daném čase  $t$  působící na celý projektil je pak dána součtem všech prvků matice, tedy:

$$F[t] = \sum_{i=0}^{10} \sum_{j=0}^{10} \mathbb{F}_{i,j} \quad (13.3.2\_7)$$

Tato síla je dále použita v diferenční rovnici, vyjadřující rychlost, kterou lze pomocí lichoběžníkového pravidla rovnou integrovat, jako je uvedeno ve vztahu (13.3.1\_1).

Pokud byl vstupní hodnotou navzorkovaný proudový pulz dle *O.13.2.3*, rozměry projektilu dle obrázku *O.15.3.1.2* a hmotnost zadána, jako 2.3 g, vystupuje z programu rychlost velmi podobná, jako v případě programu *Mech\_model\_1*. Konkrétně  $589 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Byl tedy přijat předpoklad úspěšné funkčnosti programu a tento program bude s radostí využit v následujících výpočtech. Tato rychlost ovšem zajisté nebude konečná, neboť zatím není známa exaktní velikost magnetického pole. Jen je pro funkčnost programu příhodné, že dosahuje obdobných výstupů, jako program *Mech\_model\_1*, se stejným vstupem.

To ovšem není vše, co nám program *Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu* nabídne. Další částí výstupu je výpočet dráhy v průběhu urychlování. Ta je získána jako časový integrál z rychlosti. Konkrétně je výpočet dráhy zapsán dle následujícího vztahu:

$$l = \int_{t_0}^{t_{kon}} v(t) * dt \quad (13.3.2\_8)$$

Samotný výpočet je pak prováděn jako numerická integrace lichoběžníkovou metodou, obdobně jako ve vztahu (13.3.1\_1). Další přidaná hodnota je v možnosti detekce vzdálenosti. Jelikož na stávajícím zařízení jsme omezeni délkou hlavně 1 m, program po překročení urychlované dráhy 1 m "položí" křivku na nulovou hodnotu. Výsledná rychlost ale již zpětně dopočítávána není. To je z důvodů, které vyvstaly při experimentálním ověření a jsou popsány na následujících řádcích. Krom dráhy je ve výstupu programu také čas, ve kterém dojde k výletu projektilu z ústí hlavně.

Jelikož se ale na reálném zařízení vyskytují ztráty, prozatím se projektil nepovedlo urychlit ani na náznak rychlosti a s ní spojené dráhy tohoto teoretického modelu. Mechanické hmoty se totiž touto cestou nedokážou urychlit z klidové rychlosti na rychlost spočtenou – tj. cca  $600 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  – za cca 2 ms, což je doba trvání pulzu. O tomto jevu je detailněji pojednáno v podkapitole 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů a následně v kapitole 15.4 Měření průběhu urychlování.

Když byl po sepsání tohoto programu znám výstup z programu *B\_koleje\_rez\_z\_cadu* počítající rozložení magnetického pole mezi kolejemi, vyvstala možnost vyzkoušet změnu velikosti magnetického pole. Tak bylo učiněno prostým vynásobením známého časového průběhu magnetického pole korekční konstantou, která hodnotu 6 T v místě maxima, vypočtených pro

odhad vstupu, snížila na 2.5 T, které byly uprostřed kolejnic simulovány pomocí softwaru Agros 2D, v programu B\_koleje\_rez\_z\_cadu. Korekční konstantou byl vynásoben každý navzorkovaný prvek z průběhu magnetické indukce. Pro toto zohlednění byl sepsán program *Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu\_jine\_B*. V tomto případě úpravy magnetické indukce dosahovala teoretická ústřední rychlost hodnoty 205 m\*s<sup>-1</sup>. Hodnota magnetické indukce byla opět dosazována jako jedna celistvá hodnota a na rozložení magnetického ani proudového pole nebyl zatím brán zřetel.

### 13.3.3 Mechanický model zohledňující magnetické pole kolejnic

Když byl zdá se úspěšně vytvořen program, který započítává rozložení pole v dvourozměrném případě, byla snaha dosáhnout další mety a zaexperimentovat s rozložením proudového a magnetického pole v třírozměrném prostoru – tedy v projektilu. Proto byl sepsán program *Soucin\_jb\_hezky*, ve kterém je trojrozměrný případ rozložení zahrnut.

Tento program již spolupracuje s programy B\_koleje\_rez\_z\_cadu a J\_projekttil\_v\_koleji. Z programu byla odečítána magnetická indukce rozložená podélně s projektilem, přičemž byly odečítány pouze hodnoty v bílém poli dle obrázku O.13.2.2.3. Ostatní hodnoty – ve žlutém poli, byly díky symetrii problému dopočteny. Jako první odhad byl počítán modul vektoru magnetické indukce. Takto byla odečtená matice rozložení magnetické indukce podél projektilu. Jelikož v době psaní programu nebylo známé příčné rozložení magnetické indukce, byla velikost magnetické indukce v příčném rozložení považována za konstantní a to o velikosti podélné indukce v daném místě.

Dále je pro výpočet síly nutné znát proudovou hustotu, případně její rozložení. Kvůli velikosti i rozložení byl sepsán program J\_projekttil\_v\_koleji, který ukázal, že rozložení proudové hustoty v čele projektilu je prakticky homogenní, jak dokládá obrázek O.13.2.4.6 a O.13.2.4.7. Proto bylo rozložení proudové hustoty počítáno analyticky a ve všech částech projektilu byla dosazována stejná hodnota. Také bylo v modelu ukázáno, že proudová hustota v čele projektilu má prakticky jeden směr, a proto můžeme zanedbat vektorovou povahu problému a analyticky vypočtenou proudovou hustotu prohlásit za X složku vektoru. Rozložení proudové hustoty je ovšem příčná záležitost na rozdíl od magnetické indukce, která je dosazována podélně. V příčném řezu byla tedy dosazována konstantní proudová hustota.

Celou situaci dokresluje obrázek O.13.3.3.1, kde je patrná diskretizace oblasti při výpočtu. Dále tedy ve sledovaných bodech probíhá výpočet síly, dle vztahu:

$$F_{ele} = \sum_{j=1}^{j=4} \sum_{i=1}^{i=7} J_{ij} * B_{ij} * \Delta V \quad (13.3.3\_1)$$

Vztah (13.3.3\_1) popisuje tedy velikost Lorentzovy síly na jeden daný element projektilu. Těch je celkem 196, neboť projektil je myšlenkově dělený na 7 podélných a 4 příčné řezy, kdy jeden bod podélného řezu obsahuje 4 příčné. Celkem tedy 7\*7\*4 body, což dává dohromady 196 prvků sítě. V těchto prvcích je tedy vypočtena síla působící na daný element. Ta je pak sčítána přes všechny elementy, čímž je dosaženo celkové síly v daném čase. To je ovšem pro jeden zvolený čas, resp. pro jednu hodnotu modelovaného proudu.

V počátcích programu bylo vyčleněno 10 hodnot v čase, pro které byly určeny hodnoty magnetické indukce a proudové hustoty. Časy jsou shodné s tabulkou Tab1, zde bude uvedena další tabulka Tab2, ve které pro daný čas bude uvedena také započítaná homogenní proudová hustota a velikost magnetické indukce ve středu projektilu. Celý výpočet je tedy ještě zohledňován v čase, kdy je prozatím odečteno 10 hodnot časového vývoje proudu, a výstupem tohoto programu jsou síly, které na projektil jako celek působí v daném čase, rovněž uvedené v tabulce Tab2. Tyto hodnoty byly porovnány s výstupem programu *Rychlost\_pomoci\_maticF\_pulz\_z\_obvodu*, ve kterém ovšem byla upravena velikost magnetické indukce na velikost magnetické indukce v geometrickém středu projektilu, což v maximu činí 2.5 T. Porovnání vypočtených sil ve stejných časech je tedy vidět v tabulce Tab3.

Je patrné, že síla F2, která je vypočtená programem *Soucin\_jb\_hezky*, je síle F1, vypočtené upraveným programem *Rychlost\_pomoci\_maticF\_pulz\_z\_obvodu*, velmi podobná, i co se týče časového rozložení. Program *Soucin\_jb\_hezky* tedy nejspíše pracuje správně, avšak pro výpočet velikosti ústové rychlosti je odečítáno málo prvků v čase. Výsledná ústová rychlost tedy v tomto programu počítána nebyla, neboť se předpokládá značné zkreslení. Jelikož by bylo obtížné odečítat hustší časové rozložení magnetického pole, byla přijata myšlenka dopočtu jednotlivých matic rozložení, které se mezi prozatím spočtenými časy nacházejí. Ve finálním programu byla ovšem místo dopočtu řešena jednodušší varianta získání celkového profilu síly, a sice proklad. Znázornění silového působení v čase, jako výstup programu *Soucin\_jb\_hezky*, je vidět na O.13.3.3.2, kde v horní části jsou samotné body, znázorňující velikost síly v čase, a v dolní části jsou tyto body spojeny.

Aby mohl být program využit k výpočtu ústové rychlosti, bylo by vhodné, jak je uvedeno výše, získat více časových hodnot pro sílu v těchto časech. V úvahu tedy přišlo buď hustší odečítání, nebo umělý lineární výpočet několika předpokládaných hodnot rozložení, mezi časovými okamžiky. Další možností je proklad uvedených deseti vzorků spojitou funkcí a následné zpětné ovzorkování. Z důvodů jednoduchosti a nepředpokládaného zanesení nepřesnosti byl pro určení časového působení síly volen dopočet síly pomocí prokladu. Následný proklad, který sloužil jako výstup pro pozdější programy, je vidět na obrázku O.13.3.3.3. Při prokladu je opět patrná souvislost s programem *Rychlost\_pomoci\_maticF\_pulz\_z\_obvodu*, kde časová závislost působící síly vypadá velmi obdobně.

### 13.3.4 Vliv pole projektilu na silové působení

Jak je uvedeno v podkapitole 13.2.3 Modelování stacionárního magnetického pole projektilu, jelikož projektil protéká nemalý proud, zajisté bude projektil sám kromě kolejnic také vytvářet magnetické pole, což je ve zmíněné podkapitole řešeno. Ovšem jaký toto pole bude mít vliv na urychlení? To je řešeno v programu *F\_pro\_B\_projektilu*. Tento program počítá stejně, jako předchozí program *Soucin\_jb\_hezky*, ovšem z prozatím výzkumných důvodů je program psán pouze pro jeden čas hodnoty budícího proudu. Tím byl zvolen čas 104  $\mu$ s od začátku děje, tedy čas blízký maximu. Pro tuto hodnotu byla dopočtena proudová hustota, tekoucí skrz projektil, a ta byla dosazena do modelu magnetického pole *B\_pole\_projektilu* a pomocí softwaru Agros 2D řešena. Následně byla odečtena Y složka vektoru magnetické

indukce uvnitř v projektilu na 4 místech – ve výšce 75 mm, 50 mm, 40 mm a 25 mm výšky projektilu. Odečtená data byla jako matice vložena jako vstup do programu *F\_pro\_B\_projektilu* a také byla jako matice vložena homogenně rozložená proudová hustota celým projektilem. Následně byla dle (13.3.3\_1) stejným způsobem spočítaná síla, která z programu vystupovala prozatím jako matice. Jako tabulka je matice Y složky pole přenesena do práce pod názvem tabulka Tab\_4. Je patrné, že v součtu bude síla nulová, protože v důsledku záporné velikosti Y složky vektoru magnetické indukce v polovině projektilu, bude polovina magnetické indukce kladná a polovina záporná o stejné velikosti. To dokládá i obrázek O.13.3.4.1, kde je vyobrazený průběh Y složky vektoru magnetické indukce v závislosti na poloze mířící skrze projektil ve výšce 50 mm. Vlastní pole projektilu tedy patrně na jeho urychlení nebude mít vliv, či alespoň Y složka vlastního pole. X složka vlastního magnetického pole nás přitom zajímat nemusí, protože ve vektorovém součinu dle (8.1\_1) bude působit mimo hlavní směr urychlení. Může se ovšem podílet například na deformaci projektilu.

### 13.3.5 Model se započítáním elektromagnetických polí kolejnic a projektilu

Tento model mechanické problematiky byl sepsán jako reakce na model magnetického pole projektilu a kolejnic, který je řešen v programu *Bpole\_projektilu\_a\_koleji* a který zohledňuje rozložení magnetického pole projektilu v interakci s polem kolejnic. Z modelu pole je patrné, že v čelní části projektilu se vyskytuje Y složka indukce se záporným znaménkem a v pravé s kladným. Polem kolejnic je pak pole projektilu ovlivněno a magnetická neutrála posunuta. V projektilu pak převládne kladná Y složka magnetické indukce a projektil se urychluje vpřed ve chtěném směru. Toto rozložení magnetického pole je do příčného řezu projektilu započítáno a v programu *F\_pro\_B\_s\_mag\_projektilu* je mechanická problematika počítána.

Rozložení magnetické indukce v kontrolních bodech je tedy dosažené z programu pro výpočet pole *Bpole\_projektilu\_a\_koleji*, a proudová hustota je počítána stejně jako v programu *Soucin\_jb\_hezky* a v souladu s modelem rozložení proudové hustoty *J\_projektily\_v\_koleji* je dosazována s homogenním rozložením v celém řezu. Jelikož se magnetické pole ve svém vodorovném směru mění zásadně méně než ve svislém řezu, což ukázal program *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*, bylo pole v tomto směru považováno za konstantní. Tento předpoklad může být objektivní a značné zpřesnění se tímto krokem nepředpokládá.

Výpočetní reprezentativní elementy tedy nebudou krychle, jako v případě programu *Soucin\_jb\_hezky*, ale hranoly, protékané homogenní proudovou hustotou, které mají po své délce homogenní rozložení magnetického pole. Takové elementy jsou znázorněny na obrázku O.13.3.5.1.

Dále je počítáno silové působení elektrického a magnetického pole na dané elementy. Kdy pro vyjádření každého z polí bylo v jednom čase odečítáno 5 vodorovných a 5 svislých bodů. Rovnice výpočtu síly tedy bude vypadat:

$$F_{ele} = \sum_{j=1}^{j=5} \sum_{i=1}^{i=5} J_{ij} * B_{ij} * \Delta V \quad (13.3.5_1)$$

Tak je činěno pro každý čas, kdy hodnoty proudu byly odečítány v časech dle tabulky Tab1. Výsledné působení síly v čase je patrné na obrázku *O.13.3.5.2* a je vidět, že tvarem velmi podobné silovému působení z ostatních programů. Co se týče velikosti, dosahuje ovšem v tomto programu síla větší amplitudy než v předchozích programech, zohledňujících rozložení pole. Pro srovnání je uvedena tabulka Tab3, ve které jsou uvedeny sepsané programy a velikost maximální síly. Vystává tedy otázka, jaká bude maximální možná teoretická síla působící na projektil. Tomu se věnuje následující podkapitola, ovšem pokud se pozdržíme ještě u programu *F\_pro\_B\_s\_mag\_projektilu*. Myšlenka výpočtu tedy tkví v rozložení pole, které bylo určeno na základě programu *Bpole\_projektilu\_a\_koleji*. Nicméně program pro rozložení samotného pole projektilu, ukazuje, že Y složka samotného pole projektilu je navenek neutrální. Proto se na urychlování pole projektilu nepodílí a patrně tedy lze počítat pouze s polem kolejnic a není nutné počítat superpozici pole projektilu a kolejnic. V případě projektilu bude zásadnější proudová hustota než jeho vlastní magnetické pole. Programy *B\_pole\_projektilu\_koleje* a *F\_pro\_B\_s\_mag\_cas\_ciste* budou tedy slepými uličkami.

### 13.3.6 Volba vhodného programu, popisujícího mechanické působení

Jelikož tedy v průběhu práce bylo vytvořeno více programů, pro postižení mechanické problematiky budou zde postupně uvedeny s krátkým popisem a jejich závěry. Na závěr této podkapitoly bude vybrán vhodný program pro výpočet síly, ze kterého bude dopočtena teoretická ústřední bezetrátová rychlost a ta bude označena za teoretické maximum.

*Mech\_model\_1* – Program, který počítá silové působení na základě vztahu (13.3\_2). Program poskytl prvotní náhled do problematiky a odhad velikosti sil a rychlostí, které se v systému mohou vyskytovat. Nezohledňuje rozložení proudového ani magnetického pole. Vstupem je pouze proudový pulz dle vztahu (13.1.1\_15) a výstupem časový průběh síly, s amplitudou 5276 N.

1. *Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu* – Program, který počítá se zvoleným rozložením pole, které je zatím zvoleno programátorem. Jeho vstupem je opět proudový pulz, dle (13.1.1\_15). V každém časovém kroku je počítána matice vektorů  $J$  a  $B$  o velikosti  $10 \times 10$  a následně probíhá vektorový součin prvků matic – tedy vektorů. Prozatím je dosazeno homogenní rozložení obou polí. Celková síla se pak spočte jako norma dílčích výstupních vektorů a ve své amplitudě činí 5279 N.
2. *Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu\_jine\_B* – Tento program je stejný jako předchozí, ovšem upravuje velikost magnetické indukce, v souladu s modelovaným polem od kolejnic, v programu *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*, dle kterého je v bodě maximálního proudu velikost indukce 2.5 T. Magnetická indukce v tomto mechanickém programu byla tedy vynásobena vhodnou konstantou, aby bylo dosaženo dané velikosti magnetické indukce. Výstupní síla pak dosahuje amplitudy 2059 N
3. *Soucin\_jb\_hezky* – Program, který byl sepsán při známém rozložení magnetického pole od kolejnic, které bylo výstupem z programu *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*. Pole bylo modelováno pro 10 hodnot proudu v čase a výpočet je prováděn v třírozměrné oblasti, kdy je ovšem zohledňované pouze podélné rozložení magnetického pole, dle *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*. Vypočtená síla dosahuje v amplitudě velikosti 1950 N.

4. *F\_pro\_B\_s\_mag\_projektilu* – Tento program již započítává příčné rozložení pole, dle programu *Bpole\_projektilu\_a\_koleji*, kde je pomocí permanentních magnetů simulováno magnetické pole kolejnic, které interaguje s magnetickým polem projektilu. Síla je pak počítána v dvoudimenzionálním příčném případě, kdy oproti značné změně pole napříč mění se magnetické pole mezi kolejnicemi započítáno není. Pro odečtených 10 hodnot proudu bylo dosaženo amplitudy síly 5377 N. Po konzultaci s vedoucím byl ovšem tento program shledán za pravděpodobně chybný.

Všechny výstupy časových průběhů sil z daných programů jsou k vidění na obrázku *O.13.3.6.1*.

Zbývalo tedy zvolení vhodného programu pro výpočet bezeztrátové síly, který bude reprezentovat systém v bezeztrátovém případě – tedy určí maximální teoretickou bezeztrátovou velikost rychlosti pro dané uspořádání kolejnic a elektrického obvodu. Po konzultaci s vedoucím práce byl zvolen program *Soucin\_jb\_hezky*, neboť bere v potaz rozložení magnetického pole kolejnic i proudového pole projektilu. Výsledná síla spočtená programem je ovšem série bodů, která ukazuje velikost síly v daných časových bodech. Pro dopočet celkového profilu působící síly by bylo vhodné buď odečtení více bodů, nebo určení vzájemné matematické závislosti síly mezi danými časovými kroky a pomocí této znalosti dopočet bodů v prostoru mezi známými časy. Další, a nakonec zvolenou, možností bylo proložení této závislosti a následné navzorkování této závislosti síly. Byl tak získán průběh, který je vyobrazený na obrázku *O.13.3.3.3*. Z tohoto silového průběhu byla pak vypočtena rychlost objektu dle (13.3.1\_1), která je pro hmotnost 2.3 g zobrazena na obrázku *O.13.3.6.2* a je s ní kalkulováno jako s teoretickou maximální dosažitelnou rychlostí, pro dané uspořádání a vstupní proudový pulz. Dále je obdobně jako v programu *Rychlost\_pomoci\_maliceF\_pulz\_z\_obvodu* spočtená dráha, kterou projektil během urychlování urazí. Výpočet rychlosti i dráhy je pak řešen v samotném programu *Soucin\_jb\_hezky\_s\_rzchlosti*.

Tento program tedy dále poslouží pro výpočet modelované rychlosti se započítáním ztrát, o čemž je sepsána následující kapitola.

### 13.4 Možné určování ztrát systému

Samotný matematický model mechanické problematiky byl stavěn jako bezeztrátový. Zejména proto, že určení ztrát výpočtem je velmi nelehká a s měřením nesouladná část. Přesto se o výpočet části alespoň náznakem pokusíme. Samotné ztráty se budou dělit na ztráty v elektrickém obvodu a v oblasti projektilu. Oboje jsou postiženy v programu.

Ztráty v elektrickém obvodu, počítané v programu *ztraty\_elektricke*, jsou vypočitatelné pomocí známého Jouleova zákona, přičemž abychom získali celkové tepelné ztráty v obvodu, integrujeme Jouleův zákon v čase výstřelu, tedy:

$$\int_{t_0}^{t_{kon}} R * i(t)^2 * dt \quad (13.4_1)$$

Samotná integrace je v programu řešena lichoběžníkovou metodou, tedy:

$$\sum_{i=1}^n ((R_1 + R_H) * i_i^2) * (\frac{1}{2} * t_{i+1} - \frac{1}{2} * t_{i-1}) \quad (13.4_2)$$

Výsledek z takovéto sumy, reprezentující časový integrál, je vidět na obrázku *O.13.4.1*. Jde tedy o elektrické ztráty, které se nezvratně přemění v teplo a to v částech přípojníc, předřadných odporů, hořícího elektrického oblouku a projektilu. Je patrné, že svou velikostí jsou si prakticky rovnocenné s energií uschovanou v kondenzátorové baterii. Patrně tedy zařízení bude značně neúčinné. Tepelné ztráty v celém obvodu jsou tedy určené poměrně jednoduše, o to nejjednodušší budou ztráty v samotné oblasti projektilu. Ty se budou dělit na ztráty způsobené přitlačnou Lorentzovou silou, mechanické ztráty třením při fixním přitlaku projektilu a na ztráty aerodynamické.

Patrně největší mechanické ztráty budou způsobené přitlakem ke kolejnici a to jak fixní, způsobené aktuální geometrií projektilu, tak přitlačnou Lorentzovou – v tomto případě parazitní – silou. Její směr je ukázán na obrázku *O.11.5*. Pro určení velikosti Lorentzovy síly byla podniknuta řada kroků, nicméně se zdá, že výsledky by mohly dle odhadů být objektivní.

Pro řešení byl sepsán program *sila\_nabok\_slozka\_Y\_150*. Tento program ovšem spolupracuje s rozložením pole, v programu pro výpočet pole *J\_projektil\_v\_koleji*, který počítá rozložení proudové hustoty na boku projektilu, který je protékán proudem z kolejnice. Toto rozložení je zobrazené na obrázku *O.13.2.4.8*. Toto rozložení je poté importováno do programu *sila\_nabok\_slozka\_Y\_150*, kde je vybrána pouze Y složka pole, neboť z vektorového součinu, kterým je určena síla, plyne, že ztrátová síla, která bude projektil zpomalovat, bude ramena projektilu přitlačovat ke kolejnícím. Ztrátová síla bude mít tedy složku X, proto program počítá pouze tuto složku.

Výpočet je prováděn tak, že importovaný průběh proudové hustoty se vzdáleností je normován na koeficienty v intervalu <0,1> a tím se získají koeficienty, které reprezentují rozložení proudové hustoty v prostoru. Nutné je ovšem získání časového působení. Proto je proudová hustota, vypočítaná z protékajícího proudu a rozměrů daných elementů, vynásobena koeficienty znázorňujícími rozložení proudové hustoty s délkou ramene. Tím je získáno silové působení na elementy v čase. Pro jeden čas je tedy generován list, který má 150 prvků a znázorňuje rozložení proudové hustoty v rameni. Následně je vytvořen list



magnetické indukce, která je dosazena jako homogenní nad celým projektilem v ose Z. Dále je vypočtena působící síla v daném čase, pomocí vzorce (8.1\_1). Konkrétně jako:

$$F_{ztrat} = \sum_{i=1}^{i=150} J_{ti} * B_{ti} * \Delta V \quad (13.4_2)$$

Sumou je počítaná síla, působící na jeden zvolený element v daném čase, a získáme tedy 1000 hodnot síly, které znázorňují působení na celou plochu v čase. Takovéto časové rozložení síly na jedno rameno je vidět na obrázku O.13.4.3. Dále je ovšem možné získat rozložení síly v ploše projektilu pro jeden zvolený čas. Pro čas blížký maximu proudu je toto rozložení zobrazeno, jako O.13.4.4.

Pro přesné dosazení do mechanického bezztrátového modelu by bylo vhodné vyjádřit reálnou přítlačnou sílu, působící na kolejnice, neboť nynějším výpočtem jsme určili pouze časový průběh a rozložení síly, působící na rameno projektilu, nikoli však brzdou sílu, přitlačující rameno projektilu ke kolejnici. Po konzultaci s vedoucím bylo usouzeno, že je vhodnější určit třecí ztráty v hlavní např. měřením, neboť pokračování v analytickém výpočtu by reálné výsledky nepřineslo. Zejména vzhledem k obtížné opakovatelnosti měření – viz kapitola 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů – a také neznámé stávající přítlačné mechanické síle, při vložení daného projektilu mezi kolejnice.

Matematický model pro určení ztrát, způsobených Lorentzovou silou, byl ovšem shledán jako použitelný a v případě potřeby – např. při použití sofistikovanějších projektilů stálých rozměrů a vlastností – na něj lze navázat bližším určením brzdící síly.

Dále se v systému budou nacházet ztráty fixní, které budou dané přítlakem aktuálně vyrobeného projektilu ke kolejnicím. Tato přítlačná síla lze poměrně špatně určit, neboť by to obnášelo měření přítlačné síly každého projektilu zvlášť. Jednodušší by ovšem bylo umístění projektilu mezi kolejnice a jeho protáhnutí na provázku zakončeným siloměrem. Taková situace je zobrazena na obrázku O.13.4.5. Kvůli absenci přesného siloměru byly tyto ztráty měřeny pouze zevrubně a to siloměrem domácí výroby. Velmi hrubým odhadem bylo stanoveno, že síla k překonání tření bude patrně větší než 15 N. Dále tyto ztrátové síly měřeny nebyly, avšak metodika jejich možného snímání se zdála být úspěšná.

Poslední z možných ztrát jsou ztráty aerodynamické. Ty obecně závisí na rychlosti a pro náš případ nízké rychlosti je lze vyjádřit jako vhodnou konstantu násobenou rychlostí. V případě vzorce (13.3\_4) se jedná o druhý člen na levé straně. Tato konstanta v sobě obnáší dané uspořádání projektilu, jeho tvar a drsnost povrchu. Je to jakási obdoba koeficientu přestupu tepla v Newtonově ochlazovacím zákonu.

Pro určení ztrát do mechanického modelu bychom tedy museli postihnout řadu jevů, které jsou velmi špatně predikovatelné, jako například fixní přítlak projektilu ke kolejnicím, či následný přítlak způsobený Lorentzovou silou, která ovšem působí neideálně, na rozdíl od spočteného případu v programu *sila\_nabok\_slozka\_Y\_150*.

Vzhledem k výše popsanému tedy bylo rozhodnuto, že ztráty se určí měřením, a nikoliv výpočtem, neboť jakkoli sofistikovaný výpočet by pravděpodobně ztroskotal na individuálním provedení každého projektilu. Proto byla snaha do bezztrátového mechanického modelu dosadit ztráty, které byly určeny měřením.

Z údajů změřených pomocí detekce polohy projektilu v hlavni, během urychlování, o kterém je pojednáno v podkapitole 15.4 Měření průběhu urychlování, byla tedy sejmuta poloha projektilu v čase. Vyhodnocení sejmuté polohy v závislosti na čase v průběhu urychlování je na obrázku *O.13.4.6.*, kde již je pro další zpracování poloha ponížena o počáteční polohu projektilu při měření, pak byla vhodnou funkcí proložena a zpětně navzorkována, jak je ukázáno na obrázku *O.13.4.7.* To je z důvodu získání většího počtu bodů pro následné zpracování, a to i za cenu předpokládané chyby způsobené prokládáním. Tento krok patrně přinesl ovoce i přes vědomí zanesené chyby prokládáním. Dále byla tedy snaha ze známé časové závislosti polohy projektilu v hlavni určit časovou závislost rychlosti. Ta byla spočtená jako numerická derivace průběhu polohy po zmíněných úpravách. Výstupní průběh je pak patrný na obrázku *O.13.4.8.* Sledovaný průběh je tvarově v souladu s průběhem pozorovaným ve zdroji [21], proto byl uznán jako objektivní.

K dispozici pro výpočet ztrát byla znalost polohy v čase a rychlosti v čase. V mnohých programech byla tedy snaha ponížít funkci teoreticky spočtené síly tak, aby výsledkem vypočtené závislosti rychlosti byla závislost odpovídající naměřené hodnotě. Předpokládaná funkce brzdné síly se předpokládala obdobná tvaru budící funkce – tedy taková, která by zásadně neměnila tvar ideální spočtené funkce, ale pouze doupravila její velikost natolik, aby výsledný průběh rychlosti korespondoval velikostně s naměřenými hodnotami. Jelikož se ovšem tímto konáním nedařilo ztráty určit, byly hledány ze známého průběhu polohy, neboť jak je patrné z obrázku *O.13.4.7.*, průběh polohy je značně snadněji aproximován než průběh rychlosti, poněvadž připomíná kvadratickou funkci. Také nebyly hledané přímo ztráty, ale budící funkce, která by byla potřebná k takovému průběhu polohy při urychlování projektilu. Takováto funkce byla skutečně nalezena. Avšak při zpětném dopočtu rychlosti vyšla místo naměřeného průběhu lineární funkce, neboť se při výpočtu derivovala poloha s kvadratickým průběhem. Po mnoha nezdárných pokusech nalezení správné budící funkce síly bylo tedy od této metody určení ztrát opuštěno.

Novou a přímo vybízející možnost objevil svou bystrou myslí vedoucí práce, když upozornil na možnost následné derivace průběhu sejmuté a upravené rychlosti, dle obrázku *O.13.4.8.*, kterou po vynásobení hmotností projektilu byla získána časová změna hybnosti – tedy působící síla. Takovéto započítání ztrát do mechanického bezeztrátového modelu je řešeno v programu *celkovy\_mech\_model\_JB.* V úvodní části programu jsou nahrána data o poloze projektilu, sejmuté při měření, a také jsou definované funkce proudu a napětí, jako výstupy z modelu elektrické části. Dále jsou data polohy zpracována a je vypočten průběh rychlosti přímo ze sejmutých dat. Dále je se sejmutou polohou pracováno tak, jak je popsáno o dva odstavce výše. Tedy funkce je proložena a z prokladu je derivací a následnými úpravami vypočten průběh rychlosti, který je zobrazen na obrázku *O.13.4.8.* Tento průběh rychlosti je ovšem ještě jednou derivován a přitom násoben hmotností projektilu, která v tomto konkrétním byla dosazována jako 5.3 g. Tím byl tedy získán časový průběh síly, potřebný k danému pohybu projektilu. Tato síla je ukázaná na obrázku *O.13.4.9.* Je na pohled patrné, že průběh síly se od síly spočtené ideálním modelem dosti liší. Například lze pozorovat počáteční nenulové hodnoty síly, která začíná na hodnotě cca 90 N. Tato síla byla nutná k překonání brzdné statické síly, nutné k “odlepení” projektilu z místa, neboť se předpokládá, že statický koeficient tření bude v tomto případě vyšší než dynamický. Tento fakt je také v souladu s odhadem, že

síla nutná k překonání tření bude větší než 15 N. Tuto ztrátovou sílu by bylo ovšem možné částečně ušetřit použitím předurychlovače. Dále je samozřejmě značně jiná amplituda působící síly než spočtené teoretické síly. Lze tedy předpokládat, že v zařízení se vyskytují značné mechanické, potažmo tepelné ztráty.

Patrný je i časový posun působící síly, který časově nekoresponduje s proudem, který končí za cca 2ms. Tato chyba je přisuzována metodě snímání polohy, čemuž se detailněji věnuje kapitola 15.4.4 Měření polohy pomocí měřky polohy v hlavni, jakož i nutnosti druhé numerické derivace polohy, pro výpočet síly a tím zanesené chyby.

Dále je program podobný upravenému bezeztrátovému případu, řešenému v programu *Soucin\_jb\_hezky*, kdy je pomocí známého rozložení magnetického a proudového pole získaného modely *J\_projektíl\_v\_koleji* a *B\_koleje\_rez\_z\_cadu* vypočtená teoretická bezeztrátová působící síla.

Od teoretického bezeztrátového průběhu síly je dále odečtena spočtená síla, potřebná k urychlení tělesa, určená z měření, která je patrná na obrázku *O.13.4.9*. Tím je získán rozdíl sil, tedy ztráty, které jsou při urychlování překonávány. Výsledná působící síla je tedy určena jako síla bezeztrátově teoreticky spočtena, od které je odečtena síla potřebná k překonání ztrát. Není překvapením, že při počítání síly pro urychlení projektilu o hmotnosti 5.3 g získáme průběh shodný s průběhem síly uvedeným na obrázku *O.13.4.9*.

Tato síla je pak dosazená do výpočtu rychlosti, který je prováděn stejně jako v bezeztrátovém případě. Stejně je prováděn i výpočet dráhy, potažmo polohy projektilu při urychlování. Výstup z programu pro hmotnost projektilu 5.3 g je pak vidět na obrázku *O.13.4.10*. V grafech jsou také zachyceny průběhy sejmuté při měření a je patrné, že velmi přesně korespondují s naměřenými průběhy.

Dále je tedy možné s modelem pracovat a pokusit se například predikovat chování systému. Tím může být určení ústové rychlosti projektilu o jiné hmotnosti. V kapitole 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů je také uveden projektil s kovovým přtlakem, jehož hmotnost byla stanovená na 2.3 g. Tato hmotnost urychlovaného projektilu byla tedy do modelu dosazena a výstup je vidět na obrázku *O.13.4.11*. Je patrná maximální velikost projektilu, vypočítaná jako  $123 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Dále rychlost s časem, a tedy i polohou v hlavni klesá. Tato hodnota tedy také koresponduje s měřením, neboť ústová rychlost projektilu tohoto typu byla při opakovaných měřeních zachycena v rozmezí 87 až  $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Lze tedy předpokládat, že než projektil dolétl do ústí hlavně, působila třecí síla a rychlost projektilu klesala se směrnici klesající rychlosti na obrázku *O.13.4.11*.

Tímto programem je tedy zakončeno modelování problematiky pomocí dílčích částí, kterými jsou: modely elektrického obvodu, modely elektromagnetického pole, mechanické modely a modely ztrát. Vypočtenými průběhy a velikostmi ústové rychlosti bylo dosaženo značné shody s naměřenými daty. Vhodným pokračováním by tak například byly optimalizační modely pro tvary proudu, či uspořádání kolejnic a projektilu, nebo možné další vylepšující zásahy především pro snížení ztrát.

## 14. Možnost řešení jednotným modelem

Kromě propojení výše uvedených částí, vyúsťujících do jednoho celistvého modelu, existují i jiné možnosti matematického modelování. Jedná se o komplexní modely, které se nezabývají dílčími kusy, jako modely v kapitole 13, ale podávají obrázek o chování systému jako celku. Jednou z možností je výpočet chování systému pomocí Lagrangeových rovnic.

### 14.1 Výpočet pomocí Lagrangeových rovnic

Lagrangeovy rovnice jsou založené na variačním počtu a je to univerzální nástroj pro řešení problémů mechanických, ale zároveň i elektromagnetických povah. Obecný tvar bezztrátových Lagrangeových rovnic je:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_k} - \frac{\partial L}{\partial q_k} = 0 \quad (14.1_1)$$

Nejde o jednu rovnici, neboť v zápisu je použito Einsteinovy sumační konvence, což znamená, že pokud se v rovnici vyskytuje stejný index u některých členů, probíhá součet členů přes tento index. Čili uvedený zápis, dle (14.1\_1), je suma, která je sčítána přes index  $k$ .

Dále se v rovnici vyskytuje prvek  $L$ , což je Lagrangeova funkce. Jde o funkci, která systém popisuje, pro každou sadu problematiky řešení (mechanické úlohy, elektromagnetické úlohy) má Lagrangeova funkce specifický tvar. V jednoduchých mechanických úlohách se dá Lagrangeova funkce charakterizovat jako kinetická – potenciální energie.

Dalším prvkem rovnic je jakési  $q$ . To je tzv. zobecněná proměnná, která charakterizuje systém. Obecně je nutné pro dostatečný popis popsat systém tolika nezávislými proměnnými, kolik je v systému stupňů volnosti. Podstatnou část zde hrají vazby, což znamená, že sledované objekty jsou nějakým způsobem omezeny, či usměrněny. Počet vazeb snižuje počet nezávislých proměnných, což je logické chování soustavy. Například pokud budeme uvažovat hmotné těleso na nakloněné rovině, lze předpokládat, že se bude pohybovat směrem dolů. Ubydou nám tedy parametry pro popis pohybu vzhůru a do stran.

Jelikož jsou Lagrangeovy rovnice v nerelativistickém tvaru schopné kombinovat jak mechanické, tak elektromagnetické pojetí, jsou pro řešení problematiky elektromagnetického urychlování značně vhodné. Komplikace mohou nastat v případě, že popisovaný systém vykazuje kvantové chování, nebo je nutné započítat relativistické chování. V obou zmíněných případech ovšem systém není neřešitelný, pouze se nám řešení zkomplikuje. Ani jedna popsaná skutečnost ovšem není náš případ, proto se neočekává značná komplikace Lagrangeových rovnic. Komplikace ovšem může nastat v případě, kdy jsou v obvodu ztrátoví činitelé. Těmi mohou být elektrický odpor v případě úloh s elektromagnetickou povahou, nebo mechanické tření a s tím související disipace energie do tepla. Ve ztrátovém případě nebude na pravé straně vztahu (14.1\_1) nula, ale ztrátová funkce, která bude disipaci popisovat. Touto funkcí je např. Rayleighova disipační funkce. Ta je v mechanických úlohách zpravidla závislá na rychlosti a obecně na dynamice. Pro kompletní popis systému tedy musíme znát Lagrangeovu a Rayleighovu disipační funkci.

### 14.1.1 Příklad sestavení Lagrangeovy funkce

O sestavení Lagrangeových rovnic pro elektromagnetický kolejnicový urychlovač pojednává detailně zdroj [22], kde je také odkaz na řešení případu s plasmovým pohonem. Pro jednodušší – bezztrátový případ, budou Lagrangeovy rovnice odvozeny zde.

Jak je popsáno v předchozí podkapitole, pro sestavení Lagrangeových rovnic bude nutné najít vhodnou Lagrangeovu funkci, od jejíž zvolení se odvíjí vhodná volba nezávislých proměnných. Situaci ilustruje obrázek 0.8.2. Při pohledu na uspořádání je patrné, že projektil se může pohybovat pouze v jednom směru. Proto její poloha bude funkce času a vzdálenosti jedné souřadnice od počátku. Je tedy vhodné zvolit jako jednu nezávislou proměnnou polohu projektilu v čase. To by ovšem nestačilo, neboť soustava je napájena z elektrického obvodu a bude tedy patrně nutné zvolit další nezávislou proměnnou, charakterizující elektrické chování soustavy. Vhodné bude zvolení elektrického náboje, neboť skrze náboj jsme schopni nejnázve vyjádřit napětí, proud a energii obvodu. Za nezávislé proměnné tedy volíme:

$$q_1 = x(t) \quad (14.1.1_1)$$

$$q_2 = Q(t) \quad (14.1.1_2)$$

Nyní pro sestavení Lagrangeovy funkce budeme muset vyjádřit energie jednotlivých prvků. Ideálně ve tvarech odpovídajících potenciální a kinetické energii. Začneme tedy mechanickou částí a budeme hledat energii projektilu. Co se týče potenciální energie, tak poloha projektilu se vzhledem k její výšce s časem nemění. Můžeme tedy stanovit potenciální energii projektilu jako nulovou, tedy:

$$V_{mech} = 0 \quad (14.1.1_3)$$

Jelikož nám z principu činnosti urychlovače jde o urychlení projektilu, kinetická energie již nenulová nebude. Je možné ji vyjádřit známým zápisem jako:

$$T_{mech} = \frac{1}{2} * m * v(t)^2 \quad (14.1.1_4)$$

Jelikož jsme zavedli jednu nezávislou proměnnou jako polohu, bude vhodnější vyjádření:

$$T_{mech} = \frac{1}{2} * m * \dot{x}(t)^2 \quad (14.1.1_5)$$

A tím máme mechanickou část hotovou a následuje část elektromagnetická. Jelikož je popisován stav ideální – tedy bezztrátový, bude elektromagnetická část obsahovat pouze kondenzátorovou baterii a parazitní indukčnost vedení a kolejnic. Ta bude samozřejmě s polohou projektilu proměnná, ale v tomto zjednodušujícím případě budeme indukčnost považovat za konstantní. Známý vztah pro energii na indukčnosti zní:

$$W_L = \frac{1}{2} * L * i(t)^2 \quad (14.1.1_6)$$

Jako v případě mechanické energie bude vhodné vyjádření pomocí zobecněné proměnné, což v tomto případě bude náboj. Z definice proudu získáme tedy:

$$W_L = \frac{1}{2} * L * \dot{Q}(t)^2 \quad (14.1.1_7)$$

Nyní zbývá tedy určení energie kondenzátoru. Opět ze známé definice určíme energii jako:

$$W_c = \frac{1}{2} * C * u(t)^2 \quad (14.1.1_8)$$

Opět bude vhodné vyjádřit energii pomocí nezávislé proměnné, čili pomocí definice kapacity, jako poměru uschovaného náboje a přivedeného napětí, které tento náboj vyvolalo, vyjádříme napětí pomocí náboje. Získáme tedy rovnici:

$$W_c = \frac{1}{2} * C * \frac{Q(t)^2}{C^2} \quad (14.1.1_9)$$

A po snadné úpravě lze rovnici převést na tvar:

$$W_c = \frac{1}{2 * C} * Q(t)^2 \quad (14.1.1_{10})$$

Jelikož indukčnost je pojená se změnou nezávislé proměnné, obdobně jako kinetická energie projektilu, zkusme tedy energii indukčnosti přisoudit povahu kinetické energie. Kondenzátoru, který je spojený pouze s nezávislou proměnnou v nulté derivaci, přisoudíme energii potenciální. Pro potenciální a kinetické energie systému tedy získáváme rovnice:

$$V = \frac{1}{2 * C} * Q(t)^2 \quad (14.1.1_{11})$$

$$T = \frac{1}{2} * L * \dot{Q}(t)^2 + \frac{1}{2} * m * \dot{x}(t)^2 \quad (14.1.1_{12})$$

Lagrangeovu funkci určíme obdobně jako v případech nerelativistických mechanických problémů jako rozdíl kinetické a potenciální energie. Pro Lagrangeovu funkci tedy získáme tvar:

$$L = T - V \quad (14.1.1_{13})$$

$$L(t, Q, \dot{Q}, \dot{x}) = \frac{1}{2} * L * \dot{Q}(t)^2 + \frac{1}{2} * m * \dot{x}(t)^2 - \frac{1}{2 * C} * Q(t)^2 \quad (14.1.1_{14})$$

A to je finální rovnice pro popis systému, v ideálním bezeztrátovém případě. Pokud bychom ztráty do rovnice chtěli dodat, museli bychom ztráty popsat např. pomocí Rayleighovy disipační funkce, která zpravidla bývá závislá na derivacích nezávislých proměnných. Jedna disipační funkce by tak byla nejspíše schopná vyjádřit ztráty jak elektromagnetické, tak mechanické. Pokud bychom pak chtěli získat například údaje o poloze projektilu, dosadíme získanou funkci L do (14.1\_1). Takto získaná rychlost pro nynější bezeztrátový systém má pak tvar:

$$\vec{v} = \frac{1}{m} * P_x \quad (14.1.1_{15})$$

Kde  $P_x$  je hybnost projektilu ve směru X. Po úpravách (14.1.1\_14) lze ovšem pomocí Hamiltonových rovnic získat vývoj libovolné proměnné, např. pomocí Poissonových závorek.

