

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh dvoustupňového magnetického děla

vedoucí práce: Ing. Vladimír Kindl Ph.D.

2014

autor: Bc. Pavel Svoboda

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Pavel SVOBODA**
Osobní číslo: **E12N0070P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Návrh dvoustupňového magnetického děla**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

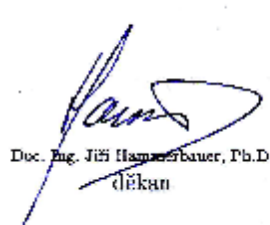
1. Uveďte možná konstrukční uspořádání magnetických děl.
2. Navrhněte cívky dvou stupňů magnetického děla konstrukce coil gun.
3. Proveďte výpočet indukčnosti cívek a síly na projektil v závislosti na pozici náboje v hlavni.

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

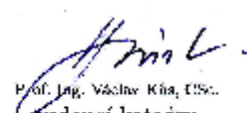
1. Elektronické informační zdroje.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

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


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




Prof. Ing. Vladimír Kindl, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Návrh dvoustupňového magnetického děla

Předkládaná diplomová práce se zabývá problematikou elektromagnetického děla. V první části jsou popsány fyzikální principy a konstrukční uspořádání magnetických děl. Detailněji je rozebrán princip konstrukce reluktančního děla typu coilgun, který je řešen v dalších částech práce. Druhá část se zabývá elektromagnetickým a konstrukčním návrhem cívek dvojestupňové konstrukce děla coilgun. Parametry cívek jsou vypočteny numerickými metodami. Dále je v předkládané práci navržena metodika výpočtu sil působících na projektil v závislosti na pozici v hlavní elektromagnetického děla.

Klíčová slova

Magnetické dělo, coilgun, magnetické pole, magnetické síly, metoda konečných prvků, elektromagnetický návrh

48 stran

22 obrázků

2 tabulky

6 stran příloh

Svoboda, P.

Design two stage magnetic coilgun

This master thesis deals with the electromagnetic gun. The first part describes the physical principles and basic design schemes of the electromagnetic gun. Particular attention is focused on an reluctance coilgun design, which is further described in following parts of the thesis. Second part deals with electromagnetic and construction design of two stage winding of the coilgun. The inductor parameters are solved using numerical finite element methods. Next a methodology of forces computation is suggested. The dependence of forces on position in coilgun barrel is calculated.

Key words

Coilgun, magnetic field, magnetic force, finite element method, electromagnetic design

48 pages

22 pictures

2 tables

6 pages of appendices

UWB, Faculty of Electrical Engineering, Plzeň 2nd May 2014

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 2.května.2014

Jméno, příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále děkuji všem, kteří napomáhali vzniku této práce.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| SEZNAM SYMBOLŮ | 9 |
| 0 ÚVOD..... | 10 |
| 1 HISTORICKÝ VÝVOJ MAGNETICKÉHO DĚLA..... | 11 |
| 1.1 VYUŽITÍ PRO AMERICKOU ARMÁDU | 11 |
| 1.2 VÝHODY MAGNETICKÉHO DĚLA OPROTI KONVENČNÍM ZBRANÍM | 12 |
| 2 FYZIKÁLNÍ PRINCIP MAGNETICKÉHO DĚLA..... | 13 |
| 2.1 KOLEJNICOVÉ DĚLO..... | 13 |
| 2.2 RELUKTANČNÍ MAGNETICKÉ DĚLO | 15 |
| 2.3 INDUKČNÍ MAGNETICKÉ DĚLO | 15 |
| 2.4 DISKOVÉ MAGNETICKÉ DĚLO..... | 21 |
| 2.5 VÍCESTUPŇOVÉ KONSTRUKCE..... | 22 |
| 3 PRAKTICKÁ ČÁST | 23 |
| 3.1 NÁVRH KONDENZÁTOROVÉ BATERIE | 26 |
| 3.2 CÍVKA PRVNÍHO STUPNĚ | 28 |
| 3.3 OVĚŘENÍ NÁVRHU POMOCÍ METODY KONEČNÝCH PRVKŮ..... | 31 |
| 3.4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO NÁVRHU | 34 |
| 3.5 URČENÍ VÝCHOZÍ POZICE PROJEKTILU | 35 |
| 4 NÁVRH DRUHÉHO STUPNĚ DĚLA | 38 |
| 4.1 SIMULACE DRUHÉHO STUPNĚ MAGNETICKÉHO DĚLA | 41 |
| 4.2 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ..... | 42 |
| 5 ZÁVĚR | 45 |
| POUŽITÁ LITERATURA..... | 46 |
| PŘÍLOHY..... | 48 |
| A. VÝPOČET MAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ MKP V PRVNÍM STUPNI | 1 |
| B. VÝPOČET MAGNETICKÉHO POLE POMOCÍ MKP V PRVNÍM STUPNI | 3 |
| C. VÝPOČET POLOHY A RYCHLOSTI PROJEKTILU DRUHÉHO STUPNĚ BEZ SÉRIOVÉHO REZISTORU | 5 |
| D. NÁČRT KONDENZÁTOROVÉ BATERIE PRO NAPÁJENÍ PRVNÍHO STUPNĚ DĚLA | 6 |

Seznam symbolů

| | |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Síla | F [N] |
| Hmotnost | m [kg] |
| zrychlení | a [m.s ⁻²] |
| Tlak | P [Pa] |
| Plocha, Průřez | S [m ²] |
| Poloměr obecně | r [m] |
| Úhlová frekvence | ω [rad.s ⁻¹] |
| Vektorový magnetický potenciál | \vec{A} [V.s.m ⁻¹] |
| Poloměr vodiče | r _v [mm] |
| Poloměr cívky | r _o [mm] |
| Délka cívky | h [mm] |
| Elektrický proud | I [A] |
| Magnetický tok | Φ [Wb] |
| Permeabilita vakua | μ_0 [H.m ⁻¹] |
| Relativní permeabilita | μ_r [-] |
| Proudová hustota | j [A.m ⁻²] |
| Rychlost | v [m.s ⁻¹] |
| Magnetická indukce | B [T] |
| Intenzita magnetického pole | H [A.m ⁻¹] |
| Energie | W [J] |
| Kapacita | C [F] |
| Elektrické napětí | U [V] |
| Indukčnost | L [H] |
| Elektrický odpor | R [Ω] |
| Rezistivita | ρ [Ω .m] |

0 Úvod

Z historie je známo, že velká část technického pokroku byla provedena díky vojenskému výzkumu. Příkladem může být celá řada technických zařízení, které dnes běžně využíváme, aniž bychom si uvědomovali, že na jejich počátku byl právě vojenský výzkum – například internet, mobilní telefony, GPS, lasery, a mnoho dalších dnes běžných zařízení a technologií. Jednou z těchto věcí je i tzv. magnetické dělo, tedy zařízení, pracující na principu přeměny elektromagnetické energie na energii kinetickou, s předpokládaným využitím ve vojenství. Výhodou je zejména tichý chod, kdy při použití není využit dosud běžný princip vystřelení projektilu pomocí výbuchu náplně střelného prachu uvnitř patrony. Magnetické dělo mění elektromagnetickou energii neslyšně, ačkoliv je zřejmé, že při překročení rychlosti zvuku zákonitě dojde k doprovodným zvukovým efektům.

Tato práce má za cíl popsat konstrukční principy magnetických děl a navrhnout funkční prototyp, zejména se zaměřením na cívku druhého stupně, která umožňuje rozšířit dosud provedený jednostupňový prototyp a výrazně tak zvýšit jeho výkon a efektivitu.

1 Historický vývoj magnetického děla

Elektromagnetické pušky a děla jsou ve „sci-fi“ téměř standardem. Stávající pokusy s uvedením takových zbraní do praxe zatím selhávaly a tak konvenční zbraně stále používají hoření různých směsí a náboj z hlavně vymetají přetlakem horkých plynů. Nové zbraně urychlují projektily z magnetického materiálu silným elektromagnetickým polem. Princip elektromagnetického děla je znám již z počátku minulého století. Průkopníkem této zbraně byl norský vědec Kristian Birkeland (1867 – 1917) [1]. I když norské dělo vystřelilo a projektil trefil cíl, došlo u jednoho z magnetů k explozi. Stalo se to při předvádění zbraně mecenášům a to dalšímu pokračování vývoje této zbraně neprospělo. Birkeland zaměřil svoje další působení na experimenty s plazmatem, výzkum polární záře, zemského magnetismu a na další oblasti. Nicméně patent na elektromagnetické dělo je Birkelandův.

Myšlenka a hlavní koncept se však velmi rychle rozšířily a začaly se vyrábět první experimentální zařízení tohoto typu. Například v roce 1933 už byl popsán zkonstruovaný prototyp automatického kulometu indukčního typu se sedmnácti stupni [2].

1.1 Využití pro Americkou armádu

Z předních světových mocností je ve využití magnetického děla nejaktivnější armáda USA, zejména námořnictvo. Hlavní výhodou pro námořnictvo je bezpečnost zbraně, která z principu nepotřebuje skladovat výbušniny, které představují hrozbu v případě zasažení lodě nepřítelem nebo v případě havárie. V případě amerického námořnictva se hovoří o tzv. kolejnicovém dělu (typ railgun) [18], [20]. Tato konstrukce k vystřelení projektilu využívá Lorentzovy síly, kterou vyvolává procházející elektrický proud přiváděný ke střele prostřednictvím kolejnic. Lorentzova síla je síla, kterou působí magnetické pole na pohybující se nabitě částice. Je úměrná rychlosti částice a indukci magnetického pole. Směr má kolmý ke směru pohybu částice a aplikovanému magnetickému poli. Tyto střely jsou v praxi urychlovány energií až 33 MJ [4].

Okamžitou dostupnost energie zajišťují kompenzované pulzní alternátory neboli kompulzátory. Jedná se o zdroje elektrické energie, které využívají kinetickou energii uskladněnou v rotujícím disku. Ta je uvolňována ve formě energie elektrické. Zařízení má velmi malou indukčnost, což dovoluje dodávat energii v mocných a zároveň velmi

krátkých pulzech. Konvenční kondenzátory nejsou k tomuto účelu vhodné, jelikož je nezbytná okamžitá dostupnost energie. Nespornou výhodou této zbraně je velká vzdálenost dostřelu, teoreticky až 110 námořních mil (přibližně 200km).

Pro pozemní síly je důležitá vysoká rychlost vystřeleného projektilu, která umožňuje efektivnější obranu proti leteckým a raketovým útokům. Dnes vyráběné zbraně dosahují rychlosti projektilu až 8 Mach, navíc tato rychlost není konečná [5].

1.2 Výhody magnetického děla oproti konvenčním zbraním

Nejvýznamnější výhodou magnetických oproti konvenčním zbraním založeným na termochemické reakci je možnost dosahovat vyšší rychlosti projektilu. Principem tradičních zbraní založených na termochemickém principu je hoření střelného prachu, který je umístěn v nábojnici. Hořením vzniká přetlak spalin uvnitř nábojnice, oddělí se projektil a ten je tlakem vypuzen z hlavně zbraně. Zde je patrná hlavní nevýhoda tohoto principu. Síla akcelerující projektil dle druhého Newtonova zákona je dána tlakem plynů vznikajících hořením a průřezem projektilu.

$$F_{\text{projektilu}} = m \cdot a, \quad (1)$$

kde: $F_{\text{projektilu}}$ je síla urychlující projektil,
 m je hmotnost projektilu,
 a je zrychlení.

$$F_{\text{projektilu}} = \frac{P}{S}, \quad (2)$$

kde: P je tlak spalin vzniklých hořením střelného prachu,
 S je plocha průřezu projektilu.

Pro dosažení vysoké rychlosti projektilu je tedy nezbytné využít projektil s malým průřezem, což není výhodné, protože klesá objem prachové náplně nábojnice, tedy klesá i tlak plynů při hoření. Tyto požadavky jdou proti sobě.

Naproti tomu u elektromagnetického děla je možné využít sílu působící na laterální plochu projektilu. To umožňuje použít projektily s vysokým poměrem energie a průřezu a dosahovat tak vyšších rychlostí projektilu.

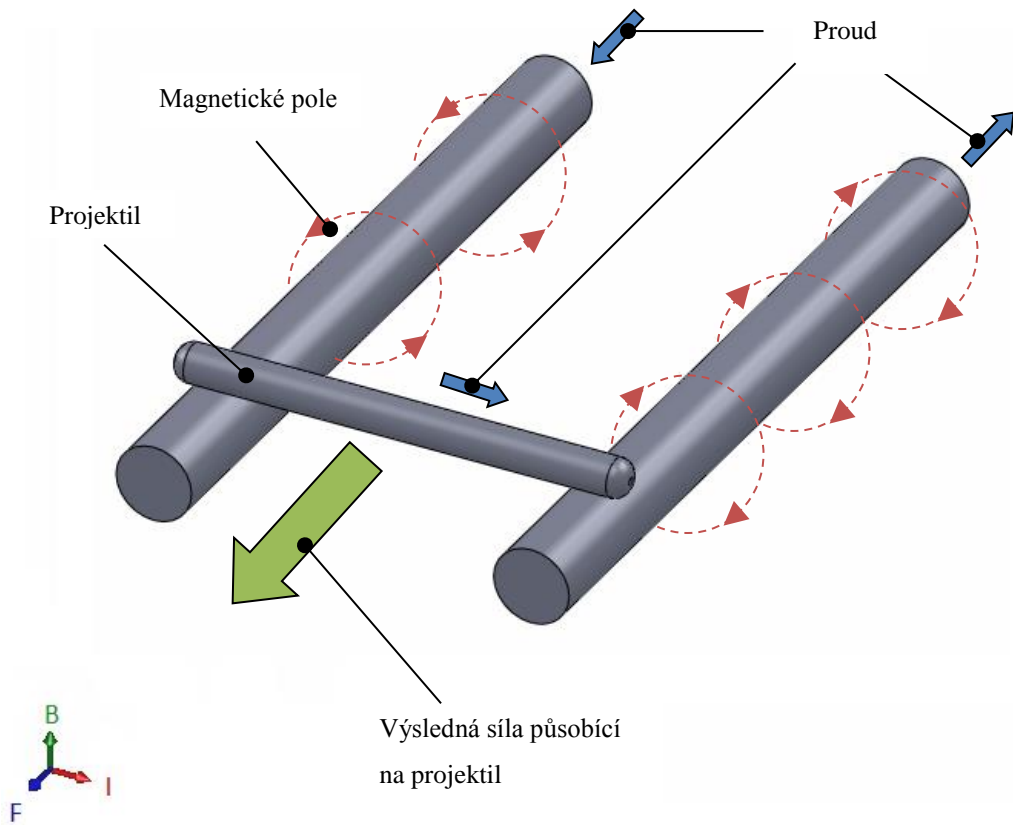
2 Fyzikální princip magnetického děla

Během historického vývoje byla sestrojena řada konstrukcí magnetických děl, které se do jisté míry liší i fyzikálním principem. Společným znakem u všech typů je přeměna elektromagnetické energie na energii kinetickou. V následujících kapitolách jsou podrobně rozebrány jednotlivé typy magnetických děl a jejich fyzikální principy.

2.1 Kolejnicové dělo

Kolejnicové dělo, neboli kolejovka (v anglické literatuře pod pojmem railgun [7], [8], [9], [10]) je elektromagnetické dělo využívající dvě koleje a Lorentzovu sílu působící na projektil. Patent na kolejnicové dělo pochází z roku 1919 [6], avšak dodnes je tento princip využíván v původní podobě.

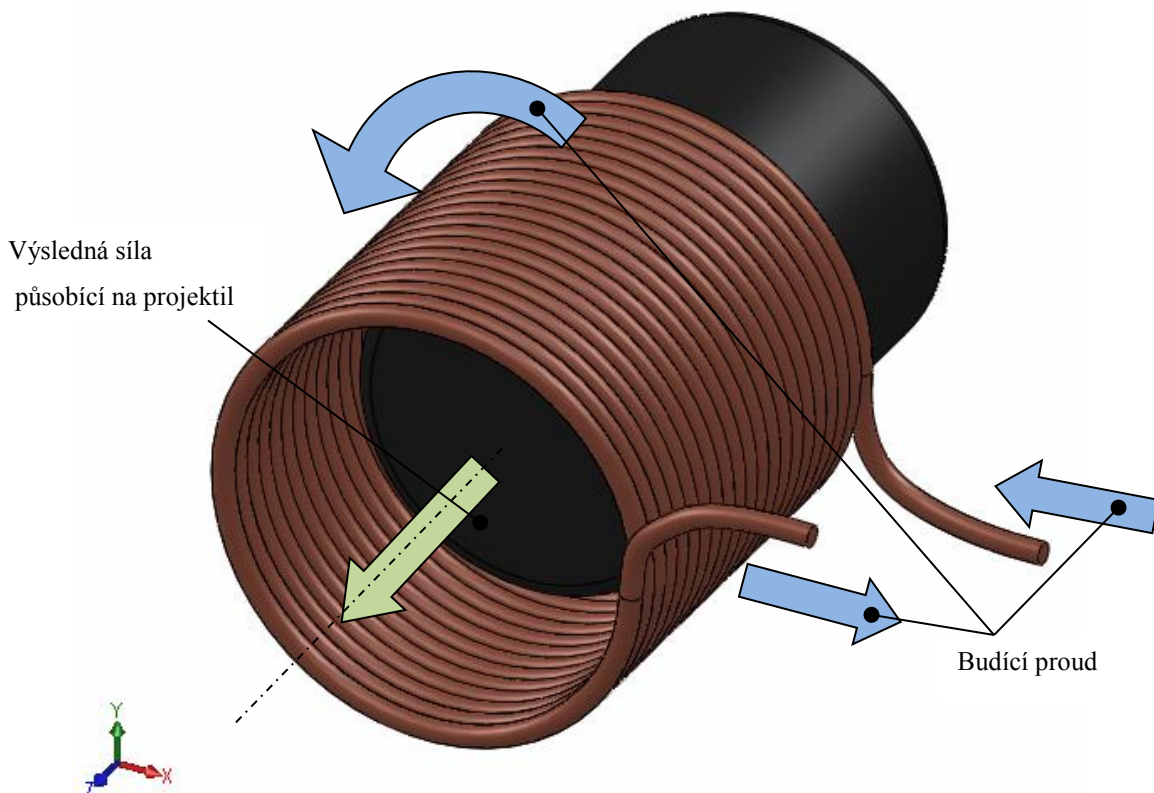
Konstrukce je jednoduchá, základem jsou dvě kolejnice, které jsou umístěny rovnoběžně v definované vzdálenosti. Mezi tyto dvě kolejnice je připojen zdroj napětí. Projektil je vložen mezi tyto kolejnice tak, aby s nimi byl vodivě spojen. Principiálně tedy zkratuje kolejnice a uzavírá tak elektrický obvod. Proud procházející projektillem se nachází v magnetickém poli kolejnic, tedy působí na něj Lorentzova síla ve směru rovnoběžném s kolejnicemi, která jej urychluje. Schematicky je tento princip znázorněn na obr. 1.



obr. 1: princip kolejnicového děla

2.2 Reluktanční magnetické dělo

Reluktanční magnetické dělo (v angl. literatuře popisováno pod názvem reluctance coilgun, nebo reluctance launcher [13], [14]) je v principu cívka, která vystřeluje feromagnetické projektily pomocí správného sepnutí a časování proudu procházejícího cívkou. Principiální konstrukční schéma je zobrazeno na obr. 2.



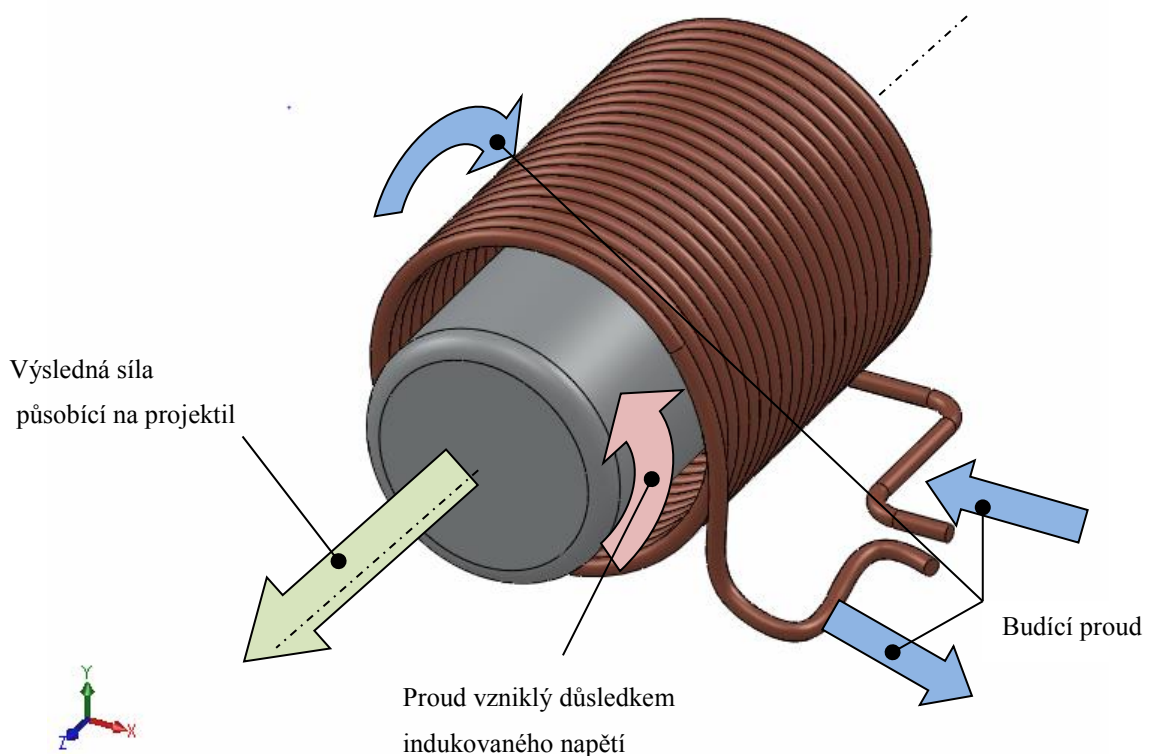
obr. 2: princip reluktančního magnetického děla

Základem je cívka typu solenoid, která je napájena proudovým impulsem. Projektil se pohybuje axiálně uvnitř cívky. Výchozí poloha projektilu je „za cívkou“, vlivem magnetického pole vzniklého v cívce je tento projektil vtahován do cívky tak, aby byl minimální magnetický odpor (reluktance). Z principu je tedy zřejmý požadavek na feromagnetický materiál, příp. je možné použít permanentní magnet.

2.3 Indukční magnetické dělo

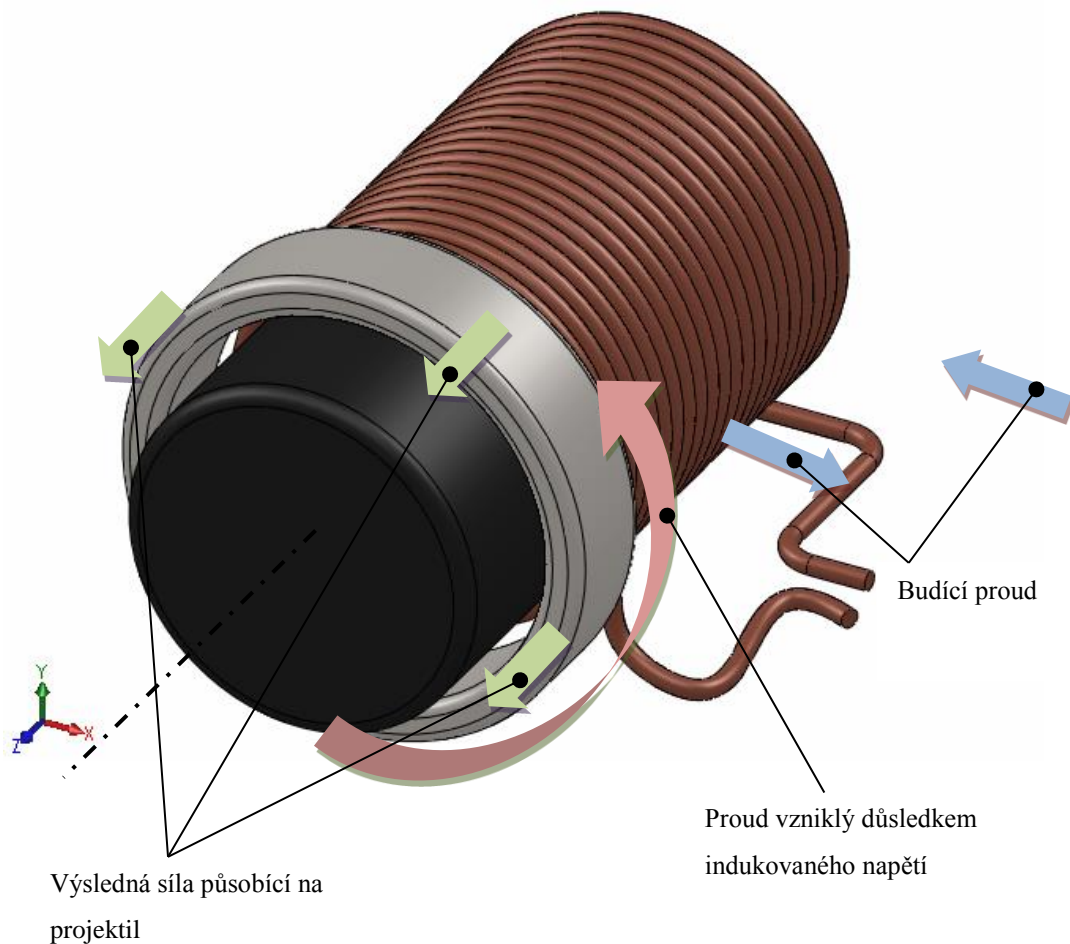
Indukční magnetické dělo (v angl. literatuře induction coilgun, tubular induction launcher) je principiálně konstrukčně shodné s reluktančním dělem. Rozdílem je

materiál projektilu, který v tomto případě není feromagnetický, ale paramagnetický (například hliník) nebo diamagnetický (měď). Výchozí pozice projektilu není „za cívkou“, ale před ní, resp. před jejím středem – dle obr. 3 v kladném směru osy Z. Průchodem proudu cívkou se vytváří magnetické pole, které indukuje napětí uvnitř projektilu. Indukované napětí způsobuje vznik vířivých proudů a tedy tvorbu magnetického pole, které působí proti poli budícímu. Interakcí těchto dvou magnetických polí je projektil odpuzován od cívky v jejím axiálním směru (viz obr. 3).



obr. 3: princip indukčního magnetického děla

Vlastnosti projektilu jsou v tomto případě velmi důležité a silně ovlivňují výsledné chování popisovaného zařízení. Vhodnou konstrukcí projektilu je možné vlastnosti do jisté míry ovlivnit. Toho využívá Thompsonovo dělo, v angl. literatuře Thompson coilgun. V literatuře může být uvedeno i pod pojmem Theta dělo (theta gun) [3]. Principiálně se jedná stále o indukční dělo, avšak projektil je prstencový (dutý válec). Obvykle se schematicky znázorňuje s vodícím feromagnetickým jádrem (viz obr. 4).



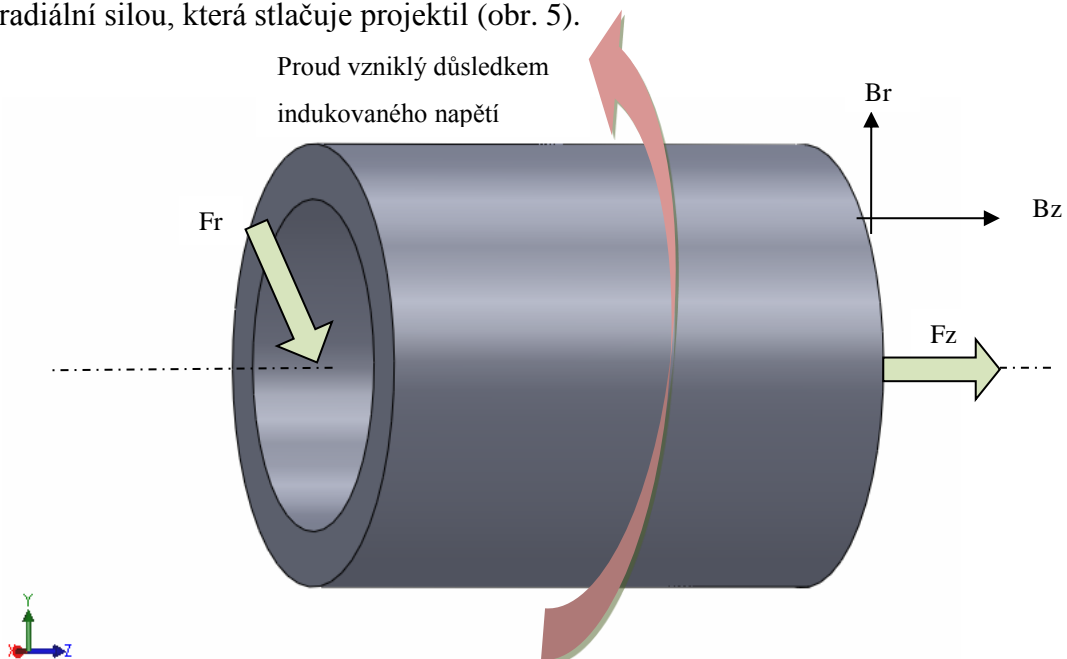
obr. 4: Thompsonova konstrukce elektromagnetického děla

Jádru vede proměnný magnetický tok, tedy mělo by být konstruováno jako listěné. Možné je složit jádro z plechů nebo lépe ze svazků tyčí, případně ze slinutých materiálů (např. ferity). To je nezbytné pro minimalizaci vířivých proudů v jádře a tudíž umožnění rychlé změny směru magnetického toku.

Z fyzikální podstaty je zřejmé, že pro vybuzení dostatečného toku v jádře je nezbytné výrazně vyšší napětí oproti konvenčnímu indukčnímu dělu. S ohledem na dostupné zdroje energie (kapacitory) je tento typ méně vhodný pro laboratorní konstrukce vzhledem k riziku úrazu elektrickým proudem.

Naopak výhodným aspektem této konstrukce je možnost dosahovat vyšších rychlostí projektilu. Vlivem vysoké energie ovšem dochází k prudkému ohřevu děla i projektilu, který může velmi rychle dosáhnout teploty tání pro daný materiál.