## 14.2. Výpočet modelu pomocí bilance energie

V předchozí podkapitole, kde se matematický model řeší pomocí Lagrangeových rovnic, je učiněn jeden poměrně zásadní krok, který je pro tuto podkapitolu klíčový. Pokud totiž počítáme s Lagrangeovými rovnicemi, nahlížíme na systém jako na komplexní soustavu, charakterizovanou zobecněnými proměnnými. Při náhledu na urychlovač, jako komplexní uzavřený systém, se zrodila myšlenka pojmout matematický model na bázi energetické bilance. Při pohledu nezávislého pozorovatele na energii zařízení před výstřelem je patrné, že při dané velikosti kondenzátoru a napětí, na které jsou před dějem nabity, je v systému uschovaná energie cca 126 kJ. Těsně po výstřelu již v systému žádná energie není a v dostatečně dlouhém čase – tj. po dopadu a vychladnutí projektilu již v systému není ani kinetická energie projektilu. Při ději výstřelu se ovšem energie rozdělí na dílčí části, ale jelikož platí zákon zachování energie, musejí se tyto jednotlivé dílčí části v součtu vždy rovnat energii počáteční. Pokud by šlo o ideální bezezátrátový případ, tak by s vybíjením kondenzátorové baterie ve stejné funkční závislosti stoupala rychlost. Energie uschovaná v kondenzátorech by se tedy jen “přelila” do urychlovaného objektu, přičemž v každém časovém okamžiku by se rozdíl těchto energií rovnal nule. Po vybití baterie by se pak kinetická energie projektilu ustálila na hodnotě 126 kJ až do okamžiku nárazu, kde by došlo k další, pro tuto práci nepodstatné výměně energie. Pro zajímavost, při současné hmotnosti projektilu by ústřední rychlost činila necelých 7 km\*s<sup>-1</sup>.

Jako výše zmíněný příklad výměny energií lze na systém ovšem pohlížet i na ztrátový – tj. reálný systém. Nebude ovšem probíhat výměna energií pouze elektrické – uložené v kondenzátorech – a kinetické energie projektilu, ovšem přibude řada dalších energií, jako energie magnetického pole a ztráty vznikem tepla. V součtu se tyto energie musejí rovnat energii uložené v kondenzátorové baterii, což platí pro každý časový okamžik. I po skončení děje tyto dílčí energie musí dát v součtu energii původní.

Na základě této myšlenky byla tedy sestavená rovnice bilance jednotlivých energií, které se v systému mohou vyskytovat. Ty se musejí v každém časovém okamžiku rovnat počáteční energii kondenzátorové baterie. Rovnice tedy bude mít tvar:

$$E_{poc} = E_{el.pole} + E_{kin} + E_{el.ztrat} + E_{mag.pole} + E_{treni.ztrat} \quad (14.2\_1)$$

Nyní můžeme rozepsat jednotlivé členy a v souladu s předchozí dynamickou myšlenkou vyjádřit jejich časovou závislost.

$$\frac{1}{2} * C * U_0^2 = \frac{1}{2} * C * u(t)^2 + \frac{1}{2} * m * v(t)^2 + \int_{t_0}^{t_{kon}} R * i(t)^2 dt + \frac{1}{2} * L * i(t)^2 + \int_{t_0}^{t_{kon}} Q(t) dt \quad (14.2\_2)$$

Z předchozích matematických modelů, či naměřených dat známe ovšem některé časové závislosti veličin a velikosti příslušných konstant – tedy i příslušné energie.

Ze znalosti velikosti kondenzátorové baterie a hladiny napětí, na jaké je baterie nabita, známe počáteční energii, která byla stanovena:

$$E_{poc} = \frac{1}{2} * C * U_0^2 = \frac{1}{2} * 5.18 * 10^{-3} * 7000^2 = 126\,910 \text{ (J)} \quad (14.2\_3)$$

Dále známe z matematického modelu elektrické části systému indukčnost jednotlivých částí, a tedy i celkovou indukčnost. Také známe z měření a později modelu elektrické části časový průběh proudu. Jsme tedy schopni určit časový průběh energie magnetického pole jako:

$$E_{mag} = \frac{1}{2} * (L_1 + L_H) * i(t)^2 = \frac{1}{2} * (1.07 + 0.72) * 10^{-6} * i(t)^2 \text{ (J)} \quad (14.2\_4)$$

Kde za časovou závislost proudu je dosazen průběh dle (13.1.1\_15).

Dále jsme schopni určit časově proměnnou energii elektrického pole, neboť máme k dispozici teoreticky spočtený průběh napětí při vybíjecím ději a také známe velikost kondenzátorové baterie. Pak tedy:

$$E_{el.pole} = \frac{1}{2} * C * u(t)^2 = \frac{1}{2} * 5.18 * 10^{-3} * u(t)^2 \text{ (J)} \quad (14.2\_5)$$

Jako další neznámá veličina jsou ztráty na parazitních, či předřadných odporech, měnicích se nenávratně v teplo. Ty budou stanoveny jako:

$$E_{el.ztrat} = \int_{t_0}^{t_{kon}} (R_1 + R_h) * i(t)^2 dt = \int_{t_0}^{t_{kon}} (0.0712 + 0.0017) * i(t)^2 dt \text{ (J)} \quad (14.2\_6)$$

Kde za časový průběh proudu je opět dosazen průběh dle (13.1.1\_15).

Jelikož výpočet ztrát je velmi obtížný a neurčitý, ponecháme je v rovnici jako jedinou neznámou. Zbývá tedy určení kinetické energie projektilu. To je také nesnadné, neboť pro analytický výpočet by bylo nutné znát výše zmíněné těžko vypočitatelné ztráty, a když už by byly vypočtené, postrádala by tato rovnice smysl.

Druhá možnost je tedy získání průběhu pomocí měření. Při měření bylo zkoušeno mnoho metod pro určení průběhu urychlování, jak je popsáno v kapitole 15.4 Měření průběhu urychlování, a nakonec byla rychlost v závislosti na čase úspěšně sejmuta. Při znalosti tohoto průběhu rychlosti, v závislosti na čase, mohla být tedy spočítána kinetická energie v závislosti na čase a dosazena do rovnice (14.2\_2). Průběh kinetické energie v čase, pro hmotnost projektilu 5.3 g, je tedy zobrazen v čase na obrázku O.14.2.1 a byl tedy určen měřením. Z hodnot je patrné, že na kinetickou energii zbývá pouze 6.7 J v maximální hodnotě, z celkového balíku 126 910 J počáteční energie. To je již druhý ukazatel, že systém bude značně neúčinný.

Po této znalosti průběhu kinetické energie v čase pak zůstává v rovnici (14.2\_2) pouze jediná neznámá veličina, kterou jsou ztráty jiné než elektrické. Ty se předpokládají zejména třecí – mezi projektilem a kolejnicí, a také aerodynamické, neboť ani jeden z vystřelovaných projektilů nebyl nikterak aerodynamicky tvarován.

Pro získání časového průběhu ztrát, a tedy pro výpočet celkové rovnice bilance energie (14.2\_2) byl sepsán program s názvem celkova\_bilance\_zaklad, který bude popsán na následujících řádcích.



V tomto programu ještě nebyla oddělená tepelná energie promařená v odporech od zbylé tepelné energie. V úvodní části programu jsou zadána data o počátečním napětí a velikosti kondenzátorové baterie. Dále jsou nahrána data, znázorňující polohu projektilu v čase, která jsou odečtená dle podkapitoly 15.4 Měření průběhu urychlování. Také jsou dosazeny funkce napětí a proudu jako výstupy z modelu náhradního obvodového schématu – program *vypocet\_L\_R\_obvodu* 25. Pak je hledán vhodný proklad sejmutých dat polohy a následuje zpětné navzorkování této funkce. Z této funkce je pak derivací vypočtená rychlost, jejíž průběh je zobrazený na obrázku *O.13.4.8*. Po znalosti rychlosti je pak dále výpočet samotných částí energií. Jako první je dle (14.2\_2) vypočtená počáteční, ze známého průběhu rychlosti a hmotnosti projektilu pak kinetická a jako poslední magnetická energie. Ztráty prozatím nejsou rozeepsané a všechny jsou interpretovány jako jeden prvek. Počítány tedy jsou:

$$Q_i = \frac{1}{2} * C * u_0^2 - \left( \frac{1}{2} * C * u_i^2 + \frac{1}{2} * m * v_i^2 + \frac{1}{2} * L * i_i^2 \right) \quad (14.2_7)$$

A celkové ztráty během času výstřelu pak tedy:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} * C * u_0^2 - \left( \frac{1}{2} * C * u_i^2 + \frac{1}{2} * m * v_i^2 + \frac{1}{2} * L * i_i^2 \right) \quad (14.2_8)$$

Výstupem programu pak jsou časové průběhy všech vypočtených energií, které jsou zobrazené na obrázku *O.14.2.2*. Při výčtu ovšem může nastat nepřesnost v časové korelaci energií, neboť při určování polohy je značně obtížné určení nulového času. O tomto problému je pojednáno v podkapitole 15.4 Měření průběhu urychlování, ale pro úvod postačí informace, že po záblesku jiskřiště je obtížné určit nulový čas proudu při pohledu na vysokorychlostní video. Lze se tak dopustit chyby, jejíž velikost se předpokládá okolo 0.5 ms, což by v tomto případě mohlo hrát jistou roli. V případě časového posunu změřené rychlosti bychom se tak blížili, či oddalovali proudovému peaku, při němž se předpokládá strmý nárůst rychlosti. Stále to samozřejmě není ideální případ určení průběhu rychlosti, ale o ostatních neúspěšných metodách vypovídá kapitola 15.4 Měření průběhu urychlování. Obecně je ale takovýto průběh rychlosti a polohy v závislosti na čase do jisté míry očekáván. Tudiž se předpokládá, že průběh vypočtené kinetické energie bude správný. Také to lze usoudit dle toho, že v čase okolo 2 ms dochází dle obrázku *O.14.2.1* ke změně funkce, která začíná klesat. Tento čas je ovšem čas konce toku proudu, čili konce působící síly. V ten moment se pokles rychlosti a s ní spojené kinetické energie očekává. Proto bude průběh kinetické energie, jakožto nejméně jistého průběhu ze vstupů do rovnice (13.1.1\_15), pravděpodobně určen správně.

Vraťme se tedy ještě krátce k programu *celkova\_bilance\_zaklad*. Ten kromě zobrazených grafů nabízí číselné údaje o jednotlivých energiích. Nejprve je určeno maximum kinetické energie na hodnotu 6.7 J. Dále je pro kontrolu určen rozdíl ztrátové – tepelné a počáteční energie. Předpokládá se, že tato hodnota bude do jisté míry korespondovat s maximální hodnotou kinetické energie, neboť to je energie, která v systému “zbyde”. Tento rozdíl vyšel 6.7 J, a jelikož tato hodnota plně koresponduje s maximální hodnotou kinetické energie, určených jinak, byl přijat předpoklad, že program počítá správně. Dalším bodem výstupu je již jen vypočítaná účinnost systému, která je v tomto případě 0.0053 %, neboť jen 6.7 J z celkových 126 910 J je použito pro urychlení.

V dalším programu tedy bude brán zřetel na rozložení tepelných ztrát na zařízení. Program *celkova\_rce\_ztraty* již zahrnuje rozdělení ztrát na ztráty tepelné v odporech a tepelné ztráty v ostatních částech. Využívá přitom rovnici (14.2\_2), která je upravena tak, že jsou přímo vyjádřené ztráty jiné než tepelné a jejich průběh. Pomocí (14.2\_1) jsou ztráty zapsané jako:

$$E_{treni.ztrat} = E_{poc} - (E_{el.pole} + E_{kin} + E_{el.ztrat} + E_{mag.pole}) \quad (14.2_9)$$

Kde za jednotlivé členy jsou dosazovány prvky dle (14.2\_3) atd. Ještě před celkovým výpočtem se ovšem podíváme na tepelné ztráty dílčích částí. Ze znalosti odporu náhradního schématu jsme schopni určit tepelné ztráty způsobené průtokem proudu u dílčích celků, jako jsou předřadné odpory a obvod projektilu. Tak učiníme pomocí (14.2\_6), kdy ovšem pomocí tohoto vztahu určíme ztráty zvláště v případě odporu  $R_1$  a  $R_H$  na obrázku *O.13.1.2.1*. Pro odpor  $R_H$ , tedy předřadných odporů, je vzniklá tepelná energie o velikosti 114 704 J. Je tedy patrné, že na předřadných odporech a obecně v obvodu zdroje se ztratí již většina energie uložené v napájecí baterii. Pro obvod hlavně a projektilu protékaného proudem je to pak 2752 J. Celkem se tedy průchodem proudu ztratí 117 456 J. Což je z celkové energie více než 3/4. Na ostatní energii, tedy včetně kinetické, pak zbyde 9452 J.

Po výpočtu tepelných ztrát na jednotlivých dílech je tedy přikročeno k řešení rovnice, která je řešena numericky v obdobném tvaru, jako (14.2\_2):

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} * C * u^2 - \left( \frac{1}{2} * C * u_i^2 + \frac{1}{2} * m * v_i^2 + \frac{1}{2} * L * i_i^2 - \sum_{i=1}^N (R_1 + R_h) * i_i^2 \right) \quad (14.2_10)$$

Výstup z programu je vidět na obrázku *O.14.2.3*. Pozoruhodné jsou dvě skutečnosti. První, že ztrátová energie nabírá na počátku děje záporných hodnot. To je ovšem neshodné s měřením, neboť by to znamenalo dodání energie, k čemuž nedochází. Chyba může být způsobena například nevhodně dosazenou velikostí kondenzátorové baterie, která může být ve skutečnosti větší než započítávaná. Případně mohou být pro počáteční děj nižší velikosti činných odporů, které se nemusejí chovat lineárně s protékajícím proudem. Odstranění této chyby by si tedy vyžadovalo další měření.

Kvůli této chybě bylo tedy následně pracováno s jednodušším programem *celkova\_bilance\_zaklad*. Tento program o problematice pojednává s dostatečnou přesností. Na konci programu je rozšíření o výpočet nové kinetické energie, pomocí známých ztrát a následný výpočet nového průběhu rychlosti. Pro projektil o hmotnosti 2.3 g tak bylo dosaženo rychlosti  $76 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , což je v souladu s měřenými hodnotami – viz kapitola 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů. Zpětně vypočtený průběh rychlosti je tedy zobrazen na obrázku *O.14.2.4*. Když byla stejným způsobem dopočítávána rychlost v případě programu *celkova\_rce\_ztraty*, bylo i přes počáteční chybný průběh ztrát dosaženo stejné rychlosti. Za objektivní výstup bude ovšem předpokládán výstup z programu *celkova\_bilance\_zaklad*.

## 15. Realizovaná ověřovací měření

V této kapitole bude rozebrána série provedených měření a pro práci podstatné hodnoty, které byly jako výsledek obdrženy. Měření probíhalo na zařízení patřící UNOB v Brně, popsané v kapitole popis sledovaného zařízení. Jednotlivá měření byla prováděna tak, aby jejich výpovědní hodnota odpovídala některé z teoretických kapitol, zejména částem o tvorbě matematického modelu.

### 15.1 Měření pro získání parametrů náhradního schématu

Jako první měření bylo měření elektrických parametrů, bez přítomnosti záznamového zařízení pro určování ústové rychlosti vystřeleného projektilu. Samotné měření bylo sofistikované tak, že se zkratovaly kolejnice zkratovací spojkou – na obrázku *O.15.1.1*, která byla takřka shodná s projektilem, ovšem lišila se fixním přitlakem. Kondenzátorová baterie nabitá na nižší než provozní napětí se do obvodu vybila. Byla tím simulována poloha projektilu v určité vzdálenosti od počátku hlavně a cílem tohoto měření bylo určení parametrů náhradního schématu pro danou vzdálenost. Měření probíhalo při napěťové hladině 1 kV a zkratovací spojka byla posouvána po 10 cm. Dále proběhlo měření s nabitou baterií na 0.5 kV a zkratovací spojka byla umístěna na počátek, prostředek a konec hlavně. Toto druhé měření mělo pouze potvrdit linearitu chování systému, vzhledem k velikosti zvoleného počátečního napětí. Linearita se ovšem nakonec naopak určovala porovnáním zkratu na hladině 1 kV a výstřelu na hladině 7 kV. Výsledky tohoto měření byly ovšem značně sporné, neboť například pro vzdálenost 20 a 30 cm od počátku kolejnic vyšla amplituda proudu vyšší než na počátku. Vzhledem k předpokládanému odporu kolejnic, který by se měl se zvyšující se vzdáleností projektilu od počátku rovněž zvyšovat, bylo toto chování systému označeno za podivné a bylo navrženo opakování měření. Body změřených amplitud proudu v závislosti na vzdálenosti od počátku kolejnic jsou vidět na obrázku *O.15.1.2*. Výpovědní poznatek z tohoto měření byl ovšem takový, že amplitudy a průběhy proudů se při posunu zkratovací spojky přílišně neměnily. Konkrétně změřené amplitudy se s rostoucí vzdáleností mění v rozsahu pod 5 %.

Vzhledem k obdrženým výsledkům bylo provedeno další měření, ve kterém bylo cílem stanovení velikosti a průběhu proudu v různých polohách projektilu v hlavni. Metodika zkratování kolejnic s proměnnou vzdáleností od počátku zůstala stejná, ošem pro jednu polohu zkratovací spojky bylo provedeno více vybití baterie. Vzhledem ke značné podobnosti průběhů v jednotlivých vzdálenostech byly také voleny pouze tři polohy – tj. 0 cm, 50 cm, 100 cm od počátku hlavně. Výsledky měření již dodávají věrohodnější závěry. Zprvu je možné určit průměrnou hodnotu velikosti proudu v daném čase, nebo například průměrnou hodnotu amplitudy při dané poloze projektilu. Porovnání velikostí proudů v maximu a v jednotlivých časech jsou zpracovány v programu *porovnaní\_tylu*. Tento program byl již využit v části matematické modelování, zde ovšem projdeme pouze výsledky dané měření. Na obrázku *O.15.1.3* je zobrazen jeden z výstupů tohoto programu, kdy jsou zobrazeny modrou spojnici body, obdržené při poloze zkratovací spojky na počátku, opakované 5x, zelenou spojnici body, obdržené při poloze zkratovací spojky v prostředku hlavně, opakované 3x, a červenou spojnici body, obdržené při poloze zkratovací spojky na konci hlavně, opakované 4x.

Jelikož zapůjčený osciloskop snímá hodnoty značně hustě, což je víc než dobře, konkrétně s krokem  $2 \cdot 10^{-7}$  s, je vhodné data důkladněji prozkoumat. Pokud se zaměříme například na oblast 0.26 ms a blízké okolí – tj. deset časových kroků vpřed a vzad, zjistíme mezi maximální a minimální naměřenou hodnotou v tomto časovém úseku rozdíl až 200 A. Také je patrná práce na vzorkovacích hladinách, kdy jdou data vedle sebe časově ležící v rozmezí 20 kroků, posunuta proti sobě zdá se o pevný krok, a pokud započítáme přepočty sond, vyjde nám velikost jedné hladiny 50 A. V tomto konkrétním časovém rozmezí jsou v oblasti času 0.26 ms až 4 kvantovací hladiny. 50 A v porovnání se snímanými amplitudami proudu není významná hodnota, ale pokud jsou ve dvaceti vzájemně časově posunutých vzorcích rozdíly v hladinách proudu 200 A, mohla by tato velikost již mít jistý vliv na vyhodnocení. Především je ale tato velikost chyby zbytečná a lze se jí vyvarovat.

Vezměme v úvahu, že z jednoho sejmutého průběhu chceme v jednom známém čase získat velikost proudu a tu porovnat s hodnotou z jiného sejmutého průběhu – např. v jiné poloze zkratovací spojky. Pokud bychom se ovšem netrefili na stejnou vzorkovací hladinu, mohli bychom vzhledem k výše uvedeným poznatkům stvořit nevědomky chybu až 200 A. Pokud budeme navzájem chtít porovnávat naměřené hodnoty mezi sebou, nebudeme mít jistotu, že v daném pevně stanoveném čase se na stejnou hladinu trefíme, a proto lze vypočítat průměrnou hodnotu proudu v blízkém okolí požadovaného času. Dopustíme se tak drobné časové nepřesnosti, ale ta bude v řádu maximálně cca  $10^{-6}$  s, což pro dané časové expozice nemá zásadní význam. Takováto aproximace je vidět na obrázku *O.15.1.4* vlevo, kde je hledaná časová hodnota  $0.00026 \pm 10^{-6}$  s. Na obrázku jsou patrné sejmuté body – modře – a dané kvantovací hladiny osciloskopu. V pravé části jsou pak vidět svislou přímkou znázorněny hodnoty reprezentující rozptyl proudu v okolí daného času, z každého z provedených měření. Červenou tečkou je pak znázorněn bod, který aproximuje velikost proudu v čase 0.26 ms pro tento sejmutý průběh.

Nyní se zaměříme na samotné hodnoty pozorované na obrázku *O.15.1.3*. Je pozoruhodné, že v případě amplitudy je nejvýše umístěn proud sejmutý při poloze zkratovací spojky na počátku kolejnic a prakticky nejnižší proud sejmutý v koncové poloze. Toto plně odpovídá představě zvyšujícího se činného odporu, rostoucího se vzdáleností projektilu od počátku kolejnic. V čase 0.26 ms tomu už tak není. Hodnota proudu při počáteční poloze zkratovací spojky je naopak nejnižší a ve vyšších hodnotách proudu se střídají velikosti proudu z průběhů sejmutých v poloviční poloze projektilu a při poloze zkratu v ústí. V čase 0.5 ms již průběhy jasně vycházejí přesně opačně než v případě maxima a velikost proudu na počátku zkratované hlavně je tedy nejnižší. V čase 0.8 ms pak velikosti proudu opět inklinují k chování jako v čase 0.5 ms, ale také mají tendenci vzájemného přiblížení a splynutí.

Jev větší velikosti proudu při zkratu na konci hlavně v čase 0.26 ms a následných časech je patrně dán rostoucí indukčností uspořádání. Při pohledu na zkratované kolejnice je patrné, že uspořádání při zkratovaném ústí tvoří jednozávitovou cívku. Měřením je tedy prokázáno, že rostoucí indukčnost bude v časech týlu patrně zásadnější než rostoucí odpor. Ten bude naopak hrát významnou roli ve velikosti amplitudy proudového peaku. Obě tyto varianty byly zkoumány v teoretickém modelu – konkrétně v programu *vypocet\_L\_R\_obvodu 23*, kde je možné dynamicky měnit velikost činného odporu a indukčnosti náhradního obvodu.

Při zkoumání chování obvodu z teoretického modelu bylo skutečně prokázáno, že pokud se činný odpor sníží, vede to v průběhu ke zvýšení amplitudy proudu, jakož i vyostření rysů průběhu.

V případě zvyšující se indukčnosti pak dochází k zaoblování průběhu a posunu v čase směrem k vyšším časovým hodnotám – tj. delším časům a také mírnému poklesu amplitudy, který ovšem není tak dramatický jako v případě zvýšení odporu. Je to ovšem chování, které je očekávatelné, neboť zařazení indukčnosti do obvodu vede na potlačení změn proudu, který pak obvodem protéká po delší časovou dobu. Tímto měřením tedy bylo prokázáno správné chování teoretického modelu, který při rostoucí indukčnosti v obvodu posouvá hranu týlu k delším časům.

## **15.2 Měření rychlosti vystřeleného objektu**

Měření rychlosti střel je značně široká problematika, jejíž přesností a možnými metodami se zabývá balistika. Velmi důležitým faktorem z různých kategorií rychlostí je její ústová rychlost. Pod pojmem ústová rychlost se skrývá rychlost projektilu v těsném, tedy infitizimálně malém okolí od ústí hlavně a je vztažena k bodu zvoleném na ústí hlavně. V současné době je na snímání mnoho požadavků, zejména v oblasti přesnosti snímání a neovlivnění střely samotným měřením. Existuje řada metod snímání a vyhodnocení ústových rychlostí, které jsou více či méně vhodné pro dané specifické situace a v této kapitole bude probráno několik málo z možných variant, zejména pak metoda snímání ústové rychlosti pomocí rychloběžné kamery.

### **15.2.1 Metoda snímání ústové rychlosti pomocí optické brány**

Jedná se o metodu poměrně dostupnou a principiálně jednoduchou. Její princip tkví v umístění dvou nejčastěji laserových zdrojů, směřujících paprsky napříč předpokládané dráhy střely. V místě dopadu paprsku je optický senzor – typicky fotodioda, či fototranzistor, který vyhodnocuje, zda na něj dopadá světelné záření, či nikoliv. Tato uspořádání jsou umístěna dvě za sebou ve známé vzdálenosti od sebe.

Pokud projektil protne první laserový paprsek, optický člen zareaguje a řídicí logický obvod systému zapne čítání čítače. To skončí v momentě protnutí druhého paprsku ve známé vzdálenosti. Tímto systémem tedy získáme údaje o času a uražené dráze projektilu, ze kterých pak lze vypočítat rychlost, která odpovídá rychlosti střely ve střední vzdálenosti mezi paprsky.

Jedná se o metodu, která neovlivňuje chování projektilu, tedy značně přínosnou pro balistiku. Často se v laboratořích používá nejen laserový svazek, ale příčný pruh světla, který dopadá na soustavu senzorů. To je příjemnější z důvodu nenutnosti vystřelení projektilu pouze v ose jednoho paprsku, takže střelec nemusí mít tak přesnou mušku.

Pro určování ústové rychlosti railgunu, je tato metoda ovšem nevhodná, neboť při výstřelu společně s projektilem opouští hlaveň i plasmatický oblak, nebo utavené části projektilu. Tyto jevy by mohly znemožnit optické vyhodnocení, proto tohoto způsobu měření nebylo využito. Dalo by se tohoto systému využít v případě větší vzdálenosti ústí hlavně a vyhodnocovací oblasti. Tím bychom ale již nesnímali ústovou rychlost, ale rychlost ve větší vzdálenosti od ústí hlavně.

### **15.2.2 Metoda snímání ústové rychlosti pomocí ultrazvukového radaru**

Další možnou laboratorní metodou měření je měření pomocí dopplerovského radaru. Jedná se o ultrazvukové měření, které do sledovaného prostoru vysílá akustické vlny, které jsou pak od letícího projektilu odrazeny a sejmuty. Jelikož se ovšem projektil vůči zdroji pohybuje, dochází zde k dopplerovskému posunu. Ze znalosti vyslané a odražené vlny je pak vyhodnocovací logika schopna dopočítat rychlost pohybujícího se objektu. Tohoto principu se například hojně používá pro měření rychlostí automobilů při dopravních kontrolách.

V případě použití pro měření elektromagnetický urychlovač je tato metoda pro určení ústové rychlosti opět nevhodná. Pokud například bude ultrazvukový zdroj umístěn před hlavní,

v oblasti dopadové plochy, v prvotních fázích zachytí radar oblast urychleného plasmatu, v kterém je schován vystřelený projektil. Akustické vlny totiž není možné s dostatečnou přesností zacílit na konkrétní bod, a proto budou sledovat pohyb celku – v tomto případě plasmatického oblaku.

Samotný projektil bude možné tímto způsobem sledovat opět ve větších vzdálenostech od ústí hlavně. Oproti optické bráně ovšem tento způsob měření může poskytnout informaci o pohybu letícího projektilu takřka v celé oblasti jeho letu, či alespoň části – např. úseku o délce 20 m. Je to tedy vhodná metoda pro aplikaci ve vnější balistice, ale tou se tato práce nezabývá, proto zde metoda snímání ústové rychlosti pomocí ultrazvukového radaru dále popisována nebude.

### **15.2.3 Metoda snímání ústové rychlosti pomocí rychloběžné kamery**

Tato metoda určování ústové rychlosti byla pro měření používána. Jde o videozáznam určité scény, která je snímána mnohokrát za sekundu. V případě provedených měření byla scéna snímána vždy rychlostí 5000 snímků za sekundu. Při měření může být snímána takřka libovolná část dráhy letu projektilu. Jelikož se ovšem zaměřujeme na ústovou rychlost, bude vhodné snímat oblast ústí hlavně. Pro určení rychlosti je také oblast vybavena speciálním pravítkem, připevněným nad hlavní, ze kterého lze určovat vzdálenost. Ze znalosti časového posuvu snímků a posuvu polohy projektilu na dvou časově následujících snímcích, jsme schopni dopočítat rychlost letícího objektu. V případě snímání rychlostí 5000 snímků za sekundu, odpovídá odstup jednotlivých snímků času  $2 \cdot 10^{-4}$  s. Pokud tedy vydělíme dráhu odečtenou na pravítku při odstupu dvou snímků a vydělíme časem  $2 \cdot 10^{-4}$  s, získáme rychlost. Pro účely snadnějšího odečtu je v případě některých měření, na balistickém pravítku zvýrazněna oblast, která činí 20 cm. Stačí tedy z následnosti snímků odečíst čas, po který projektil touto oblastí cestoval.

Jelikož je sledovaná oblast v těsné blízkosti ústí hlavně, lze konstatovat, že snímáme přímo ústovou rychlost. Při vyhodnocování je ovšem často náročné rozpoznat letící projektil od ostatních letících objektů, neboť z hlavně se kromě projektilu vlivem zahořené oblouku a mnohokrát popsané degradace uvolňuje mnoho ostatních prvků, jako například jiskry, či plasmový oblak, ve kterém bývá projektil zahalen. Proto je vhodné snímání scény v infračerveném oboru světelného spektra.

Před měřením byla scéna vždy nasvícena reflektory s vysokým obsahem infračervené složky. Následně byl nastaven trigger kamery, který reagoval na posun světelného zdroje značné intenzity napříč scénou. Jelikož je hlaveň umístěna blízko zařízení, je také blízko jiskřiště, které dodá značný světelný pulz pro sepnutí kamery. Lze tedy s jistou chybou vzájemně spárovat tok proudu ze sejmutých proudových průběhů a záběry z kamery. Navíc je na kameře nastaven pretrigger, a to nejčastěji na 100 ms před zábleskem.

Touto metodou byla tedy měřena ústová rychlost všech projektilů, které byly během této práce vystřeleny.

### **15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů**

Při psaní teoretického rozboru problematiky, jakož i při programování modelu, vyvstalo několik nových možných zlepšení a myšlenek, které by bylo vhodné experimentálně ověřit. Myšlenky se netýkaly pouze projektilů a jejich možných provedení, ale také například oblasti snímání polohy projektilu při výstřelu. Tyto možné inovace pak budou uvedeny později a nyní se tedy věnujme oblasti projektilu. Jak je uvedeno v kapitole 11. Přenášení proudu do projektilu, je tato oblast urychlovačů značně problematická, proto zde také může být prostor pro novou tvorbu.

#### **15.3.1 Projektil s kovovým přitlakem**

Jedno z prvních měření se ovšem uskutečnilo se známým uspořádáním, tj. přímém kontaktu vodivého projektilu s kolejnicí. Pro tento experiment byl použit projektil dle obrázku *O.15.3.1.1*, jehož rozměry jsou uvedeny na obrázku *O.15.3.1.2*. Tento typ již byl dle zdroje [17] použit dříve. Jde o 1 mm tlustý měděný plech, který byl vyroben pro elektrotechnické účely. Plech je před výstřelem nastříhán na rozměry uvedené na obrázku *O.15.3.1.2*, výšku 1 cm a v kleštích je ohnut do požadovaného tvaru. Hmotnost tohoto typu projektilu byla měřena pro více kusů a poté byla stanovena průměrná hmotnost jednoho kusu, která byla stanovena jako 2.6 g. Pro minimalizaci přechodového odporu je projektil těsně před výstřelem obroušen a jeho plocha vyhlazena. Poté byl vložen na počátek hlavně a byl provedený klasický postup nabíjení urychlovače. Při výstřelu byl sejmut proud, vyobrazený po příslušném přepočtu na obrázku *O.15.3.1.3*. Výstřelů projektilu tohoto typu bylo provedeno více a velikost ani tvar sejmutého proudu se navzájem prakticky vůbec neliší. Lze tady přepokládat, že činný odpor tohoto uspořádání bude patrně velmi obdobný pro různé konstrukce. Krom proudu bylo pomocí vysokorychlostní kamery snímáno ústí hlavně a z pořízených snímků byla odečtena ústíová rychlost vystřeleného projektilu. Snímek pořízený v ústí hlavně je vidět na obrázku *O.15.3.1.4*. Dle několika po sobě následujících obrázků byla určena ústíová rychlost tohoto projektilu na  $87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Jelikož je experiment špatně opakovatelný a to z důvodu individuální výroby každého použitého projektilu, byla provedena měření tři. Při prvním byla stanovena ústíová rychlost zmíněných  $87 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , při druhém byla stanovena na  $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a při posledním výstřelu na  $83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Pro tento typ projektilu pak byla stanovena průměrná ústíová rychlost na  $96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Obdobných rychlostí pak dosahuje i zdroj [17].

Z výsledků měření bylo usouzeno, že značně závisí na daném ohnutí projektilu, tedy síly přitlaku jeho ramen ke kolejnicím, neboť rozptyl ústíových rychlostí byl v rozsahu  $83\text{--}125 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Z důvodu místní výroby projektilů – tedy zohýbáním v kleštích, je přitlačná síla velmi špatně odhadnutelná. Experimenty jsou tedy pak velmi špatně opakovatelné a patrně z tohoto důvodu jsou také odlišné ústíové rychlosti jednotlivých výstřelů. Proto byla pro tento druh projektilu zavedena obecná ústíová rychlost  $96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a s touto v podstatě statistickou hodnotou bylo dále pro tento druh projektilu počítáno. Obdobně tomu bylo činěno s hmotností projektilu, jak je uvedeno výše.

Při měření byla pozorována ovšem další pozoruhodná vlastnost. Rychloběžná kamera, která byla trigrovaná na záblesk jiskřiště, zaznamenala mezi koncem záblesku a výletem projektilu z ústí hlavně celkem 51 snímků. To odpovídá času 10.2 ms. Dle sejmutého oscilogramu, na



obrázku *O.15.3.1.3*, ovšem tok proudu trval pouze 2 ms. Této zajímavé vlastnosti, která měla značný význam pro další dění, byla později věnována část kapitoly 15.4 Měření průběhu urychlování.

Projektily jsou dále po výstřelech značně deformované, jak je vidět na obrázku *O.15.3.1.5*. Vystává otázka, jestli je deformace způsobena samotným procesem výstřelu, nebo dopadem do zásahové plochy.

Na místě je uvést, že na konci laboratoře v předpokládaném místě dopadu střel je umístěna řada plastových měkkých závěsů, sloužících pro lapení střel, pokud možno bez jejich poškození. Tyto závěsy jsou ovšem umístěny jen v předpokládaném místě dopadu a v ostatním prostoru jsou tvrdé dřevěné lapače. Nelze tedy s jistotou konstatovat dopad střely do měkkého závěsu, neboť z pohledu aerodynamiky a vnější balistiky nebyl projektil nijak upravován a také vzhledem k nejasným deformacím bude jeho trajektorie nejasná. Jelikož ale projektily v urychlovači nedosahují takových rychlostí, které by projektil značně deformovaly, se zásadní poškození dopadem, i kdyby do tvrdého materiálu, neočekává.

Zdá se tedy, že deformace je způsobená procesy odehrávajícími se v hlavni. Možné může být například zapůsobení nesymetrie příčné části projektilu, která když nebude doléhat kolmo ke kolejnicím, zapříčiní nesymetrické působení síly na projektil, který pak bude nadměrně přitlačován k jedné z kolejnic. Vzhledem k deformacím, které vystřelené projektily vykazují, by tato myšlenka mohla odpovídat skutečnosti. Tento děj může být také podpořen lokálními opotřebovanými částmi v hlavni, které rovněž nemusí mít symetrický charakter vzhledem ke kolejnicím.

Pokud tedy dochází k deformaci projektilu při urychlování, část energie zdroje se nutně musí spotřebovat na deformaci, což je zbytečně ztrátová oblast. Jak je ovšem vidět na obrázku *O.15.3.1.5*, některé projektily jsou deformované více a některé méně. To potvrzuje špatnou opakovatelnost experimentů v závislosti na vytvoření projektilu – tedy vytvoření ohybu v kleštích.

### **15.3.2 Projektil s kovovým přitlakem a stabilizačním prvkem**

Z důvodu možné deformace v hlavni byl vyroben nový projektil s přímým přitlakem, vyobrazený na obrázku *O.15.3.2.1*. Tento projektil také využívá kovového přitlaku s kolejnicí, ale oproti projektilu na obrázku *O.15.3.1.1* obsahuje stabilizační prvek, který by měl projektilu zabraňovat přílišnému přitlaku k jedné či druhé kolejnici – zabraňovat deformacím, a tedy ztrátě energie. Výroba byla provedena před měřením pomocí pěnového špuntu od vína, který se jevil jako lehká a opracovatelná volba materiálu. Dále byla ve stávajícím projektilu vyvrtána díra s 3mm průměrem a to v jeho čele. Skrze vyvrtaný otvor byl zasazen metrický šroub M3, který byl pak skrz elektrovodnou část zašroubován do upravené pěny. Jelikož byly vyrobeny 4 projektily tohoto druhu, byla sledována jejich hmotnost v rozpětí 4.3 a 5.8 g. Jako průměrná hmotnost byla stanovena hmotnost 5.3 g. Při měření byla předpokládána nižší odporová síla při působení na projektil při letu hlavní a přitom byl předpoklad dobrého a symetrického elektrovodného kontaktu.

Než bude uveden konkrétní závěr při použití tohoto typu projektilu, je vhodná jistá drobná teoretická rozvaha. Po zhlédnutí záznamu výstřelu bylo totiž usouzeno, že vlivem nutné přítomnosti šroubu, a tedy i odvrtnému materiálu, patrně vzrostl odpor uspořádání, a tedy i ztráty. Narostla zajisté i proudová hustota, neboť zdroj se snaží protlačit proud o stejné velikosti projektilem, který má v činném místě značně menší průřez. Na druhou stranu se předpokládá stabilnější kontakt s kolejnici, a tedy nižší třecí i elektrické ztráty při urychlovacím ději.

Přikročme tedy nyní k vyhodnocení úspěšnosti tohoto projektilu. Tu budeme určovat opět ze záznamů rychloběžné kamery, sledující ústí hlavně. Po trigru kamery, tedy konci akce jiskřiště, je cca za 3 snímky patrný plamen, linoucí se z ústí. Situace je zobrazena na obrázku O.15.3.2.2. Tři snímky odpovídají času 0.6 ms po počátečním toku proudu. Po výšlehu plamene je na snímcích patrný lesklý objekt, který vylétává v čase 2 ms, tedy o 10 snímků později. Ústíová rychlost tohoto objektu byla stanovena na  $125 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Snímek tohoto objektu je uveden jako obrázek O.15.3.2.3, kdy se objekt nachází zhruba v polovině mezi vyznačenými vzdálenostmi na balistickém pravítku. Situace je také patrná na přiloženém videu s názvem: *Cu\_pritlak\_stabil\_2*. Jelikož je ovšem při tomto výstřelu přítomný senzor polohy projektilu při urychlování – viz kapitola 15.4 Měření průběhu urychlování, který tento lesklý objekt předežene, vyvstává otázka, zda je možné, aby to byl sledovaný projektil, neboť ten se očekával vždy až za touto měrkou. Jelikož se ovšem po výstřelu projektil nepodařilo v dopadovém prostoru nalézt a v prostoru mezi kolejnici také nezůstal, vyvstala hypotéza, že při výstřelu došlo k jeho destrukci. Lesklý objekt by tedy byl jakýsi pozůstatek projektilu. Této hypotéze nahrává fakt, že pěnový stabilizátor nebyl nalezen v celku, ale jen jako odoutnalé pozůstatky.