Pokud je projektil prstencový, vířivé proudy se uzavírají po jeho obvodě a působí radiální silou, která stlačuje projektil (obr. 5).



obr. 5: Síly působící na dutý válcový projektil [3]

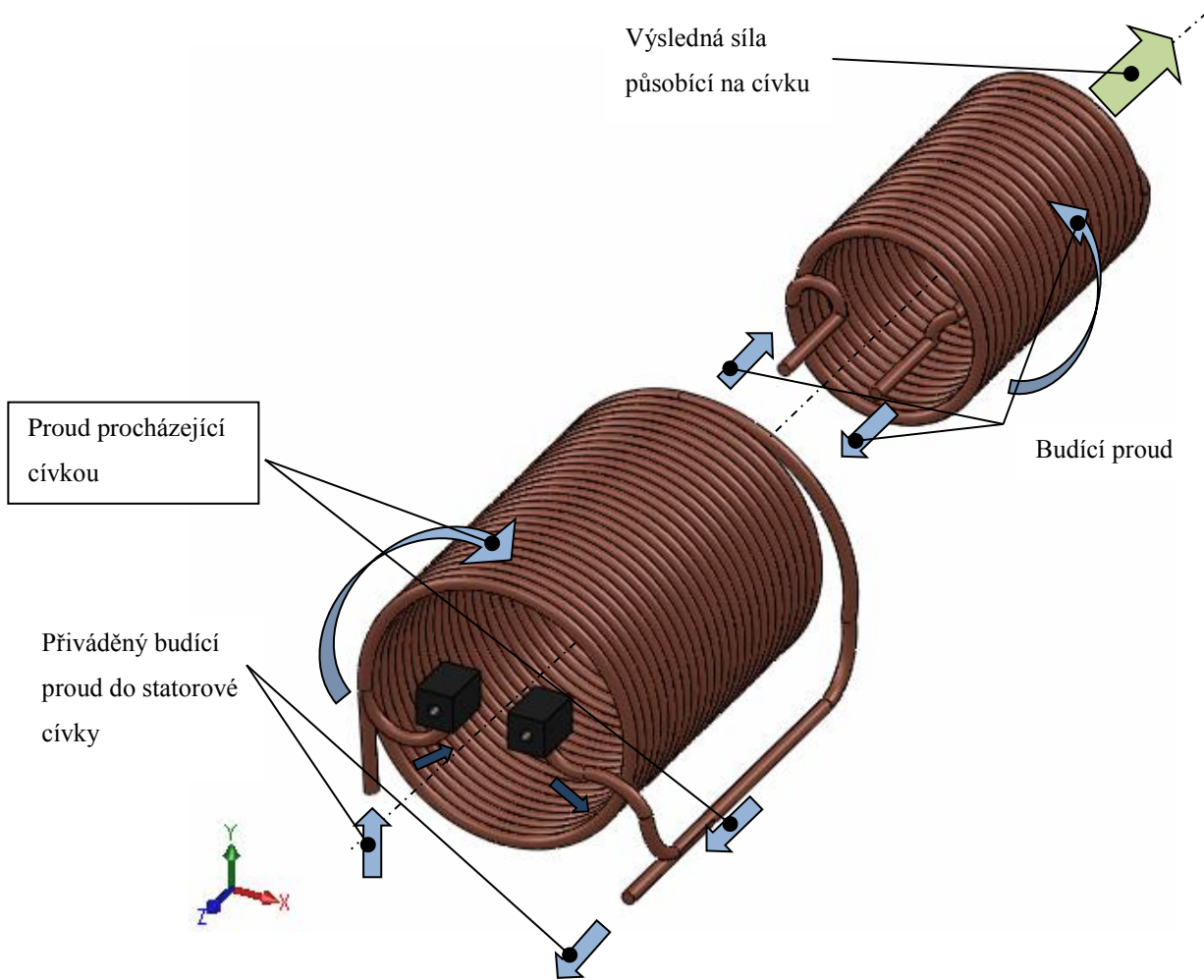
Dále na projektil působí tečná síla, která způsobuje axiální rotaci projektilu. Ta je nezbytná pro stabilní let po opuštění hlavně děla a k zajištění vhodné balistické křivky. Tečná síla způsobující rotaci projektilu je dána vztahem (3) [3].

$$F_{spin} = m \cdot r \cdot \omega^2, \quad (3)$$

kde: F_{spin} je tečná síla způsobující rotaci projektilu,
 m je hmotnost projektilu
 r je střední poloměr průřezu projektilu
 ω je úhlová frekvence

Další možností je využít cívku jako projektil [22]. Tato konstrukce se označuje jako šroubovicové dělo (v angl. literatuře helical launcher). První cívka (na obr. 6 vnější cívka) je statická, její vývody jsou vyvedeny na kartáče. Vnitřní cívka slouží jako projektil. Vnitřní cívka je napájena proudem přivedeným přes kartáče. V této konstrukci je nutné zachovat opačný chod obou cívek. Pokud je statická cívka pravotočivá, pak musí být cívka projektilu levotočivá, aby výslednice magnetického pole působily proti sobě.

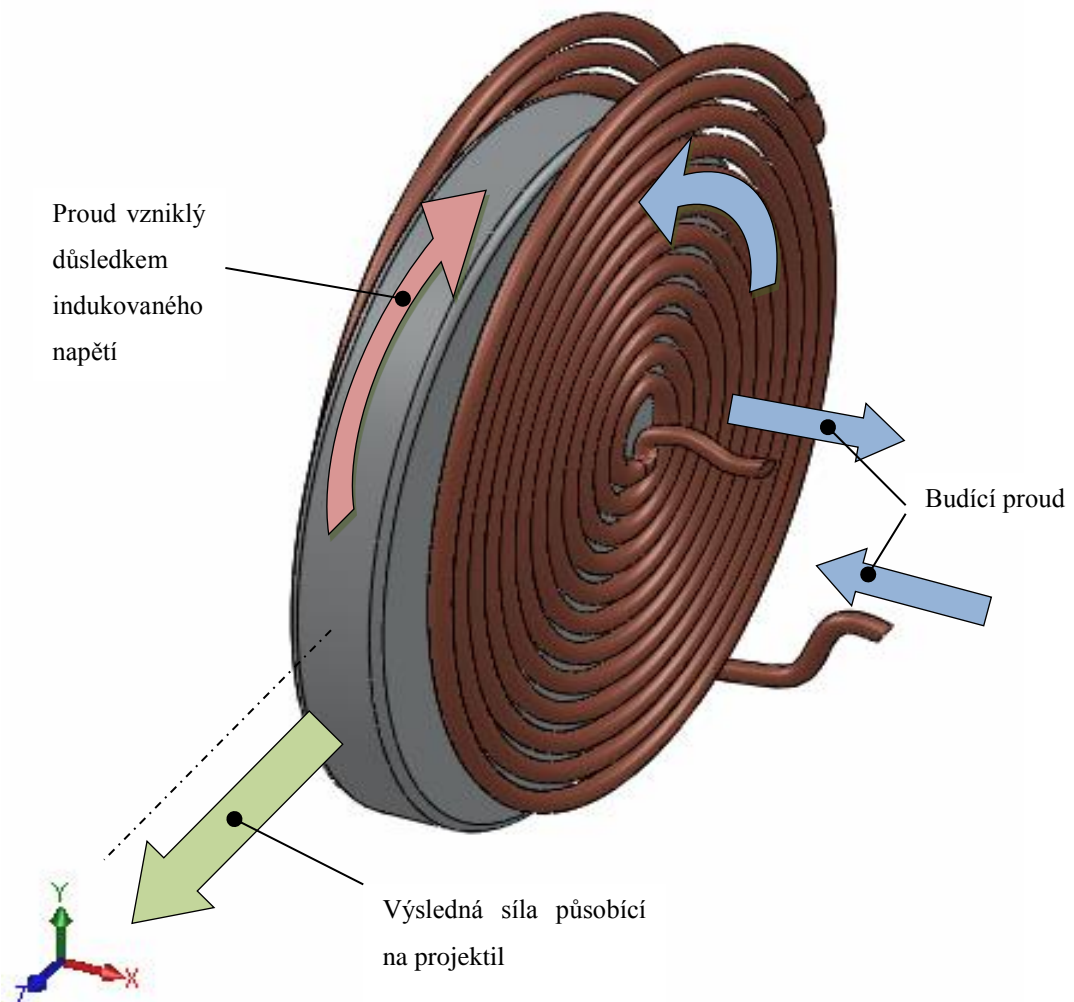




obr. 6: princip šroubovicového magnetického děla

2.4 Diskové magnetické dělo

V literatuře je označeno též jako talířové, nebo přepojovací magnetické dělo (disc launcher, plate launcher, reconnection launcher [11], [12]). Jedná se opět o princip indukčního děla, avšak s dvojím deskovým vinutím. Cívky jsou zapojeny tak, aby jejich toky působily proti sobě. Pokud je projektil uprostřed, nepůsobí na něj žádná síla. Pokud se ovšem vychýlí, cívky se jej snaží vypudit ze svého středu [15]. Tato konstrukce se vyznačuje dvěma komplikacemi. První je trativod pro projektil, aby letěl v požadovaném směru, a druhou komplikací je nutnost stažení a zpevnění sestavy tak, aby se cívky průchodem proudem nevzdálily od sebe, jelikož jejich vzájemné silové působení je značné [16].

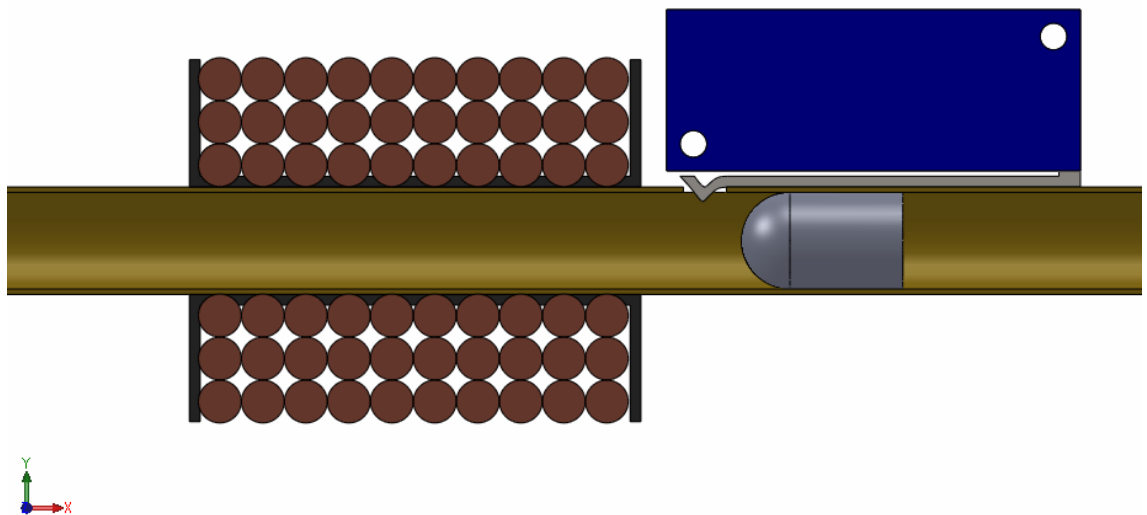


obr. 7: princip diskového indukčního magnetického děla

2.5 Vícestupňové konstrukce

Fyzikální princip působení síly na projektil elektromagnetického děla umožňuje na rozdíl od konvenčních zbraní sériové řazení více stupňů, které vede ke zvýšení výkonu děla. V případě indukčního děla je ovšem nutné systém vybavit vhodným časováním a spínat proud v jednotlivých cívkách ve vhodných časových intervalech. Právě spínání je z hlediska výsledné účinnosti zbraně klíčové.

První pokusy o časování sepnutí jednotlivých cívek (stupňů) magnetického děla obsahovaly jazýčkové spínače umístěné na vhodném místě v hlavni. Princip je naznačen na obr. 8. Projektil při kontaktu se spínačem stlačil jazýček a sepnul tím proud v daném stupni děla.



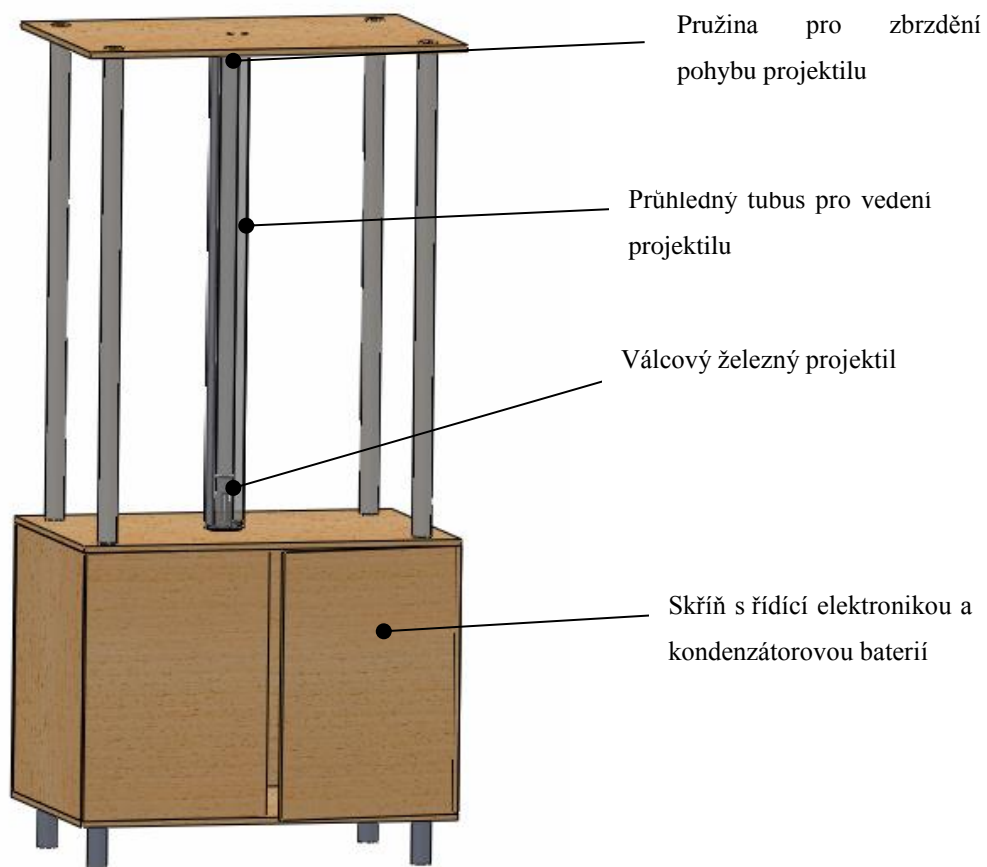
obr. 8: mechanismus kontaktního spínání pro použití ve vícestupňových konstrukcích magnetických děl

Propracovanější systémy využívají polovodičové spínače, které jsou vhodně řízeny, aby byl plně využit potenciál jednotlivých stupňů magnetického děla. Časování sepnutí jednotlivých stupňů je možné optimalizovat pro dané charakteristiky projektilu a spočítat tak jednotlivé časy sepnutí pro optimální výkon. Jednou z možností je vytvoření optických závor uvnitř hlavňe, které po detekování projektilu generují spínací impuls pro patřičnou cívku.

3 Praktická část

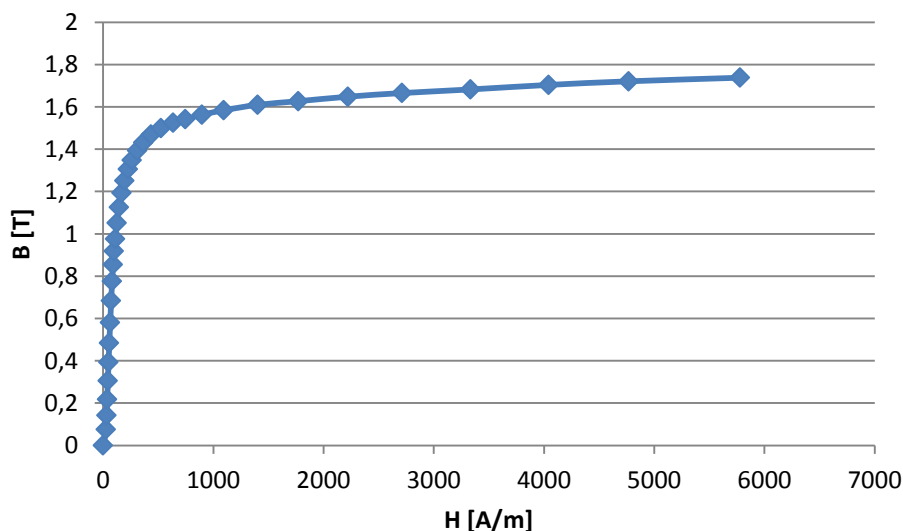
Tato diplomová práce navazuje na předchozí činnosti vykonávané na Katedře elektromechaniky a výkonové elektroniky. V rámci spolupráce s Techmania Science Centrem byl na katedře připraven exponát jednostupňového magnetického děla za účelem popularizace elektrotechniky a demonstrace elektromechanických účinků magnetického pole.