Vzhledem k výše uvedeným teoretickým poznatkům o vyšších ztrátách vlivem větší proudové hustoty byla přijata hypotéza o destrukci projektilu při urychlování. Pro potvrzení byla velmi orientačně vypočtena kalorimetrická rovnice, která měla za úkol orientačně určit, zda je při daných energiích možné projektil roztavit. Vstupní výkon bude vypočten z časového průběhu proudu, vypočteného z programu pro výpočet obvodu dle obrázku O.15.3.1.3 a odporu odporníku z náhradního schématu dle obrázku O.13.1.2.1, znázorňujícího projektil a hlaveň, tedy  $0.00171 \Omega$ . Průběh ztrát byl pak integrován v čase a tím byla získána předpokládaná energie uvolněná do tepla při proběhlém ději. Tento vztah byl pak dosazen do kalorimetrické rovnice jako vstupní výkon a hledala se teplota  $T_2$  – tedy předpokládaná, na kterou se projektil zahřeje. Výpočet znázorňuje následující vztah:

$$\int_{t_0}^{t_{kon}} R * i^2(t) dt = M * c * (T_2 - T_1) \quad (15.3.2\_1)$$

Přičemž byly do výpočtu dosazeny hodnoty:

$$R = 0.00171 \Omega$$

$$M = 2.3 \text{ g}$$

$$c = 390 \text{ J} \cdot (\text{Kg} \cdot \text{K})^{-1}$$

$$T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$$

Za funkci proudu byly dosazeny příslušně proložená data sejmutá z oscilogramu proudu. Výsledkem rovnice (15.3.2\_1) byla tedy teplota  $T_2$ , na kterou by se projektil při ději měl ohřát, pokud by nedošlo k disipaci tepelné energie do pohybové energie. Spočtená teplota činí:  $3137\text{ °C}$ . Z následného dohledání bodu tání mědi, který je dle zdroje [23]  $1084\text{ °C}$ , bylo usouzeno, že roztavení projektilu při výstřelu bylo skutečně možné.

Měření ústové rychlosti lesklého objektu, který je považován za pozůstatek projektilu, je tedy neobjektivní, neboť má značně nižší a neznámou hmotnost než celý projektil. Také patrně vykazuje nižší třecí ztráty než celý projektil, neboť předběhl měřku pro snímání polohy.

V rámci zkoumání dalších možných variant pohonu bylo další pozorování tohoto druhu projektilu pozastaveno. Byl tedy uskutečněn pouze jeden výstřel.

Nutno také dodat, že při tomto měření nebyl projektil umístěn do počáteční polohy začátku, nýbrž 38 cm od ústí hlavně. Tato informace pak bude hrát roli v kapitole 15.4 Měření průběhu urychlování.

### **15.3.3 Projektil poháněný zažehnutým výbojem**

Jak je popsáno v kapitole 10. Druhy kolejnicových urychlovačů a způsoby urychlování těles, jednou z možností vytvoření síly je zapálení obloukového výboje, který je pak sám urychlován vlivem toku proudu a přítomným magnetickým polem. Pokud je před tento obloukový výboj umístěn nějaký prvek, je přirozeně vytlačován mezi kolejnicemi ven z hlavně. Dle [13] je pak urychlován prvek z nevodivého materiálu a jsou na něj kladeny značné nároky, co se týče teplotní odolnosti, neboť hnaný oblouk v zádi urychlovaného prvku dosahuje značných teplot. Dle zdroje [13] je ovšem tento způsob pohonu použitelný spíše pro vyšší rychlosti, neboť rozpočívání projektilu z klidové polohy by plasmatickému pohonu odebralo značný kus energie a tím odebralo značnou energii kondenzátorové bance. Také by tím byla způsobena značná eroze kolejnic v jednom startovacím bodě. Tyto tvrzení ovšem platí obecně pro jakýkoliv druh projektilu.

Tento způsob pohánění projektilu byl testován pouze jednou, neboť v případě experimentů nedosahujeme takových rychlostí projektilu, aby byl tento způsob pohonu výhodný. Jak uvádí zdroj [13], tento způsob pohonu se používá až při rychlostech okolo  $1\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ .

V případě experimentálního měření byl použit ovšem známý vodivý měděný projektil, za který byl umístěn tenký vodivý měděný drátek, sloužící pro prvotní zažehnutí oblouku. Výsledkem měření bez předurýchlení, byla dosažená rychlost  $125\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Patrné jsou jiskry za vylétnutým projektilem na obrázku O.15.3.3.1 na rozdíl od obrázku O.15.3.1.4, který zobrazuje urychlení při použití klasického kovového kontaktu.

Vzhledem k časovým možnostem ovšem projektilu tohoto typu dále nebyla věnována pozornost. Zajímavý by ovšem byl výstřel lehkého projektilu z nevodivého materiálu.

### 15.3.4 Projektil se smíšeným plasmatickým vedením

Jak je uvedeno v kapitole 11. Přenášení proudu do projektilu, existuje alternativa v podobě kombinace obou výše zmíněných variant, proto jsme se s vedoucím práce jali tuto alternativu vyzkoušet. Jak je popsáno v teoreticky rozmyšlené kapitole 11. Přenášení proudu do projektilu, cílem budování tohoto projektilu je oddělení mechanické vodné cesty od proudově vodivé cesty.

Projektil takto uskutečněný je vykreslen na obrázku *O.11.4.1* a reálné provedení na obrázku *O.15.3.4.1*. Provedení je popsáno a zdůvodněno v kapitole 11. Přenášení proudu do projektilu, podkapitole možné alternativy, proto zde bude popsáno chování projektilu při měření.

Z technických vlastností jsou uvedeny rozměry na obrázku *O.11.4.1*. Dále byla série projektilů vyrobena – celkově asi 10 kusů a byla opět stanovena jejich průměrná hmotnost, která činila 3.15 g.

Po vložení projektilu mezi vodící kolejnice byl na první pocit patrný nízký mechanický odpor uspořádání, neboť se projektil pohyboval mezi kolejnicemi prakticky volně. Poté byl proveden zkušební výstřel, zda vůbec projektil opustí hlaveň. Ukázalo se, že hlaveň opustil a myšlenka přenosu proudu skrze obloukový výboj mezi kolejnicí a projektilem tedy evidentně funguje. Navíc byl sejmut proud při výstřelu a porovnán s proudem výstřelu při použití projektilu s kovovým přitlakem. Porovnání je vidět na obrázku *O.15.3.4.2*, kde červený průběh je proud sejmutý při výstřelu se smíšeným plasmatickým vedením a zeleně je pak vidět proud, sejmutý při použití tradičního kovového přitlaku. Je patrné, že proud při použití smíšeného plasmatického vedení je nižší než proud při výstřelu projektilu s kovovým přitlakem. Pokud se podíváme do matematického modelu elektrického schématu – konkrétně programu *vypocet\_L\_R\_obvodu\_25*, kde je takovéto chování patrné pro zvýšený odpor hlavně. Toto chování je vesměs logické a koresponduje i se zdrojem [12], který uvádí, že uspořádání s obloukem hořícím za projektil, vykazuje větší odpor, než přímý kontakt projektilu a kolejnice. Proto se autor tohoto zdroje snaží také nalézt cestu v podobě smíšeného vedení proudu, pomocí plasmatu, které je například patentované a uvedené jako zdroj [19]. Jde ovšem o celý systém railgunu a zde se soustředíme pouze na projektil.

Po úspěšném zkušebním výstřelu tedy následovalo měření ústové rychlosti pomocí rychloběžné kamery na novém projektilu. Měření poskytlo velmi zásadní informace. Bylo zjištěno, že 6 snímků po konci světelného záblesku – tedy sepnutí jiskřiště – vyšlehl z ústí hlavně plamen, patrně jako následek obloukového výboje. 6 snímků odpovídá době 1.2 ms. Dále obloukový výboj samostatně doutnal ještě 5 snímků poté, což odpovídá času 1 ms. Pokud doby sečteme, získáme čas 2.2 ms, což je ovšem dle obrázku *O.15.3.4.2* doba, po kterou hrubě vzato obvodem protéká proud. Pro měření projektilu je ovšem podstatné, že ten opustí hlaveň až 303 snímků po akci jiskřiště. Tedy 58.8 ms po poklesu proudu k nule. Ústová rychlost pak byla vypočtena jako  $12.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .

Vysvětlení na to, co se v hlavní patrně odehrálo, dal s větší přesností nalezený jeden z projektilů. Ten je vyobrazen na obrázku *O.15.3.4.3*. Zaprvé jako jeden z mála projektilů skončil po výstřelu v takřka neporušeném stavu a jsou na něm patrné známky eroze po působícím oblouku. Ten byl patrně zažehnut v zadní části projektilu a Lorentzovou silou byl

pak urychlován dopředu. Tomu nasvědčuje linie odpařeného cínu na projektilu. Když ovšem oblouk dorazil k místu měděného povrchu projektilu, tak se nezastavil a pokračoval dále. Dle stopy eroze v mědi pak patrně pokračoval až před projektil a projektil předběhl. Patrný plamen v ústí hlavně je tedy patrně samotný oblouk, který projektil předběhl.

Na popud tomuto zjištění byl prostudován zdroj [24], který se týkal elektrického oblouku. Ohledně stabilizace oblouku byla ve zdroji uvedena podkapitola, ve které je mimo řadu jiných možností uvedena stabilizace stěnou. Elektrický oblouk je tedy vytlačen k dostatečně teplotně odolné a elektricky nevodivé stěně a je zde udržen. Obdobného principu tedy byla snaha dosáhnout v případě urychlování projektilu – byla idea zabránit oblouku předběhnutí projektilu a naopak vyvíjet na tuto část projektilu tlak. Jelikož v době tvorby projektilu nebyl znám výsledek výstřelu projektilu s kovovým kontaktem a stabilizačním prvkem, byla stabilizační stěna oblouku vyrobena opět z důvěrně známého plastového korku ze zátky od vína s ideou, že po krátký čas plast teplotu vydrží.

Při experimentálním měření byl projektil upravován na míru až na místě, neboť byla snaha přesného utěsnění plochy stabilizačního prvku vzhledem ke kolejnicím, aby se neopakovalo předběhnutí oblouku. Při vyvíjeném drobném tlaku byl projektil hůře posouvatelný než projektil bez stabilizace, ale přitom lépe než projektil s přímým kovovým přitlakem. Projektil byl před výstřelem umístěn na pozici 26.5 cm od ústí hlavně a před odpálením byl rozpohybován předurýchlovačem. Při provedení výstřelu byl sejmut záznam vysokorychlostní kamerou, jehož výsledek je bohužel nevyhovující. Po patrném záblesku jiskřiště je totiž celá scéna přesvětlena plasmatickým oblakem linoucí se z ústí hlavně. Jeden z pozdějších snímků, na kterém je oblak mírně patrný – tj. snímek není pouze bílý – je uveden na obrázku *O.15.3.4.4*. Na obrázku *O.15.3.4.5* je pak pozdější stádium výšlehu, kde je již scéna patrnější, včetně tyčky pro měření polohy projektilu v hlavni, která je v oblaku ztracena. Celý záznam je patrný na přiloženém videu *Smes\_plas\_Cu\_3*.

Vystřelený projektil, stejně jako v případě projektilu s přímým kontaktem a stabilizačním prvkem, nebyl nalezen. Vzhledem k těmto pořízeným záznamům a nenalezenému projektilu bylo usouzeno, že projektil se opět destruoval. Jeho pozůstalá měď byla patrně odpařena a posloužila jako zdroj kovových částic pro hoření oblouku, stejně jako tomu bylo v případě cínu téhož projektilu bez stabilizace oblouku. Vzhledem k výsledkům měření – především k záběrům z rychloběžné kamery – bylo v této oblasti učiněno několik teoretických závěrů, pro případné další budování projektilů tohoto typu. Zprv by bylo vhodné vyrobít stabilizační stěnu z jiného materiálu, který bude teplotně odolnější než použitý špunt. Měl by to být ovšem materiál dobře tvárný, neboť by například v případě keramiky, či obdobných křehkých struktur, hrozilo poničení stabilizační stěny vlivem nerovností v hlavni. Dále je nutné vyřešení připevnění stabilizační stěny k elektrovodné části, neboť na stěnu je ze zadu vyvíjen tlak hořícího oblouku. Ten přitom pravděpodobně hoří pomocí kovových prvků projektilu. Pokud by se čelní stabilizační stěna od celkového projektilu vzdálila, nejspíše by oblouk opět předběhl projektil a urychlil by se sám. Stávající technikou připevnění šroubu či vrutu ovšem tento problém řešit nelze, protože v elektrovodné části se vlivem otvoru sníží průřez a projektil dle vztahu (15.3.2\_1) výkon tekoucí skrz projektil nevydrží pohromadě.

## 15.4 Měření průběhu urychlování

Pro zjištění ztrát, vznikajících v systému při urychlování, je vhodné určit časový vývoj rychlosti při urychlování. Po této znalosti zbude v rovnici bilance energie (14.2\_2) pouze jedna neznámá funkce, která bude vyjadřovat ztráty. Rovněž se můžeme pak podívat na teoreticky vypočtenou dráhu, která je výstupem bezetrátového modelu a porovnat ji s naměřeným průběhem vývoje rychlosti. To samé lze provést při znalosti polohy v čase. Klíčové tedy zůstává změření polohy projektilu v čase, v průběhu urychlování.

Dále je pozoruhodné, že pokud se zaměříme na časový vývoj proudu, trvá celkový děj zhruba 2 ms. Ovšem při zhlédnutí záznamu z rychloběžné kamery byl pozorován výlet i toho doposud nejrychlejšího projektilu ( $143 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ústové rychlosti) za 6 ms, průměrného projektilu s kovovým přitlakem pak za 10 ms od akce jiskřiště. To by ovšem znamenalo, že k urychlování dochází pouhé 2 ms a zbytek děje je pro let projektilu ztrátový. Také patrně dochází k urychlení na extrémně krátké dráze, neboť se nepředpokládá rozpohybování mechanických hmot projektilu za čas 2 ms. Proto byl při měření zkoumán povrch kolejnic a byla zjištěna gougingová degradace pouze v počátcích hlavně. Následný povrch, kudy se projektil ubíral, byl shledán jako hladký. Situace gougingové degradace na počátku hlavně je zobrazena na obrázku O.15.4.1. Po tomto objevu byly projektily, až na účelné výjimky, vkládány z ústí hlavně několik desítek centimetrů od ústí. Cílem této akce bylo snížení třecích ztrát v průběhu letu celou hlavní, když k vlastnímu urychlení dojde jen na úseku malé délky – patrně několik cm. Po sejmutých oscilogramech je skutečně patrné, že proud není násilně přerušen – tedy že nedošlo k přerušování obvodu, neboli výletu projektilu před poklesem proudu. Nejspíše by ovšem v takovémto případě zahořel v ústí hlavně oblouk, který by zbytkový náboj z kondenzátorové baterie odsál. Soustředit se tedy budeme na správnou časovou synchronizaci rychloběžné kamery a osciloskopu po provedeném měření. Změnou počáteční polohy projektilu bychom si ovšem měli část ztrát ušetřit a to by mělo být vidět při snímání urychlování pomocí senzorů polohy.

V průběhu psaní práce byly objeveny některé možnosti snímání polohy, které budou nyní popsány. To se ovšem netýká metody měření magnetického pole, která je dle zdroje [14] známá a bude popsána jako první.

### 15.4.1 Měření magnetického pole pomocí Hallových sond

Dostupná možnost měření polohy projektilu je dle zdroje [14] možnost měření magnetického pole, které projektil vytváří. Magnetické pole kolejnic je vidět na obrázku O.13.2.2.2, kde je vidět numerická simulace magnetického pole kolejnic. Pokud budeme tedy chtít snímat polohu projektilu, stačí dle [14] rozmístit nad hlaveň v daných vzdálenostech Hallovu sondy pro snímání magnetického pole, které budou snímat magnetické pole v čase. Ze znalosti vzdálenosti a času, ve kterém došlo k indikaci magnetického pole, můžeme určit vývoj rychlosti projektilu, či jeho polohu v hlavní v daném čase.

V praktickém provedení tato myšlenka ovšem vázne, neboť dle provedené simulace pole, dosahuje velikost magnetické indukce v maximální hodnotě až 2.5 T. Takovouto hodnotu by ovšem řada komerčně dostupných sond nemusela vydržet, či by museli být umístěny v delší

vzdálenosti od hlavě, což by ovšem zkreslilo přesnost snímání polohy. Proto tato možnost zkoušena nebyla a experimentálně byla ověřena až možnost následující.

### 15.4.2 Měření magnetického pole pomocí cívek

Vzhledem k možnosti destrukce Hallových sond byla objevena a vyzkoušena nová metoda měření polohy projektilu, která si také principiálně zakládá na snímání magnetického pole. Jelikož se jedná o časově a zároveň polohově proměnné pole, vyvstal nápad měření polohy magnetického pole pomocí cívek, ve kterých se předpokládá indukování napětí. Cívka je pevně umístěna nad hlavní v určité poloze a v hlavní pod ní proletí projektil, táhnoucí si s sebou magnetické pole. I kdyby byl projektil napájen konstantním proudem, při jeho prostorovém pohybu se bude cívkám pole jevit časově proměnné, neboť bude jiné v čase před přiletem projektilu, v čase polohy projektilu pod cívkou a po jeho dalším posunu. V dané cívce by tedy mělo docházet k indukování napětí.

Tato metoda snímání polohy projektilu byla experimentálně ověřována a to v několika polohách měřících cívek od počátku hlavě. Také, jak se ukázalo dle numerického modelu pole, se předpokládá přítomnost magnetického toku v ocelových šroubech, které drží staženou hlavě. Proto vyvstal nápad vytvořit cívku přímo z tohoto šroubu, neboť v průběhu hlavě jsou již rozmístěny v daných vzdálenostech. Tuto cívku znázorňuje obrázek *O.15.4.2.1*, kdy je pomocí pěti závitů vodiče s modrou izolací vytvořena cívka s jádrem ze šroubu.

Krom těchto vyrobených cívek byly nad hlavě umístěny také komerčně získané cívky z feritovým jádrem. Při měření tedy byl 1. kanál osciloskopu připojen na komerční cívku, umístěnou ve vzdálenosti 7.5 cm od počátku kolejnic, kanály 2 a 3 na cívku vyrobenou pomocí šroubů a na kanálu 4 byl snímán proud. Sejmутý oscilogram při výstřelu je patrný na obrázku *O.15.4.2.2*. V komerčně dostupné cívce je patrné indukování napětí o amplitudě cca 2 V. Amplituda pro toto měření ovšem není podstatná. Důležitější je zaznamenaná změna – tedy čas, kdy k indukci došlo. Oproti tomu na cívkách vyrobených pomocí šroubu indukované napětí patrné není. Další pozorování tedy probíhalo především na cívkách komerčně dostupných.

Při dalším výstřelu tedy byly cívky rozmístěny nad hlavní a bylo snímáno jednotlivé napětí. Uspořádání jedné cívky na hlavní je vidět na obrázku *O.15.4.2.3*. Cívky byly rozmístěny ve vzdálenostech po 10 cm od první cívky a polohy cívek od počátku kolejnic tedy byly: 7.5 cm, 12.5 cm, 22.5 cm. Na posledním dostupném kanálu byl snímán časový průběh proudu a sejmутé hodnoty jsou vidět na obrázku *O.15.4.2.4*, kde nejvýše je zobrazen průběh na první cívce, pak na druhé, na třetí a jako poslední je červenou barvou zobrazen proud.

Pro vyhodnocení jsou zajímavé dva úkazy. Zaprvé indukování napětí ve všech cívkách ve stejný čas a zadruhé dva peaky rozdílných polarit sejmутé na první cívce, na ostatních však nikoliv. Indukce napětí ve stejný čas může být způsobena rychlým časovým nárůstem magnetického pole značné amplitudy. Jelikož je dle Faradayova zákona napětí úměrné záporné hodnotě časové derivace, předpokládá se při pozorovaných časech a amplitudách značné indukované napětí. Jelikož dle numerické simulace pole dosahuje magnetická indukce značně vysokých hodnot, můžeme předpokládat plošné působení pole, které bude mít patrně značně delší dosah než jen do oblastí nad projektilem. Tomuto jevu bylo dále věnované další měření, nyní se pojdme zaměřit na druhý indukovaný peak v první cívce.

Jelikož byl druhý peak indukován na první cívce, je dobře možné, že v daném čase druhého peaku došlo k posunu projektilu do oblasti za snímací cívkou, neboť indukce svědčí o změně pole. Časová změna to přitom pravděpodobně není, protože na ostatních cívkách se napětí neindukovalo. Patrně tedy metoda snímání polohy pomocí indukce napětí v cívkách bude reálná.

Další měření byla zaměřená na indukování napětí ve stejný čas. Při stejném uspořádání cívek byl proveden výstřel a indukované napětí bylo snímáno v kratší čas. Sejmутý oscilogram je patrný na obrázku *O.15.4.2.5*. Na obrázku je skutečně patrný jeden časový okamžik, kdy dochází k indukování napětí takřka ve stejný časový okamžik ve všech cívkách. Nejnižší průběh, vyobrazený zeleně, opět náleží proudu, který, jak je patrné, vykazuje na počátku jisté oscilace.

Pro další měření byla poloha cívek změněna a poslední cívka byla přesunuta do polohy ústí hlavně. Při snímání byla rovněž posunutá časová záznamová oblast osciloskopu na ještě kratší časovou hodnotu děje než v případě obrázku *O.15.4.2.5*. Sejmутý oscilogram je pak vidět na obrázku *O.15.4.2.6*.

Ze změřených dat bylo tedy zhodnoceno, že druhý peak na první cívce z obrázku *O.15.4.2.4* je indukován změnou pole vlivem posunu projektilu pod cívkou. Než se ovšem projektil stihl dostat pod další cívky, přestal z kondenzátorové baterie vytékat proud. Dále byl přijat předpoklad, že první peak, indukovaný ve všech cívkách nezávisle na jejich poloze, je způsoben rychlou změnou magnetického pole v okolí celého uspořádání. Z vyzkoušených měření je tedy patrné, že snímat polohu projektilu v hlavní patrně možné je, jen není zcela vhodné pro toto konkrétní zařízení, neboť projektil dosahuje nízkých rychlostí a proud tedy poklesne k nule dříve, než se projektil stihne pod cívkou přesunout. Proto byly hledány a objeveny další metody měření polohy projektilu.

### **15.4.3 Měření polohy pomocí přerušného obvodu**

Po výzkumu snímání polohy pomocí magnetického pole, způsobené proudem tekoucím skrze projektil, byla tato metoda prohlášena za pravděpodobně funkční, avšak z důvodu urychlení na krátké dráze nevhodná pro současné zařízení. Bylo proto bádáno dále a byla snaha nalézt jinou objektivní metodu, která byla skutečně nalezena. Jde o metodu, která si zakládá na mechanickém kontaktu projektilu s určitým senzorem, umístěným v dané vzdálenosti v hlavní. Myšlenka je založená na průtahu tenkého drátku skrze hlaveň, kterým bude protékat elektrický proud z externího obvodu. V případě kolize projektilu a drátku dojde k přerušení drátku a proud přestane téct. To bude moct být vyhodnoceno pomocí osciloskopu, který bude proud snímat. Tato myšlenka byla úspěšně otestována pomocí sportovní vzduchové pušky, kdy byly skrze mosaznou trubku o průměru málo větším než projektil nataženy dva drátky, protékané proudem. Následoval výstřel a záznam proudu pomocí osciloskopu. Sejmутý oscilogram je patrný na obrázku *O.15.4.3.1* a je na něm jasně patrný čas, kdy došlo k přerušení obvodu – tedy časověprostorová stopa projektilu. Ze znalosti délky tyčky a přepočteného sejmутého času byla určena rychlost projektilu na  $94 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Ze znalosti chování pušky je ale známá ústíová rychlost  $135 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Patrně tedy vlivem nárazu – v tomto případě lehkého – projektilu do drátku rychlost značně poklesla. Toho by se ovšem dalo vyvarovat pomocí použití



tenčího drátku – například z rozebrané komerčně koupené indukčnosti, navíc v případě použití u sledovaného zařízení by bylo použito hmotnějšího projektilu.

Použití této metody na stávajícím zařízení ovšem brání jedna zásadní překážka. V obvodu hlavně se totiž při výstřelu vyskytuje vysoké napětí, které by se nejen při styku projektilu s přerušeným vodičem mohlo dostat do měřícího obvodu a poničit měřící aparaturu, zejména zapůjčený osciloskop. Tato technika tedy pro sledované zařízení také použita nebyla, ale dle provedených experimentů vykazuje jistou výpovědní hodnotu.

#### **15.4.4 Měření polohy pomocí měřky polohy v hlavni**

Po úspěšných, ale pro stávající zařízení nepoužitelných objevených metodách snímání polohy projektilu jsme se s vedoucím práce nenechali odradit a vymysleli jsme metodu, která byla nakonec pro stávající zařízení použita. Jedná se o umístění tenké lehké tyčky o vzdálenosti delší než hlaveň před projektil, který ji bude při urychlování vytlačet. Pak jen zbývá snímat ústí hlavně vysokorychlostní kamerou, která bude polohu konce tyčky zaznamenávat.

Samozřejmě má tato metoda několik nevýhod. Zaprvé samotným přidáním měřící tyčky ovlivníme výsledek experimentu, neboť tyčka vykazuje jistou hmotnost a také ovlivní aerodynamické uspořádání v hlavni. Problém s hmotností lze minimalizovat pomocí použití lehké tyčky. Navíc je pak vhodné přičíst hmotnost tyčky k hmotnosti projektilu a v teoretickém modelu počítat s hmotností projektilu větší o hmotnost aktuálně použité tyčky. Při prováděných měřeních byla použita tyčka z bývalé dřevěné žaluzie, která byla patrně z olšového dřeva. Uříznuta byla na objekt, který měl při každém měření jinou délku, ale v průřezu činila zhruba 1 x 2 mm, pokud se řez zrovna povedl. V laboratoři byla stanovena hmotnost tohoto prvku jako 0.3 g/10 cm a pro každé měření je tak dopočitatelná hmotnost zvolené tyčky, podle její délky.

Dále bylo při cvičném předurychlení zjištěno, že tyčka může při skřípnutí mezi kolejnicí a projektil bránit projektilu v pohybu. Pro projektily bez špuntového čela, do kterého lze tyčku zasadit, byl tedy přidán mezi tyčku a projektil kus polystyrenu, který byl tvarován přesně do rozměrů kolejnic a bránil tak skřípnutí.

Samotné měření bylo zkoušeno na různé druhy projektilů. Nejprve bude popsán projektil s přímým kovovým přitlakem a stabilizačním prvkem, kde je na snímcích patrné urychlování, ale také je patrné předběhnutí části projektilu měřící tyčku. Jak je popsáno v kapitole 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů, projektil se při výstřelu pravděpodobně rozpadl a měření polohy je proto neobjektivní, protože tyčka letí pak z velké části setrvačností, či hnaná tlakem vzniklých plynů, a nikoliv projektilem. Nejsme ani s to říci v jakém časovém okamžiku došlo k destrukci a zda je tedy alespoň část dat použitelná. Počáteční poloha projektilu byla na počátku hlavně.

Další na pořadí byl projektil se smíšeným plasmatickým urychlováním. Dle záznamu je ovšem patrná exploze projektilu ještě před pohybem tyčky. Další možný pohled na tyčku je až značně později po opuštění hlavně a uvnitř plasmatického oblaku. Zde ovšem poloha již není důležitá, proto bylo toto měření z hlediska polohy také označeno jako neúspěšné. Projektil byl při tomto experimentu umístěn 26 cm od ústí.

Následovalo opět měření projektilu s kovovým přtlakem a stabilizačním prvkem. I toto měření dopadlo neúspěšně, ale je důležité experiment zmínit, neboť na nalezené tyčce byly patrné lesklé kousky mědi, což skutečně svědčí o roztavení, či alespoň sublimaci části projektilu. Projektil byl v tomto případě umístěn 38 cm od ústí hlavně.

Jako poslední byl uskutečněn experiment s projektilem a klasickým kovovým přtlakem bez stabilizačního prvku. Tento experiment, zdá se, má značnou výpovědní hodnotu. V první fázi po akci jiskřiště je projektil stále v klidu. Po skončení záblesku se projektil začne nejprve pohybovat poměrně pomalu. Podstatná je zmínka, že jde o akci s předurychlením, kdy časový posun toku proudu byl nastaven jako nulový. V dalším čase je ovšem patrný rychlý nárůst rychlosti projektilu. Ten je patrný i ze zvlnění tyčky, které je zkreslující, ale pro tento experiment mu nebylo zabráněno. Zvlněnou tyčku lze vidět na obrázku *O.15.4.4.1*. Na dalších snímcích je patrná již takřka konstantní rychlost tyčky. Na snímcích bohužel není zcela a jasně patrný projektil, proto nelze jednoznačně určit rychlost. Lze se ovšem zaměřit na jeden z výraznějších prvků scény, který cestuje z hlavně ve dráze projektilu a ústovou rychlost projektilu prohlásit za obdobnou tomuto prvku. Ústová rychlost byla takovýmto způsobem určena na  $62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Počáteční poloha projektilu byla 25 cm od ústí hlavně a délka měřicí tyčky byla 40 cm. Vypočtená hmotnost tyčky byla 1.2 g. Celková hmotnost urychlovaného tělesa, včetně ucpávkového čela a měřicí tyčky, pak tedy byla započítávána jako 5.3 g.

Nyní věnujme pozornost vyhodnocení snímání polohy projektilu. Záznam jednotlivých obrázků byl procházen po jednotlivých snímcích a byla určována poloha konce tyčky na daném snímku. Ze znalosti časového odstupů byl pak vypočten profil polohy v čase, který je pro urychlovací děj zobrazen na obrázku *O.13.4.6*, kde je odečtena počáteční poloha.

Dále byla sejmutá poloha numericky derivována, abychom získali průběh rychlosti při ději. Ten je vyobrazen na obrázku *O.15.4.4.2* a je patrné, že průběh konverguje ke konečné rychlosti – tedy cca  $55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Tento údaj je patrné v souladu s měřením, neboť projektil při tomto výstřelu nebyl na záběrech patrný, ale obdobnou rychlost lze získat sledováním jiného objektu.

Získaná data měření tedy budou pravděpodobně relevantní a mohou být použita jako znalost polohy a rychlosti projektilu v čase. Metoda má samozřejmě mnoho nezmíněných nevýhod, což je například kmitání měřicí tyčky při rychlém ději – tedy prudšího nárůstu rychlosti. Přitom zrovna v této oblasti by bylo nejzajímavější znát průběh rychlosti. Klepání tyčky by přitom šlo odstranit pomocí druhé tyčky, vhodně připevněné k první tyčce. Celým tímto uspořádáním ale narůstá hmotnost urychlovaného tělesa a je otázka, jestli tímto samotným prvkem měření více nezkrusíme. Další problém nastává s časovou synchronizací, neboť kamera zaznamená na více obrázcích záblesk jiskřiště. Pro účely výpočtu je počítáno s posledním obrázkem, kde je ještě patrné světlo z oblouku, jako s časem nula. Je však možné, že se nevhodnou volbou dopustíme chyby až 0.5 ms. Nicméně výsledná data vytvoří značný obrázek o chování systému.

## 15.5 Měření vlivu předurychlení

Měření vlivu předurychlení má za cíl vyzkoumat vliv počátečního urychlení projektilu na ústovou rychlost projektilu. První část měření se ovšem týkala zahrnutí předurychlovače do stávajícího systému. Jako první proběhlo mechanické připevnění řídicího procesoru a ovládacích relé. Bylo zvoleno provizorní umístění na konstrukční sloupek systému v blízkosti jiskřiště. Uchycení je vidět na obrázku *O.15.5.1*. Následně byl systém elektricky zapojen se stávajícím zařízením, dle schématu na obrázku *O.12.2.1*. Dále byl systém elektricky otestován, kdy byl urychlovač nabit na 500V a sepnut do zkratu. Systém předurychlovače zareagoval správně jako v domácích podmínkách, jak je ukázáno na videu *funkce předurychlovače*. Jen místo testovací žárovky skutečně sepnulo jiskřiště. Následovalo upevnění desky předurychlovače do rámu držící hlavěň. Tak bylo činěno pomocí stahovacích elektrikářských pásků, které se upínaly do čtyř připravených děr v desce předurychlovače. Bylo tak možné polohování v rámu, které zaručilo přesné směřování posuvného ramena do mezery mezi kolejnicemi. Zaznamenané uchycení je vidět na obrázku *O.15.5.2 a O.12.2.2*, kde je i patrná návaznost ramene do prostoru hlavěň. Pak byla jen zkoušena snadnost pohybu urychlovacího ramene mezi kolejnicemi urychlovače.

Do počátku hlavně byl vložen projektil s kovovým přitlakem bez vnější stabilizace. Předurychlovač byl ručně natažen a poté bylo nasazeno rameno předurychlovače a projektil byl zepředu dotlačen tak, aby na rameno doléhal. Následně byl předurychlovač nabit na 7 kV na kondenzátorové baterii a byl proveden úspěšný výstřel. Po rozboru záběrů z rychloběžné kamery jdou vyvodit následující poznatky:

K výletu projektilu z hlavěň došlo za 29 snímků, což odpovídá času 5.8 ms. Pro srovnání projektil bez předurychlení upouštěl hlavěň v časech 10 ms.

Dále byla určována známým způsobem ústová rychlost, která byla stanovena na  $143 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , což byla v provedených měřeních nejvyšší ústová rychlost, které bylo s projektilem tohoto typu dosaženo. Výstřel je zaznamenaný na přiloženém videu *Cu\_kov\_predurychl*.

Také byla zkoušena akce předurychlovače na prázdno, aby bylo zjištěno, jak moc přispívá počáteční rychlost k rychlosti ústové. Projektil s kovovým přitlakem se ovšem pohnul pouze v rozsahu zdvihu ramene. Přidanou počáteční rychlost lze tedy v případě tohoto projektilu zanedbat.

Reakce na předurychlení je tedy patrná. Dále byl zkoumán vliv předurychlení na projektil s částečným plasmatickým vedením a projektil s kovovým kontaktem a stabilizačním prvkem. Jak je ale popsáno v podkapitole 15.3 Měření pro výzkum chování projektilů různých druhů, urychlování těchto dvou projektilů skončilo jejich roztavením. Zaznamenané výsledky jsou pořízeny, jakož i informace o poloze projektilu v průběhu urychlování, které bylo činěno dle 15.4.4 Měření polohy pomocí měřky v hlavni. Vlivem nejasného osudu projektilů během urychlování a jejich patrnému roztavení jsou ovšem naměřené výsledky neobjektivní.

Vzhledem k výsledku předurychlení projektilu s kovovým přitlakem se akt předurychlení projektilu počítá za experimentálně ověřený jako přínosný, a to by mělo platit pro projektily s jakýmkoliv způsobem pohonu, či přenášení proudu.

## 16. Závěrečná zhodnocení práce

Hlavním cílem práce bylo sestavení matematického modelu a jeho výstupy ověřit na stávajícím zařízení. Obě tyto skutečnosti se povedly a sestavené matematické modely lze prohlásit na vypovídající, neboť matematické modely dosahují obdobných výstupních ústředních rychlostí jako naměřené hodnoty. Pro srovnání: měřeno  $83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  až  $125 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , vypočteno  $76 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  až  $123 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vytvořené modely nejsou zcela dokonalé – například se nepovedl utvořit model magnetického pole v časově proměnné oblasti. I tak bylo na stávajícím zařízení mnohé objasněno. Zato v oblasti elektrického modelování obvodu bylo mimo jiné prokázáno, že poloha projektilu na počátku a konci hlavně, nemá na elektrické parametry soustavy přílišný vliv a bylo více cestami poukázáno na nízkou účinnost zařízení.

V oblasti ztrát nebyl z přílišné komplikovanosti možný jejich exaktní výpočet. I přesto byl sestaven nekompletní model teoretického výpočtu ztrát a jsou navrženy metody, pro jejich možné následné určení. Při určování ztrát do stávajícího matematického modelu, jsme se museli opřít o změřená data, ovšem v tomto důsledku byla objevena nová metoda snímání polohy projektilu v hlavni. Zde je důležité zdůraznit, že samotná metoda je použitelná a měření ověřená, ale prozatím reálné provedení, které bylo ověřováno Bohužel pouze jednou, je zatíženo chybou, která se projevila například drobným časovým posunem síly oproti času tekoucího proudu. Je to ovšem nová metoda odečtu polohy urychlovaného tělesa, která byla v praxi ověřena a shledána jako úspěšná. Další možný vývoj této metody by byl na poli opatření proti vlnění měřky, či propojení s elektrickým senzorem, např. dle 15.4.3 Měření polohy pomocí přerušovaného obvodu, aby bylo možné stanovení nulového času.

Dále byly zkoumány vyrobené projektily různých druhů. Několik projektilů se shledalo neúspěchem, jako například projektil s kovovým přitlakem a stabilizačním prvkem, který v hlavni explodoval. Důvod proč tomu tak bylo, byl ale odhalen a v rámci dalšího výzkumu se tomuto jevu lze vyvarovat. V oblasti projektilu byl tedy také proveden značný výzkum, na který lze navázat.