Tento exponát byl navržen tak, aby byl bezpečný a nemohl ohrozit zdraví návštěvníků expozice. Je tedy zřejmé, že nebylo účelem maximalizovat účinnost ani dosahovat vysokých úst'ových rychlostí projektilu. Požadavkem bylo vystřelit projektil do přibližně metrové výšky a následně jej zbrzdit pro opakované použití. Dráha projektilu byla limitována průhlednou rourou, ve které se pohyboval vertikálně a působením tíhové síly dopadl zpět do výchozí pozice. Schematické znázornění exponátu je na obr. 9.



obr. 9: exponát jednostupňového elektromagnetického reluktančního děla pro Techmania Science Center

Jedná se o elektromagnetické dělo reluktančního typu (viz kap. 2.2). Projektil je tedy železný, válcový o průměru 20 mm a výšce 40 mm, vyrobený z běžné nelegované jakostní konstrukční oceli (např. S 235JR). Je možné použít libovolnou běžnou konstrukční ocel, jelikož nejvýznamnější charakteristikou pro chování výsledného děla je její magnetizační charakteristika, která je pro tuto třídu ocelí velmi podobná a drobné nuance způsobené rozdílným materiálovým složením se s ohledem na přesnost výpočtu neprojeví.



obr. 10: Křivka prvotní magnetizace konstrukční oceli použitá pro elektromagnetický výpočet děla

Výchozí pozice projektilu je pod cívku. Průchodem proudu v cívce dochází k vybuzení elektromagnetického pole, které je přítomností projektilu v okolí cívky narušováno. Tím že je projektil feromagnetický je nutné řešit pole numerickými metodami s respektováním výše uvedené magnetizační charakteristiky oceli.

Magnetické pole cívky bylo řešeno pomocí metody konečných prvků v programu FEMM. Problém byl definován jako magnetostatický, osově symetrický. Model obsahoval pouze cívku a projektil, ostatní vlivy nebyly uvažovány. V modelu se vyskytuje pouze jedna okrajová podmínka na vnější hranici řešené oblasti a sice Dirichletova:

$$\vec{A} = 0, \quad (4)$$

kde: \vec{A} je vektorový magnetický potenciál,

která vyjadřuje, že přes hranici oblasti neteče žádný magnetický tok. Tato podmínka je principiálně i na ose symetrie.

Řešení magnetického pole spočívá v numerickém řešení rovnice (5):

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} \vec{A} \right) = \vec{j}, \quad (5)$$

kde: μ je permeabilita materiálu daná vztahem (6),

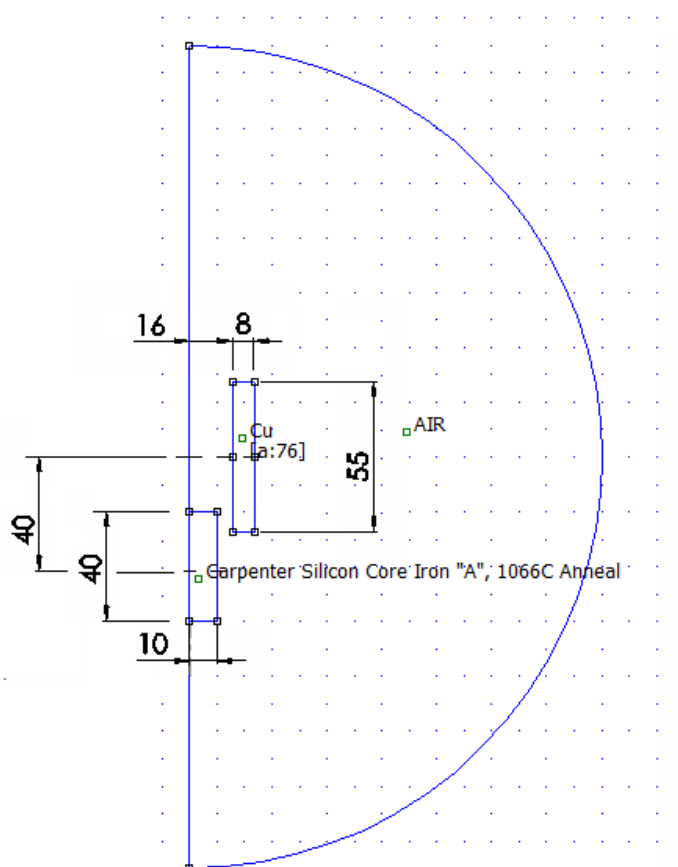
\vec{j} je proudová hustota

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r, \quad (6)$$

kde: μ_0 je permeabilita vakua,

μ_r je relativní permeabilita.

Geometrie řešené oblasti je zobrazena na obr. 11.



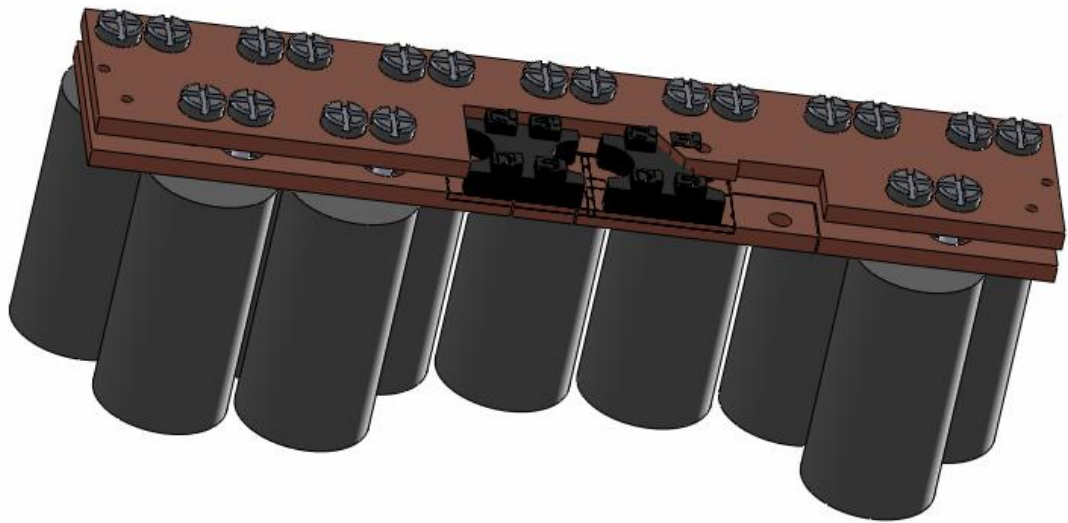
obr. 11: Geometrie řešené oblasti pro výpočet prvního stupně děla

Fyzikální princip funkce vychází ze silových účinků magnetického pole. Feromagnetické předměty jsou přitahovány do jádra vinutí, které je protékáno proudem. Síla působící na projektil je tedy úměrná proudu protékajícímu vinutím. Z tohoto důvodu bylo pro napájení cívky využito kondenzátorové baterie, která umožňuje rychlé vybití akumulované energie přes cívku magnetického děla.

3.1 Návrh kondenzátorové baterie

Návrh kondenzátorové baterie vychází z dostupných součástek. K dispozici bylo 10 kondenzátorů o kapacitě 0,01F. Paralelním spojením bylo dosaženo výsledné kapacity kondenzátorové baterie 0,1F. Původně byly uvažovány tři varianty konstrukčního provedení. První (obr. 12a)) spočívá v umístění kondenzátorů na kuprexitovou desku a vyvedení vývodů pomocí měděných pasů na polovodičový spínač. Druhá varianta (obr. 12 b)) uvažovala využití měděných desek, které by byly vzájemně odizolovány vzduchovou mezerou. Výhodou by bylo možné rozšíření o další kondenzátory a tím zvýšení výkonu děla. Třetí varianta (obr. 12 c)) byla skutečně realizována. Konstrukce spočívá ve využití dvou rovnoběžných měděných pasů dostatečného průřezu, ke kterým jsou přišroubovány jednotlivé svorky kondenzátorů. Jeden pas je připojen k záporné a druhý ke kladné polaritě kondenzátorů. Ve středu pasových vodičů je umístěna dvojice spínacích transistorů opatřených zpětnými diodami pro omezení přepětí. Použité spínací tranzistory byly typu MOSFET, výrobce IXYS, typ IXFN 340N07.





c)

obr. 12: varianty konstrukčního uspořádání kondenzátorové baterie

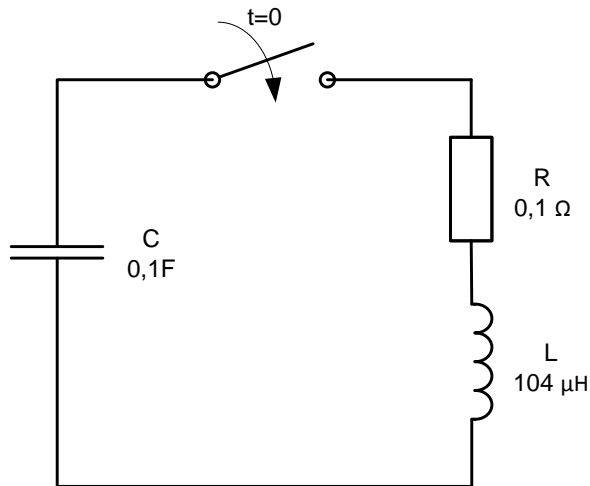
Použité měděné pasy měly průřez 5x50mm. Maximální proudová hustota ve středu pasového vodiče je 1,44 A/mm². Ačkoliv by krátkodobý proudový impuls bylo možné vést vodičem menšího průřezu, vlivem relativně vysokého odporu by zbytečně vznikl úbytek napětí na vedení a omezoval tak amplitudu proudového impulsu.

Kondenzátorová baterie je nabíjena na 35 V pomocí stabilizovaného laboratorního zdroje. Celková energie akumulovaná v kondenzátorové baterii je 61,25 J dle vztahu:

$$W_{el} = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2, \quad (7)$$

3.2 Cívka prvního stupně

Návrh cívky vychází z řešení přechodového děje druhého řádu. Zdrojem je kapacitor s parametry uvedenými v předcházející kapitole 3.1. Kapacitor je na počátku přechodného děje nabit na napětí 35 V. V čase $t = 0$ dojde k sepnutí spínače a energie akumulovaná v kapacitoru se vybijí přes zátěž typu RL. Obvodové schéma je na obr. 13.



obr. 13: obvod prvního stupně magnetického děla

Obecné teoretické odvození vztahu pro proud procházející cívku (viz obvod na obr. 13) je uvedeno v rovnicích (8) - (14) [17]. Ve skutečnosti byla cívka opatřena zpětnou diodou, která omezuje případné kmitání, pokud by přechodný děj byl kmitavý.

$$u_R + u_L - u_C = 0 \quad (8)$$

$$R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} - u_C = 0 \quad (9)$$

$$\frac{du_C}{dt} = \frac{i}{C} \quad (10)$$

$$L \cdot \frac{d^2i}{dt^2} + R \cdot \frac{di}{dt} - \frac{i}{C} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{d^2i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} - \frac{i}{L \cdot C} = 0 \quad (12)$$

$$\lambda^2 + \frac{R}{L} \cdot \lambda - \frac{1}{L \cdot C} = 0 \quad (13)$$

$$\lambda_{1,2} = -\frac{R}{L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{2L} + \frac{1}{L \cdot C}} = -\frac{R}{L} \pm \sqrt{D} = -\beta \pm \alpha \quad (14)$$

Požadavkem je aperiodický průběh přechodného děje. V ideálním případě by byl obvod na mezi aperiodicity, tedy přechodný děj by byl nejkratší a proudový impuls by ustal v nejkratším čase. Pro tento děj platí následující vztah:

$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC} \quad (15)$$

Kořeny charakteristického polynomu (13) jsou stejné, reálné a záporné.

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -\beta \quad (16)$$

Obecné řešení diferenciální rovnice (12) je ve tvaru:

$$i(t) = K_1 \cdot e^{-\beta \cdot t} + K_2 \cdot e^{-\beta \cdot t} \quad (17)$$

V tomto okamžiku je úkolem určit indukčnost cívky potřebnou pro zajištění aperiodického přechodného děje. Lze tedy vyjít ze vztahu (15) a vyjádřit indukčnost ve tvaru:

$$L = \frac{C \cdot R^2}{4} \quad (18)$$

Dále je nutno uvažovat odpor přívodních vodičů, odpor na kontaktech a další parazitní jevy přispívající ke zvýšení odporu. Jelikož je přijatelnější, aby byl přechodný děj aperiodický, než kmitavý, je možné volit nižší indukčnost než je ideální pro děj na mezi aperiodicity. Odpor všech prvků sériově řazených v obvodu (odpor vinutí, spínače a odpor přívodů) byl odhadem určen na min. $0,1 \Omega$. Z toho vyplývá ze vztahu (18) požadavek na indukčnost nejvýše $250 \mu\text{H}$. Jelikož v této fázi bylo účelem demonstrovat účinky elektromagnetického pole, nikoliv maximalizovat účinnost zbraně, byla raději zvolena nižší hodnota, a sice přibližně $100 \mu\text{H}$.

Uvažujeme-li cívku jako ideální solenoid, pak pro její indukčnost platí:

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I}, \quad (19)$$

kde N je počet závitů, ϕ je magnetický tok procházející středem solenoidu a I je procházející proud.

Uvažujeme-li magnetické pole uvnitř cívky homogenní, lze předpokládat, že indukční čáry jsou rovnoběžné s normálou plochy průřezu solenoidu, a tok cívku lze zjednodušit na tvar [23]:

$$\Phi = B \cdot S, \quad (20)$$

kde B je magnetická indukce uvnitř solenoidu a S je plocha průřezu solenoidu, kterou lze vyjádřit jako obsah kruhu:

$$S = \pi \cdot R^2, \quad (21)$$

Pro intenzitu magnetického pole uvnitř cívky pak platí:

$$H = N \cdot I, \quad (22)$$

a vztah mezi idukcí a intenzitou magnetického pole uvnitř cívky lze zjednodušeně psát jako [23]:

$$B = \mu_0 \cdot H, \quad (23)$$

Po dosazení vztahů (20), (21), (22) a (23) do vztahu (19) lze psát pro indukčnost solenoidu [24]:

$$L = \mu_0 \cdot \pi \cdot N^2 \cdot R^2, \quad (24)$$

Jak již bylo zmíněno, pro exponát je vhodné navrhnout cívku s indukčností přibližně 100 μH . Průměr projektilu je 20mm, tedy vnitřní průměr solenoidu musí být větší. Dále je nutno respektovat podpůrné konstrukce, zejména kostru cívky. S tímto ohledem je možno volit poloměr cívky R . Potřebný počet závitů N lze pak dopočítat vytknutím ze vztahu (24) [24]:

$$N = \sqrt{\frac{L}{\mu_0 \cdot \pi \cdot R^2}}, \quad (25)$$

S ohledem na dynamické síly a rozměry solenoidu byla cívka v reálném uspořádání provedena jako čtyřvrstvá šroubovice. Vnitřní poloměr cívky je 16mm, v každé vrstvě je 19 závitů, celkem 76 a výška cívky je 55 mm.

Indukčnost cívky byla vypočítána pomocí metody konečných prvků v programu FEMM. Vypočtená hodnota 104 μH je s ohledem na přesnost obou výpočetních metod přijatelná. Odpor cívky byl dopočítán pomocí vztahu [19]:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} = N \cdot \rho \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot r_c}{\pi \cdot r_v^2}, \quad (26)$$

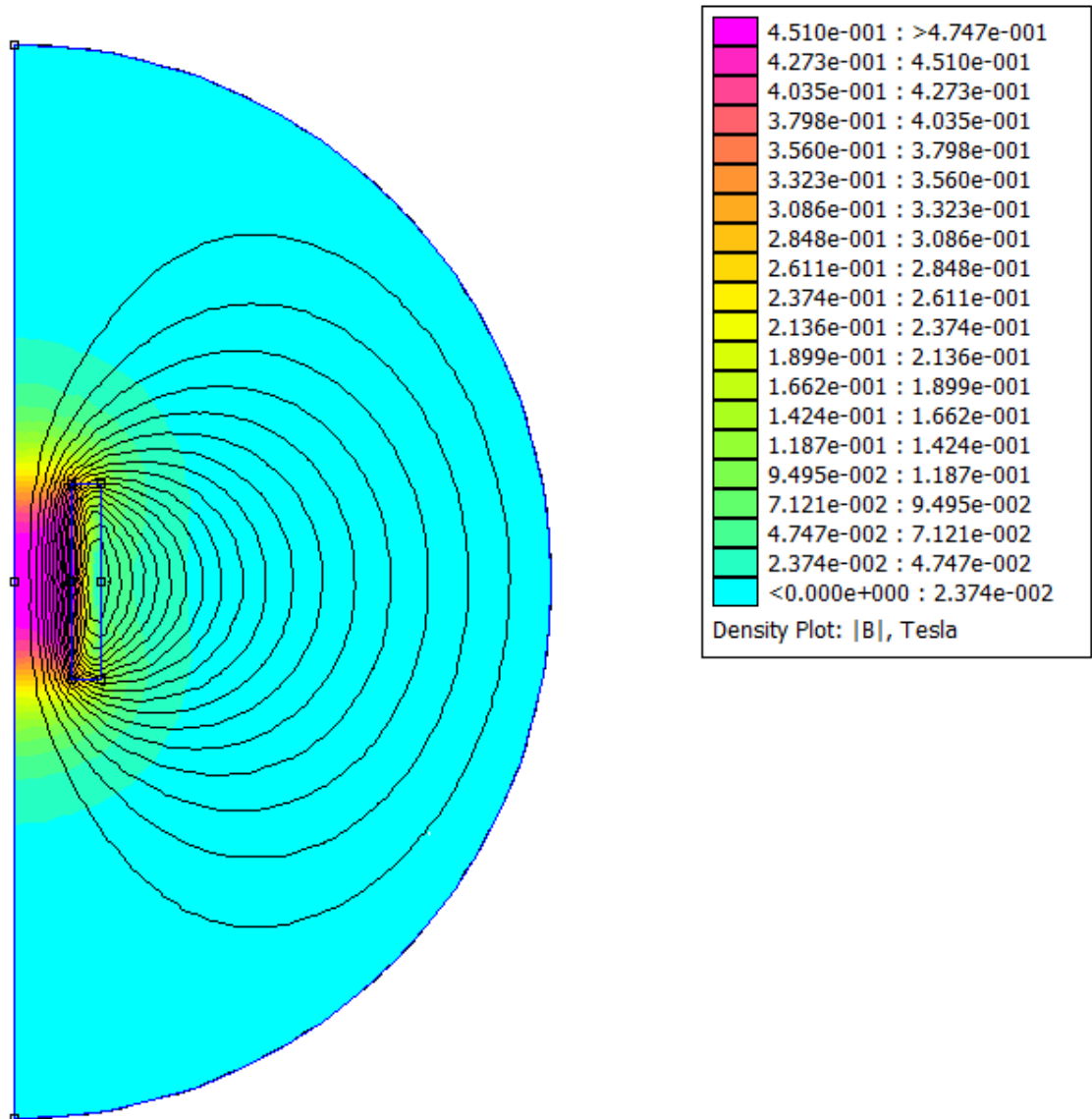
kde ρ je rezistivita mědi, l je délka vodiče, S je průřez vodiče, r_c je střední poloměr vinutí a r_v je poloměr vodiče.

Vypočtená hodnota odporu cívky je $5 \cdot 10^{-5} \Omega$. Při průchodu maximálního proudu 350 A pak vychází proudová hustota 111 A/mm^2 . Ačkoliv je proudový impuls krátkodobý, lze předpokládat oteplení vodiče a tím i zvýšení odporu cívky.

3.3 Ověření návrhu pomocí metody konečných prvků

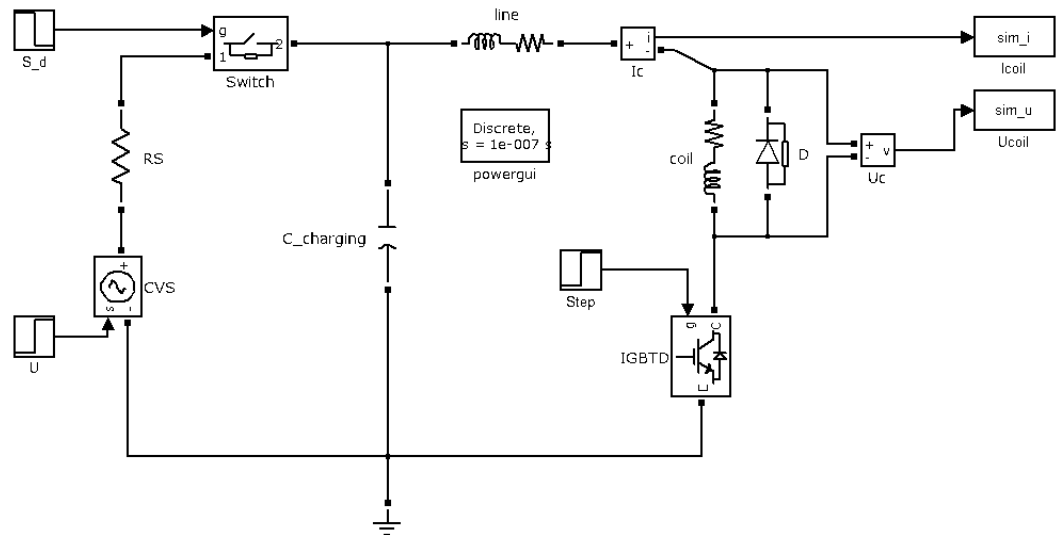
Navržené parametry prvků obvodu byly následně ověřeny pomocí simulacemi v programech FEMM a Simulink. Cívka byla modelována pomocí programu FEMM,

kromě geometrie byly zadány ještě hodnoty proudu a počet závitů. Cívka budí v amplitudě proudu magnetické pole o indukci až 0,0065 T (viz obr. 14).



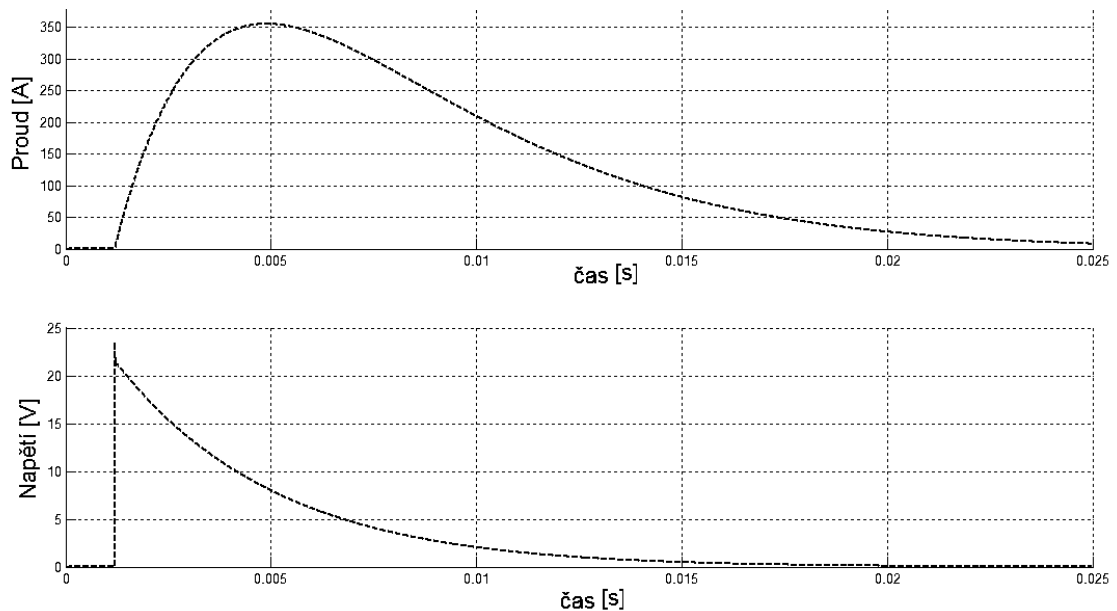
obr. 14: magnetická indukce vybuzená proudem procházejícím solenoidem

Obvodové schéma bylo zadáno do programu Simulink a následně řešeny obvodové poměry. Rozdílem oproti obvodu na obr. 13 je zpětná dioda, která omezuje případné kmitání, pokud by přechodný děj nebyl aperiodický, ale kmitavý.



obr. 15: obvodové schéma v simulačním programu Simulink

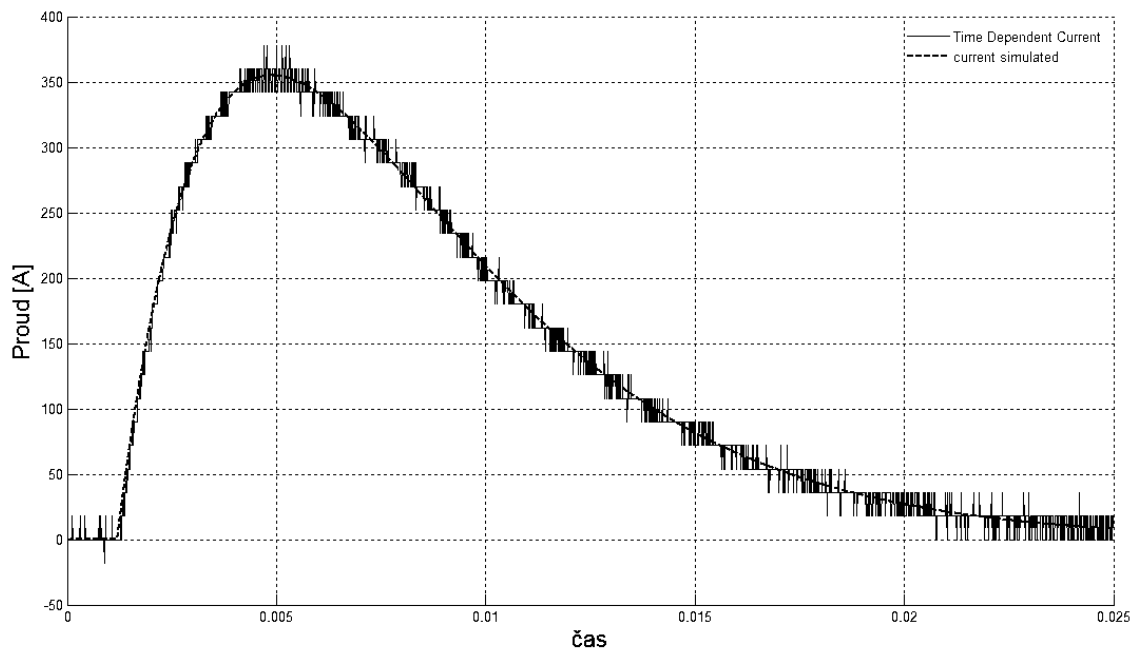
Po zadání výše uvedených parametrů byl simulačním program vypočítán průběh napětí a proudu na cívce prvního stupně (viz obr. 16).



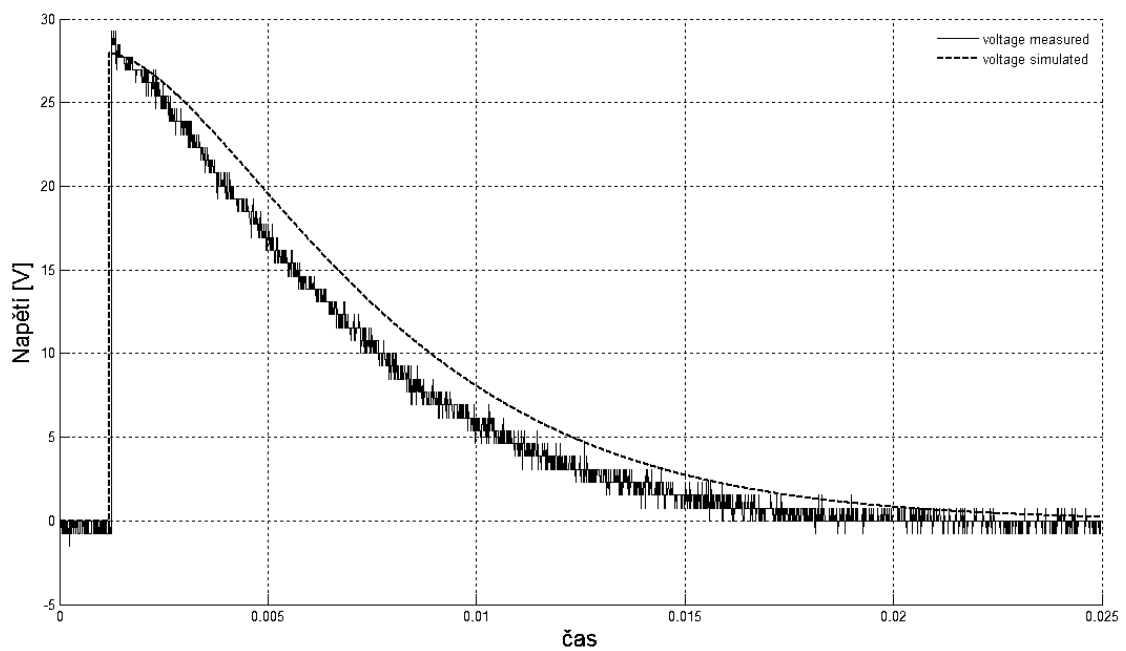
obr. 16: průběh proudu a napětí na cívce vypočítaného pomocí simulačního modulu Simulink

3.4 Experimentální ověření elektromagnetického návrhu

Za účelem ověření elektromagnetického návrhu bylo provedeno měření proudu a napětí na prvním stupni cívky magnetického děla. Proud procházející cívkou je na obr. 17 a napětí na vinutí na obr. 18.