Při sestavování modelu založeném na bilanci energie, bylo mimo jiné zjištěno velké množství ztrát na stávajícím systému. Pro ilustraci z počáteční energie 126 kJ, která je v systému k dispozici, se pro samotné urychlení využije pouze 7J. V rámci matematického modelu byly ovšem největší ztráty lokalizovány v předřadných odpornících a vhodnými úpravami se jich lze vyvarovat. Nad rámec práce bylo vyřazení odporníků v modelu simulováno a v takovém případě bychom mohli dosahovat ústředních rychlostí okolo  $300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Také byl nad rámec zadání práce zkonstruován předurychlovač, kterým bylo stávající zařízení doplněno a měření bylo dokázáno, že vede ke zvýšení účinnosti systému. S použitím zkonstruovaného předurychlovače, byla dosažena doposud nejvyšší ústřední rychlost zařízení  $143 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

## 17. Použité zdroje

- [1] Birkeland, Kristian. *Aldebaran homepage* [online]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/famous/people/Birkeland\\_Kristian.php](http://www.aldebaran.cz/famous/people/Birkeland_Kristian.php)
- [2] Jiří Hofman: Kolejnicové elektromagnetické dělo. *Aldebaran homepage* [online]. Copyright © Copyright Aldebaran Group for Astrophysics [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: [http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008\\_10\\_bum.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_10_bum.php)
- [3] I. R. McNab, "Early electric gun research," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 35, no. 1, pp. 250-261, Jan 1999.  
doi: 10.1109/20.738413  
keywords: {electromagnetic launchers;history;projectiles;applications;developments;electric gun research;historical overview;novel ideas;projectile launchers;Chemistry;Costs;Cows;Engines;Guns;IEEE news;Projectiles;Propellants;Protection;Rockets},  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=738413&isnumber=15929>
- [4] Electromagnetic Rail Gun (EMRG). *GlobalSecurity.org - Reliable Security Information* [online]. Copyright © 2000 [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: <http://www.globalsecurity.org/military/systems/ship/systems/emrg.htm>
- [5] I. R. McNab, "Progress on Hypervelocity Railgun Research for Launch to Space," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 1, pp. 381-388, Jan. 2009.  
doi: 10.1109/TMAG.2008.2008601  
keywords: {railguns;Air Force Office of Scientific Research;Texas Tech University;University of Minnesota;University of New Orleans;University of Texas;aerothermal behavior;airborne platform;distributed power feed concepts;hypervelocity railgun research;mass 10 kg;nosetip ablation;plasma arc;preinjected plasma armature;size 7 m;velocity 11 km/s;velocity 5.2 km/s;velocity 7 km/s;Aerothermal;high velocity;railgun;space},  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4773566&isnumber=4773510>

- [6] I. R. McNab, "Launch to space with an electromagnetic railgun," in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 39, no. 1, pp. 295-304, Jan. 2003.  
doi: 10.1109/TMAG.2002.805923  
keywords: {aerospace propulsion;pulsed power supplies;railguns;10 GJ;7500 m/s;direct payload launch;economic feasibility;electromagnetic railgun;launch to orbit;muzzle energies;muzzle velocities;power supply technology;railgun system concept;rugged payloads;space;technical feasibility;technology development issues;Acceleration;Costs;Electromagnetic launching;Fuels;Laboratories;Payloads;Power supplies;Railguns;Space shuttles;Space technology},  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1179826&isnumber=26497>
- [7] Doc.Ing.Petr Voženílek, CSc., Doc.Ing.Vladimír Novotný, CSc. a Doc.Ing.Pavel Mindl, CSc. *Elektromechanické měniče*. České vysoké učení technické v Praze, 2011. Skriptum. České vysoké učení technické v Praze - Fakulta Elektrotechnická.
- [8] BAE systems. *Electromagnetic Railgun: Datashhet* [online]. In: . [cit. 2017-05-11].
- [9] BAE systems. *Hyper velocity projectile: Datashhet* [online]. In: . [cit. 2017-05-11].
- [10] VEVERKA Antonín. *Technika vysokých napětí*. 1. Praha: SNTL, 1982.
- [11] *R.A. Marshall, "Railgun overview," Department of Energy Impact Fusion Workshop, Los Alamos Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, U.S.A., July 10-13, 1979.*
- [12] I. R. McNab, M. T. Crawford, S. S. Satapathy, F. Stefani and T. J. Watt, "IAT Armature Development," in *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 39, no. 1, pp. 442-451, Jan. 2011.  
doi: 10.1109/TPS.2010.2082568  
keywords: {railguns;skin effect;IAT armature development;Institute for Advanced Technology;bore geometries;contact interface pressures;current nonuniformities;electromagnetic skin effects;fiber contacts;launch package designs;launch package interactions;magnetic obturators;magnetic sawing;matching armature;material action limits;material surface treatments;melt lubrication;parasitic mass;pseudoliquid armatures;railgun armature development;splined armatures;Aluminum;Copper;Force;Leg;Materials;Railguns;Rails;Armatures;electromagnetic (EM) launch;railguns},  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5621924&isnumber=5680667>
- [13] *R.A. Marshall, "Railguns," 9th U. S. National Congress of Applied Mechanics, Cornell University, Ithaca, New York, U.S.A., June 21-25, 1982.*
- [14] *U.S. Naval Research Laboratory (NRL)* [online]. Copyright ©eP [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: [https://www.nrl.navy.mil/content\\_images/2012Review/12\\_FA2.pdf](https://www.nrl.navy.mil/content_images/2012Review/12_FA2.pdf)

- [15] *DTIC Online* [online]. Copyright © [cit. 11.05.2017]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a152129.pdf>
- [16] Bc. Jaroslav Broul. *Návrh elektromagnetického kolejnicového děla*. Plzeň, 2013. Diplomová práce. ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI-FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ-Katedra teoretické elektrotechniky. Vedoucí práce Ing. David Pánek, Ph.D.
- [17] Martin KOHOUT. *Ideový návrh konstrukce projektilu pro elektromagnetický urychlovač těles: Ev. č.: 1446/15*. Brno, 2015. Bakalářská práce. UNIVERZITA OBRANY - FAKULTA VOJENSKÝCH TECHNOLOGIÍ - Katedra zbraní a munice. Vedoucí práce Plk. doc. Ing. Libor DRAŽAN, CSc.
- [18] *DTIC Online* [online]. Copyright © [cit. 12.05.2017]. Dostupné z: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a152129.pdf>
- [19] MCNAB, Ian a George KEMENY. *Electromagnetic projectile launcher with combination plasma/conductor armature*. 1984. U.S.A. US 4467696. Uděleno 24. květen 1982. Zapsáno 28. srpen 1984.
- [20] Ping Ma, Ming Yang a Yuwei Hu. A Whole Trajectory Simulation for the Electromagnetic Rail Gun. *Www.thinkmind.org* [online]. 2012, November 18, 2012(50023), 92 to 96 [cit. 2017-04-20]. ISSN 2308-4537. Dostupné z: [https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=simul\\_2012\\_4\\_20\\_50023](https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=simul_2012_4_20_50023)
- [21] KOWALENKO, V, a MATERIALS RESEARCH LABS ASCOT VALE (AUSTRALIA). *Experimental Results from Railgun Firings Involving Magnetic Flux Probes.: Technical note*, [online]. 1986, 43 [cit. 2017-03-12]. Dostupné z: *Experimental Results from Railgun Firings Involving Magnetic Flux Probes*.
- [22] KULHÁNEK, Petr. *Tf1: Teoretická fyzika: Studijní text pro zvědavé studenty* [online]. Praha: FEL ČVUT, 2016, 2016(3. doplněné vydání) [cit. 2017-04-25].
- [23] Periodická tabulka prvků: Měď. *Periodická tabulka prvků* [online]. Copyright © 1998 [cit. 14.05.2017]. Dostupné z: <http://www.tabulka.cz/prvky/ukaz.asp?id=29>
- [24] HRABOVSKÝ, Milan. *Elektrický oblouk: Termické plazma* [prezentace]. In: . 2016, s. 63 [cit. 2017-04-21].
- [25] Lorentz Force Law[online]. Dostupné z: <http://www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magfor.html#c2>
- [26] *Popular Science: Whats new magazine*. Madison Avenue New York: Times mirror magazines, 1981, 1981(5).

- [27] .:: *GEOCITIES.ws* :: [online]. Dostupné z: <http://www.geocities.ws/physicsthings/microrailgu.htm>
- [28] Nabitá částice v elektromagnetickém poli [online]. Dostupné z: [http://www.physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/elmag/6\\_1](http://www.physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/elmag/6_1)
- [29] DOLEŽEL, Ivo. *Electromagnetics and related coupled problems: elektronické učební texty*.
- [30] Teoretická mechanika | VŠPřednášky.cz. *VŠPřednášky.cz | Kvalitní nahrávané vysokoškolské přednášky v češtině pro všechny a zdarma* [online]. Dostupné z: <http://www.vsprednasky.cz/kurzy/fyzika/teoreticka-mechanika/>
- [31] NRL Commissions Small Railgun - U.S. Naval Research Laboratory. *U.S. Naval Research Laboratory (NRL)* [online]. Dostupné z: <https://www.nrl.navy.mil/media/news-releases/2014/nrl-commissions-small-railgun>
- [32] ČÍŽEK, Martin. *Poznámky k některým tématům z přednášky TMF057: Numerické metody pro teoretické fyziky* [online]. In: . Praha, 2015, 27 - 45 [cit. 2017-05-1].
- [33] E.RICE, Eric, Lisa A.MILLER a Richard W.ERHART. *Final technical report: For earth to space elektromagnetic launchers* [online]. , 31-37,58,82-105,113-127,150 - 187 [cit. 2017-05-1].
- [34] PowerLabs Rail Gun!. *Sam Barros' PowerLabs!* [online]. Dostupné z: <http://powerlabs.org/railgun.htm>
- [35] Simulating the Difference between a DES and a Simple Railgun using SPICE - INSPIRE-HEP. *HEP - INSPIRE-HEP* [online]. Dostupné z: <http://inspirehep.net/record/1421965/plots>
- [36] PUTMAN, Phil. *LIFEBOAT FOUNDATION: EM Launch Competitors' Guide* [online]. Chapters 1 - 6,. 2006 [cit. 2017-03-15].



## 18. Seznam příloh

### 18.1 Přiložené programy

Pro správný chod programů je nutno programy uložit do společné složky s načítaným souborem – typicky soubory s koncovkou *.xls* – a v hlavičce nutno zadat správnou cestu do dané složky, příkazem:

```
SetDirectory[NotebookDirectory[ ]]; "C:\patříčná cesta ke společné složce";
```

#### **Přiložené programy:**

**Optimal\_odpal\_Cas\_rucni** - Program pro ukázkou pulzů a výstupní rychlosti se vzájemným časovým odstupem, pro možné napájení DES railgunu

**ridici\_program\_arduino** - program, který je nahrán do mikroprocesoru Arduino Uno, pro ovládání soustavy předurýchlovače

#### Modely elektrické části:

**vypocet\_L\_R\_obvodu 23** - Program pro hledání velikosti prvků náhradního schématu, dle obrázku O.13.1.1.1.

**vypocet\_L\_R\_obvodu 25** – Program pro výpočet prvků náhradního schématu, dle obrázku O.13.1.2.1.

**vypocet\_L\_R\_obvodu 23\_konec** - Program pro hledání velikosti prvků náhradního schématu, dle obrázku O.13.1.1.1, při poloze zkratovací spojky na konci hlavně

**porovnani\_tylu**-Program pro vyhodnocení sejmutých průběhů proudů při různých polohách zkratovací spojky v místech hlavně. Viditelné je také vhodné proložení naměřených hodnot reprezentativním bodem / přímkou

#### Modelování elektromagnetického pole:

**B\_koleje\_cas** - program pro výpočet časově proměnného magnetického pole kolejnic. Program byl shledán jako neúspěšný

**B\_koleje\_rez\_z\_cadu** - program pro výpočet stacionárního magnetického pole kolejnic při zvolené velikosti budící proudové hustoty

**Bpole\_projektilu** - program pro výpočet stacionárního vlastního magnetického pole projektilu při zvolené budící proudové hustotě

**Bpole\_projektilu\_a\_koleji** - program pro výpočet interakce pole projektilu a pole kolejí. Program je pouze ilustrativní a data z něj byly odečítány orientačně, avšak pro finální model zařízení použit nebyl

**J\_projektil\_sam** - Modelování stacionárního rozložení proudové hustoty uvnitř projektilu, při započátní samotné geometrie projektilu

**J\_projektíl\_v\_koleji** - Modelování stacionárního rozložení proudové hustoty projektílu po vložení do kolejnic. Patrné také rozložení proudové hustoty v kolejnicích

Modelování mechanické problematiky:

**Mech\_model\_1** - program pro výpočet ústové rychlosti projektílu, bez znalosti rozložení polí

**Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu** - Program pro výpočet ústové rychlosti projektílu pomocí matic vektorů proudové hustoty a magnetické indukce. Pole pro vstup počítány analyticky bez znalosti rozložení

**Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu\_jine\_B** - Program pro výpočet ústové rychlosti projektílu pomocí matic vektorů proudové hustoty a magnetické indukce. Velikost magnetické indukce upravena dle programu B\_koleje\_rez\_z\_cadu

**F\_pro\_B\_projektílu** - Výpočet síly pro určení působící síly od magnetického pole samotného projektílu

**F\_pro\_B\_s\_mag\_projektílu** – Program pro výpočet mechanických účinků interakce elektromagnetického pole projektílu a kolejnic. Program pro finální výpočet použit nebyl

**Soucín\_jb\_hezky** – Program pro výpočet mechanických účinků, po znalosti rozložení magnetického pole od kolejnic v projektílu, a rozložení proudové hustoty v projektílu

**Soucín\_jb\_hezky\_s\_rychlosti** – Program pro výpočet mechanických účinků po znalosti rozložení magnetického pole od kolejnic v projektílu a rozložení proudové hustoty v projektílu + finální výpočet ideální bezztrátové ústové rychlosti projektílu

Modelování ztrát:

**Ztraty\_elektrické** – Program pro výpočet elektrických ztrát v celém systému

**sila\_nabok\_slozka\_Y\_150** – Program pro výpočet parazitní síly, působící na bok projektílu při urychlování

**Celkovy\_mech\_model\_JB** – Celkový model urychlovače, který zahrnuje rozložení elektromagnetických polí, jejich silové účinky a ztráty. Výstupem je ústová rychlost projektílu zvolené hmotnosti, včetně ztrát

Modelování pomocí energetické bilance:

**celkova\_bilance\_zaklad** – program pro výpočet dílčích energií systému a konečné ústové rychlosti. Ztráty započítány jako jeden prvek. Výpočet na základě rovnice (14.2\_2)

**celkova\_rce\_ztraty** - program pro výpočet dílčích energií systému a konečné ústové rychlosti. Ztráty započítány zvlášť, jako tepelné ztráty v elektrickém obvodu a ostatní ztráty. Výpočet na základě rovnice (14.2\_2)

## **18.2 Přiložená videa**

**funkce předurychlovače** - video, na kterém je ukázána funkce předurychlovače před instalací na sledovaném zařízení. Signál pro sepnutí jiskřiště, je dodáván ručně a samotné jiskřiště je nahrazeno žárovkou. Rozsvícení žárovky, tedy signalizuje akci jiskřiště. Pro ilustraci je nastavena doba mezi akcí jiskřiště a předurychlovače 500 ms.

**Cu\_pritlak\_stabil\_2** - zaznamenaný výstřel projektilu s kovovým přitlakem a stabilizačním prvkem s měřicí tyčkou pro snímání polohy projektilu během urychlování

**Smes\_plas\_Cu\_3** - zaznamenaný výstřel projektilu se smíšeným plasmatickým vedením a stabilizačním prvkem oblouku, při snaze změřit polohu projektilu při urychlování, pomocí měřicí tyčky v hlavni

**Cu\_kov\_predurychl** - video sejmutého výstřelu, projektilu s přímým kovovým přitlakem bez stabilizačního prvku a s počátečním předurychlením

**Smes\_plas\_Cu\_1** – zaznamenaný výstřel projektilu se smíšeným plasmatickým vedením proudu, bez stabilizace oblouku. Tento projektil byl shledán jako neúspěšný

## 19. Seznam tabulek

Čas ( $\mu\text{s}$ )	6	18	78	104	198	298	398	498	698	1098
$J_{ext}$ ( $10^7 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ )	6.7	17.5	39.3	40.5	34.6	26.0	19.1	14.0	7.57	2.21
$B$ (T)	0.40	1.04	2.33	2.4	2.05	1.54	1.13	0.83	0.45	0.13

Tabulka Tab\_1 – vypočtené proudové hustoty programem *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*, pro dané vstupní proudové hustoty, sejmuté v daných časech

Čas ( $\mu\text{s}$ )	0	6	18	78	104	198	298	398	498	698	1098
$J_{ext}$ ( $10^9 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ )	0	1.35	3.51	7.85	8.1	6.91	5.19	3.82	2.81	1.52	0.44
$B$ (T)	0	0.40	1.04	2.33	2.4	2.05	1.54	1.13	0.83	0.45	0.13
$F(N)$	0	271	364	1832	1950	1428	799	434	234	68	5.8

Tabulka Tab\_2 – Vstupní proudová hustota a magnetická indukce ve středu projektilu a výstupní – vypočtená síla v daných časech

Čas ( $\mu\text{s}$ )	6	18	78	104	198	298	398	498	698	1098
F1	116	676	2059	1954	1234	710	408	234	77	8
F2	271	364	1832	1950	1428	799	434	234	68	5
F3	115	1409	5377	4792	4563	2049	699	450	127	20

Tabulka Tab\_3 – porovnání výpočtu síly pomocí programu

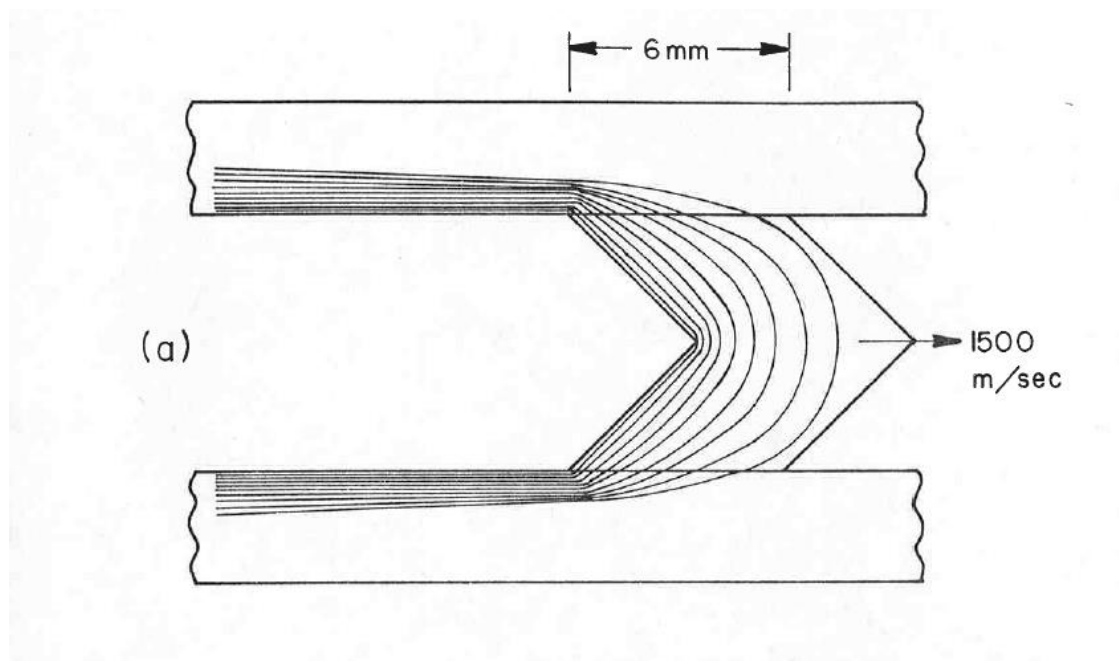
*Rychlost\_pomoci\_maticeF\_pulz\_z\_obvodu* (F1), programu *Soucin\_jb\_hezky* (F2) a programu *F\_pro\_B\_s\_mag\_projektilu* (F3)

Poloha (mm)	0	0.25	0.5	0.75	1
7.5	-4.2	-2	0	2	4.2
5	-4.2	-1.6	0	1.6	4.2
2.5	-4.2	-1.6	0	1.6	4.2
0	-4.2	-2	0	2	4.2

Tabulka Tab\_4 – rozložení Y složky vektoru magnetické indukce jako výstup z programu B pole Projektilu

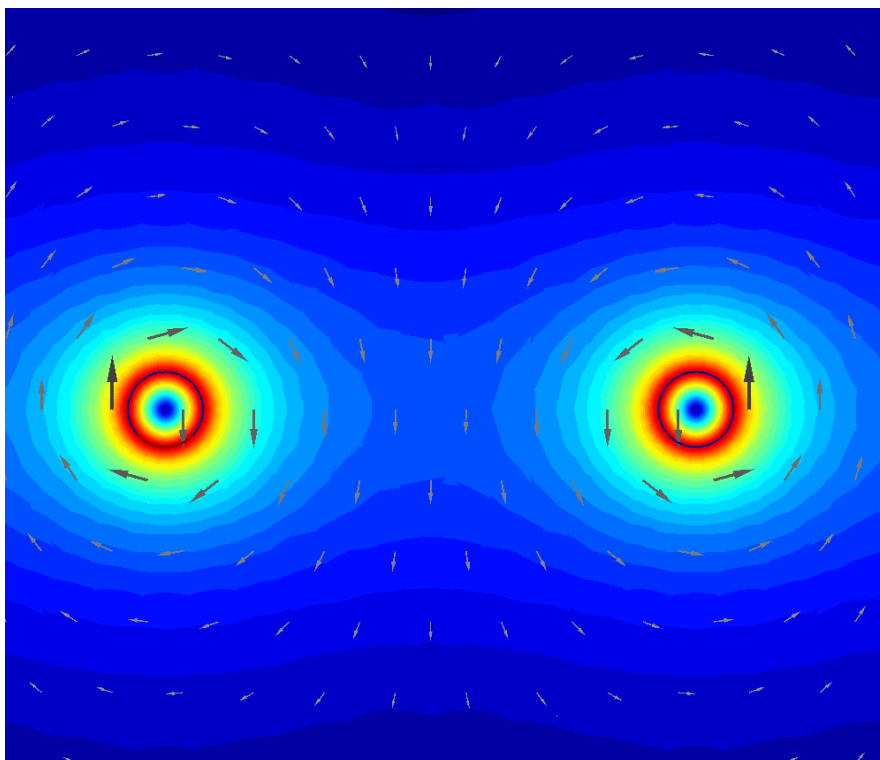
## 20. Seznam obrázků

Obrázky ke kapitole 7 - Historické souvislosti a elektromagnetické urychlovače

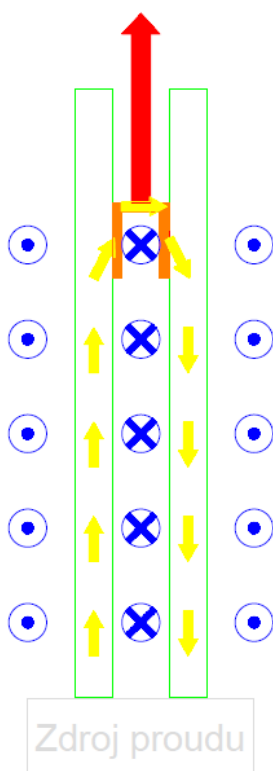


obrázek O.7.1 - přímý kontakt projektilu tvarovaného do šípku, mezi kolejnicemi, převzatý z [13]

Obrázky ke kapitole 8 - Popis a princip obecného kolejinového urychlovače

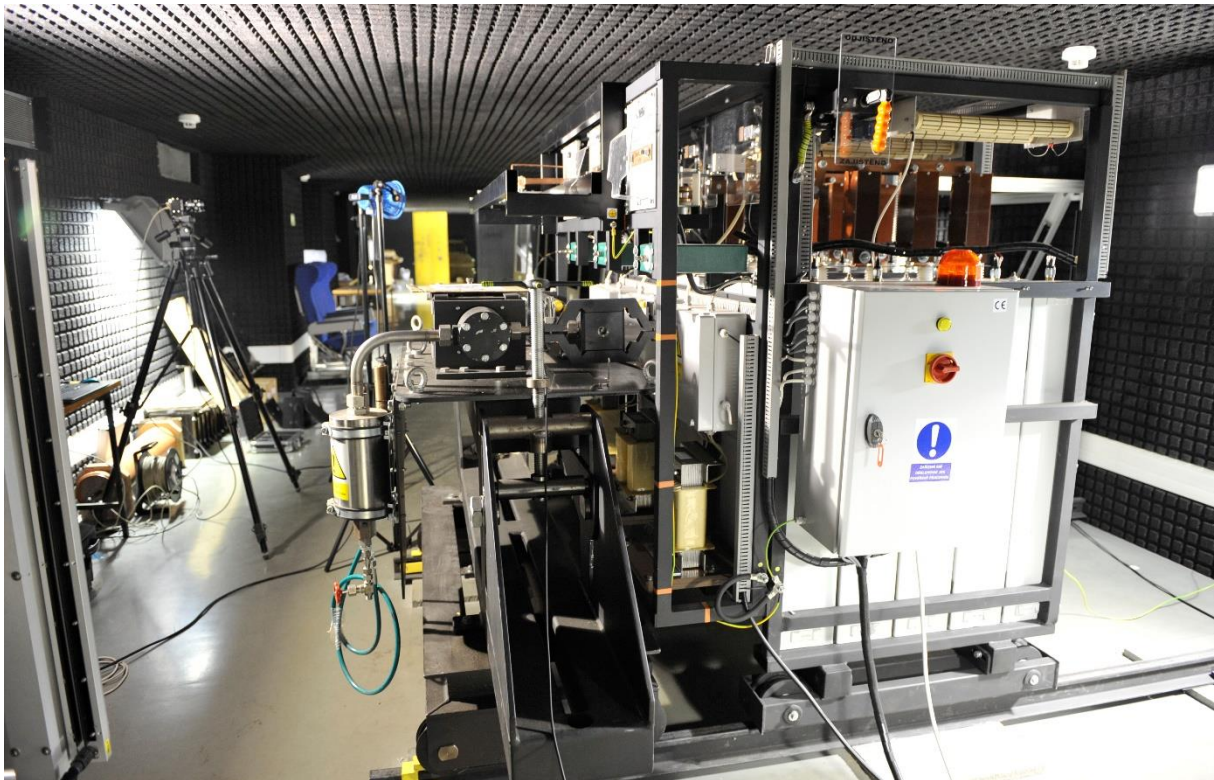


obrázek O.8.1 - rozložení magnetického pole mezi kruhovými vodiči, protékáných proudy opačnými směry

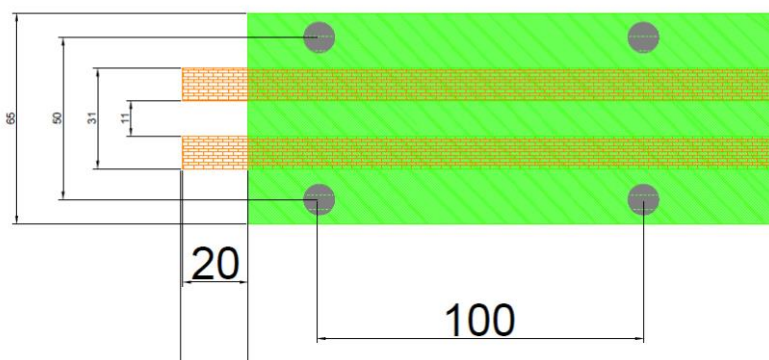
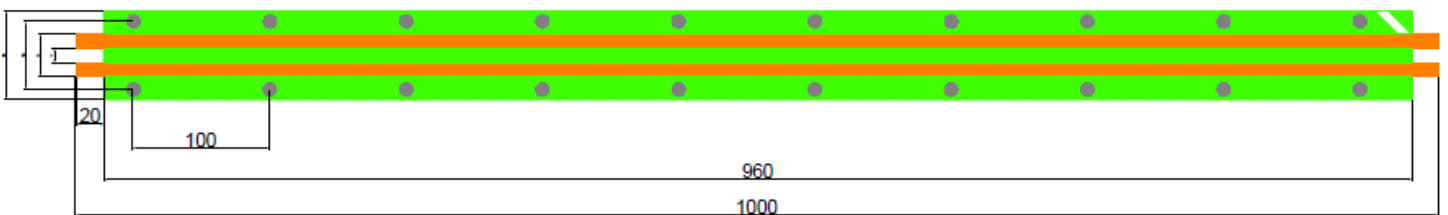


obrázek O.8.2 – základní princip railgunu – Modře – magnetické pole, Žlutě – proudová hustota, Červeně – působící síla

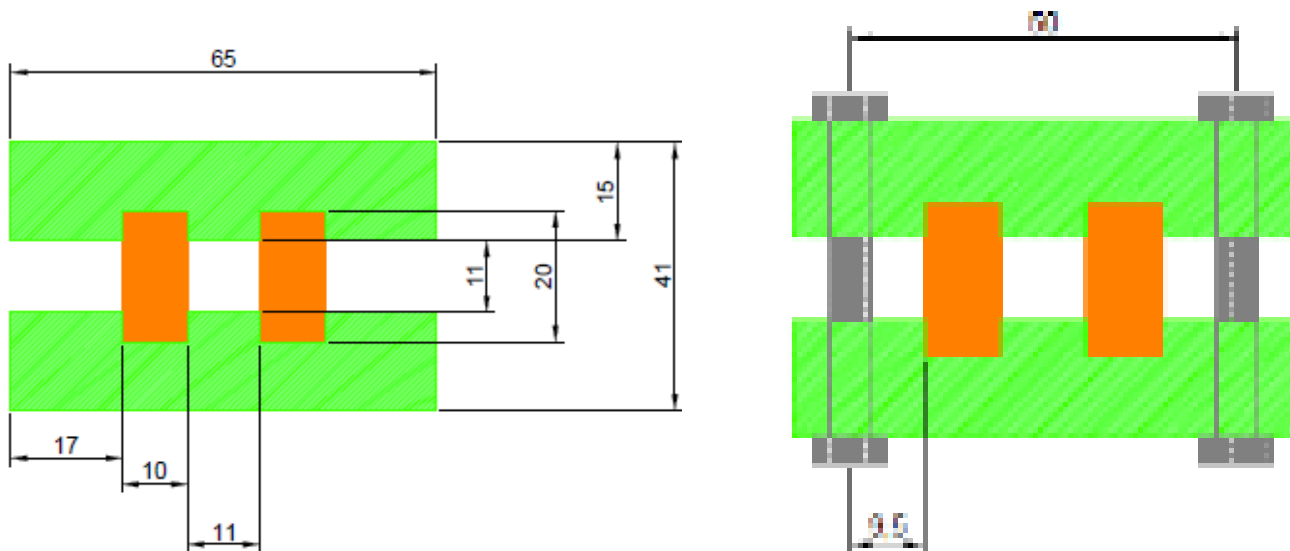
Obrázky ke kapitole 9 - Popis sledovaného zařízení



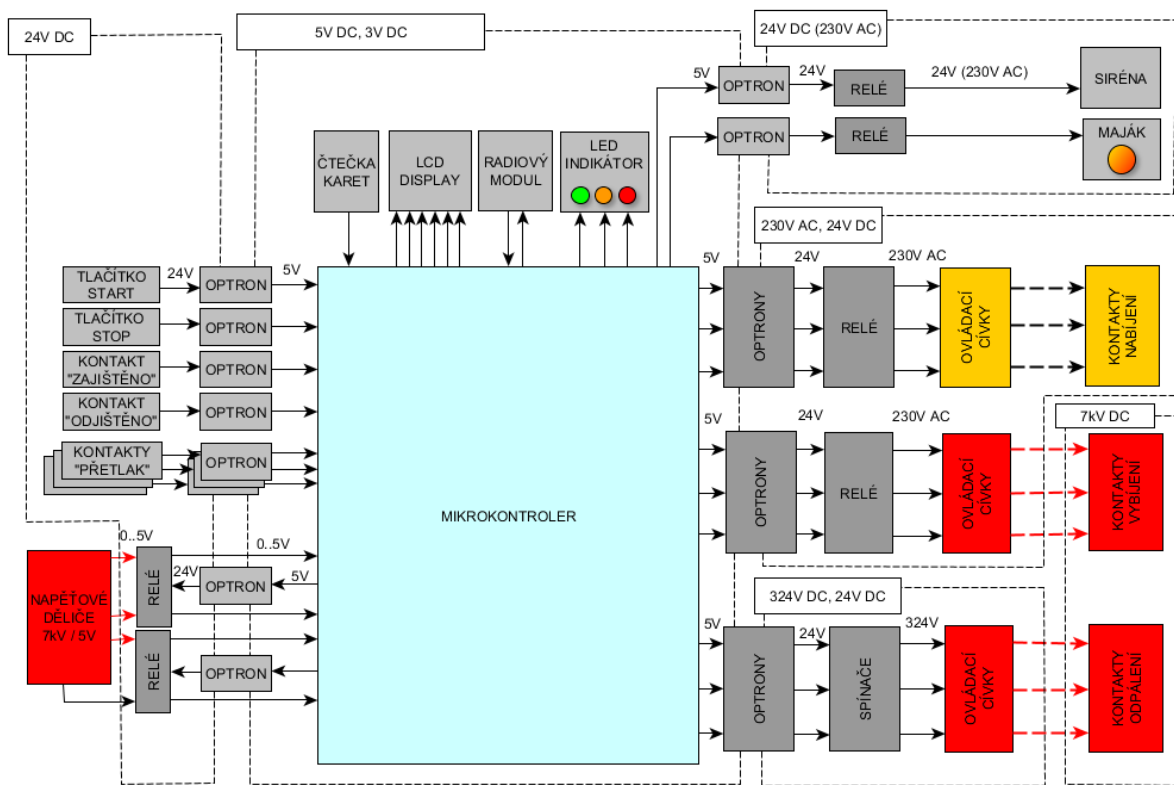
obrázek O. 9.1- fotografie impulzního zdroje - pohled zezadu na krabici s řídicí elektronikou



obrázek O.9.2- náčrtek hlavně systému, včetně rozměrů cečky a detailu rozměrů v počátku hlavně – pohled shora.

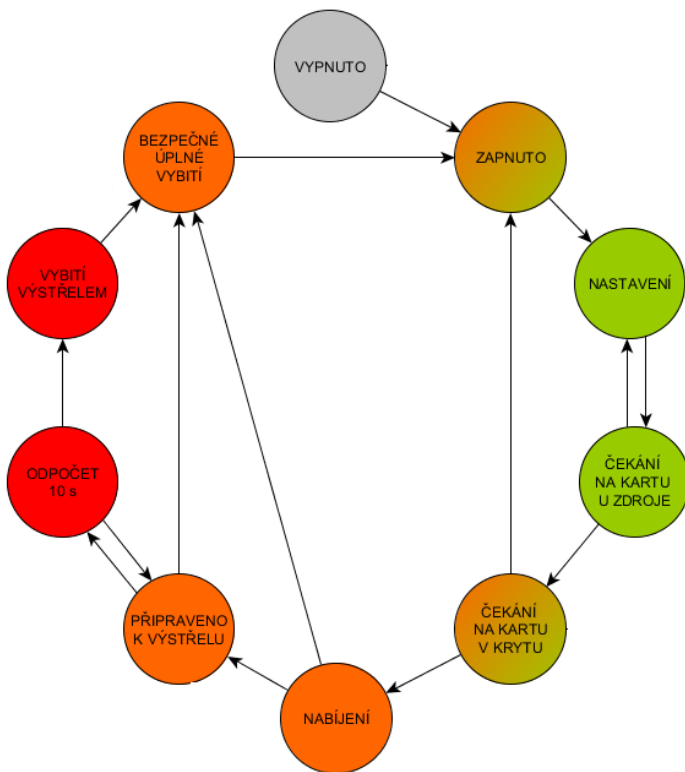


obrázek O.9.3 – pohled na hlavěň v řezu bez a včetně zpevňovacích šroubů

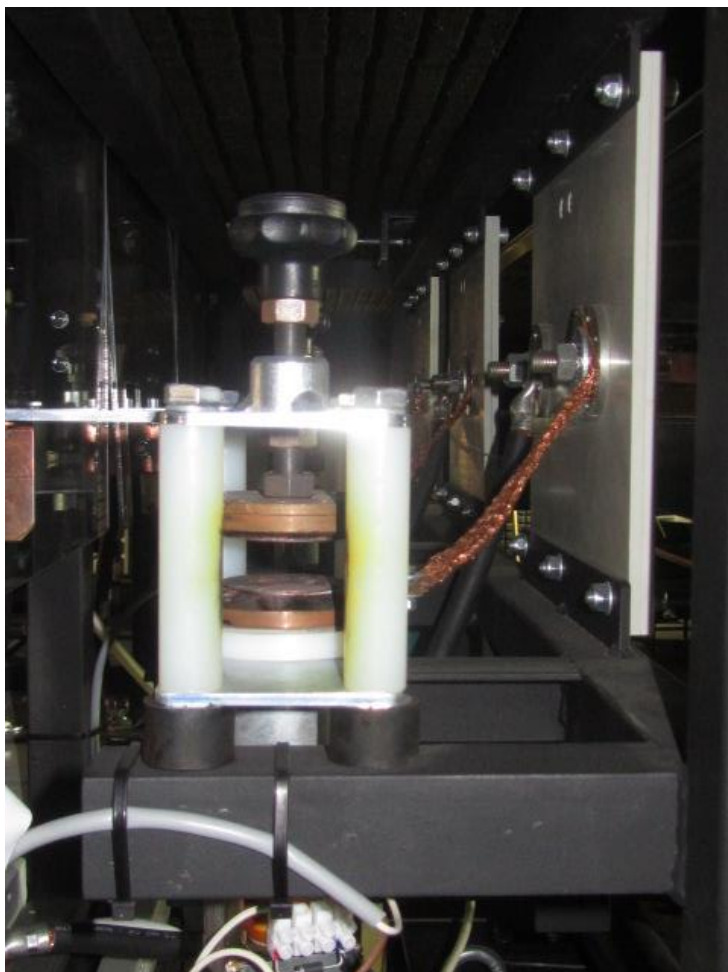


obrázek O.9.4 - schématické znázornění částí systému řízených mikrokontrolerem. Obrázek je převzatý od dodavatele systému





obrázek O.9.5 - stavový diagram systému, převzatý z ovládacího softwaru dodavatele zařízení



obrázek O.9.6 - fotografie jiskřiště stávajícího zařízení

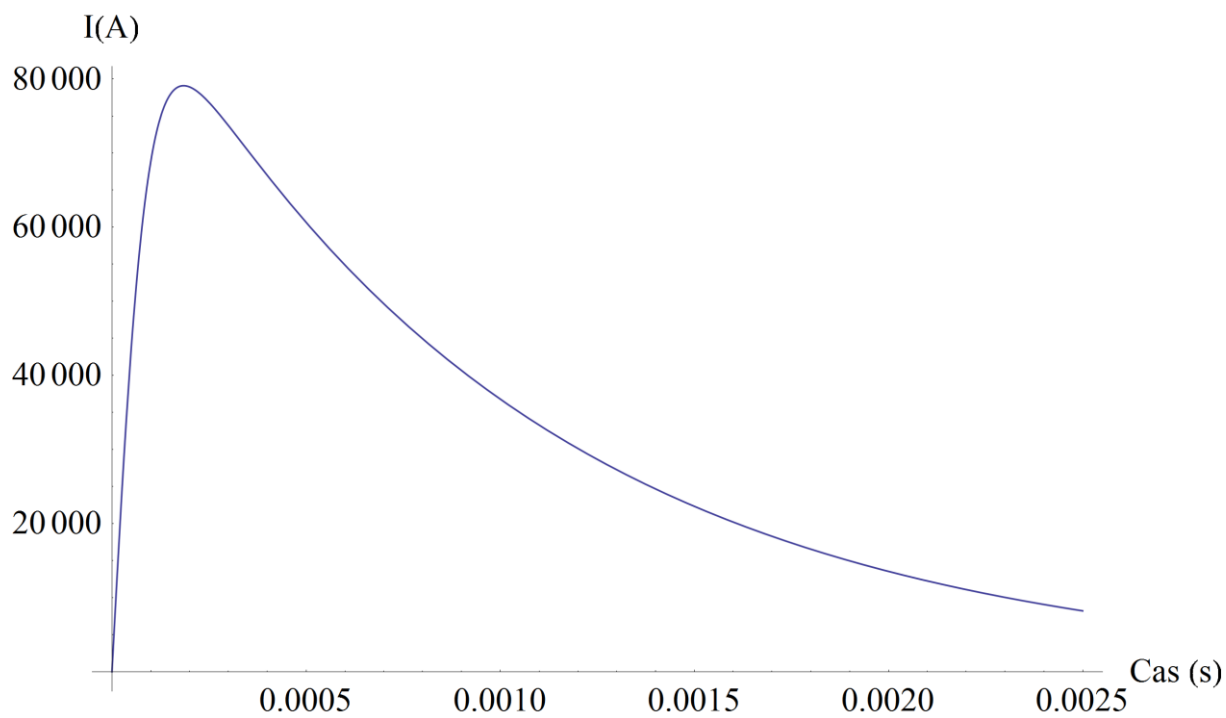
Obrázky ke kapitole 10 - Druhy kolejnicových urychlovačů a způsoby urychlování těles



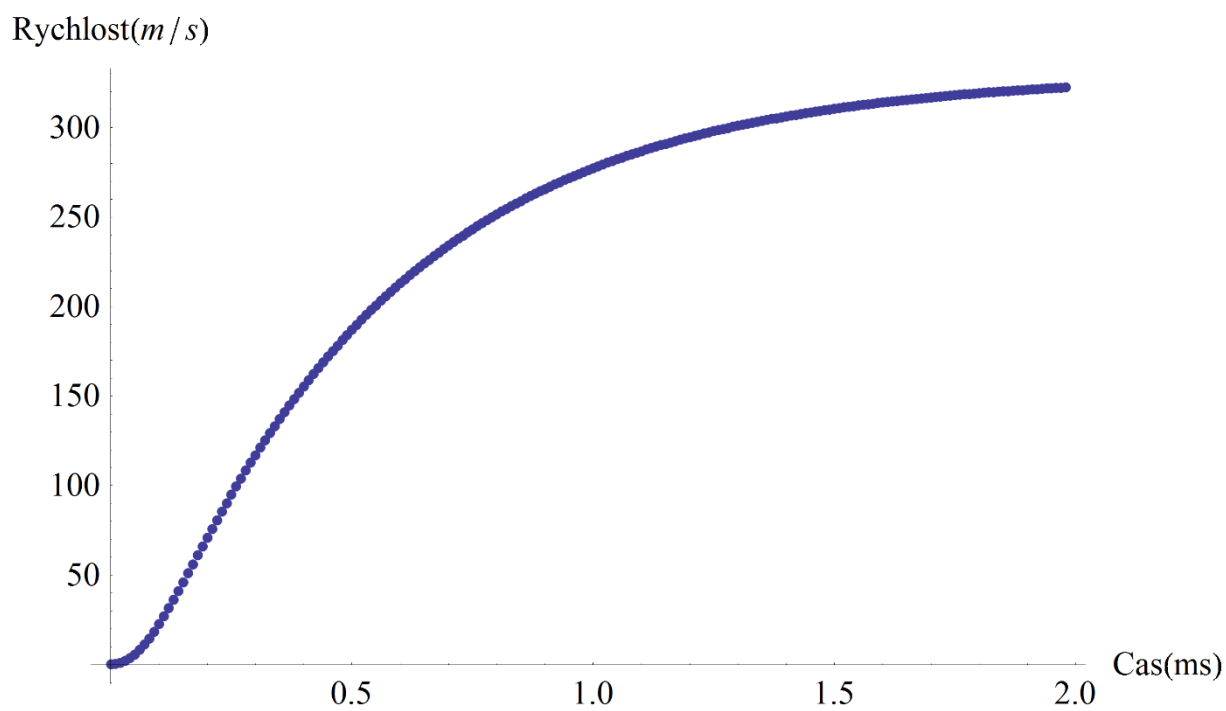
obrázek O.10.2.1 - projektil s přímým tvarovaným kontaktem vystřelený z railgunu US Navy a patrný plasmový oblak, převzatý z [8]



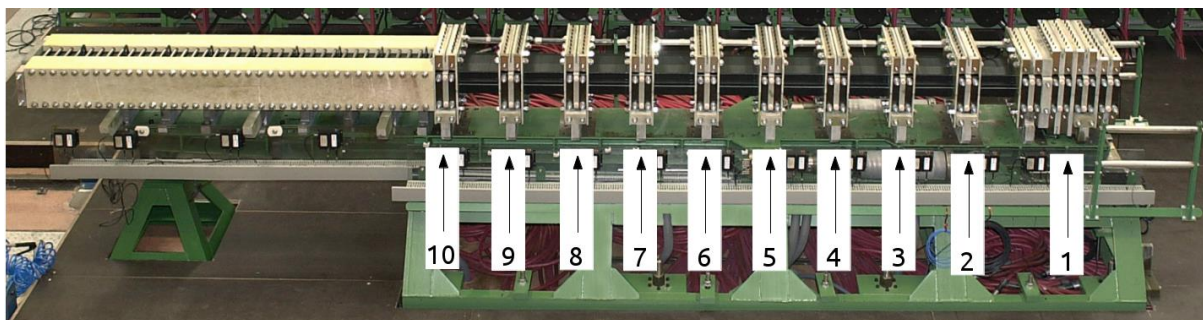
obrázek O.10.3.1 - kondenzátorové baterie (modře) pro napájení railgunu, urychlující 18Kg projektil na rychlosti okolo 1700 m/s, převzatý z [8]