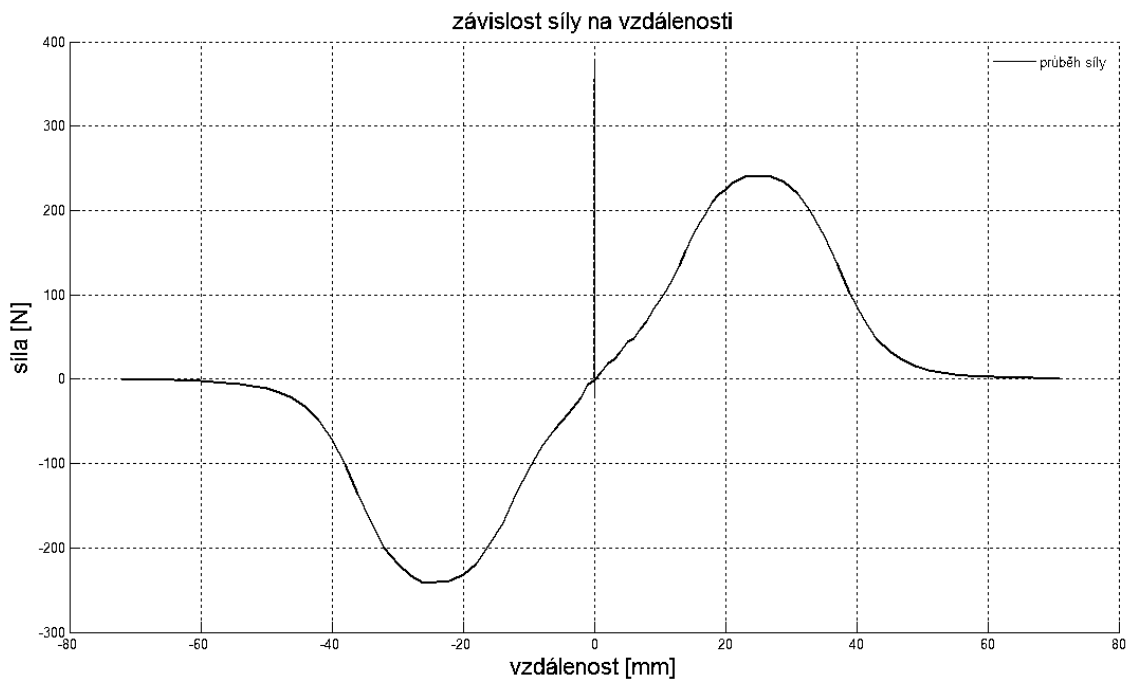
obr. 17: změřený a simulovaný průběh proudu na cívce prvního stupně



obr. 18: změřený a simulovaný průběh napětí na cívce prvního stupně

3.5 Určení výchozí pozice projektilu

Z prvního pohledu je zřejmé, že síla, kterou je vtahován projektil do cívky procházené proudem se mění se vzdáleností od cívky. Pokud je projektil umístěn ve středu cívky, je tato síla nulová. Závislost síly na poloze projektilu byla vypočtena opět ze skutečného geometrického uspořádání metodou konečných prvků. Proud cívkou byl nastaven na konstantní hodnotu a projektil byl posouván v axiálním směru od středu cívky směrem dolů. Druhá větev (při posuvu cívky směrem vzhůru) je středově symetrická. Tato silová charakteristika je na obr. 19.



obr. 19: vykreslení průběhu síly vůči poloze projektilu v cívce

Z charakteristiky na obr. 19 je zřejmé, že nejvyšší síla působí na projektil, pokud je střed projektilu a střed cívky v axiální vzdálenosti 25mm (platí pouze pro toto konkrétní geometrické uspořádání, nezávisle na velikosti proudu). Dále bylo na obr. 16 ukázáno, že proud cívkou neprochází okamžitě, ale maximální hodnoty dosáhne až s určitým zpožděním, vlivem časových konstant. Je tedy nezbytné zajistit, aby se projektil nacházel v okamžiku kdy je proud v maximu v pozici, kde je síla působící na projektil nejvyšší, tedy zmíněná axiální vzdálenost středů 25mm.

Tato úloha ovšem není analyticky řešitelná, jelikož se projevuje nelineární magnetizační charakteristika železného projektilu. Postup řešení byl tedy následující:

1. Diskretizace průběhu proudu cívkou na 5 oblastí
2. Průměrování proudu v každém z pěti okamžiků
3. Odhad výchozí pozice projektilu
4. Postupný iterační výpočet polohy, rychlosti a zrychlení projektilu v pěti krocích s postupným posouváním projektilu podle uražené dráhy a s postupnou změnou proudu procházejícího cívkou dle diskretizace v prvním kroku
5. Shodný výpočet s krokem 4) avšak pro jiné výchozí pozice projektilu

Výchozí pozice projektilu byla iterativním způsobem zpřesňována metodou půlení intervalů. V momentě kdy byla nalezena optimální výchozí pozice, byl výpočet dle kroku 4) proveden pro jemnější diskretizaci, a sice v 15 krocích. Tento výpočet byl proveden ještě pro výchozí pozici posunutou o 1mm na každou stranu, aby bylo jisté, že hrubá diskretizace proudu neovlivnila správnost určení výchozí pozice.

Jednotlivé kroky zahrnovaly výpočet silových poměrů na projektil pomocí metody konečných prvků. Síla byla počítána pomocí Maxwellova tenzoru napětí v programu FEMM. Z této síly bylo pomocí 2. Newtonova zákona (27) určeno zrychlení projektilu. Následně byla dopočtena dráha a rychlost s uvažováním tíhového zrychlení Země, které působí proti pohybu projektilu [21]:

$$F = m \cdot a , \quad (27)$$

kde F je působící síla, m je hmotnost projektilu a a je zrychlení,

$$v_i = (a_i - g) \cdot \Delta t , \quad (28)$$

$$s_i = \frac{1}{2}(a_i - g) \cdot \Delta t, \quad (29)$$

kde v_i je rychlost projektilu, s_i je uražená dráha, g je tíhové zrychlení a Δt je časový interval.

Tyto veličiny byly počítány v každém kroku iterativního výpočtu a celková dráha sumarizována:

$$s_{celk} = \sum s_i, \quad (30)$$

V každém okamžiku výpočtu byl totiž projektil urychlován jiným zrychlením.

Optimální výchozí pozice projektilu v prvním stupni magnetického děla je 40 mm pod cívkou. Jedná se o axiální vzdálenost středu projektilu a středu cívky. Vypočtené hodnoty rychlosti a uražené vzdálenosti jsou v tab. 1.

tab. 1: kroky výpočtu polohy a rychlosti projektilu

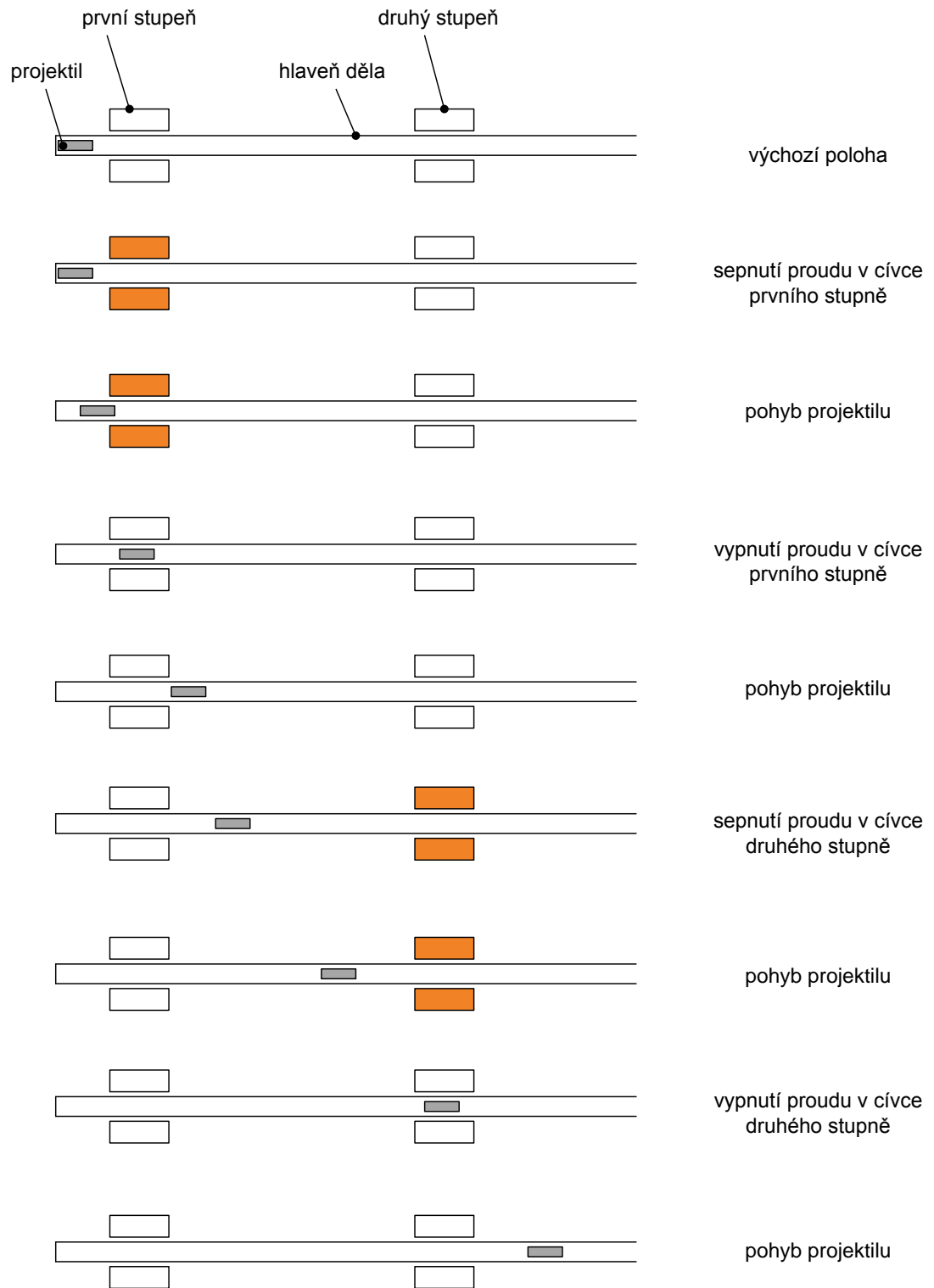
| 1. stupeň | | | | | |
|-----------|---------|-------|-----------|-------------|-------------|
| t [s] | dt [s] | F [N] | I stř [A] | v_i [m/s] | s celk [mm] |
| 0,001 | 0,001 | 28,3 | 167 | 0,28 | 0,28 |
| 0,002 | 0,001 | 80,4 | 289 | 1,09 | 1,37 |
| 0,003 | 0,001 | 87,4 | 342 | 1,97 | 3,34 |
| 0,004 | 0,001 | 139,6 | 354 | 3,39 | 6,72 |
| 0,005 | 0,001 | 176,6 | 339 | 5,18 | 11,9 |
| 0,006 | 0,001 | 189,3 | 314 | 7,1 | 19 |
| 0,007 | 0,0005 | 184,7 | 329 | 8,04 | 23,02 |
| 0,0075 | 0,0005 | 160 | 315 | 8,85 | 27,45 |
| 0,008 | 0,0005 | 120,2 | 298 | 9,46 | 32,17 |
| 0,0085 | 0,00025 | 76,1 | 289 | 9,65 | 34,59 |
| 0,00875 | 0,00025 | 49,4 | 280 | 9,77 | 37,03 |
| 0,009 | 0,00025 | 27,1 | 272 | 9,84 | 39,49 |
| 0,00925 | 0,00005 | 0 | 0 | 9,84 | 39,98 |
| 0,0093 | 0,00005 | 0 | 0 | 9,84 | 40,47 |
| 0,00935 | 0,00005 | 0 | 0 | 9,84 | 40,97 |

4 Návrh druhého stupně děla

Druhý stupeň a případné další stupně je možno přidávat k již existující konstrukci. Pokud je druhý stupeň dostatečně vzdálen od prvního, pak nehrozí ovlivnění projektilu v prvním stupni a pokažení optimálního nastavení. Pokud by byl druhý stupeň příliš blízko prvnímu, pak by na projektil působila větší síla, a tudíž by projektil dosáhl polohy s nejvyšší možnou silou (zmíněných -25 mm ax.) dříve, než by proud v prvním stupni dosáhl maximální hodnoty. Následně projektil proletěl středem cívky prvního stupně, která by projektil opět přitahovala do svého středu (pokud by byla stále protékána proudem). Síly od obou stupňů děla by tak působily proti sobě, což není optimální. Proto je nutné druhý stupeň umístit do dostatečné vzdálenosti od prvního, aby k ovlivnění nedošlo, případně toto ovlivnění respektovat ve výpočtu.

Z tohoto důvodu byla zvolena vzdálenost mezi středy cívek obou stupňů 100 mm, což je dostatečné pro omezení vlivu a zároveň tato vzdálenost příliš nezvýší rozměry děla.

Zatímco u prvního stupně nebylo časování potřeba a bylo možno spínat cívku v momentě, kdy byl požadavek na výstřel projektilu, v případě druhého a dalších stupňů je časování nezbytné. Sepnutí druhého stupně je nutno provést v závislosti na poloze projektilu tak, aby maximální proud procházel cívkou druhého stupně tehdy, když je projektil v optimální pozici dle silové charakteristiky. Zároveň je nutno rozepnout obvod tehdy, když střed projektilu míjí střed cívky. Schematicky je sled spínání obou stupňů magnetického děla reluktančního typu naznačen na obr. 20.



obr. 20: sled spínání cívek dvoustupňové konstrukce reluktančního magnetického děla

Postup elektromagnetického návrhu druhého stupně magnetického děla byl shodný s prvním stupněm. Jediným rozdílem byla nutnost uvažovat nenulovou počáteční rychlost. Právě tato počáteční rychlost působila drobné potíže s určením výchozí pozice projektilu pro sepnutí druhého stupně.

Pro druhý stupeň byla k dispozici kondenzátorová baterie s kapacitou 0,01 F, avšak s možností pracovat s vyšším napětím. Kondenzátorová baterie druhého stupně je napájena ze sítě na napětí 180 V, což zajišťuje energii 162 J (tedy přibližně 2,5 násobek energie baterie prvního stupně). Odpalovací cívka druhého stupně je shodná s cívkou prvního stupně. Silová charakteristika (obr. 19) je tedy též shodná, jelikož závisí pouze na geometrii cívky. Projektil by tedy měl být v oblasti 25 mm (axiální vzdálenost středů) od cívky druhého stupně v okamžiku proudového maxima.

Nízká kapacita kondenzátorové baterie má ovšem vliv na rezonanční kmitočet LC členu v obvodu (viz obr. 13). Proto bylo nutné ověřit, jestli po sepnutí obvodu zůstane přechodný děj aperiodický. Z prvního stupně cívky byl určen odpor přívodů a vinutí přibližně 0,071 Ω. Tato hodnota odpovídala i výsledkům měření. Při uvažování indukčnosti cívky 104 μH, indukčnosti přívodů 31 μH a kapacity kondenzátorové baterie 0,01 F však předpoklad z prvního stupně neplatí. Dosadíme-li tyto parametry do vztahu (15), přechází tento vztah v nerovnost:

$$69149 < 740740$$

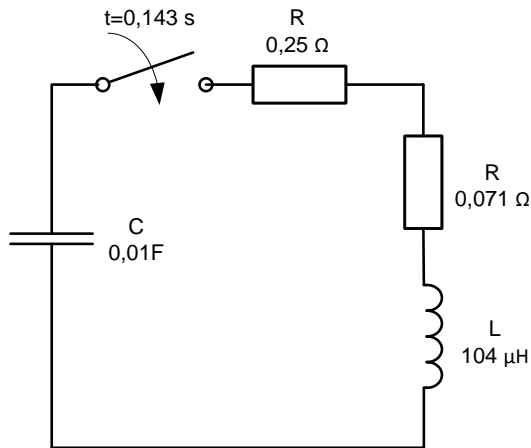
$$\left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC} \quad (31)$$

Přechodný děj by tedy byl kmitavý [17]. Aby platila opačná nerovnost a přechodný děj se utlumil na aperiodický průběh, je nutné zvýšit kapacitu kondenzátorové baterie, snížit indukčnost, nebo zvýšit odpor. Nejjednodušší cesta je přidáním seriového odporu do obvodu druhého stupně. Teoretická hodnota odporu celého obvodu pro zajištění aperiodického průběhu je min. 0,232 Ω. Do obvodu byl proto zařazen sériově odpor 0,25 Ω, aby bylo jisté, že průběh bude aperiodický. Pro maximalizaci účinnosti je nutný průběh přechodného děje co nejpřesněji na mezi aperiodicity, a zároveň co nejnižší odpor obvodu (odpor cívky a přívodních vodičů). Tímto je možné zajistit, aby proudový impuls dosahoval co nejvyšších hodnot a zároveň odezněl v co nejkratším čase. Tím předá cívka maximum energie projektilu v okamžiku kdy má nejvyšší účinnek.

Dalším krokem bylo určení výchozí polohy projektilu pro sepnutí cívky druhého stupně. Toto spínání je možné řešit buď primitivně, jak bylo naznačeno na obr. 8, nebo

optickou závoru, či vhodným časováním. Z možných řešení bylo zvoleno spínání s vhodným časováním, jelikož obvod musí být vybaven časováním pro vypnutí spínače.