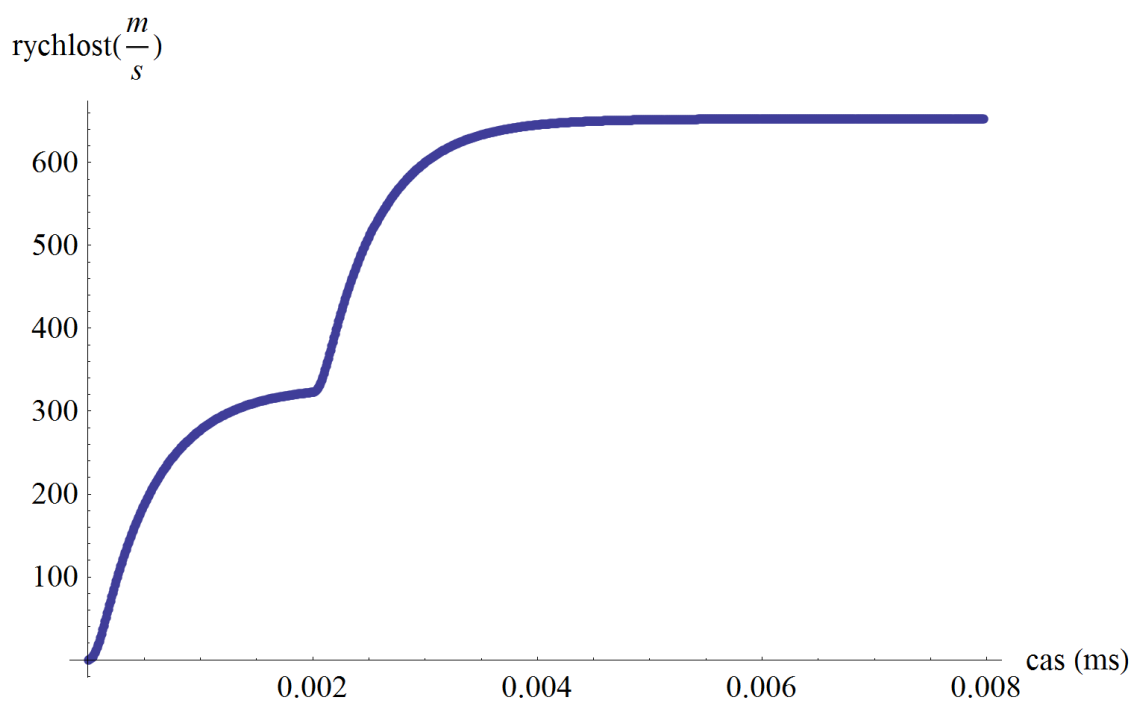
obrázek O.10.4.1 - proudový pulz při vybití kondenzátorové banky při výstřelu, pro odhad matematického modelu mechanické části



obrázek O.10.4.2 - vypočítaný průběh rychlosti 10 g projektilu, jako odezva na proudový pulz vyobrazený na obr. O.10.4.2



obrázek O.10.4.3 - hlaveň railgunu typu distributed energy storage system s očíslováním sekcí, převzatý obrázek z [35]

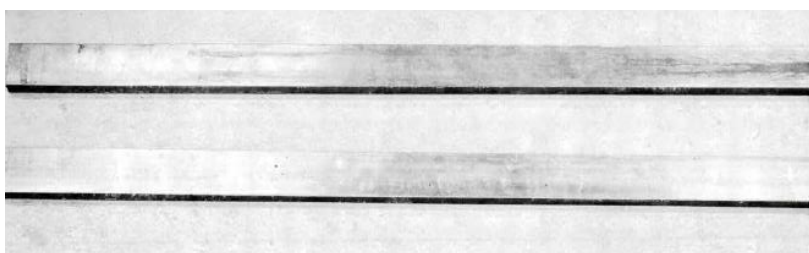


obrázek O.10.4.4 - Průběh rychlosti numerického výpočtu při modelování systému DES, v programu Optimal\_odpal\_Cas\_rucni

## Obrázky ke kapitole 11 – Přenášení proudu do projektilu



*obrázek O.11.1 - praktické použití projektilu tvarovaného do šípu s více sběrníci*



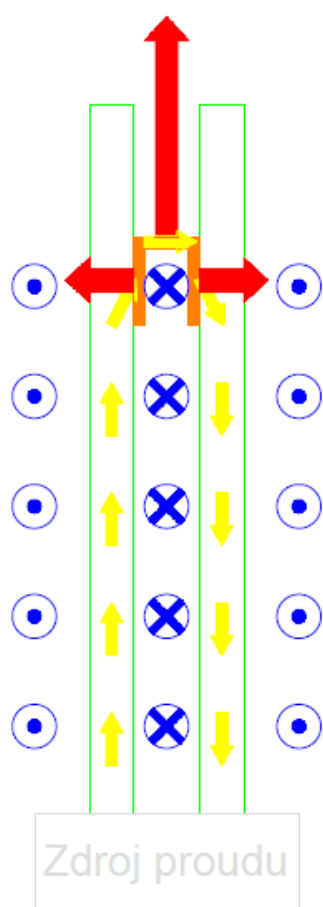
*obrázek O.11.2 - fotografie opotřebení hlavně, které vzniklo během výstřelu v počátcích hlavně, patrné na horní kolejnici v pravé části – převzato z [15]*



*obrázek O.11.3 - opotřebení vystřeleného projektilu s tvarovaným přítlakem.*



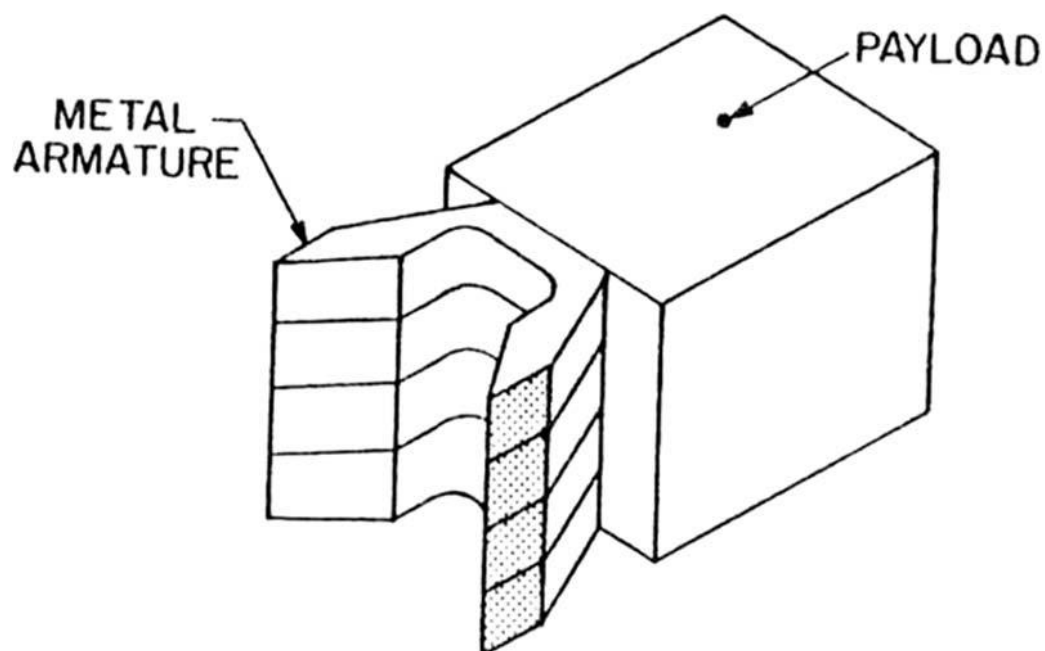
*obrázek O.11.4 - patrné následky elektrického oblouku, který při výstřelu hořel mezi projektilem a kolejnici*



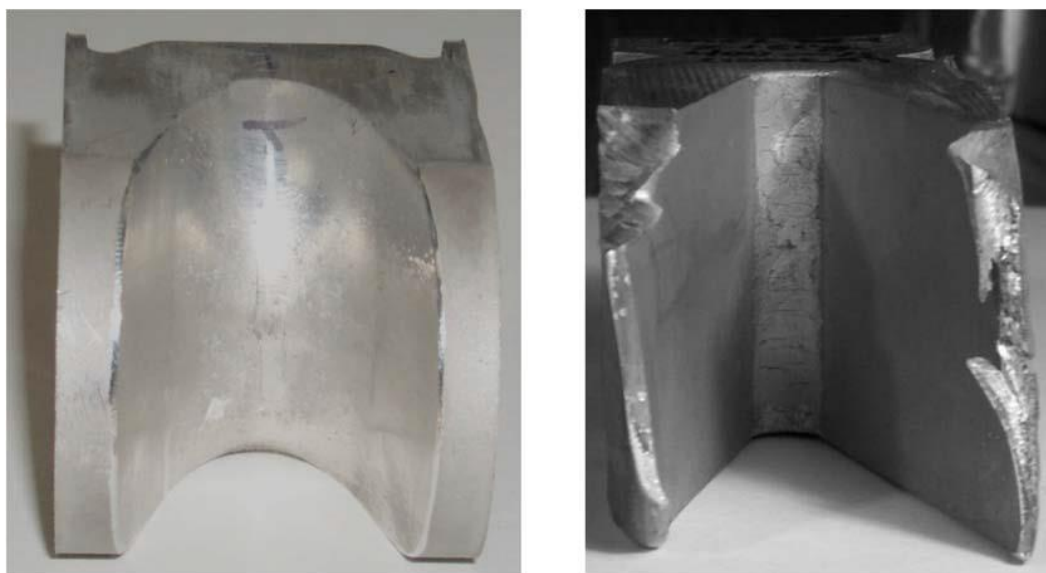
obrázek O.11.5 - Směr působení urychlující, jakož i přítláčivé síly vlivem průtoku proudu projektilem



obrázek O.11.1.1 - tvarovaný skluzný kontakt projektilu pro railgun US Navy – převzato z [9]



obrázek O.11.1.2 - šípový projektil vynalezen Richardem A. Marshalleem, převzatý z [12]



obrázek O.11.1.3 - eroze krajů projektilu tvarovaného do typu C po výstřelu - vpravo, převzato z [12]

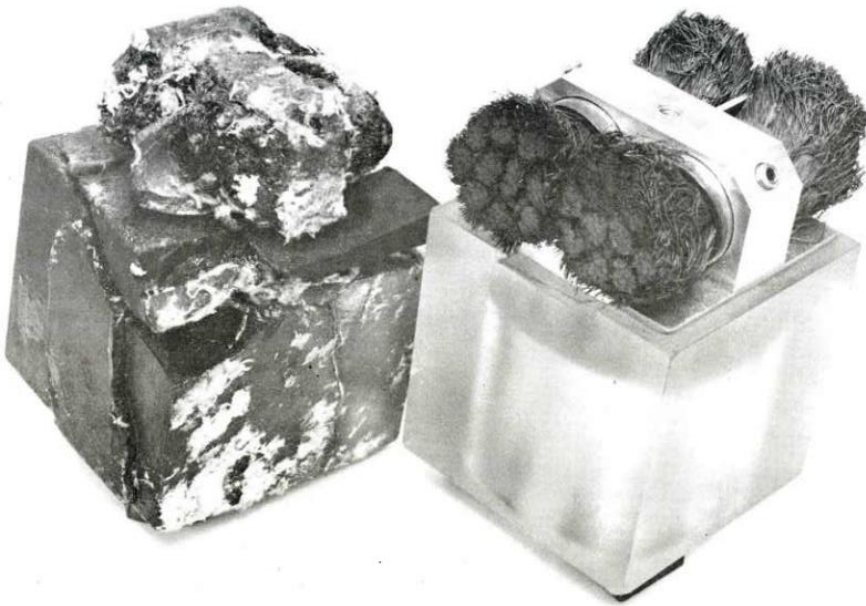
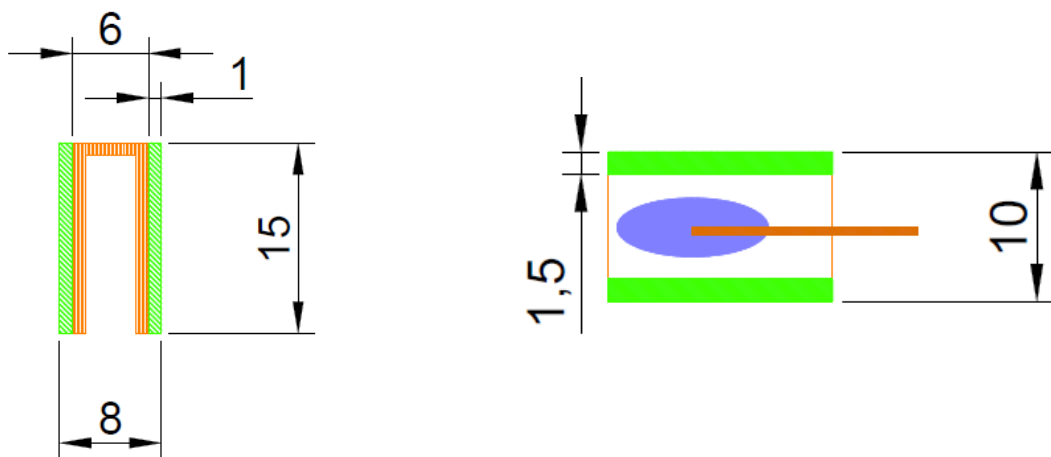


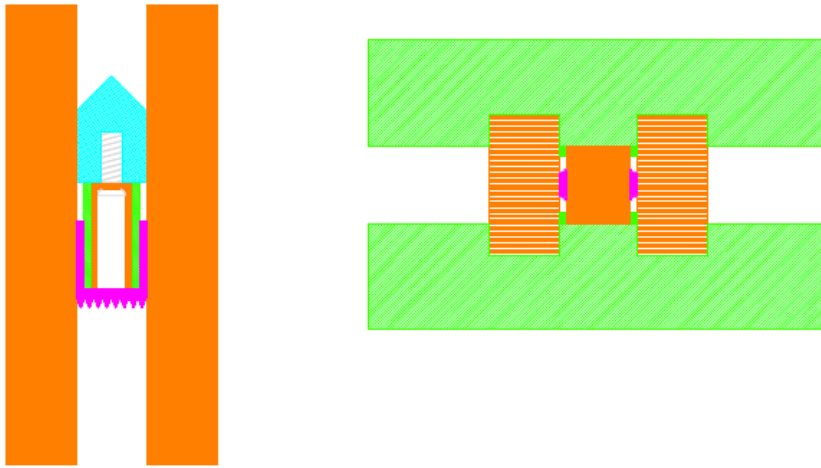
Figure 2. EMACK cube projectiles: new (right) and fired (left)

*O.11.2.1 - projektil s kartáčovým přitlakem před a po výtřelu – převzato z [18]*



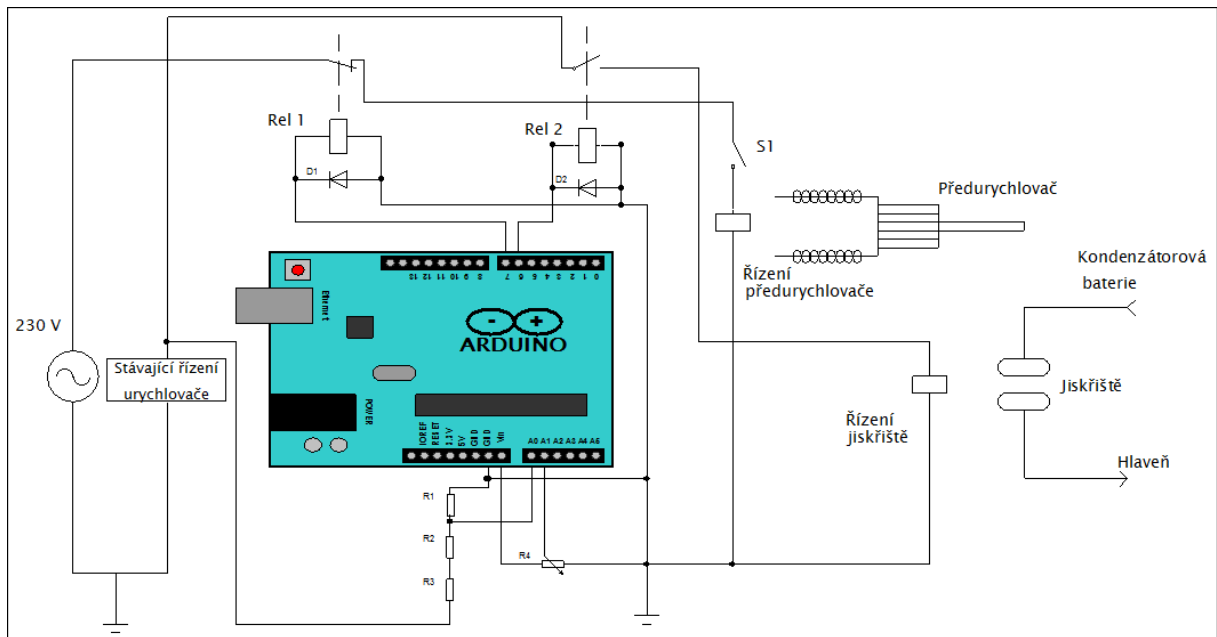
*obrázek O.11.4.1 - schématický výkres projektilu s oddělenou mechanickou a elektrovodnou částí*



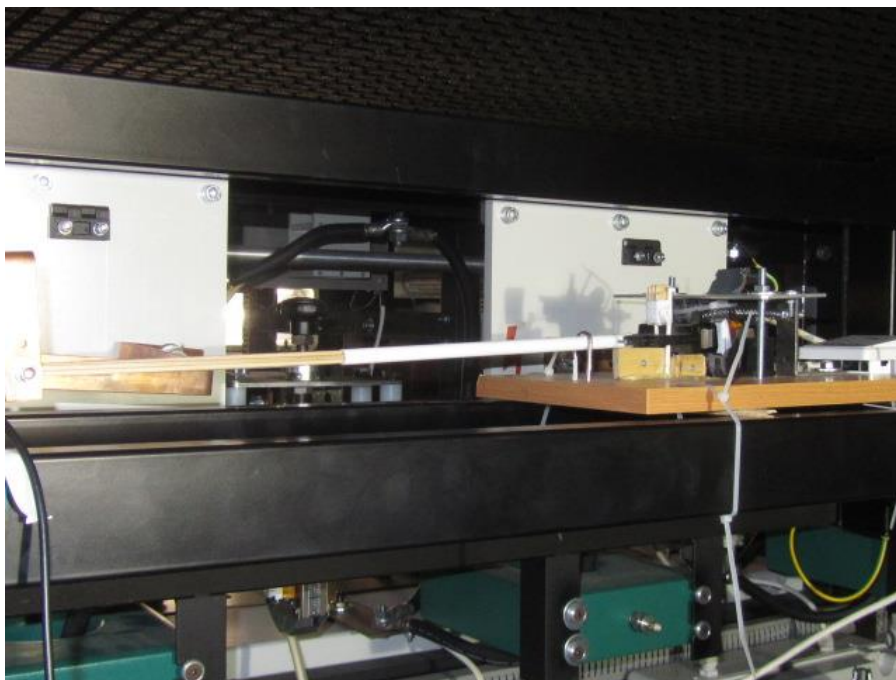


*O.11.4.2 - schématický výkres projektilu s oddělenou mechanickou a elektrovodnou částí při zasazení do hlavně a naznačeným hořícím obloukem (fialová)*

## Obrázky ke kapitole 12 - Doplňkové části urychlovače

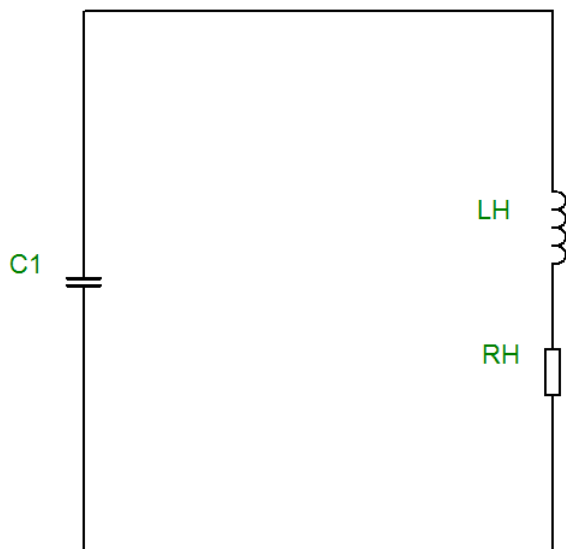


Obrázek O.12.2.1 - schéma řídicího obvodu předurychlovače

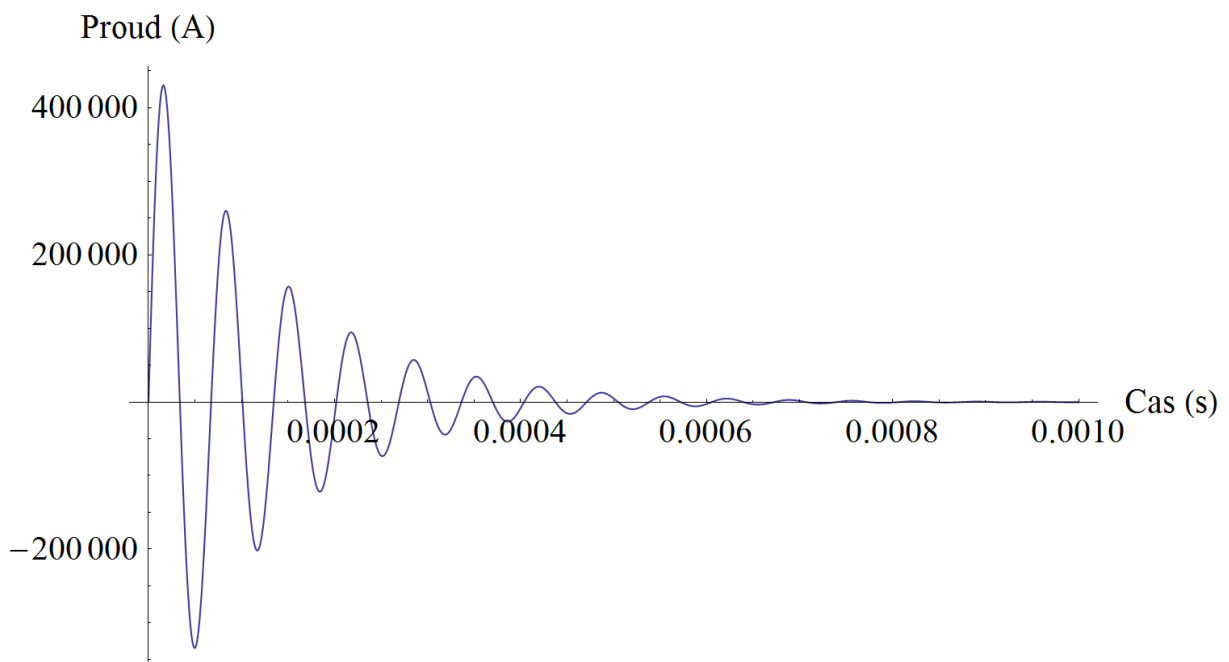


O.12.2.2 – přeurychlovač instalovaný na stávajícím zařízení – patrná tyčka pro postrčení projektilu v hlavni

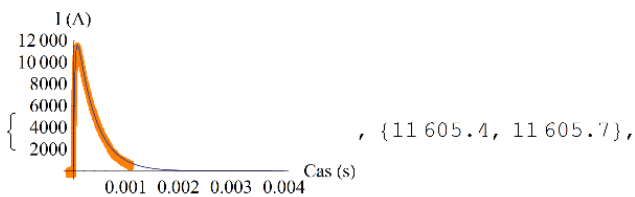
**Obrázky ke kapitole 13 – Matematické modelování urychlovače, podkapitole 7.1 –  
Modelování elektrické části urychlovače**



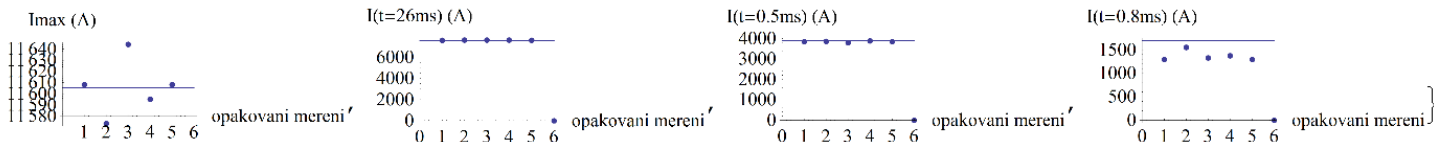
*Obrázek O.13.1.1.1 - prvotní odhad pro model elektrické části urychlovače - volba náhradních prvků pro simulaci hlavně*



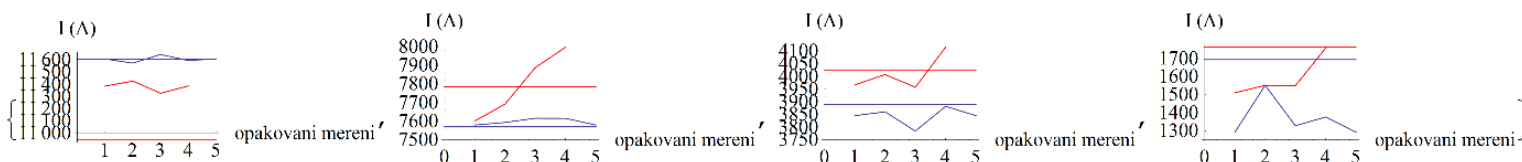
*Obrázek O.13.1.1.2 -vypočítaný proud z prvotního odhadu součástek*



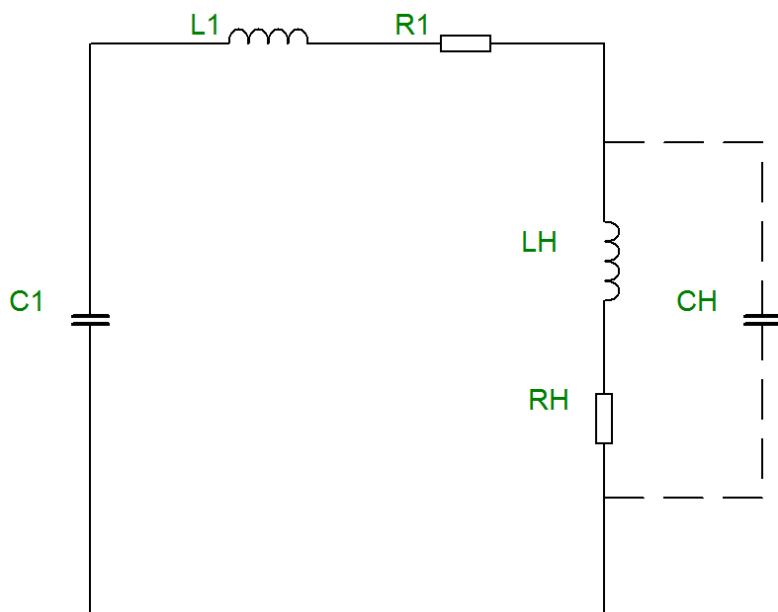
{7569.83, 7596.99},  
 {3890.32, 3843.87},  
 {1693.99, 1368.24},



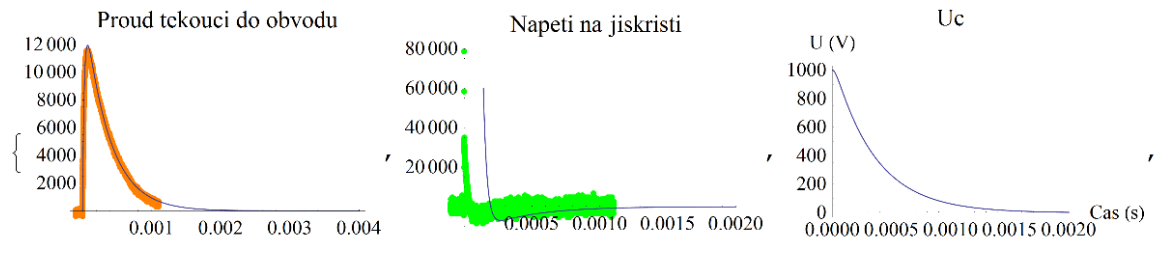
Obrázek O.13.1.1.3 -výstup z programu vypocet\_L\_R\_obvodu 23, popsaného v podkapitole 13.1.1 odhad modelu



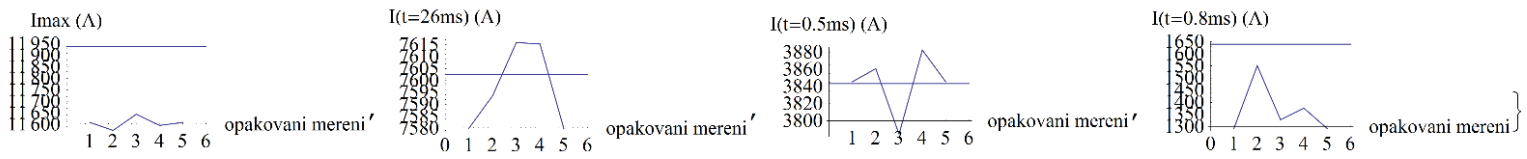
Obrázek O.13.1.1.4 výstup z programu porovnaní\_tylu, který znázorňuje změřené hodnoty proudu a zvolený proklad. To vše v daných časech, Modře - proud při zkratu na počátku hlavně, Červeně - proud při zkratu v ústí hlavně



Obrázek O.13.1.2.1 – obvod pro modelování elektrické části urychlovače. Součástky popsané v kapitole 13.1.2 části pokročilejší model

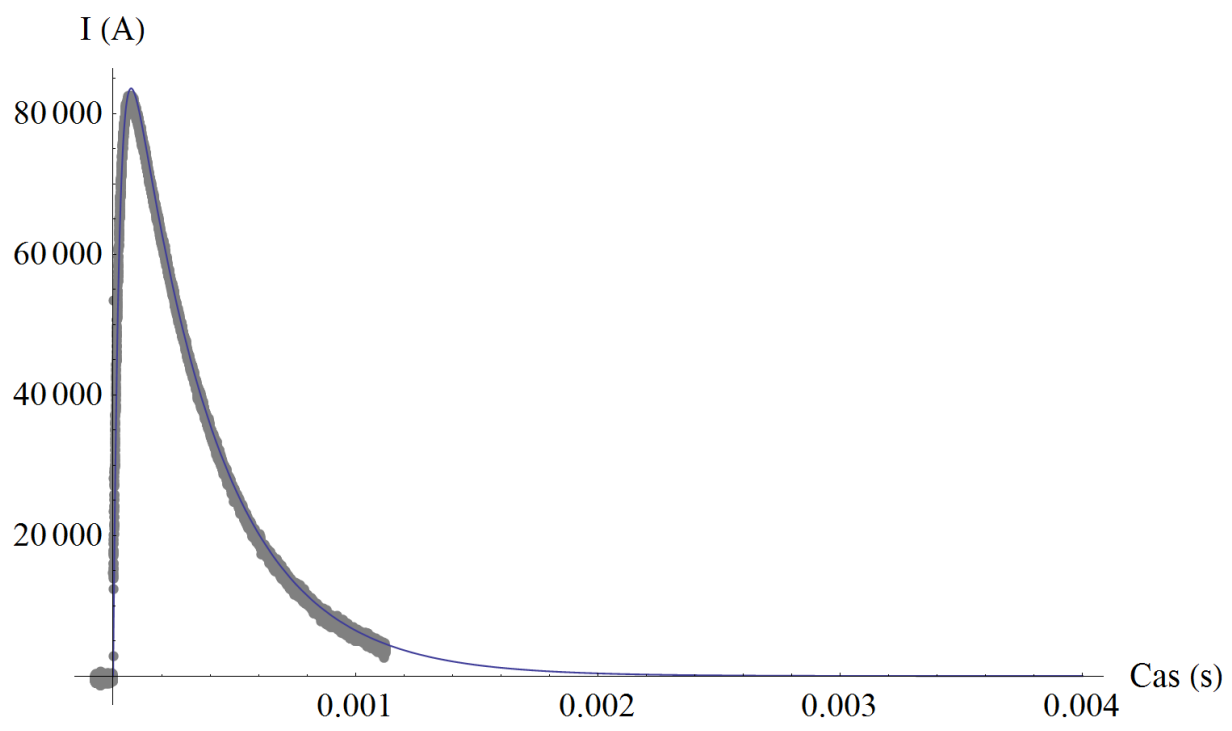


{0.07296,  $1.79703 \times 10^{-6}$ },  
 {2587.78, 2590.},  
 {11 939.2, 11 605.7},  
 {7602.52, 7596.99},  
 {3843.44, 3843.87},  
 {1639.79, 1368.24},

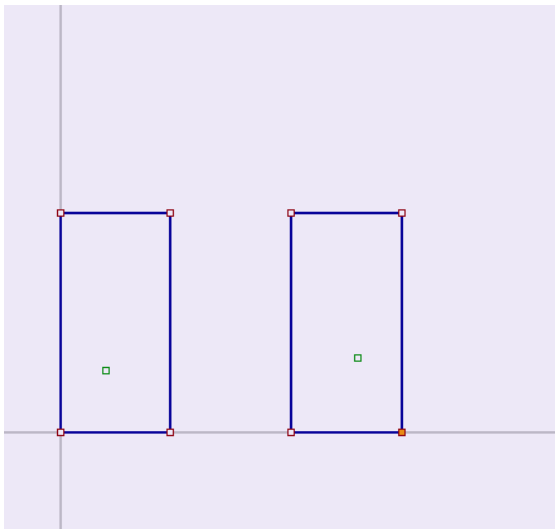


Obrázek O.13.1.2.2 -výstup z programu vypocet\_L\_R\_obvodu\_25, který počítá velikost prvků náhradního obvodu dle obrázku 25 pro polohu zkratovací spojky na počátku kolejnic

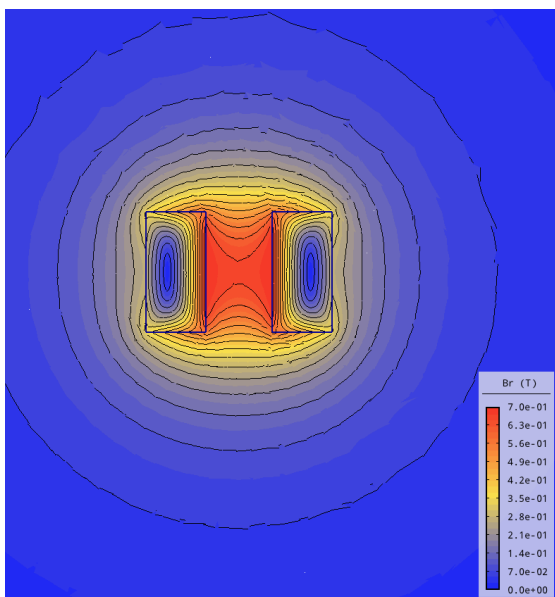
### Proud tekoucí do obvodu



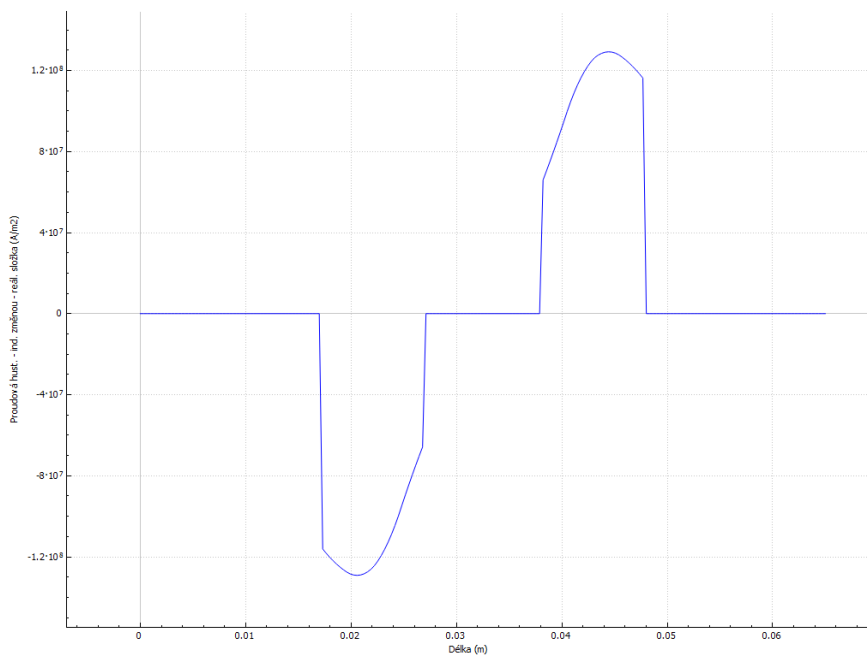
Obrázek O.13.1.2.3 -výstup proudu z programu vypocet\_L\_R\_obvodu\_25, který počítá náhradní prvky obvodu dle obrázku 25 a změřeného proudu



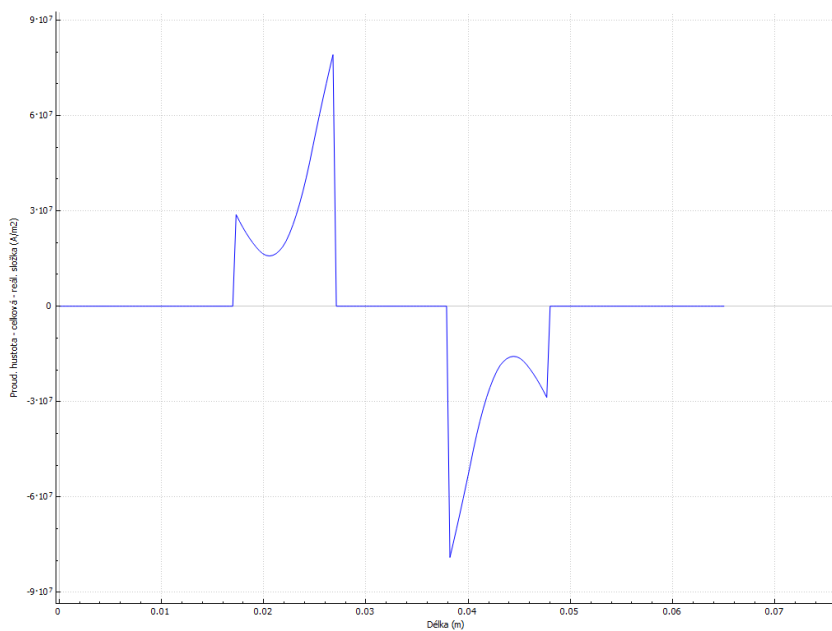
obrázek O.13.2.1.1 - geometrie, ve které je počítáno rozložení magnetického pole v programu B\_koleje\_cas



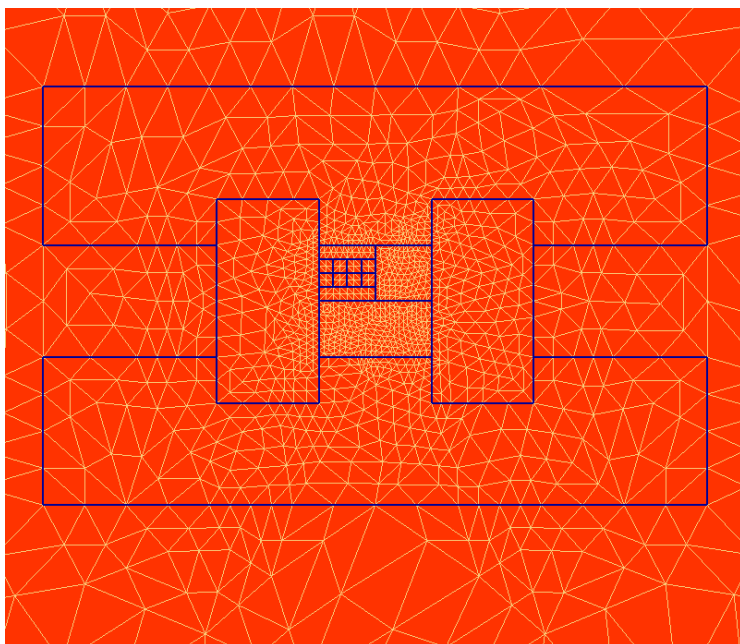
obrázek O.13.2.1.2 - vypočtené rozložení magnetické indukce při maximu proudové hustoty, jako výstup z programu B\_koleje\_cas



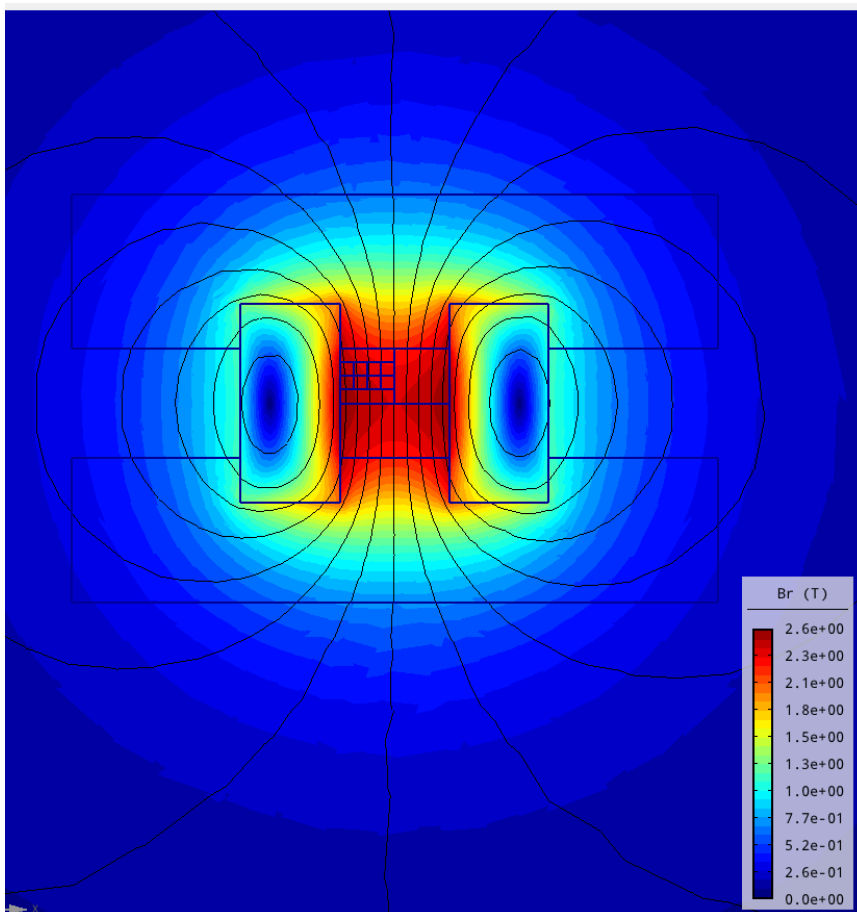
obrázek O.13.2.1.3 –  
Průběh indukované  
proudové hustoty, v řezu  
projektilu a časovou  
změnou pole. Konkrétní čas  
je blízký maximu proudu



obrázek O.13.2.1.4 –  
Průběh celkové proudové  
hustoty, jako součet  
indukované a externě  
dodávané, pro čas blízký  
maximu proudu



obrázek O.13.2.2.1 – Vstupní geometrie do programu *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*, včetně pokrytí řešenou sítí

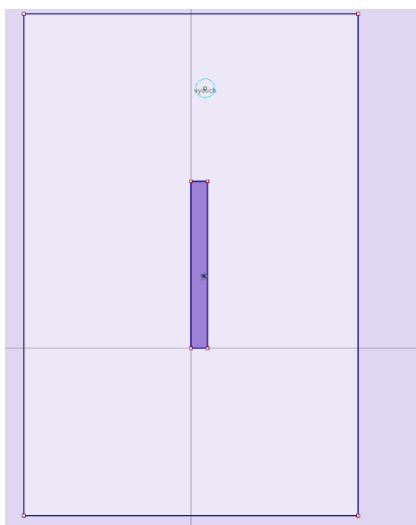


Obrázek O.13.2.2.2 – vypočtené rozložení magnetického pole v programu *B\_koleje\_rez\_z\_cadu* pro maximální proudovou hustotu.

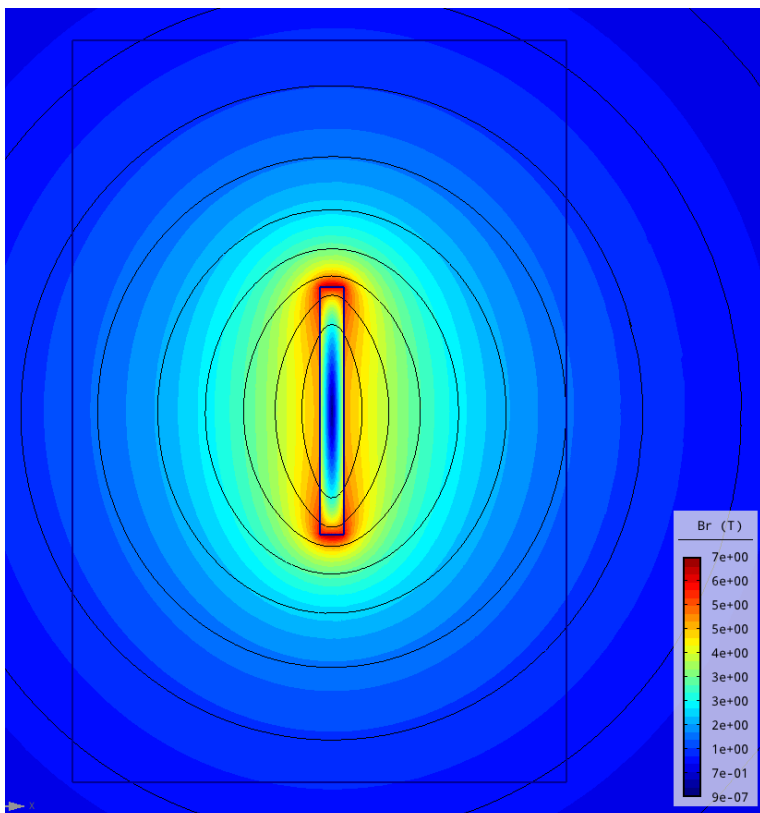


B11	B12	B13	B14	B13	B12	B11
B21	B22	B23	B24	B23	B22	B21
B31	B32	B33	B34	B33	B32	B31
B41	B42	B43	B44	B43	B42	B41
B31	B32	B33	B34	B33	B32	B31
B21	B22	B23	B24	B23	B22	B21
B11	B12	B13	B14	B13	B12	B11

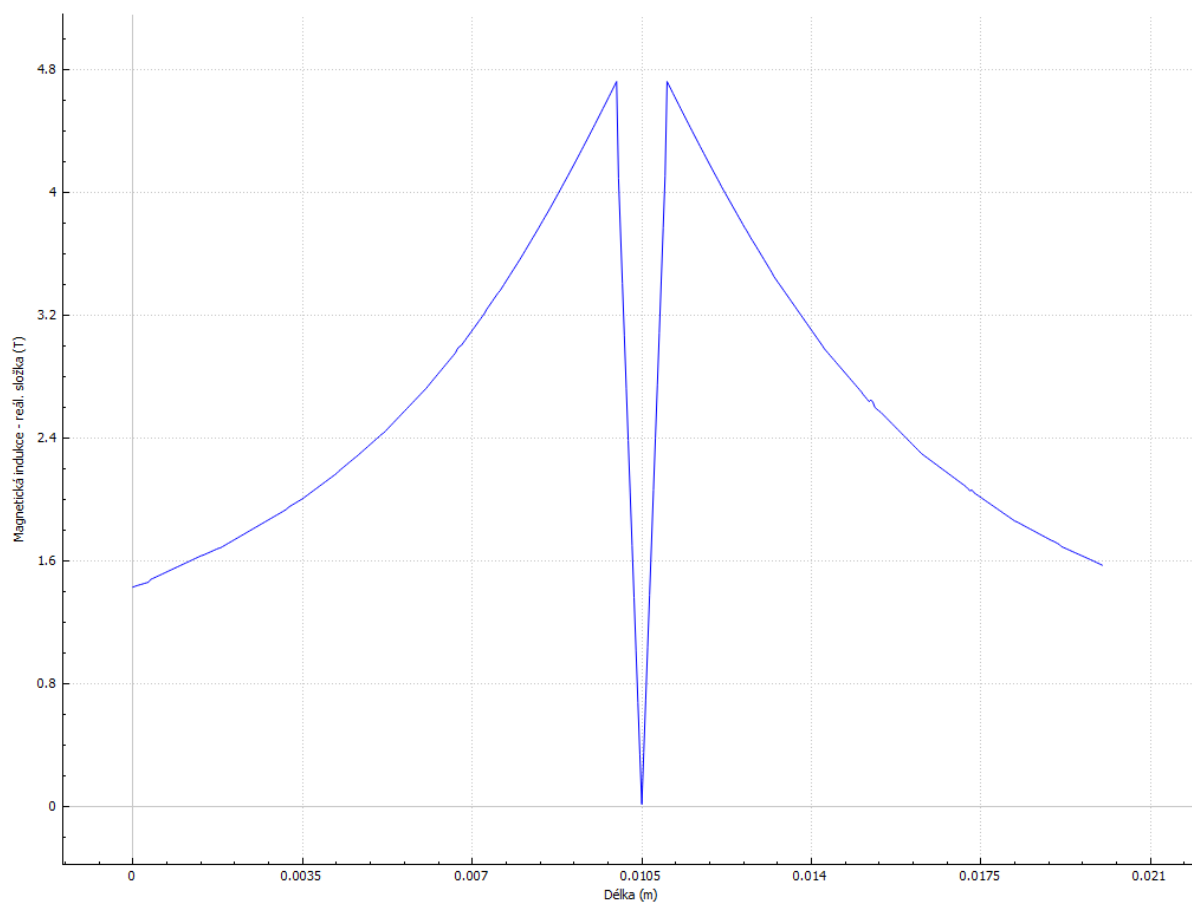
Obrázek O.13.2.2.3 – využití symetrie pro snazší odečet hodnot výstupu programu *B\_koleje\_rez\_z\_cadu*



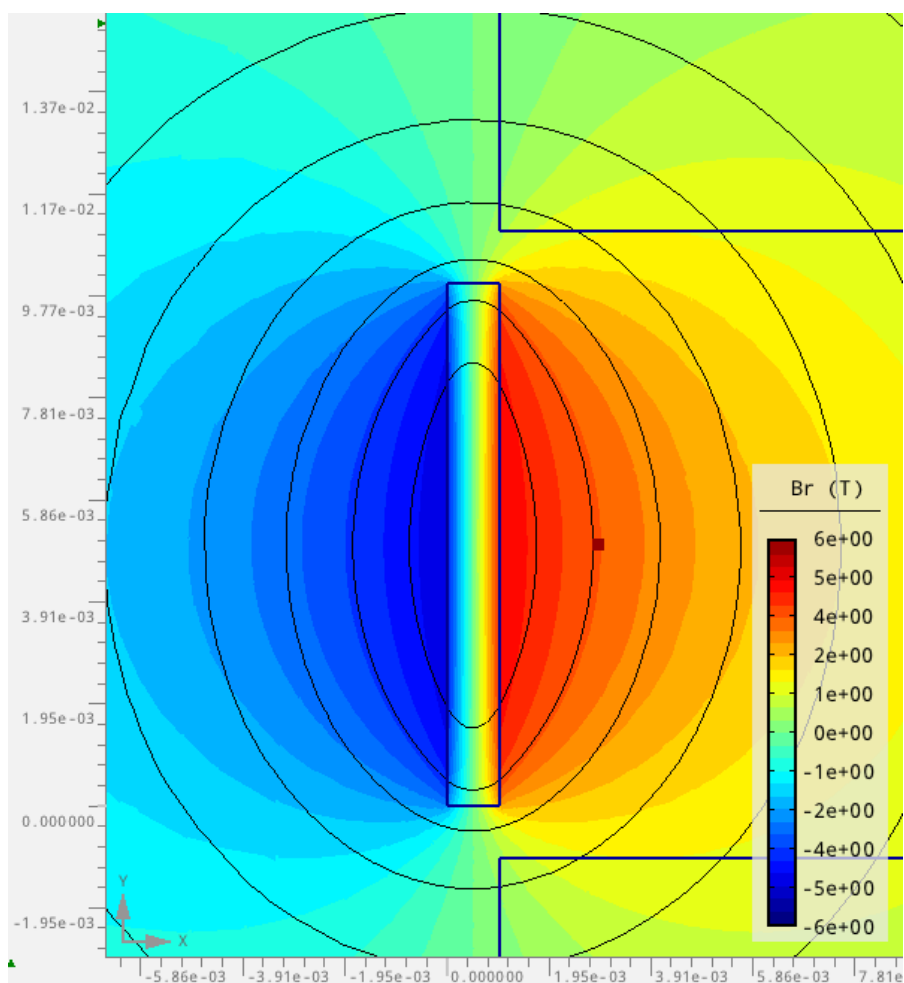
Obrázek O.13.2.3.1 – geometrie řešená při hledání magnetického pole projektilu v programu *B\_pole\_projektilu*



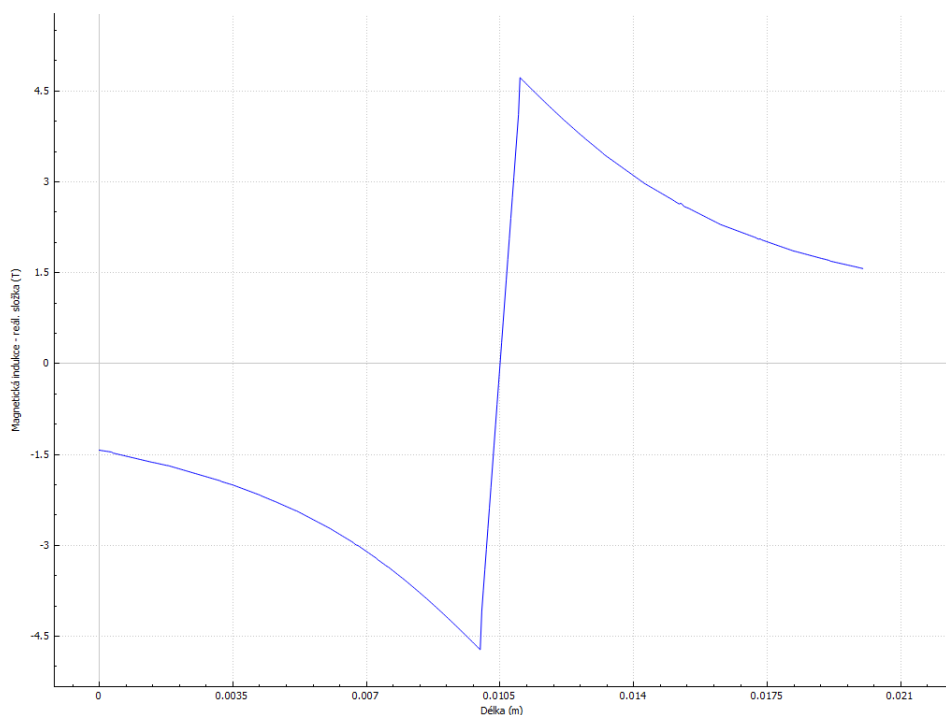
Obrázek O.13.2.3.2 – modul vektoru magnetické indukce projektilu pro buzení proudovou hustotou v čase maxima proudu v programu *B\_pole\_projektilu*



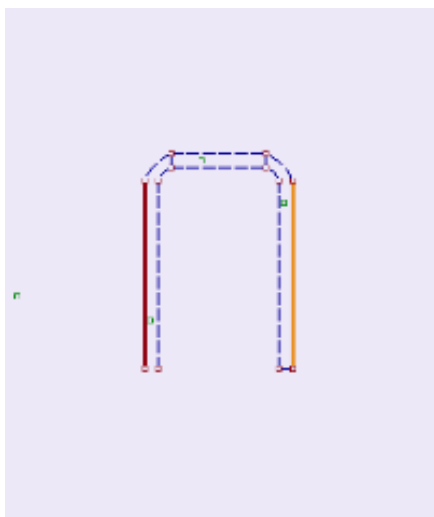
*Obrázek O.13.2.3.3 – Průběh modulu vektoru magnetické indukce s vprostopu skrze projektil. Nulová hodnota – střed projektilu v programu B\_pole\_projektilu*



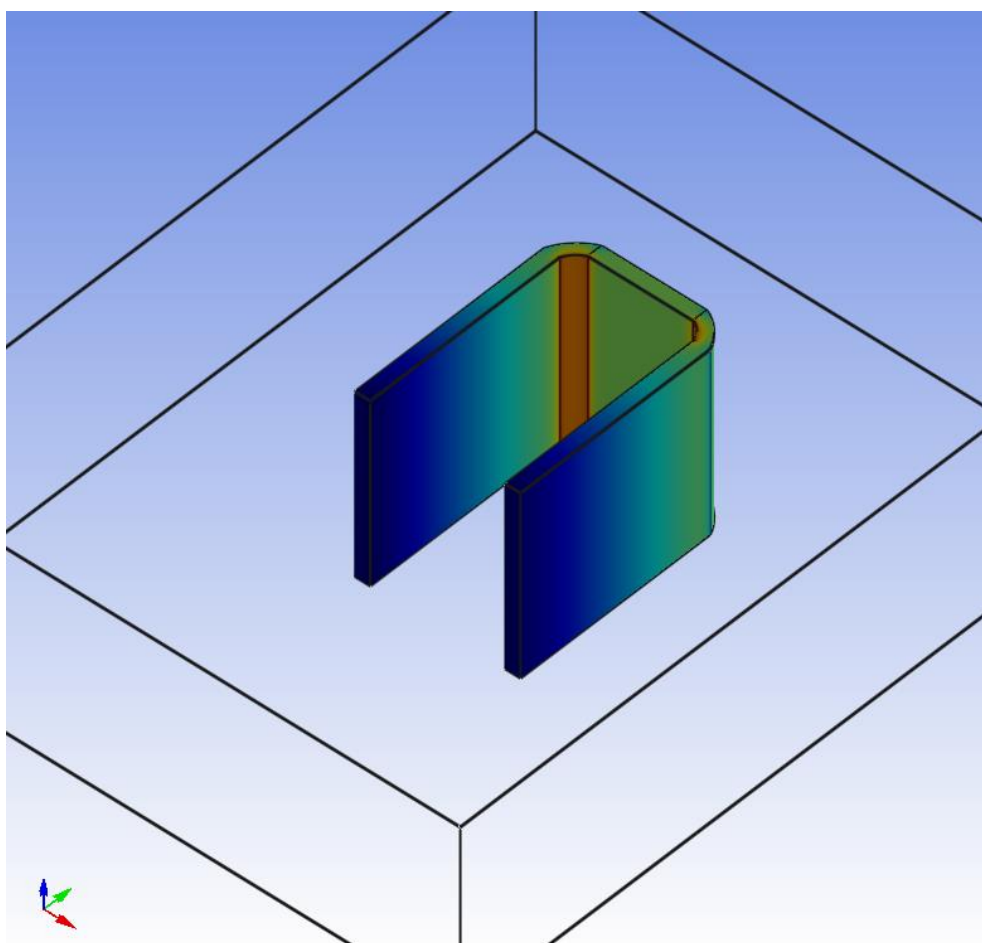
Obrázek O.13.2.3.4 – Průběh modulu vektoru magnetické indukce s vprstotou skrze projektil. Nulová hodnota – střed projektilu v programu *B\_pole\_projektilu*



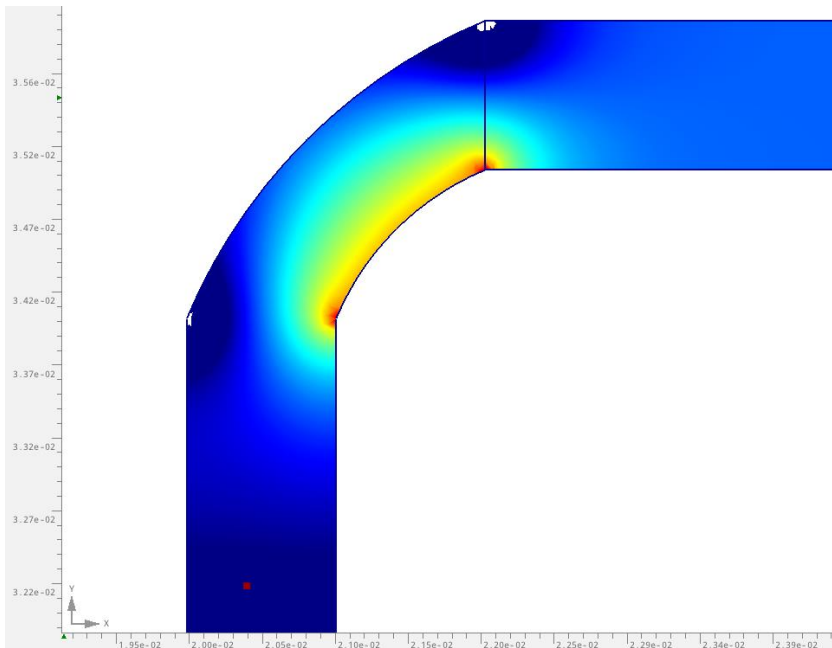
Obrázek O.13.2.3.5 – průběh velikosti  $Y$  složky vektoru magnetické indukce při řezu projektilem v jeho středu. Indukce spočtená v programu *B\_pole\_projektilu*



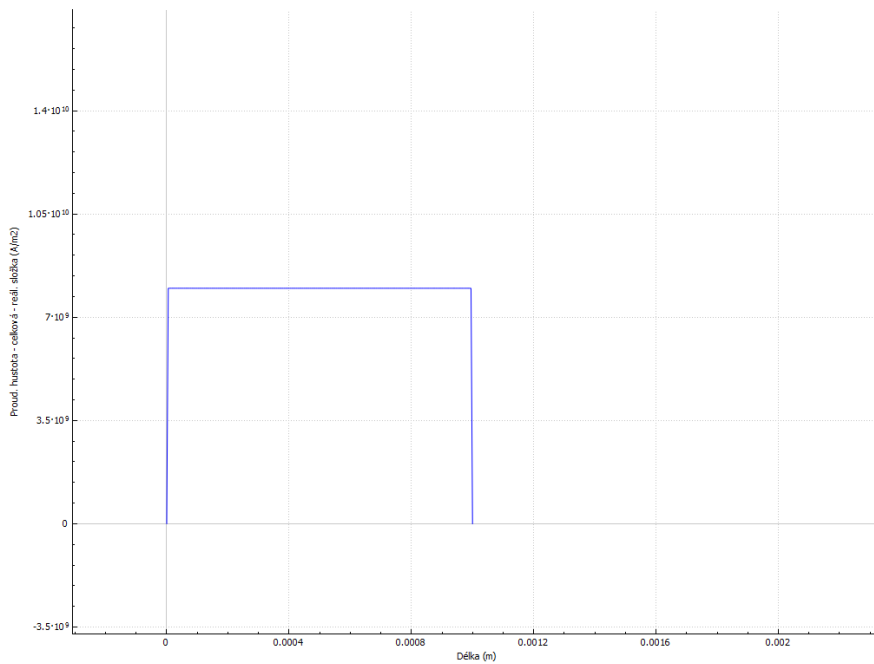
Obrázek O.13.2.4.1 – geometrie projektilu, pro kterou je počítáno rozložení proudového pole v projektilu v programu *J\_projektíl\_sam*. Barevnou částí jsou označena místa vstupu a výstupu proudu



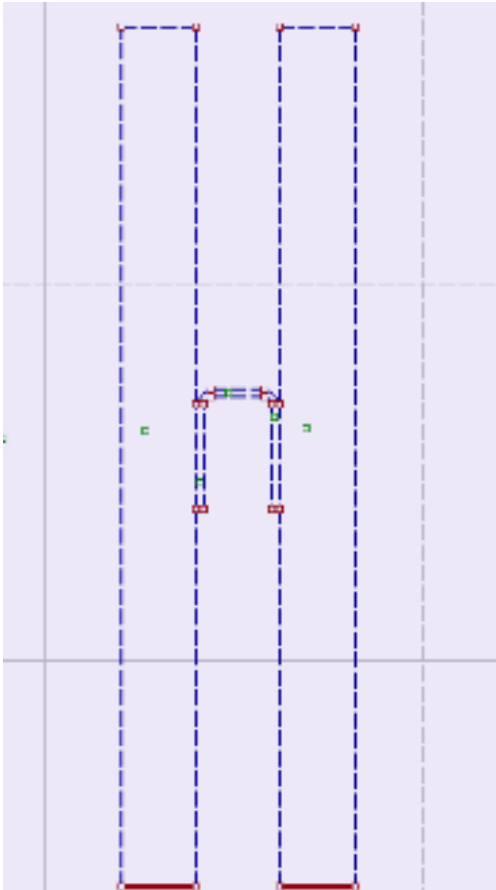
Obrázek O.13.2.4.2 – Prostorové zobrazení rozložení proudového pole v projektilu v programu *J\_projektíl\_sam*.



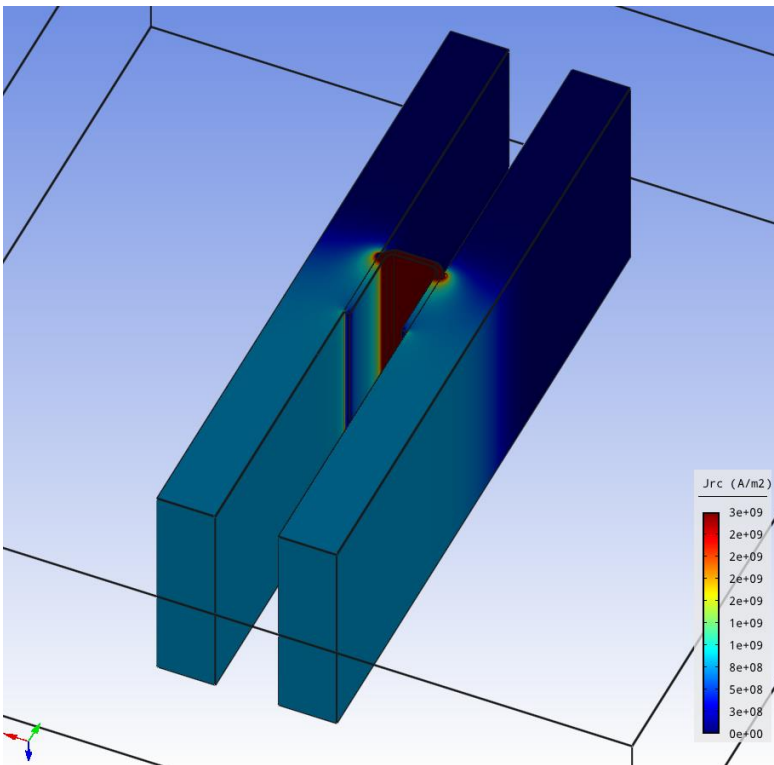
Obrázek O.13.2.4.3 – zobrazení Jouleových ztrát v oblasti ohybu projektilu v programu J\_projektíl\_sam.



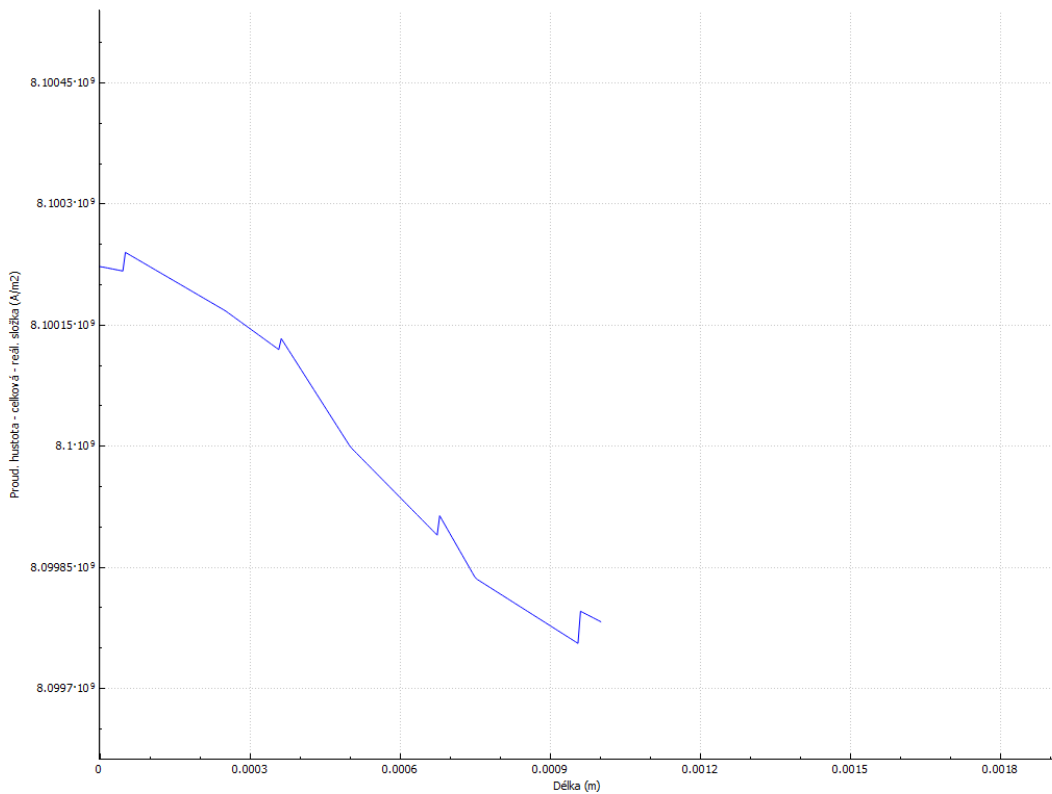
obrázek O.13.2.4.4 – graf rozložení proudové hustoty v čele projektilu v programu J\_projektíl\_sam.



Obrázek O.13.2.4.5 – geometrie, dle níž je počítáno proudové pole projektilu, zasazeného mezi kolejnice, v programu *J\_projektíl\_v\_koleji*

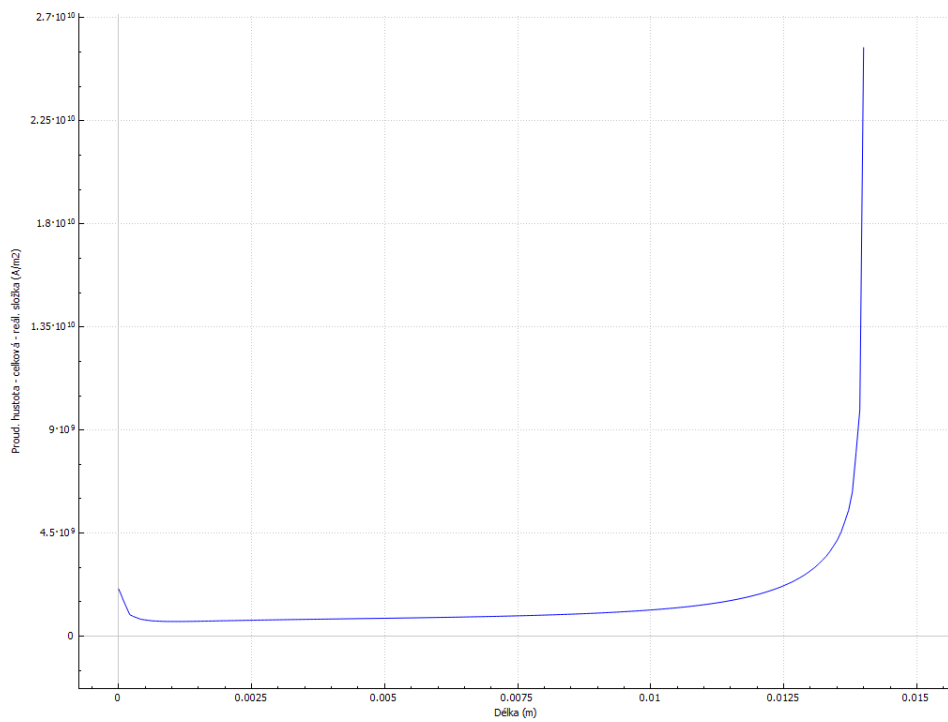


Obrázek O.13.2.4.6 – Prostorové zobrazení rozložení proudového pole v projektilu v programu *J\_projektíl\_v\_koleji*

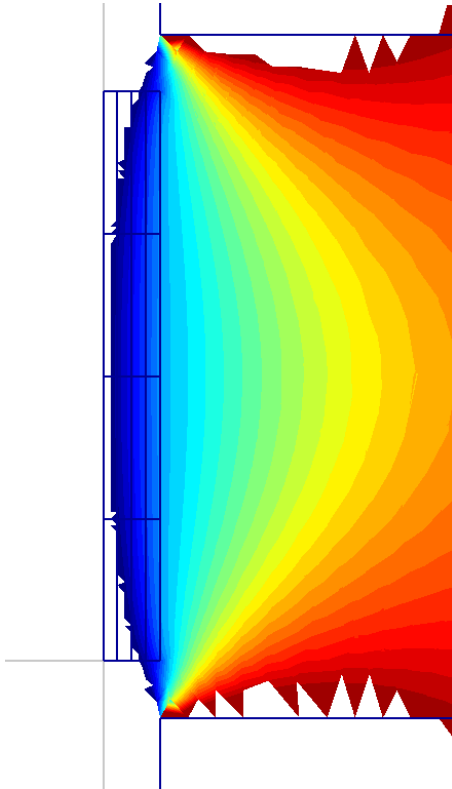


*O.13.2.4.7 – rozložení X složky proudové hustoty v čele projektilu – patrný nízký rozptyl, tedy homogenita a velikost dle analytického výpočtu. Výstup z programu J\_projektíl\_v\_kolej*

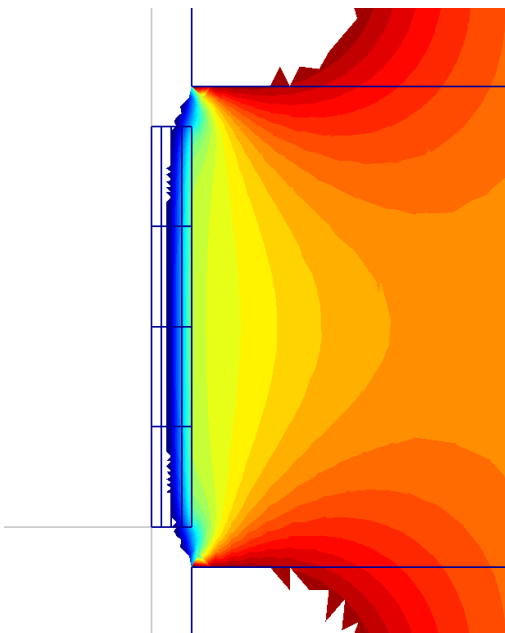
*i*



*O.13.2.4.8 – rozložení proudové hustoty v rameni projektilu, kudy vtéká proud z kolejnic. Výstup z programu J\_projektíl\_v\_kolej*

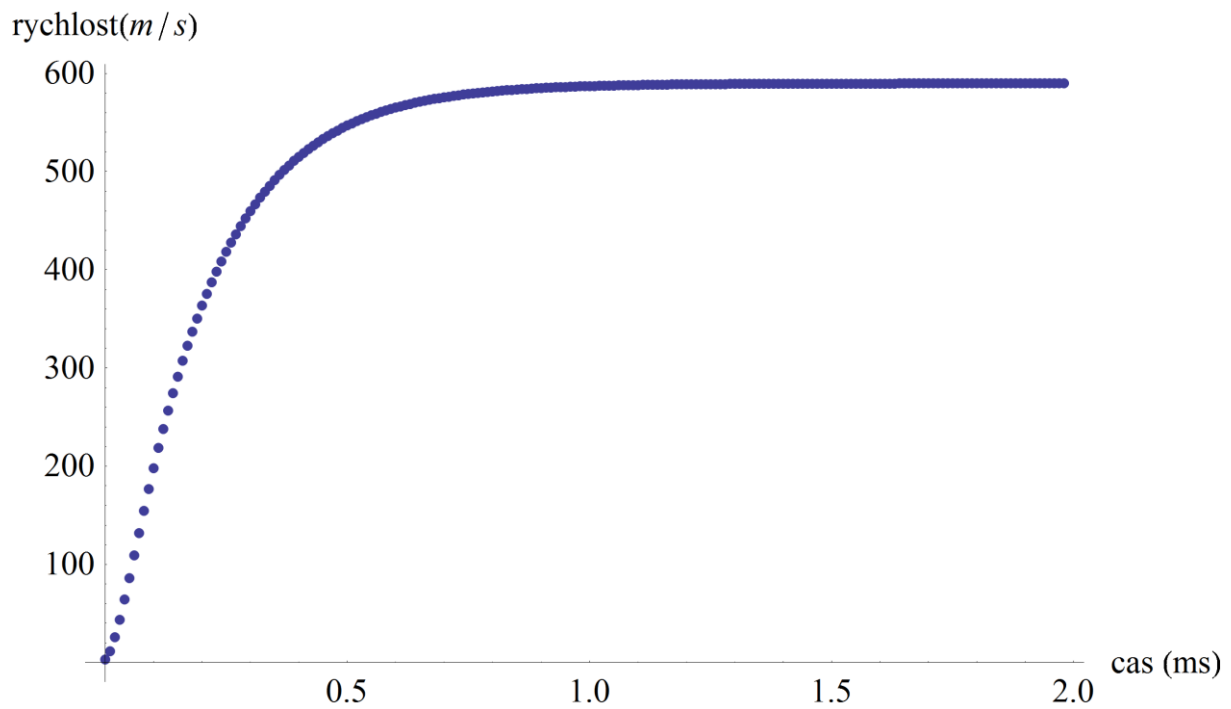


*O.13.2.5.1 – rozložení Y složky vektoru magnetické indukce v řezu projektilu pomocí samotných permanentních magnetů - Výstup z programu Bpole\_projektilu\_a\_koleji*

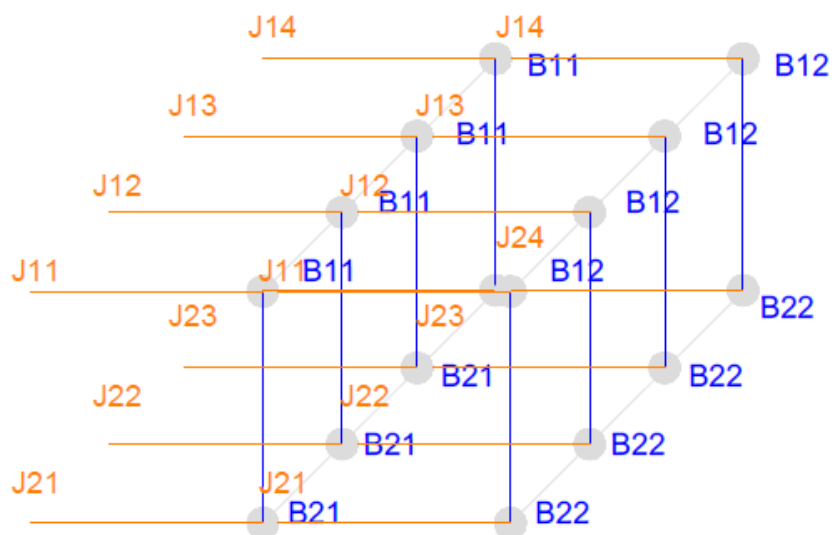


*O.13.2.5.2 – rozložení Y složky vektoru magnetické indukce v řezu projektilu při interakci permanentního pole a pole způsobené proudovou hustotou tekoucí skrz projektil – patrný posun magnetické neutrální osy oproti programu Bpole\_projektilu. Výstup z programu Bpole\_projektilu\_a\_koleji*

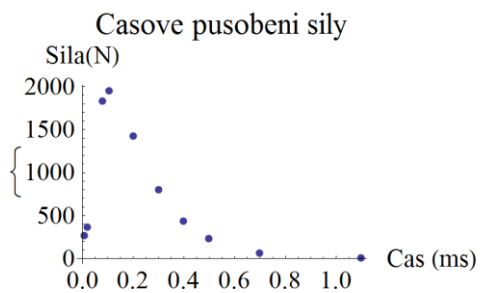




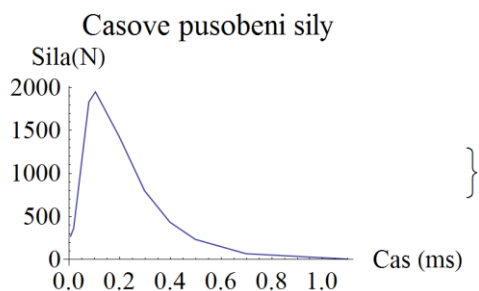
Obrázek O.13.3.1.1 – výsledek numerického výpočtu časového průběhu rychlosti, jako výsledek programu Mech\_model\_1



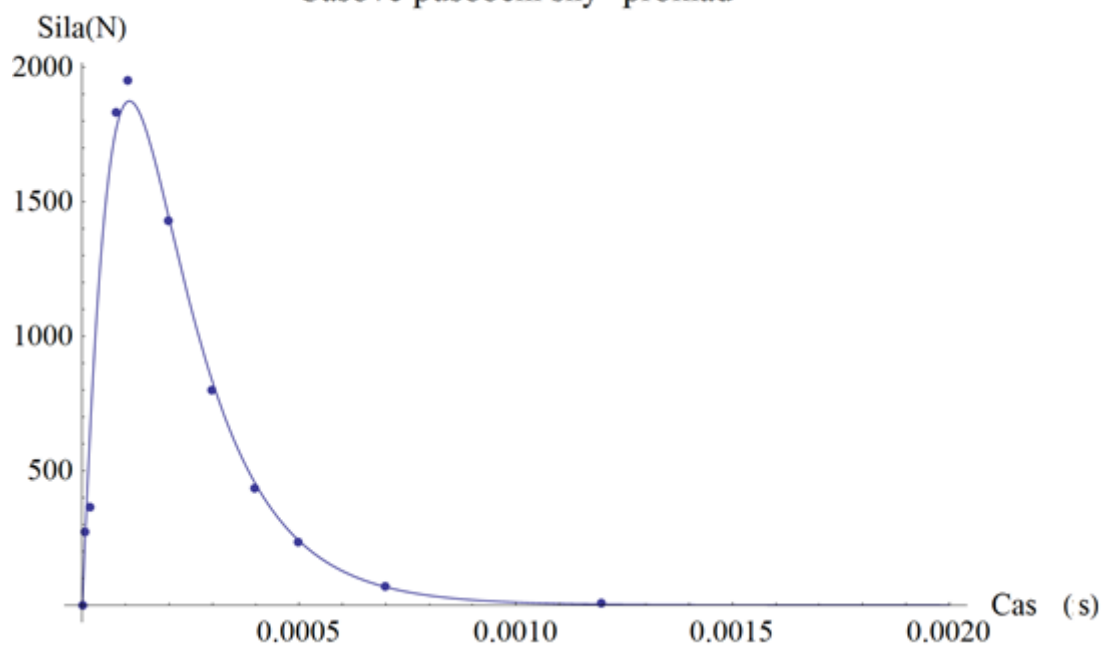
Obrázek O.13.3.3.1- znázornění diskretizace oblasti v průběhu výpočtu programu soucin\_jb\_hezky