Síla působící na projektil je úměrná proudu procházejícímu obvodem. Zařazený sériový odpor tedy negativně ovlivňuje efektivitu druhého stupně děla. Odpor byl volen mírně vyšší, než je nezbytně nutné, protože není známá přesná hodnota odporu prvků obvodu (zejména odpor přívodů, kontaktů a spínacích prvků). Při praktické konstrukci děla je možné tento odpor změřit a následně upravit hodnotu odporu vloženého do obvodu kvůli omezení kmitů. Tento odpor je tedy vhodné volit laditelný (viz obr. 21. Zároveň je ovšem nezbytné přepočítat průběhy proudu a síly na projektil v druhém stupni děla. Zvýšení proudu má za následek zvýšení síly na projektil a tím i zrychlení. Je tedy nutné spínat druhý stupeň s kratším předstihem před dosažením nulové axiální vzdálenosti středů projektilu a cívky.



obr. 21: obvod druhého stupně magnetického děla

4.1 Simulace druhého stupně magnetického děla

Simulace proudu a napětí pomocí programu Simulink využívá stejný kód, jako pro první stupeň, pouze byly změněny hodnoty jednotlivých prvků (kapacita kondenzátorové baterie a odpor vložený pro tlumení kmitů).

Výpočet výchozí pozice pro sepnutí druhého stupně byl proveden shodně s prvním stupněm. Tedy metodou půlení intervalů byla hledána optimální pozice pro získání nejvyššího zrychlení při průchodu projektilu středem cívky. Nejprve byla zvolena počáteční pozice a vypočtena síla působící na projektil pomocí Maxwellova tenzoru napětí [25], [26]. Dále byla síla převedena na zrychlení pomocí hmotnosti projektilu a dále dopočtena dráha za určitý časový okamžik. O tuto uraženou dráhu byl v následujícím kroku posunut projektil v programu FEMM a vypočtena síla působící na

projektil. Tímto iterativním postupem byla počítána dráha, dokud nedosáhl střed projektilu středu cívky. Jako optimální byla označena varianta, kdy je druhý stupeň sepnut v okamžiku $t = 0,143$ s od sepnutí prvního stupně. V tomto okamžiku je projektil 99 mm za svojí výchozí pozicí a 41 mm před cívku druhého stupně (axiální vzdálenost středů).

Vypočtené hodnoty rychlosti a uražené vzdálenosti projektilu urychleného oběma stupni děla jsou v tab. 2.

tab. 2: kroky výpočtu polohy a rychlosti projektilu v druhém stupni

| 2. stupeň | | | | | |
|-----------|----------|-------|-----------|----------|-------------|
| t [s] | dt [s] | F [N] | I stř [A] | vi [m/s] | s celk [mm] |
| 0,0143 | 0,00025 | 3,4 | 63 | 9,786262 | 2,447 |
| 0,01455 | 0,00025 | 83,8 | 283 | 9,997679 | 4,946 |
| 0,0148 | 0,00025 | 185,8 | 394 | 10,46927 | 7,563 |
| 0,01505 | 0,00025 | 256,2 | 442 | 11,12038 | 10,343 |
| 0,0153 | 0,00025 | 290 | 452 | 11,85765 | 13,308 |
| 0,01555 | 0,00025 | 300,7 | 443 | 12,62221 | 16,463 |
| 0,0158 | 0,00025 | 288,5 | 422 | 13,35561 | 19,802 |
| 0,01605 | 0,00025 | 256 | 396 | 14,00615 | 23,304 |
| 0,0163 | 0,00025 | 212,2 | 367 | 14,54513 | 26,94 |
| 0,01655 | 0,00025 | 160,9 | 337 | 14,95326 | 30,678 |
| 0,0168 | 0,00025 | 108,7 | 308 | 15,22817 | 34,485 |
| 0,01705 | 0,00025 | 60 | 282 | 15,37879 | 38,33 |
| 0,0173 | 0,00005 | 25,3 | 277 | 15,39119 | 39,1 |
| 0,01735 | 0,00005 | 17 | 272,3 | 15,39936 | 39,87 |
| 0,0174 | 0,00005 | 7,4 | 267,5 | 15,40262 | 40,64 |
| 0,01745 | 0,000025 | 2,9 | 265,1 | 15,40312 | 41,025 |

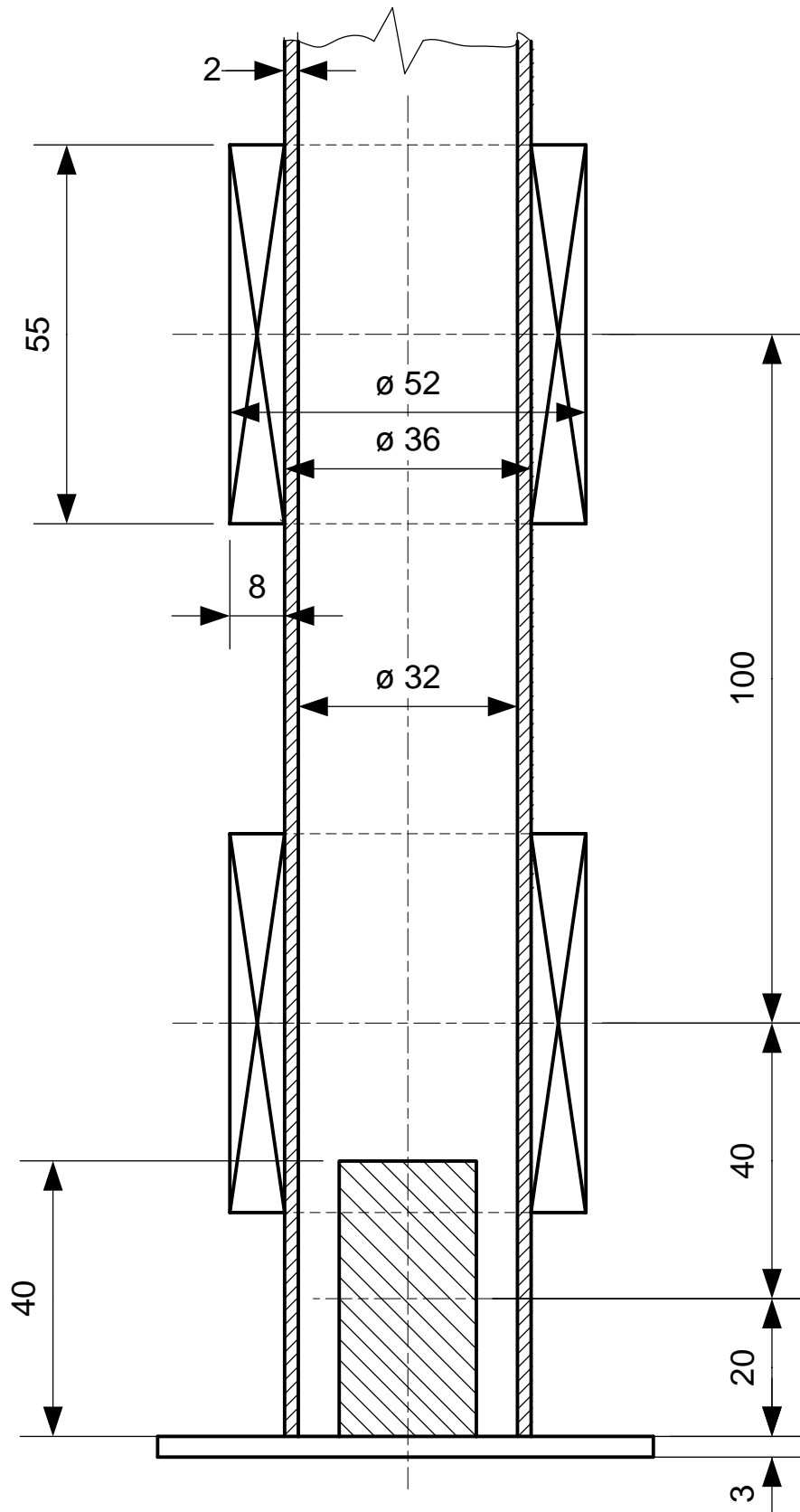
4.2 Konstrukční uspořádání

Elektrický obvod byl popsán v předcházejících kapitolách. Exponát pro Techmania Science Center (viz obr. 9), jak již bylo zmíněno, byl navržen pro nízkou ústřovou rychlost projektilu, proto nebylo potřeba uvažovat speciální bezpečnostní, či

konstrukční opatření. Cívka byla navinuta na plastové kostřičce a lepicí páskou připevněna na hlaveň děla. Samotná hlaveň je z polykarbonátu, aby byl projektil vidět po celou dráhu letu. Obě strany hlavně jsou opatřeny pružinovým dorazem, který zbrzdí projektil a utlumí tak náraz.

Dvoustupňová konstrukce dosahuje téměř dvojnásobné úst'ové rychlosti (15,4 m/s, tedy přibližně 55 km/h). Doporučuji tedy konstruovat hlaveň z oceli, namísto polykarbonátu. Dále cívky jednotlivých stupňů je nutné přesně vymezit a zachovat vzdálenost mezi nimi a vzdálenost výchozí pozice. Pokud by vzdálenosti mezi cívkami obou stupňů a od dorazu výchozí pozice byly odlišné než dle výpočtu, pak by časování sepnutí nebylo optimální a dělo by dosahovalo nižší úst'ové rychlosti.

Na obr. 22 je náčrt navržené dvoustupňové konstrukce reluktančního magnetického děla.



obr. 22: konstrukční uspořádání navrženého dvoustupňového magnetického děla

5 Závěr

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem dvoustupňového magnetického děla reluktančního typu. Jednotlivé typy magnetických děl jsou uvedeny v první kapitole. Pro všechny typy je zde uvedeno typické konstrukční uspořádání, fyzikální princip vzniku síly působící na projektil a případné varianty. V další části je představen způsob elektromagnetického návrhu magnetického děla s respektováním nelineární magnetizační křivky projektilu. Nejprve byla řešena jednostupňová koncepce, jejíž účel byl zejména didaktický. Tato koncepce byla následně realizována a slouží jako exponát v Techmania Science Center k demonstraci dynamických účinků elektromagnetického pole. Projektil je vystřelován vertikálně do výše přibližně 1 m a následně zbrzděn pružinovým mechanismem.

Jednostupňové dělo bylo dále rozšířeno o druhý stupeň. Toto rozšíření přineslo dva hlavní konstrukční problémy. Prvním je vhodné časování a spínání jednotlivých cívek tak, aby jejich magnetická pole nepůsobila proti sobě a výsledné účinky na projektil tak nebyly vyrušeny. Druhým úskalím bylo optimalizovat návrh z hlediska účinnosti. Zatímco na první stupeň nebyly kladeny žádné požadavky z hlediska účinnosti, druhý stupeň byl navržen tak, aby byl přechodný děj blízko meze aperiodicity, proud procházející cívkou tak působil co nejkratší čas a s co nejvyšší amplitudou. Tím je zajištěna i vysoká účinnost druhého stupně děla.

Předkládaná práce popisuje výpočetní metody a podává omezený teoretický základ pro elektromagnetický návrh vícestupňových konstrukcí magnetických děl reluktančního typu. Důkladnější rozbor by zahrnoval navíc chování materiálů při extrémních podmínkách (mechanických a tepelných), které mohou nastat při extrémních výkonech magnetických děl a základy balistiky. Tyto pasáže jsou však nad rámec předkládané práce.

Použitá literatura

- [1] Alv Egeland, "Birkeland's Electromagnetic Gun: A Historical Overview", IEEE Transactions on Plasma Science, VOL. 17, NO. 2, April 1989.
- [2] "Silent Machine Guns Are Fired By Electromagnets", June 1933, Popular Mechanics, URL: http://books.google.cz/books?id=UOIDAAAAMBAJ&pg=PA819&dq=Junkers+stratosphere&hl=en&ei=4KgNTb33B8S4ngeYq9WjDg&sa=X&oi=book_result&ct=result&redir_esc=y#v=onepage&q=Junkers%20stratosphere&f=true
- [3] Burgess, T.J.; Cnare, E.C.; Oberkampf, W.; Beard, S.; Cowan, M., "The electromagnetic θ gun and tubular projectiles," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.18, no.1, pp.46,59, Jan 1982
- [4] Lewis, P., „US Navy achieves ‘100 mile’ hypersonic railgun test shot, The register, 13.12.2010, cit. 10.4.2014, URL: http://www.theregister.co.uk/2010/12/13/32mj_railgun_test_onr/
- [5] Aldebaran Bullerin, týdeník věnovaný aktualitám a novinkám z fyziky a astronomie, AGA & Štefánikova hvězdárna v Praze, č. 10, r. 6, říjen 2008, ISSN: 1214-1674, URL: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_10_bum.php
- [6] "Railgun“, Wikipedie, cit. 10.4.2014, URL: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Railgun>
- [7] Patch, L.; Comstock, J.; Thio, Y.; Young, F., "Railgun barrel design and analysis," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.20, no.2, pp.360,363, Mar 1984
- [8] Benford, J.; Kares, R.; Brooks, A.; Goldman, E., "High energy railgun designs," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.20, no.2, pp.407,410, Mar 1984
- [9] Karhi, R.W.; Wetz, D.A.; Giesselmann, M.; Mankowski, J.J.; Diehl, J.P.; Kelly, P.M., "A 40-Stage Synchronous Distributed Energy Railgun," Plasma Science, IEEE Transactions on , vol.39, no.4, pp.1192,1197, April 2011
- [10] Usuba, Shu; Kakudate, Yozo; Aoki, K.; Yoshida, M.; Tanaka, K.; Fujiwara, S., "Development of railgun accelerator at NCLI," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.22, no.6, pp.1785,1789, Nov 1986
- [11] Berning, P.R.; Hummer, C.R.; Hollandsworth, Clinton E., "A coilgun-based plate launch system," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.35, no.1, pp.136,141, Jan 1999
- [12] Coilgun systems, online, publ. 18.6.2004, cit. 9.3.2014, URL: http://www.coilgun.eclipse.co.uk/coilgun_basics_3.html
- [13] Waindok, A.; Mazur, G., "A mathematical and physical models of the three-stage reluctance accelerator," Electrodynamic and Mechatronics, 2009. SCE 11 '09. 2nd International Students Conference on , vol., no., pp.29,30, 19-21 May 2009, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5156100&isnumber=5156083>
- [14] El-Hasan, T.S., "Design of a single stage supersonic reluctance coilgun (RCG)," Pulsed Power Conference (PPC), 2011 IEEE , vol., no., pp.964,969, 19-23 June 2011, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6191548&isnumber=6191397>
- [15] Xiongying Duan; Minfu Liao; Ji-yan Zou; Zhao Chun; Zhou Zhengyang; Xiaopeng Li, "Simulation and measurement on velocity of flat-plate projectiles in a three-stage reconnection