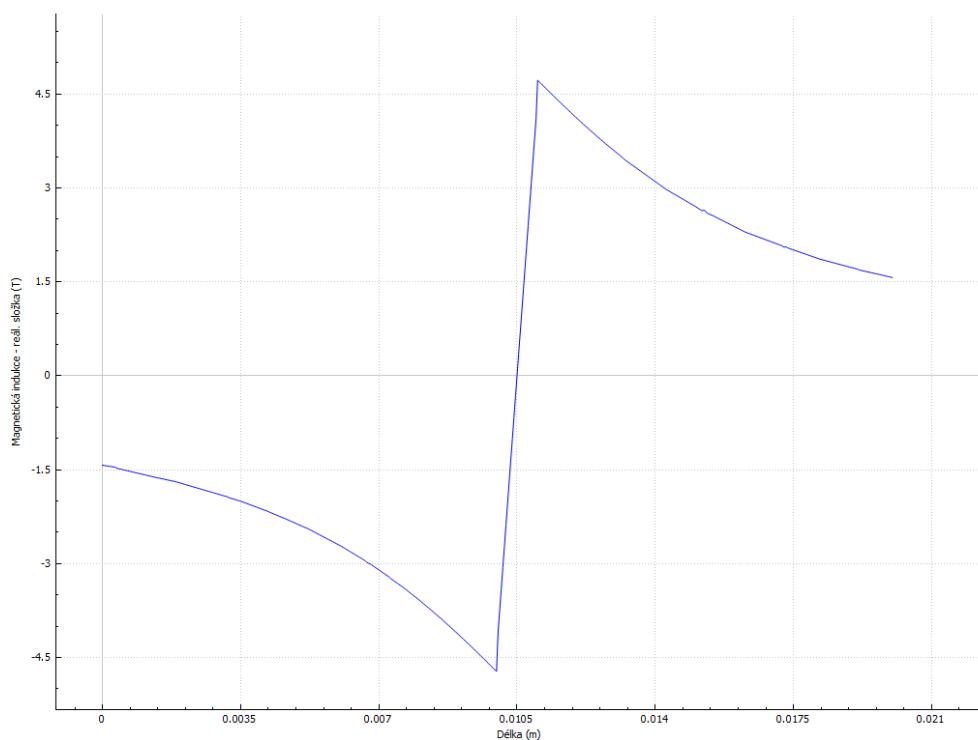
Obrázek 0.13.3.3.2- Výstupní body spočtené síly, jako výstup programu `soucin_jb_hezky`



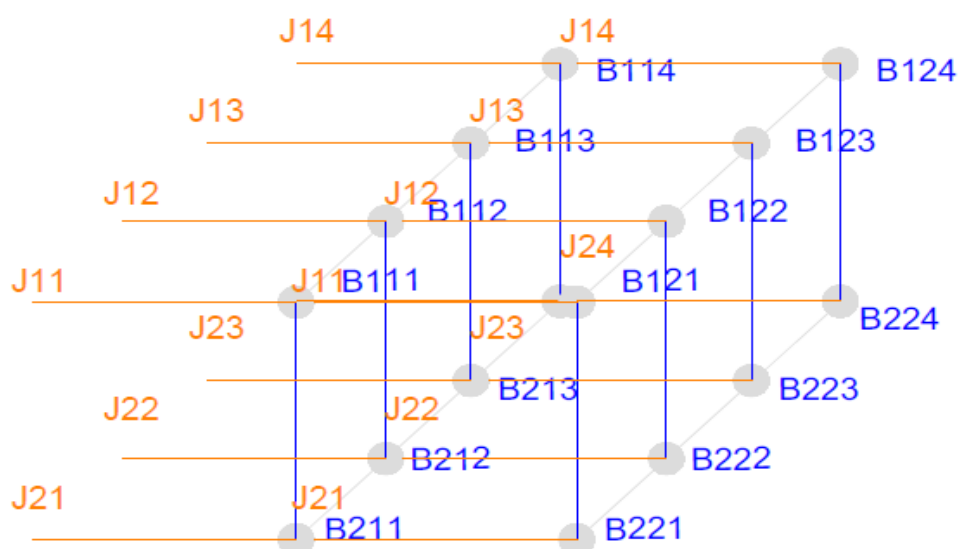
### Casove pusobeni sily–proklad



Obrázek 0.13.3.3.3 – Proložení spočtených bodů, jako výstup síly z programu `soucin_jb_hezky`

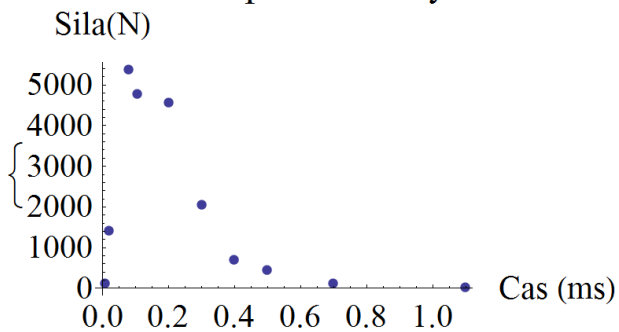


Obrázek O.13.3.4.1 – rozložení Y složky vektoru magnetické indukce v závislosti na vzdálenosti projektilu, jako vstup do programu *F\_pro\_B\_projektilu*



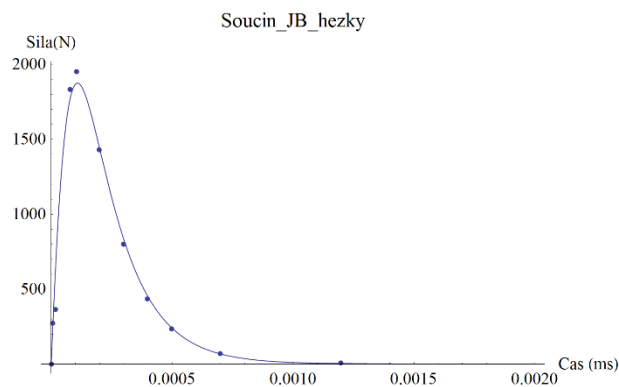
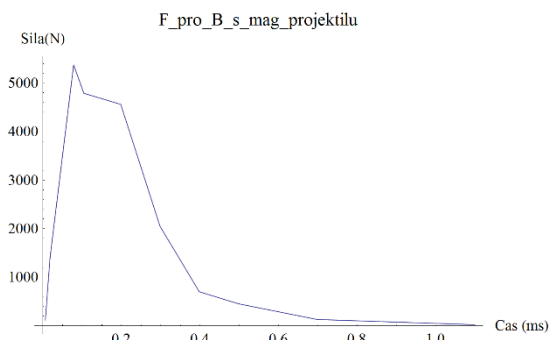
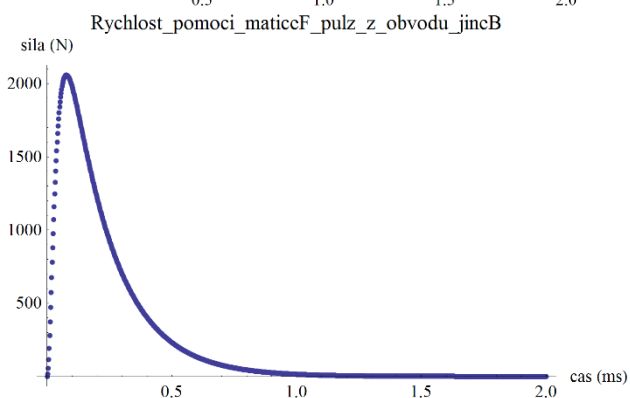
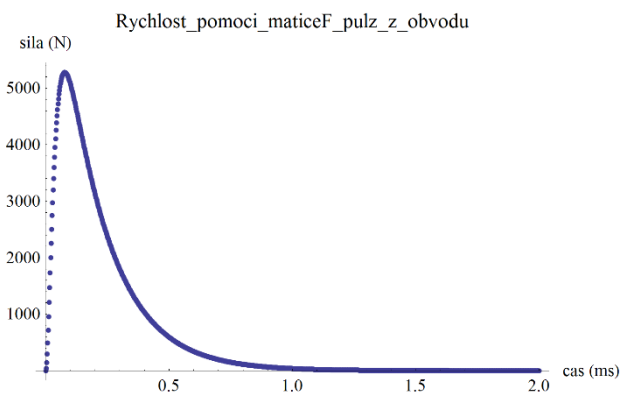
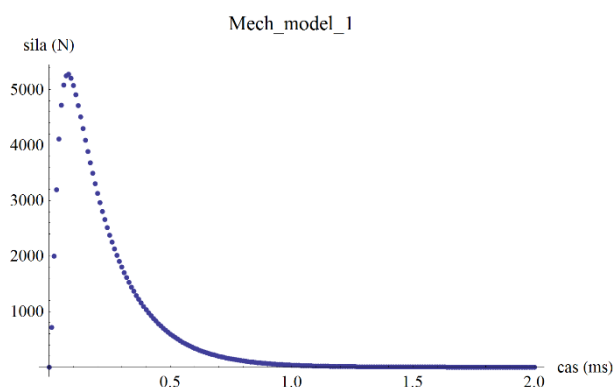
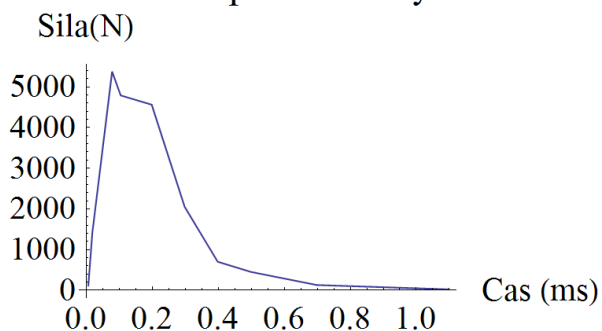
Obrázek O.13.3.5.1- znázornění diskretizace oblasti v průběhu výpočtu programu *F\_pro\_B\_s\_mag\_projektilu*

### Casove pusobeni sily

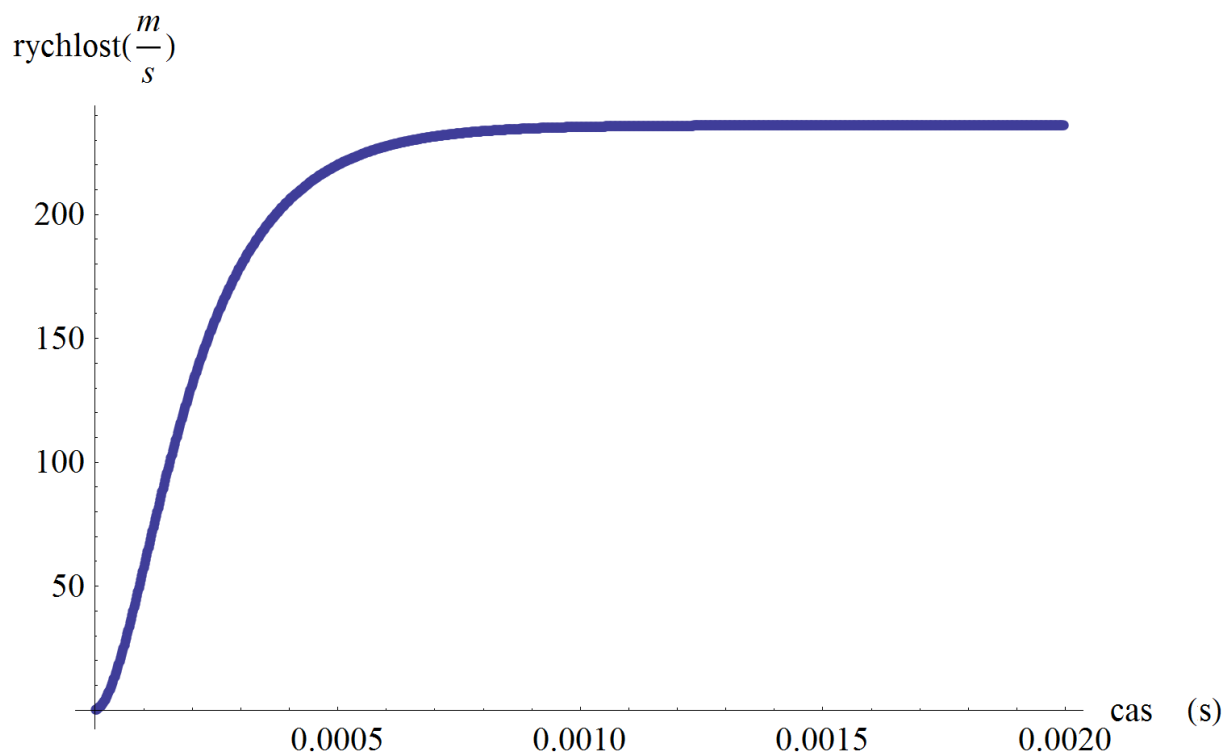


Obrázek O.13.3.5.2 – časové působení síly v daných časových bodech, jako výstup z programu *F\_pro\_B\_s\_mag\_projektilu*

### Casove pusobeni sily

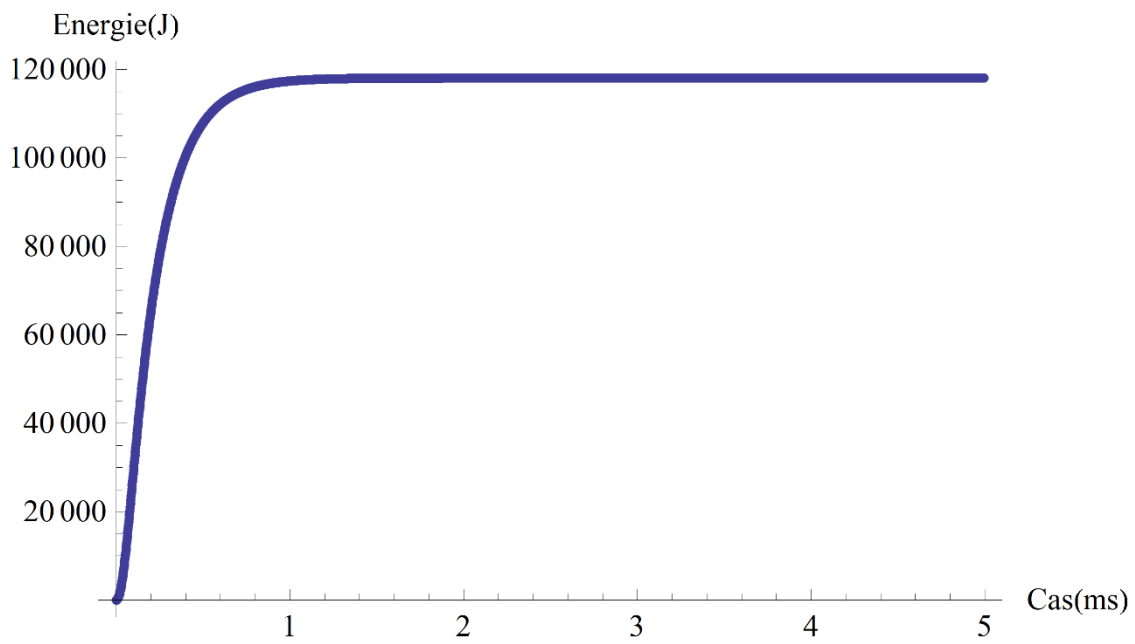


Obrázek O.13.3.6.1 – Výstupní síly, vypočtené pomocí jednotlivých mechanických programů

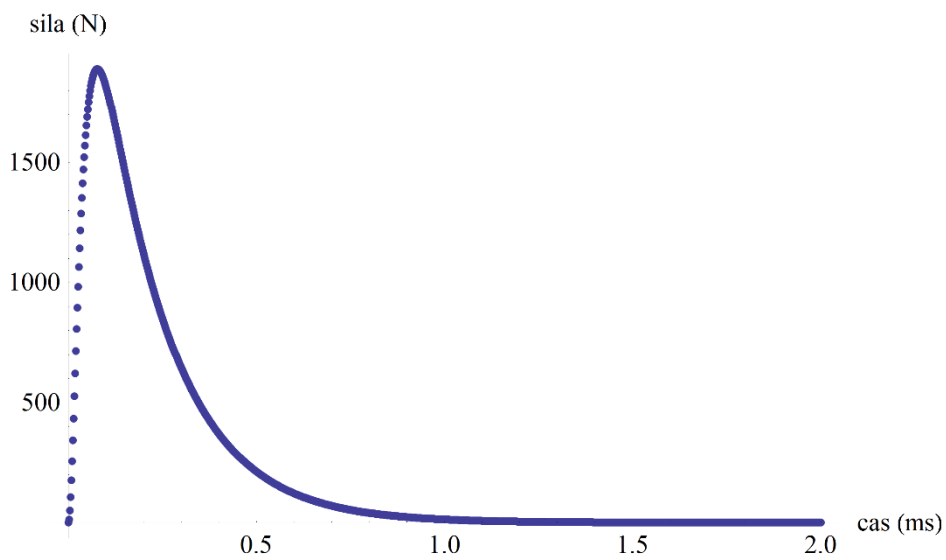


Obrázek O.13.3.6.2 – Výstupní průběh rychlosti, vypočtené pomocí programu Soucin\_jb\_hezky\_s\_rzchlosti.

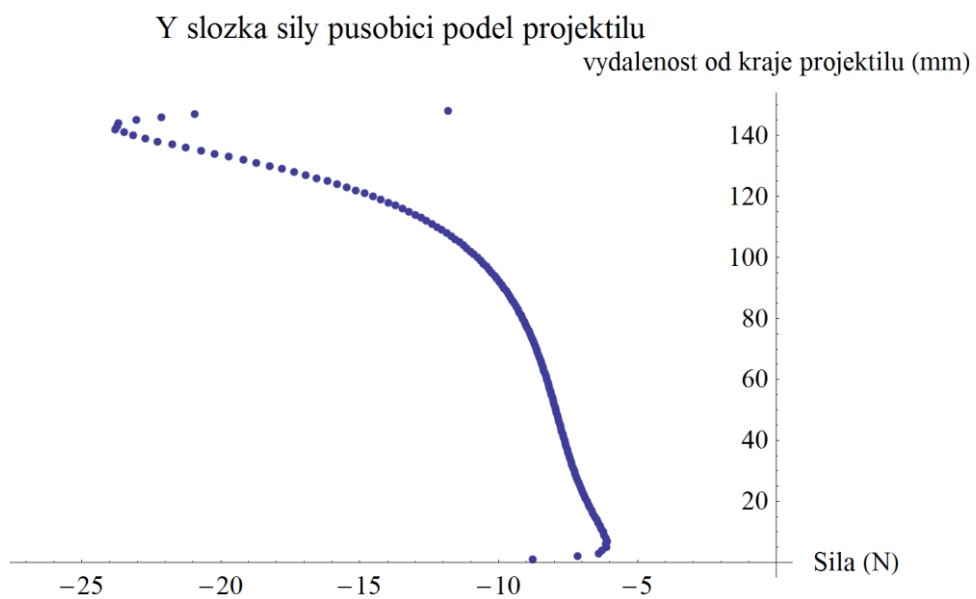
## elektrické ztráty



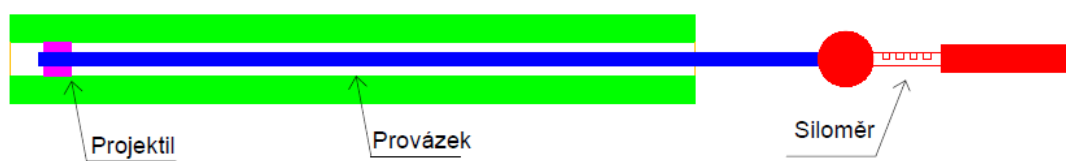
obrázek O.13.4.1 - vypočtené elektrické ztráty v průběhu urychlování



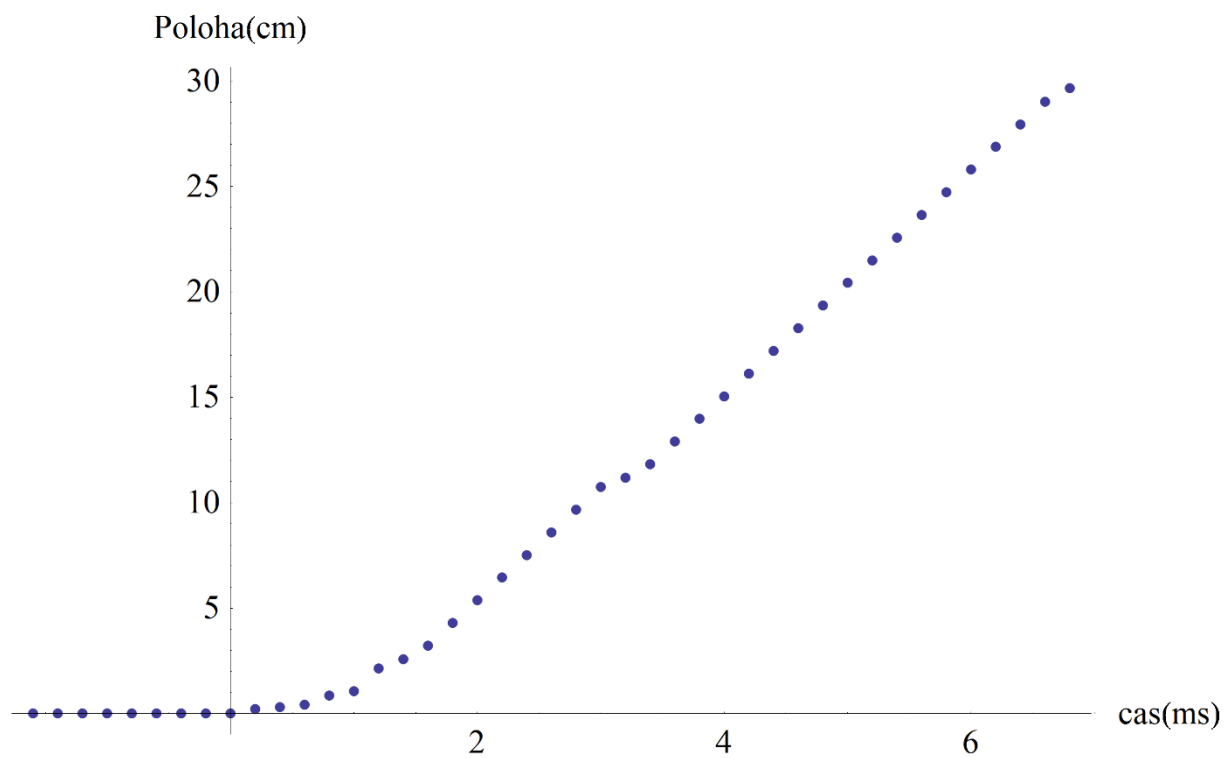
obrázek O.13.4.3 - časové působení ztrátové síly na rameno projektilu



obrázek O.13.4.4 - působení síly na části ramena projektilu v jednom čase

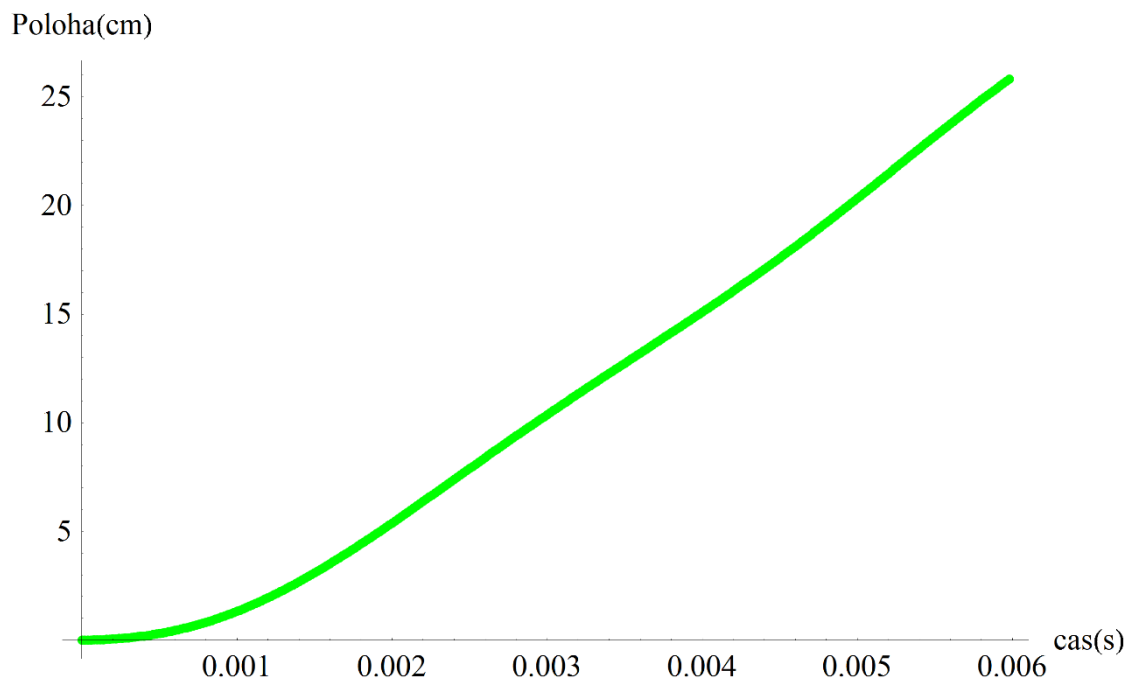


obrázek O.13.4.5 – možné určení fixních ztrát pomocí projektilu (fialová) protahovaného na provázku (modrá), zakončeným siloměrem (červená)

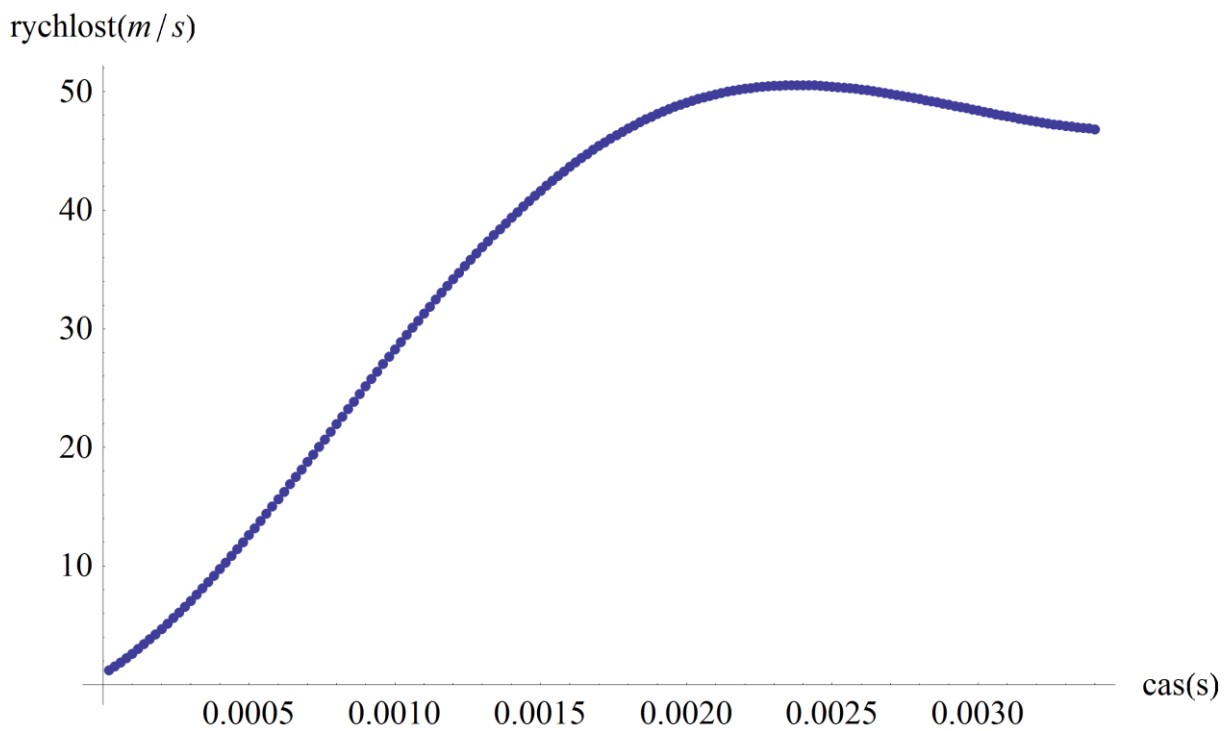


*obrázek O.13.4.6 - pravděpodobná poloha projektilu v hlavni při urychlování, sejmutého pomocí měřicí tyčky polohy*

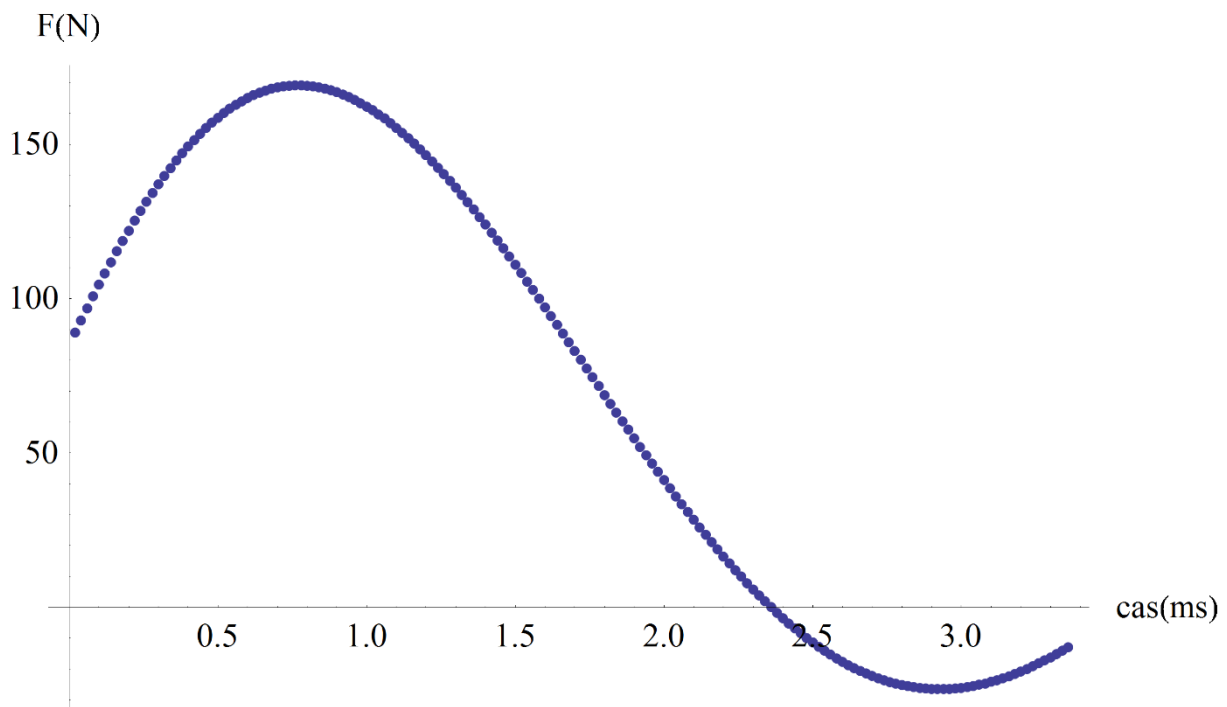




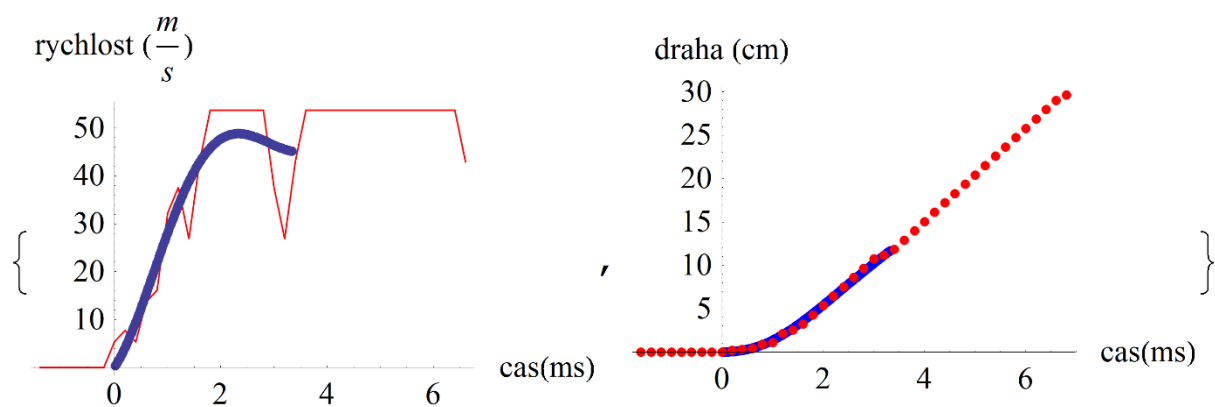
obrázek O.13.4.7 - proložená sejmutá poloha, pomocí které byla hledána budící funkce



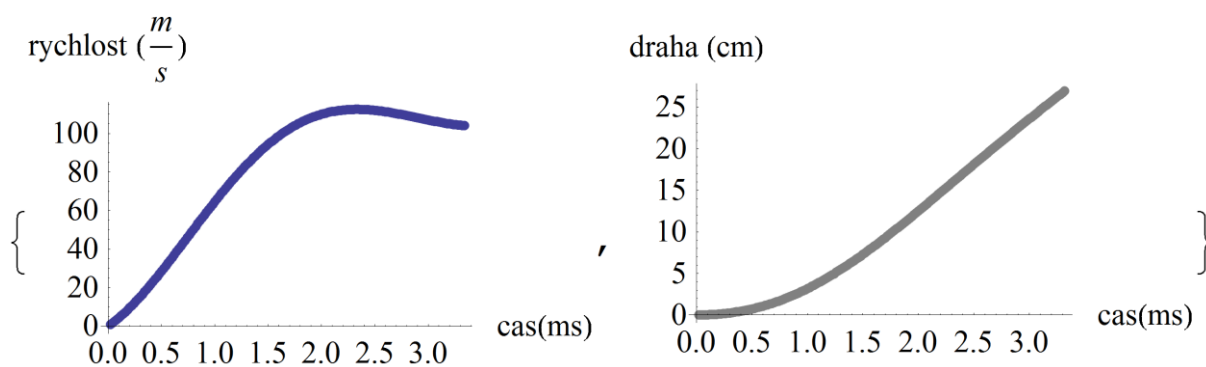
obrázek O.13.4.8 - Průběh rychlosti při urychlovacím ději, získaný derivací průběhu O.13.4.7



obrázek O.13.4.9 - síla, urychlující projektil získaná jako hmotnost projektilu násobená zrychlením, které je výsledkem derivací průběhu dle O.13.4.8

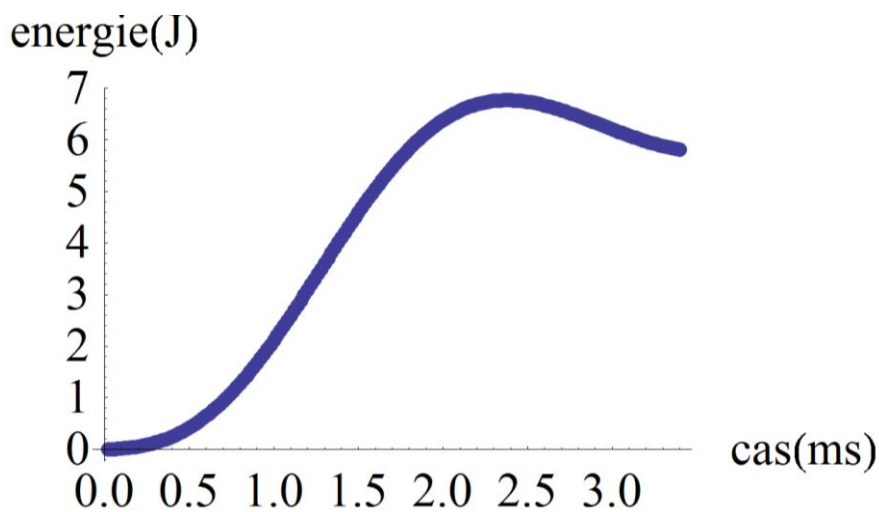


obrázek O.13.4.10 - Výstup z modelu celkovy\_mech\_model\_JB. Zahrnující ztráty. Červená – naměřené průběhy, modrá – dopočtené průběhy, pro hmotnost projektilu 5.3g

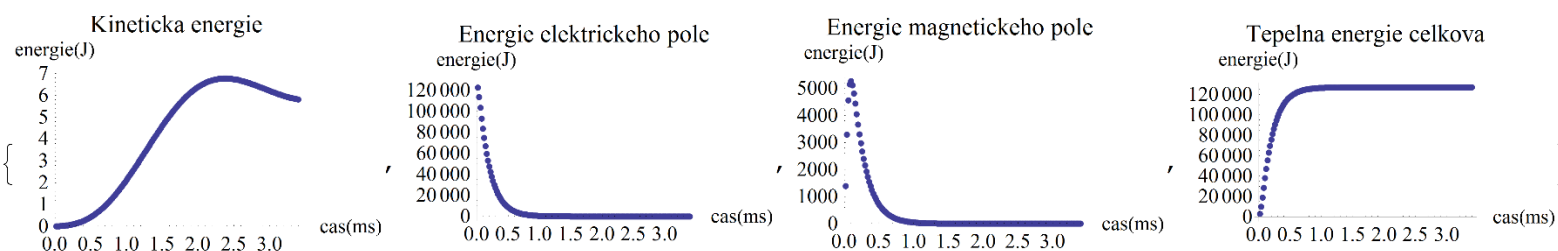


obrázek O.13.4.11 - Výstup z modelu celkovy\_mech\_model\_JB, zahrnující ztráty. Dopočtené průběhy, pro hmotnost projektilu 2.3g

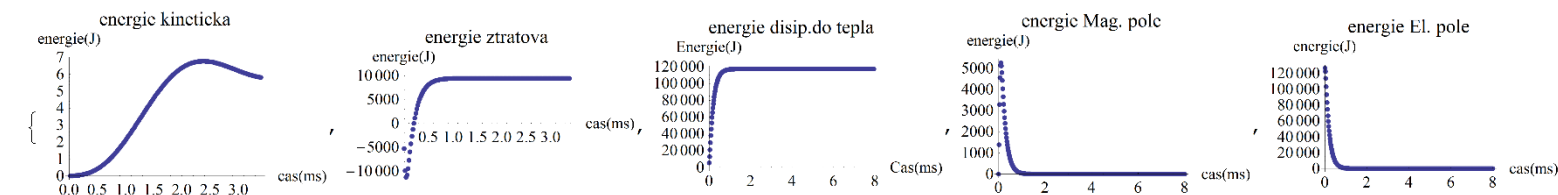
## Obrázky ke kapitole 14 – Možnost řešení jednotným modelem



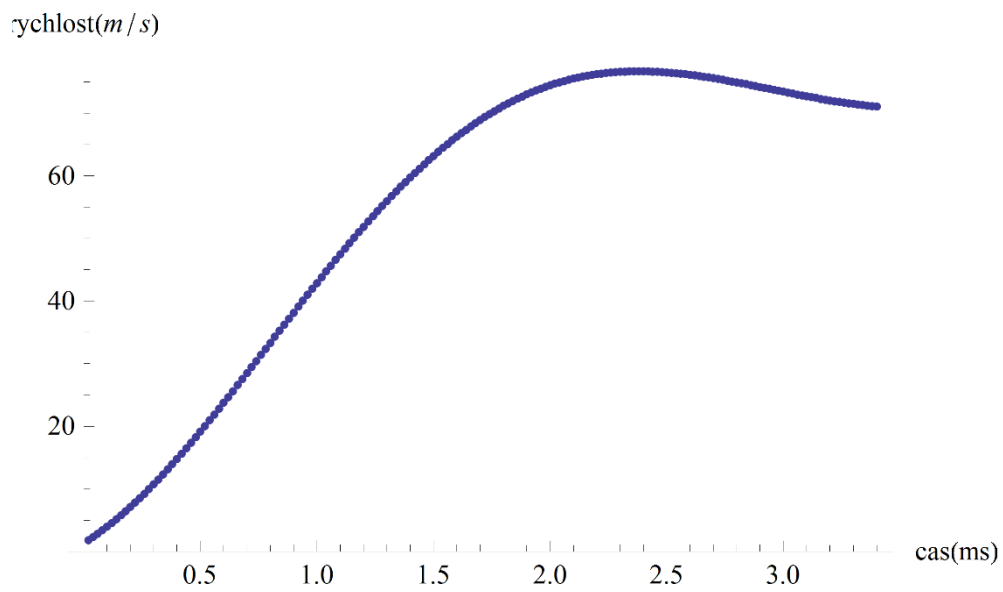
obrázek O.14.2.1 -  
Průběh kinetické energie  
v čase, získaný měřením  
polohy a následným  
výpočtem pro hmotnost  
projektilu 5.3g



obrázek O.14.2.2 - Průběh vypočtených energií v čase, jako jeden z výstupů z programu celkova\_bilance\_zaklad . Výpočet pro proudový pulz dle (13.1.1\_5), polohu dle O.13.4.7, rychlost dle O.13.4.8 a hmotnost projektilu 5.3g



obrázek O.14.2.3 - Průběh vypočtených energií v čase, jako jeden z výstupů z programu celkova\_rce\_ztraty,. Výpočet pro proudový pulz dle (13.1.1\_5), polohu dle O.13.4.7, rychlost dle O.13.4.8 a hmotnost projektilu 5.3g

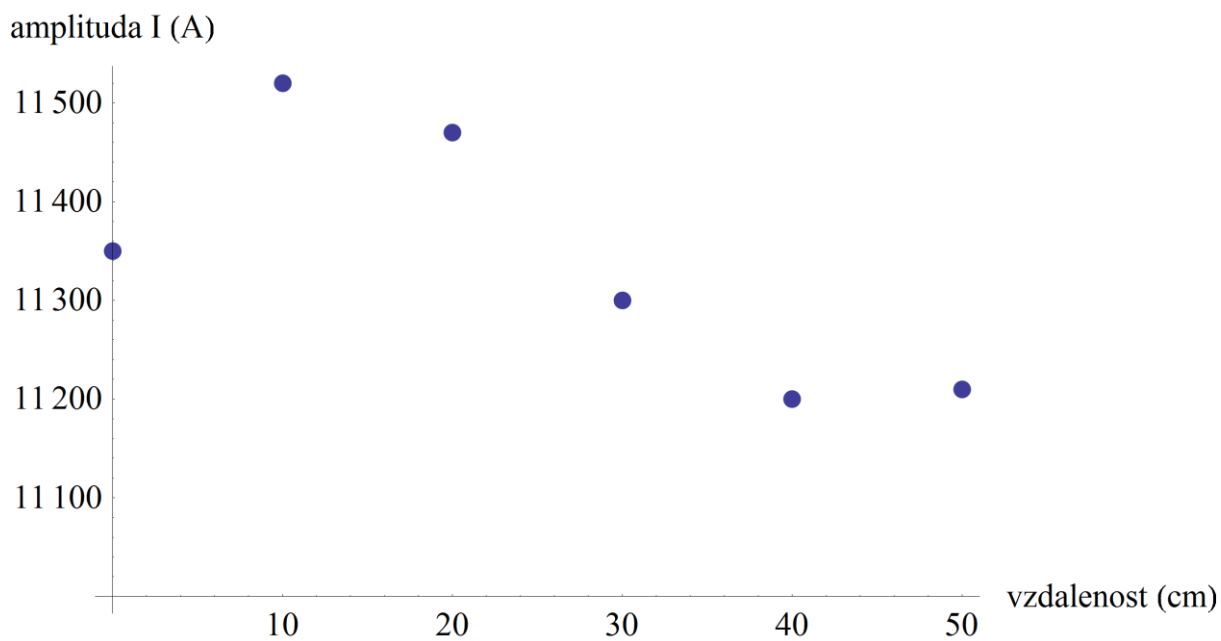


Obrázek O.14.2.4 – nově spočtený průběh rychlosti, pomocí rovnice bilance ztrát (14.2\_2) pro hmotnost urychlovaného tělesa 2.3g.

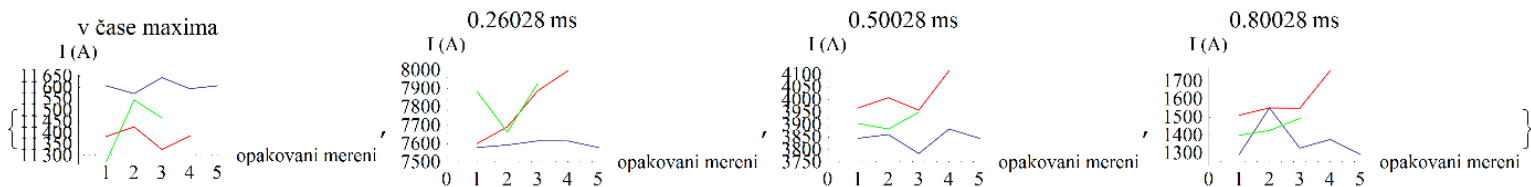
## Obrázky ke kapitole 15 – Realizovaná ověřovací měření



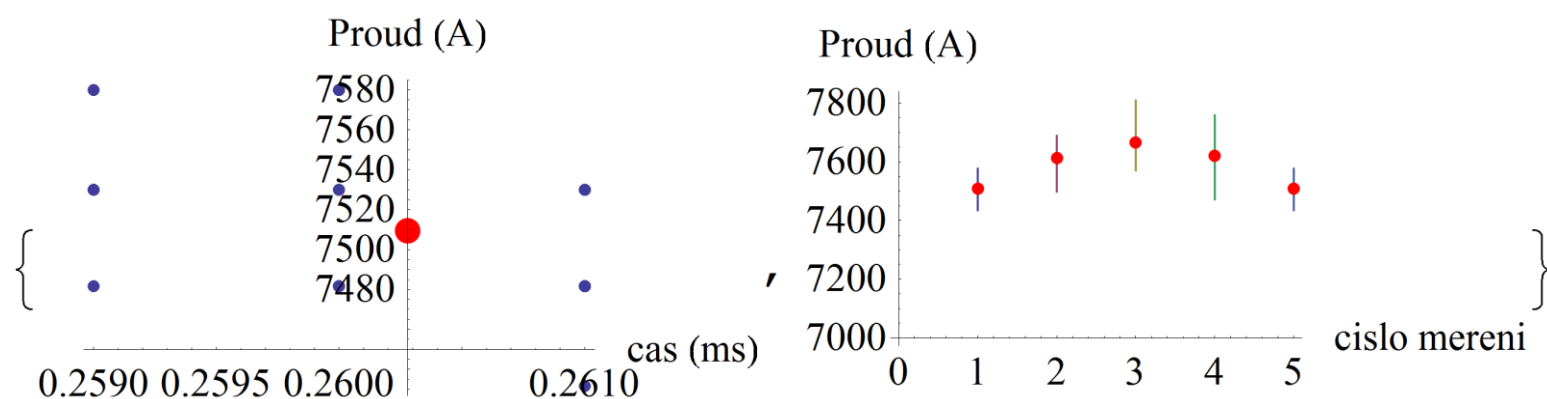
*O.15.1.1- zkratovací spojka pro účely měření*



*O.15.1.2-sejmuté amplitudy proudu v jednotlivých vzdálenostech zkratovací spojky od počátku kolejnic*



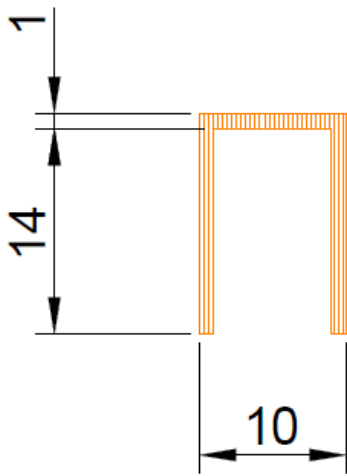
O.15.1.3- výstup z programu porovnaní\_tylu, pro vyhodnocení měření proudů v různé poloze zkratovací spojky



O.15.1.4- aproximace velikosti proudu v čase 0.26 ms z prvního průběhu sejmutého při zkratování kolejnic na počátku

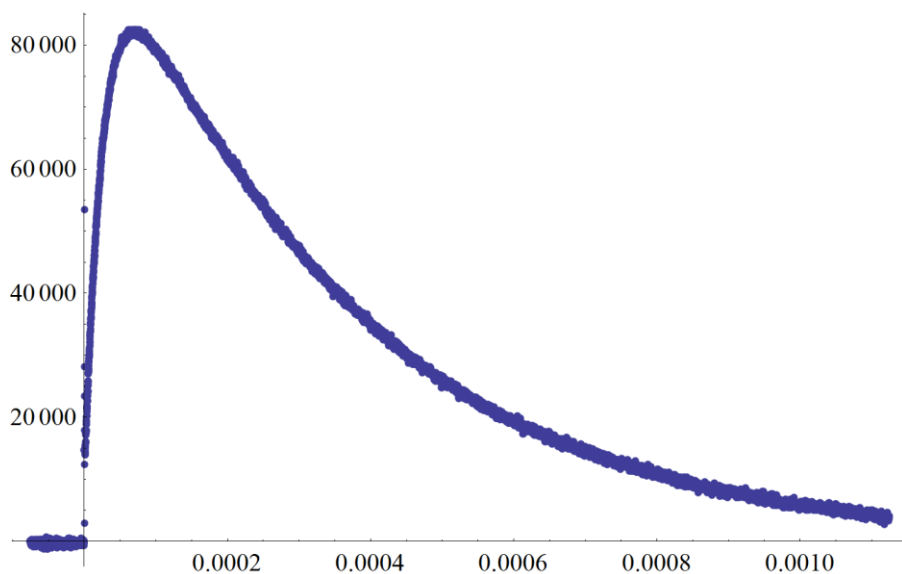


*O.15.3.1.1- Měřený projektil, tvarovaný dle bakalářské práce, uvedené jako [17]*

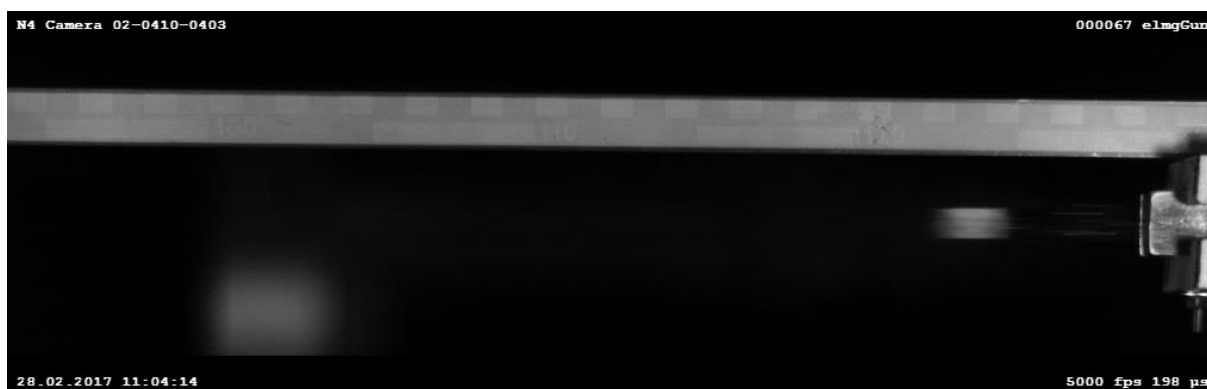


*O.15.3.1.2– Rozměry vystřelovaného projektilu s kovovým přitlakem, vyfotografovaným na obrázku O.15.3.1.1*

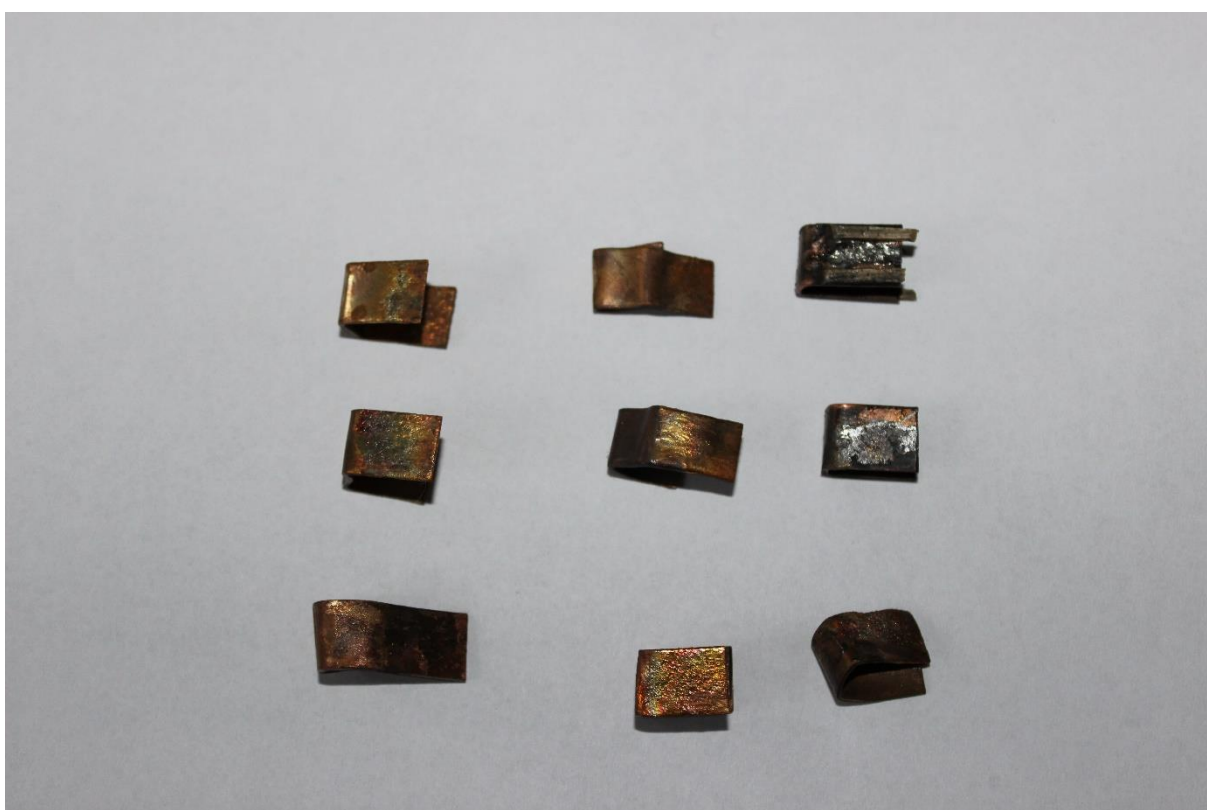




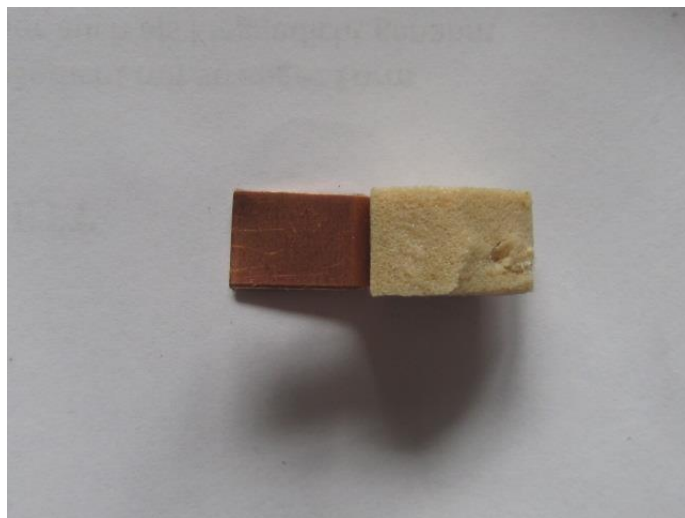
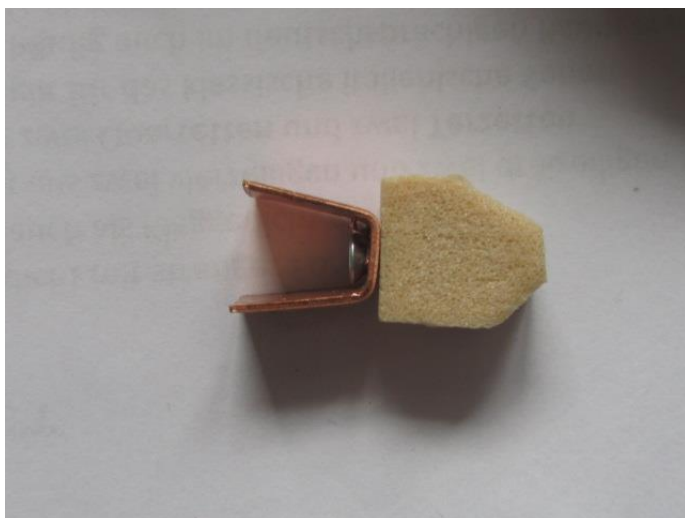
*O.15.3.1.3 - proud sejmutý při výstřelu střely s přímým kovovým kontaktem ke kolejnici*



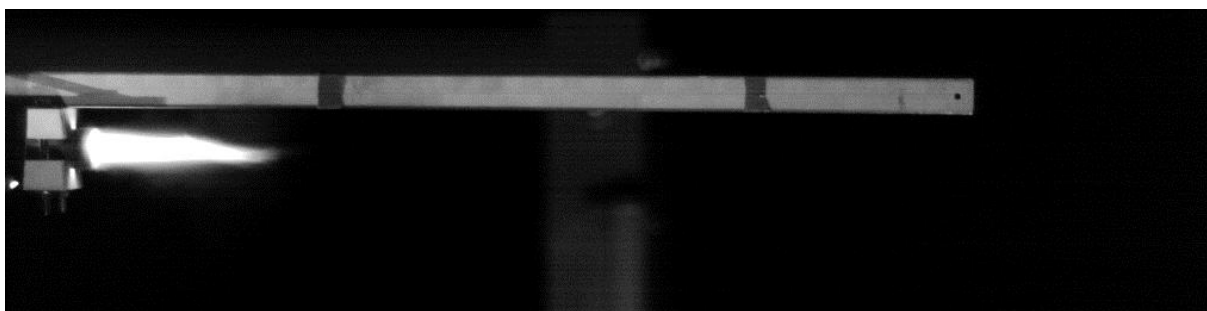
*O.15.3.1.4 - obrázek pořízený po záznamu vysokorychlostní kamery v ústí hlavně, při výstřelu projektilu s přímým přitlakem dle obrázku O.15.3.1.1 a O.15.3.1.2*



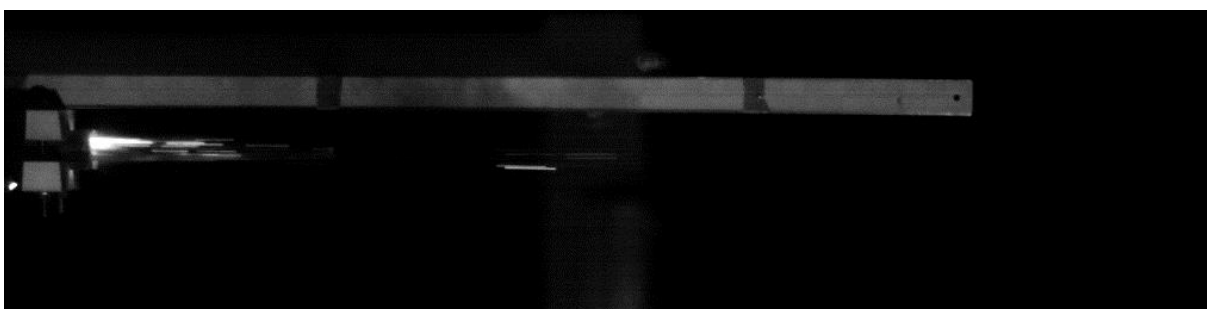
*O.15.3.1.5 - zdeformované projektily po výstřelu*



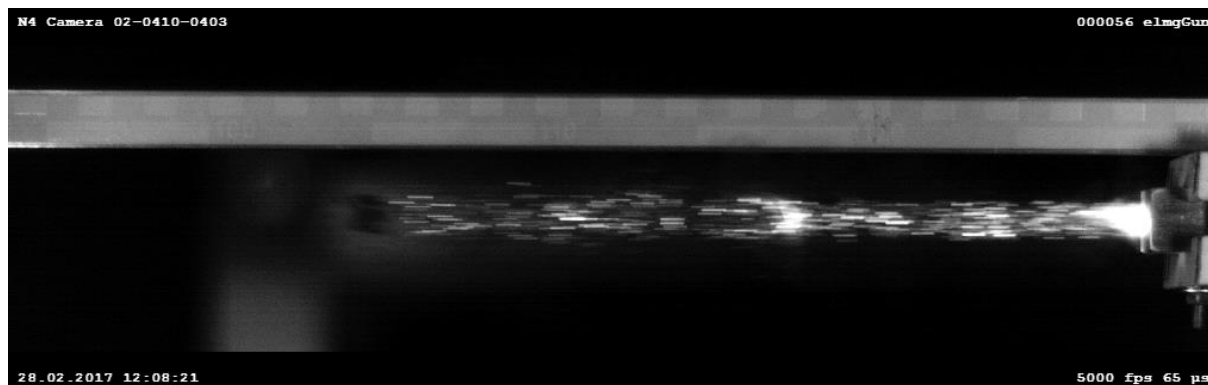
*O.15.3.2.1. - projektil s kovovým kontaktem s kolejnicí a stabilizujícím prvkem*



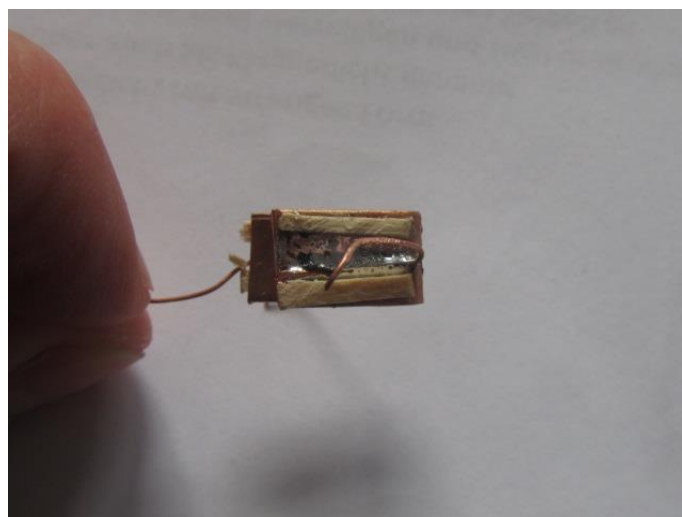
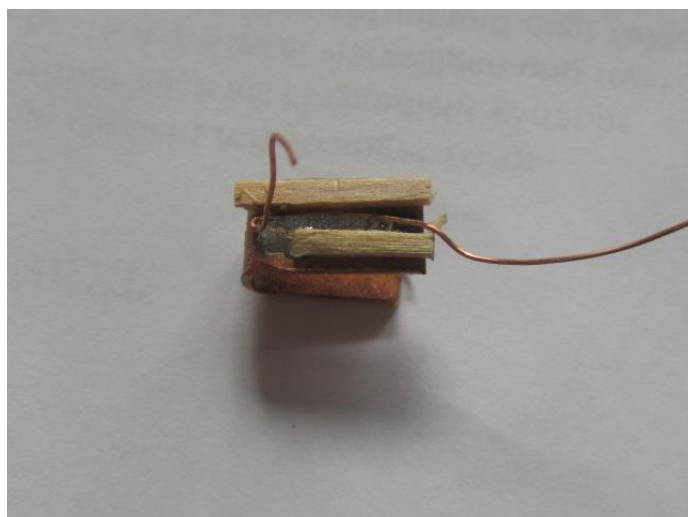
*O.15.3.2.2- patrný výsledek po urychlení projektilu s kovovým přitlakem a stabilizačním prvkem*



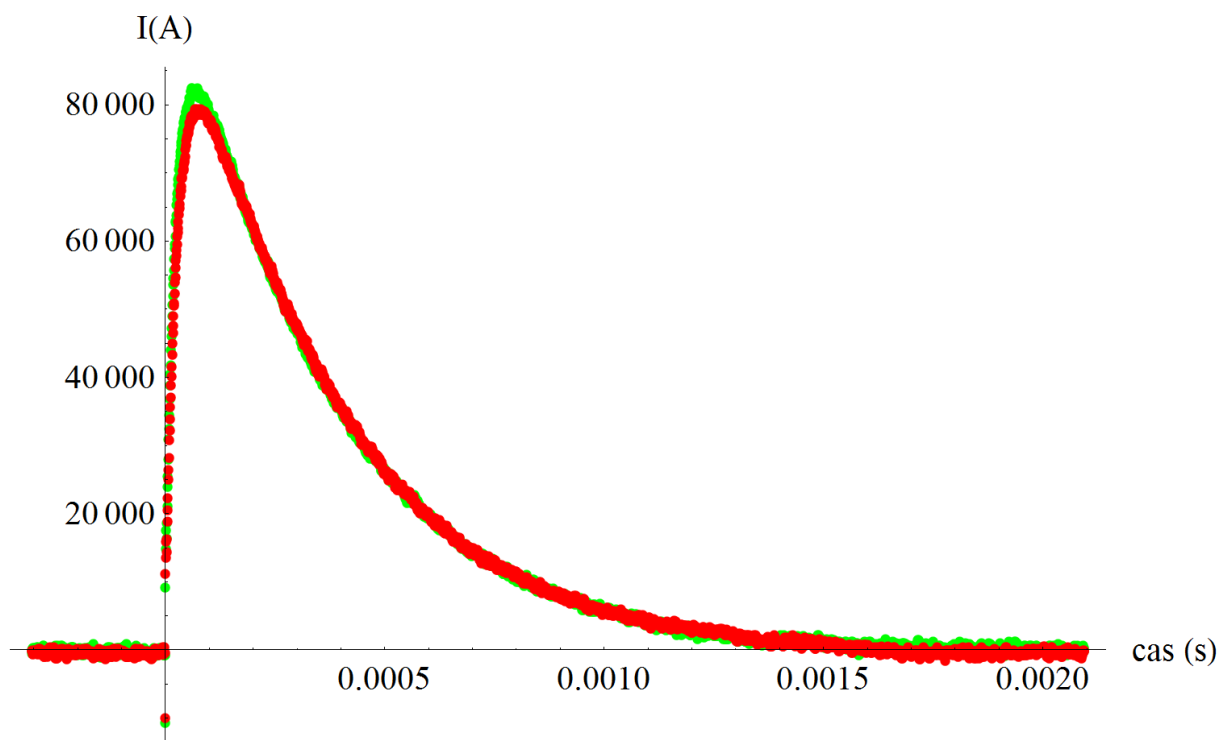
*O.15.3.2.3 - patrně pozůstatek projektilu po urychlení projektilu se stabilizací. Objekt patrný zhruba v polovině vyznačených rysek*



*O.15.3.3.1 - projektil urychlovaný obloukem hořícím v jeho týlu a patrné jiskry v jeho pozadí*



*obrázek O.15.3.4.1 - projektil s oddělenou mechanickou a elektrickyvodnou částí před výstřelem*



*O.15.3.4.2 - sejmutý proud při výstřelu projektilu s kovovým přitlakem - zeleně a proud při výstřelu projektilu se smíšeným plasmatickým vedením – červeně*



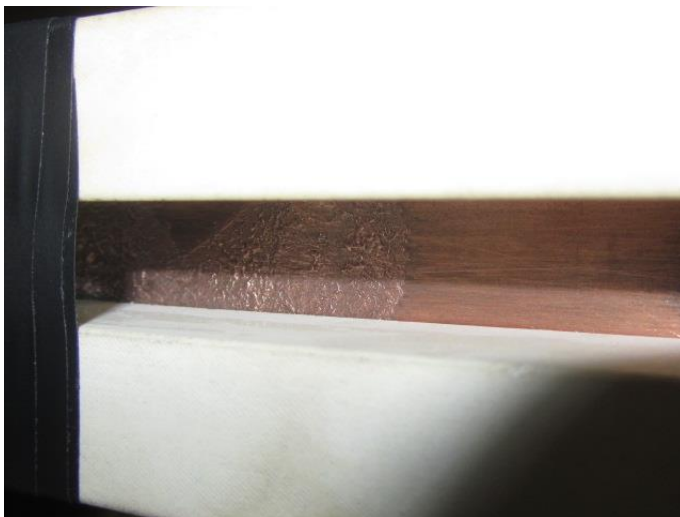
*O.15.3.4.3 - projektil se smíšeným vedením proudu pomocí plasmy a kovu, vyfotografovaný po výstřelu*



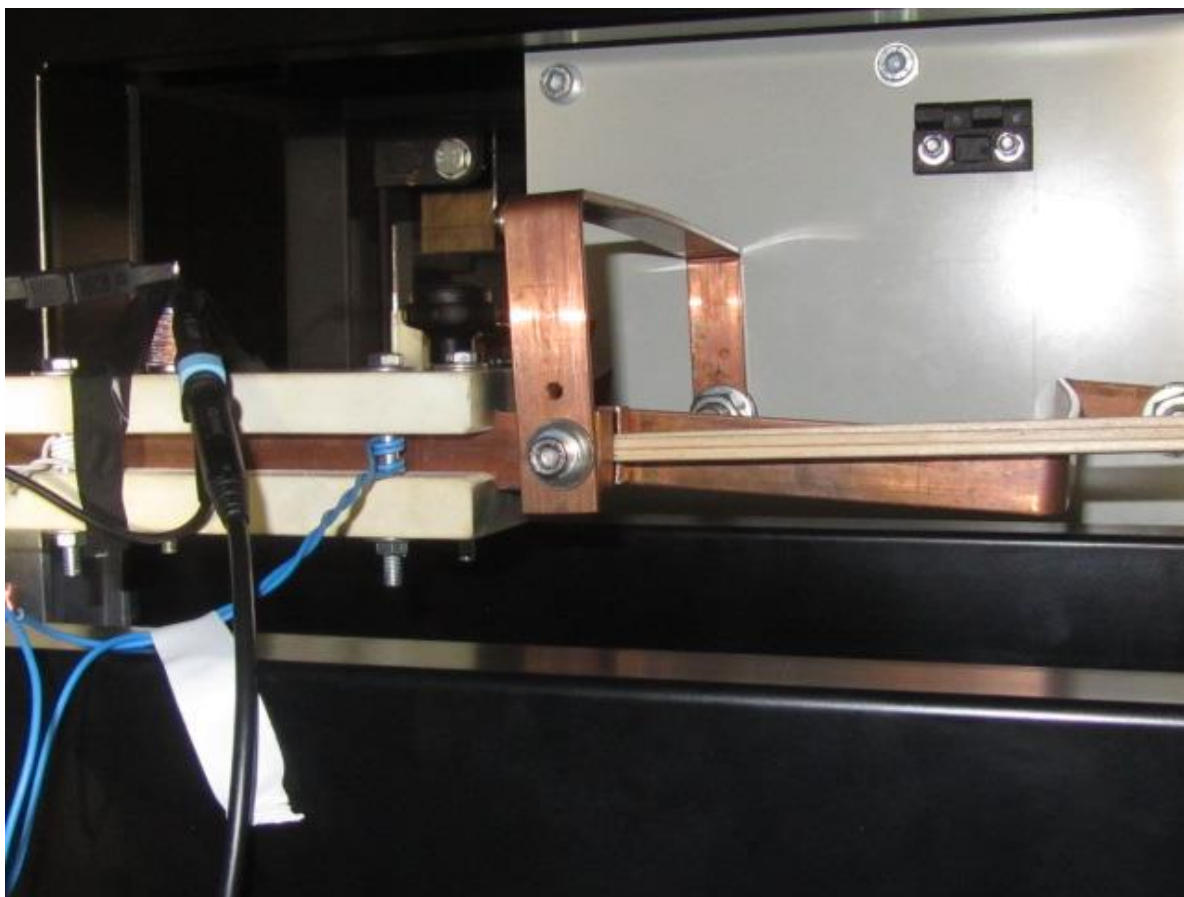
*O.15.3.4.4 - plasmatický oblak po výstřelu projektilu se smíšeným plasmatickým vedením I*



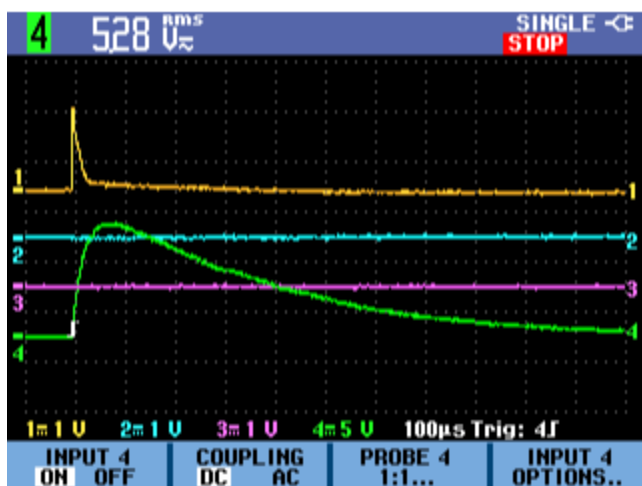
*O.15.3.4.5 - plasmatický oblak po výstřelu projektilu se smíšeným plasmatickým vedením II*



*O.15.4.1 – gougingová degradace kolejnic na počátku.*



O.15.4.2.1 - vyrobená cívka ze šroubu zpevňujícího hlaveň - vinuto vodičem s modrou izolací

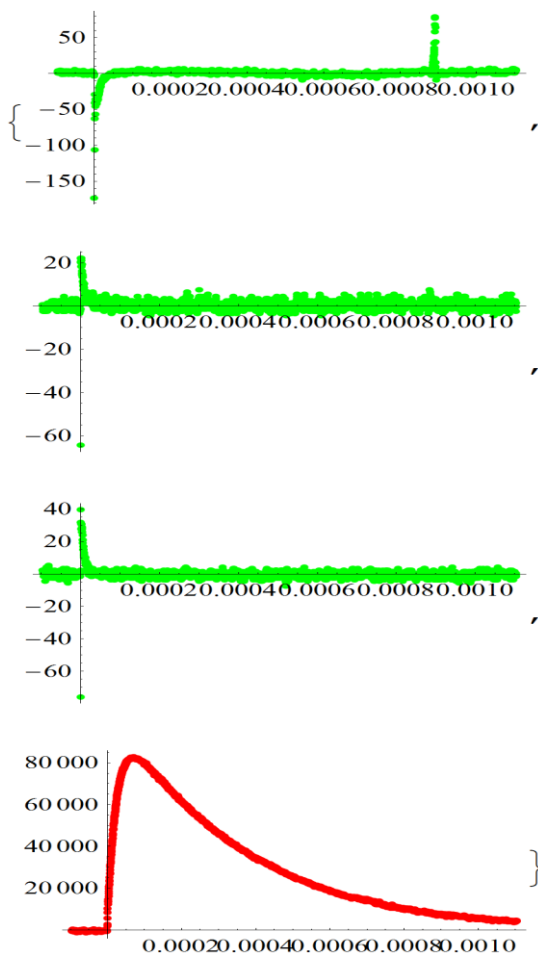


O.15.4.2.2 - sejmutý oscilogram 1. - cívka nad hlavní, 2.3- cívka ze šroubu, 4- sejmutý proud

THS3014 - 11:06:00 11.4.2017



O.15.4.2.3 - detail na umístění cívky nad hlavní



O.15.4.2.4 - průběhy napětí na:

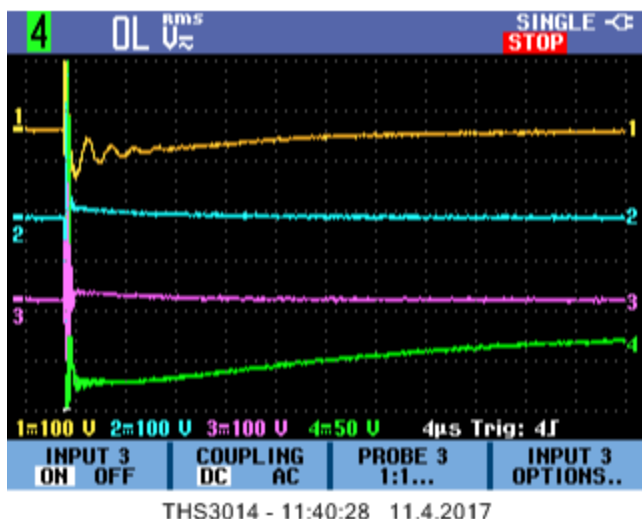
1. - cívka 7.5 cm

2.- cívka 12.5 cm

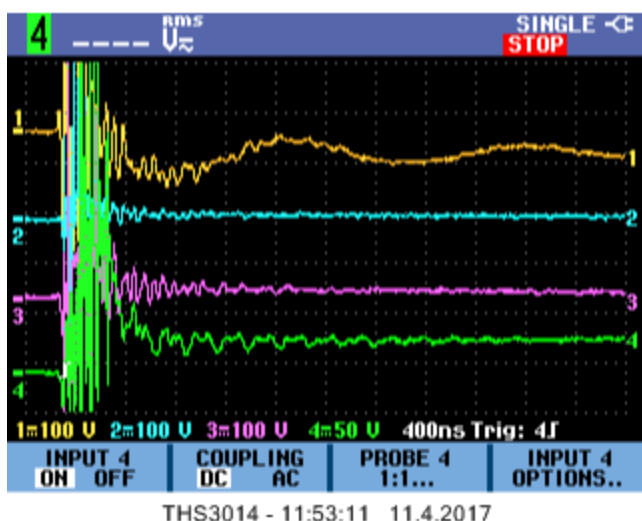
3.-cívka 22.5 cm

4- sejmutý proud (vzdálenosti od počátku kolejnic)

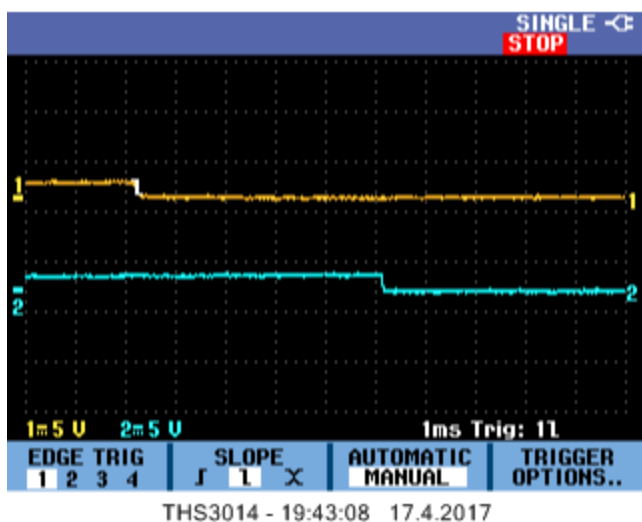




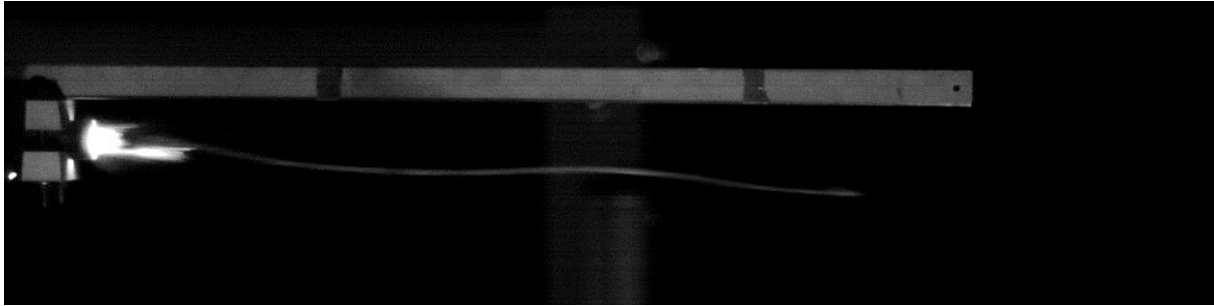
O.15.4.2.5 - sejmutý oscilogram s uspořádáním stejným jako na obrázku O.15.4.2.4 v kratší časové oblasti



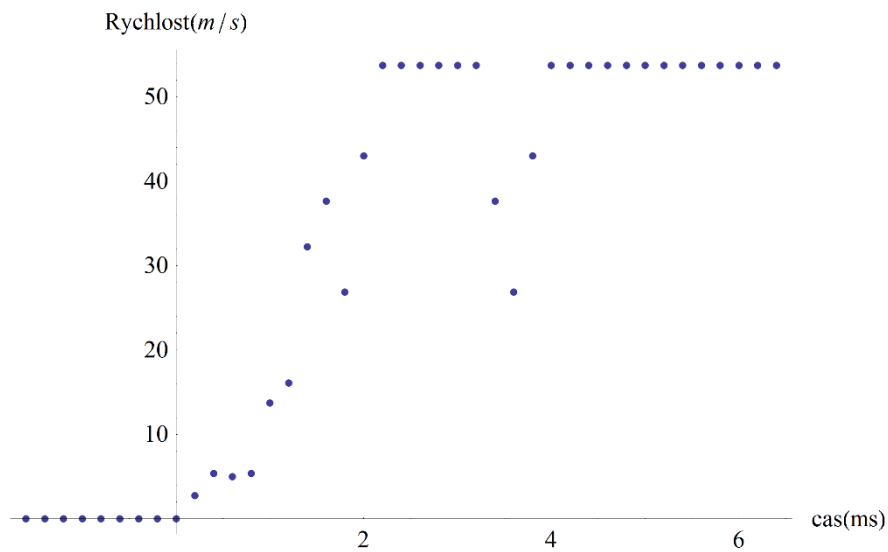
O.15.4.2.6 - sejmuté napětí na cívkách na počátku, uprostřed a v ústí hlavně v ještě kratší časové oblasti, než na obrázku O.15.4.2.5



O.15.4.3.1 - sejmutý oscilogram při měření polohy pomocí přerušného obvodu



O.15.4.4.1 - zvlnění tyčky pro snímání polohy projektilu při urychlování.





*O.15.5.2 – předurýchlovač připevněný  
na konstrukci navazující na hlaveň*