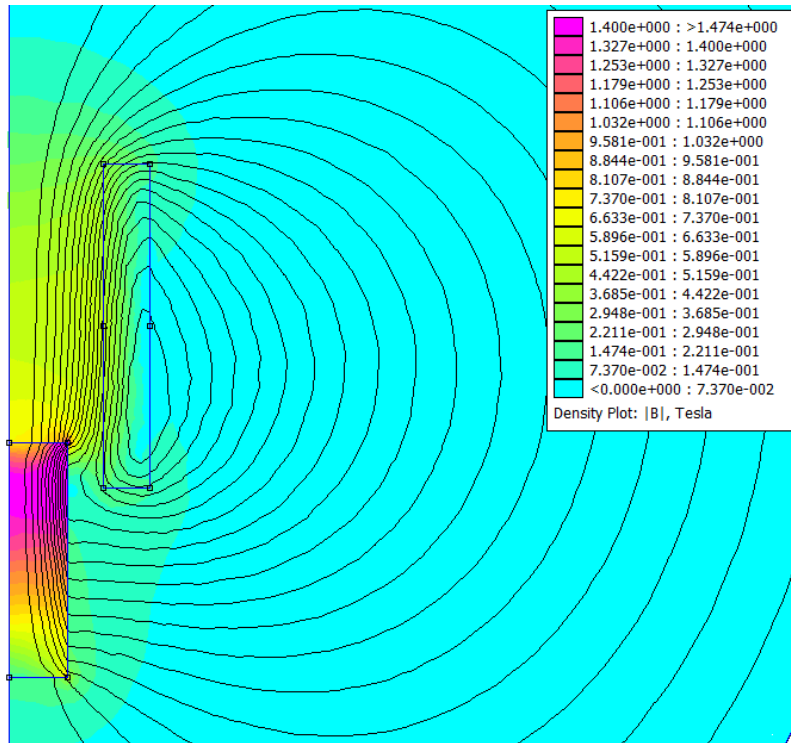
- electromagnetic launcher," Pulsed Power Conference (PPC), 2011 IEEE , vol., no., pp.1503,1507, 19-23 June 2011, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6191672&isnumber=6191397>
- [16] Jin Hongbo; Wang Huijin; Zhang Liping; Xue Luqiang, "Efficiency comparison between synchronous induction launcher and reconnection launcher," Electromagnetic Launch Technology (EML), 2012 16th International Symposium on , vol., no., pp.1,4, 15-19 May 2012, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6325153&isnumber=6324992>
- [17] Benešová, Z.; Ledvinová, M.: Základy elektrických obvodů v příkladech, ZČU, Plzeň, 2008
- [18] Horňák, J., Hložek, F., Kerepecký, T., Matys, M.: „Gaussova zbraň aneb využití magnetismu vez zbrojním průmyslu“, texty k přednáškám pro 1. ročník na fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské, 2011, URL: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Zima11/proc/gauss.pdf>
- [19] Kotlan, J.: Základy teoretické elektrotechniky, skripta ZČU, Plzeň, 1995.
- [20] Chevko, O., Ficker, O., Tesař, K., Větrovec, V.: „Railgun – magnetické kolejnicové dělo“, texty k přednáškám pro 1. ročník na fakultě jaderné a fyzikálně inženýrské, 2011, URL: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2010-2011/Leto11/proc/railgun.pdf>
- [21] Marder, B., "A coilgun design primer," IEEE Transactions on Magnetics, vol.29, no.1, pp.701,705, Jan 1993, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=195661&isnumber=5024>
- [22] Williamson, Stephen; Smith, Alexander, "Pulsed coilgun limits," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.33, no.1, pp.201,207, Jan 1997, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=559951&isnumber=12211>
- [23] Mayer, D.: Teorie elektromagnetického pole. Skripta ZČU, Plzeň, 2004.
- [24] Benešová, Z., Mayer, D.: Základní příklady z teorie elektromagnetického pole. Skripta ZČU, Plzeň, 2004.
- [25] Chudoba, O.: „Elektrodynamika“, učební text, Masarykova Univerzita, cit: 2.5.2014 URL: <http://www.math.muni.cz/~xchudoba/eldyn.pdf>
- [26] Freschi, F.; Repetto, M., "Natural Choice of Integration Surface for Maxwell Stress Tensor Computation," Magnetics, IEEE Transactions on , vol.49, no.5, pp.1717,1720, May 2013, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6514782&isnumber=6514491>

Přílohy

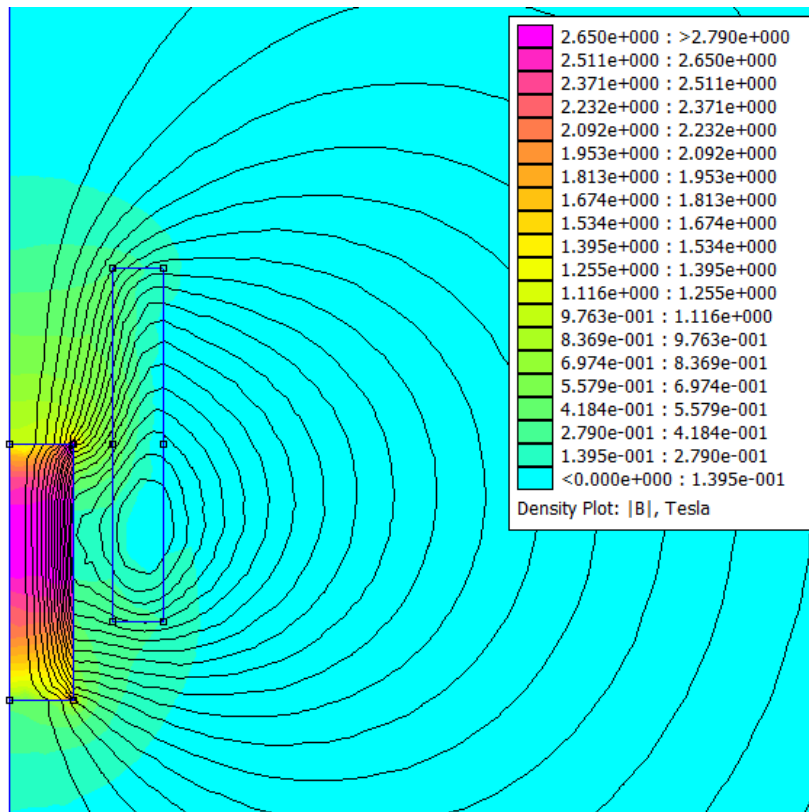
- A. Výpočet magnetického pole pomocí MKP v prvním stupni
- B. Výpočet magnetického pole pomocí MKP v druhém stupni
- C. Výpočet polohy a rychlosti projektilu druhého stupně bez sériového rezistoru
- D. Náčrt kondenzátorové baterie pro napájení prvního stupně děla

A. Výpočet magnetického pole pomocí MKP v prvním stupni

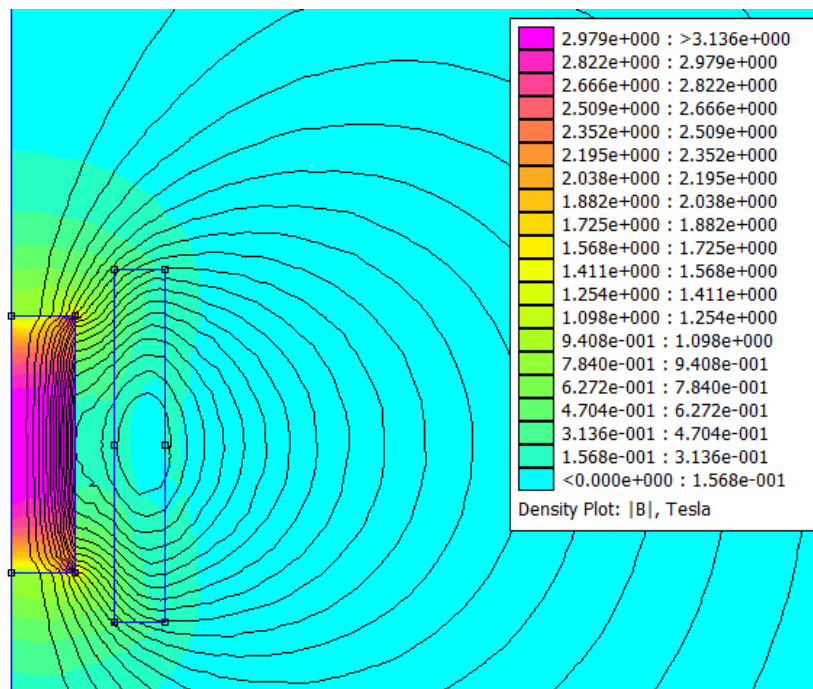
Na následujících obrázcích jsou uvedeny tři pozice projektilu a jim odpovídající průběhy magnetického pole cívky prvního stupně magnetického děla.



obr. A 1: rozložení indukce magnetického pole cívky prvního stupně magnetického děla pro pozici projektilu -40 mm – výchozí pozice, $I = 167$ A



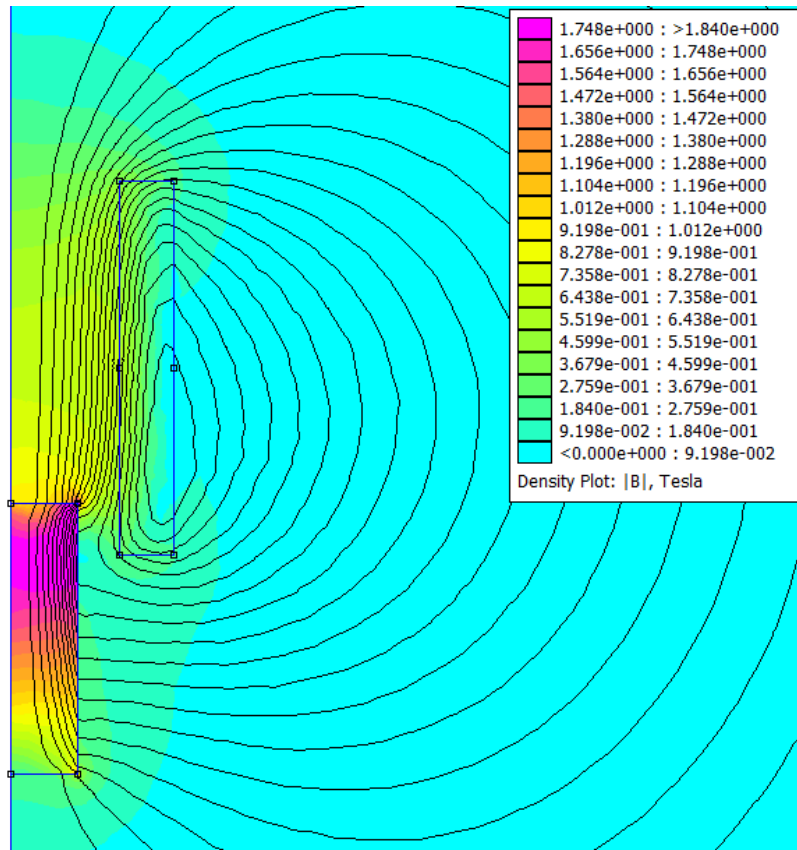
obr. A 2: rozložení indukce magnetického pole cívky prvního stupně magnetického děla pro pozici projektilu -20 mm, $I = 314$ A



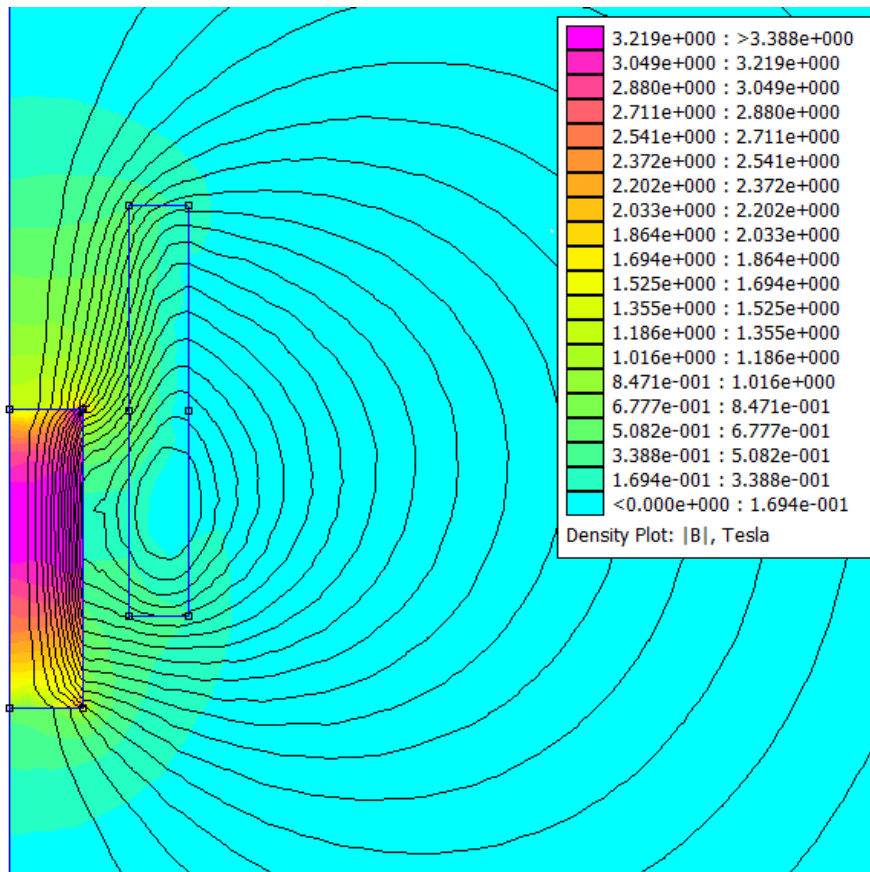
obr. A 3: rozložení indukce magnetického pole cívky prvního stupně magnetického děla pro pozici projektilu 0 mm (střed projektilu ve středu cívky), $I = 27,1$ A

B. Výpočet magnetického pole pomocí MKP v prvním stupni

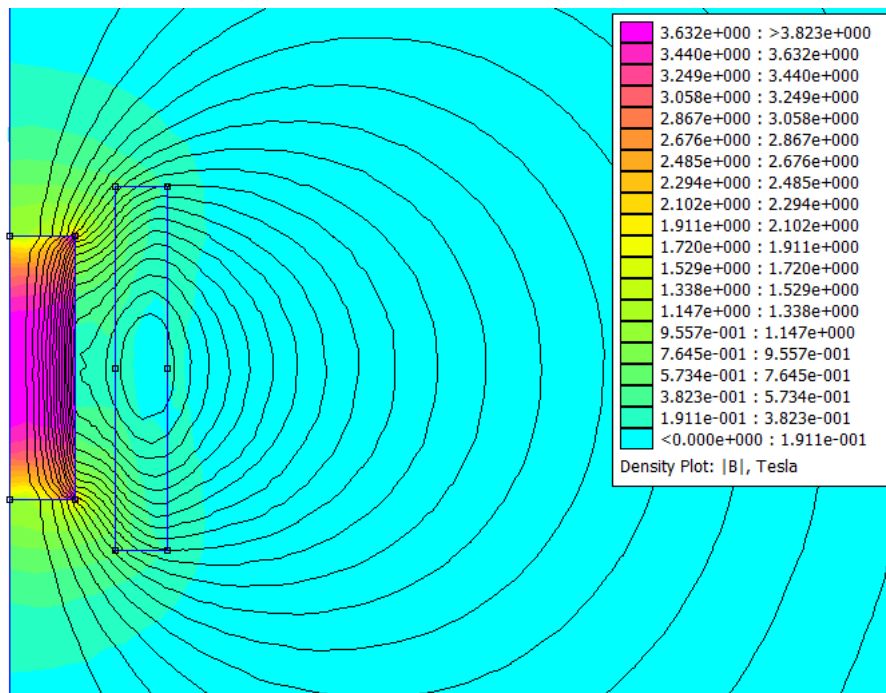
Na následujících obrázcích jsou uvedeny tři pozice projektilu a jim odpovídající průběhy magnetického pole cívky druhého stupně magnetického děla.



obr. B 1: rozložení indukce magnetického pole cívky druhého stupně magnetického děla pro pozici projektilu -41 mm od středu cívky druhého stupně, tedy v okamžiku sepnutí cívky druhého stupně, $I = 63$ A



obr. B 2: rozložení indukce magnetického pole cívky druhého stupně magnetického děla pro pozici projektilu -20 mm od středu cívky druhého stupně, $I = 422 \text{ A}$



obr. B 3: rozložení indukce magnetického pole cívky druhého stupně magnetického děla pro pozici projektilu 0 mm (střed projektilu ve středu cívky druhého stupně), $I = 265 \text{ A}$

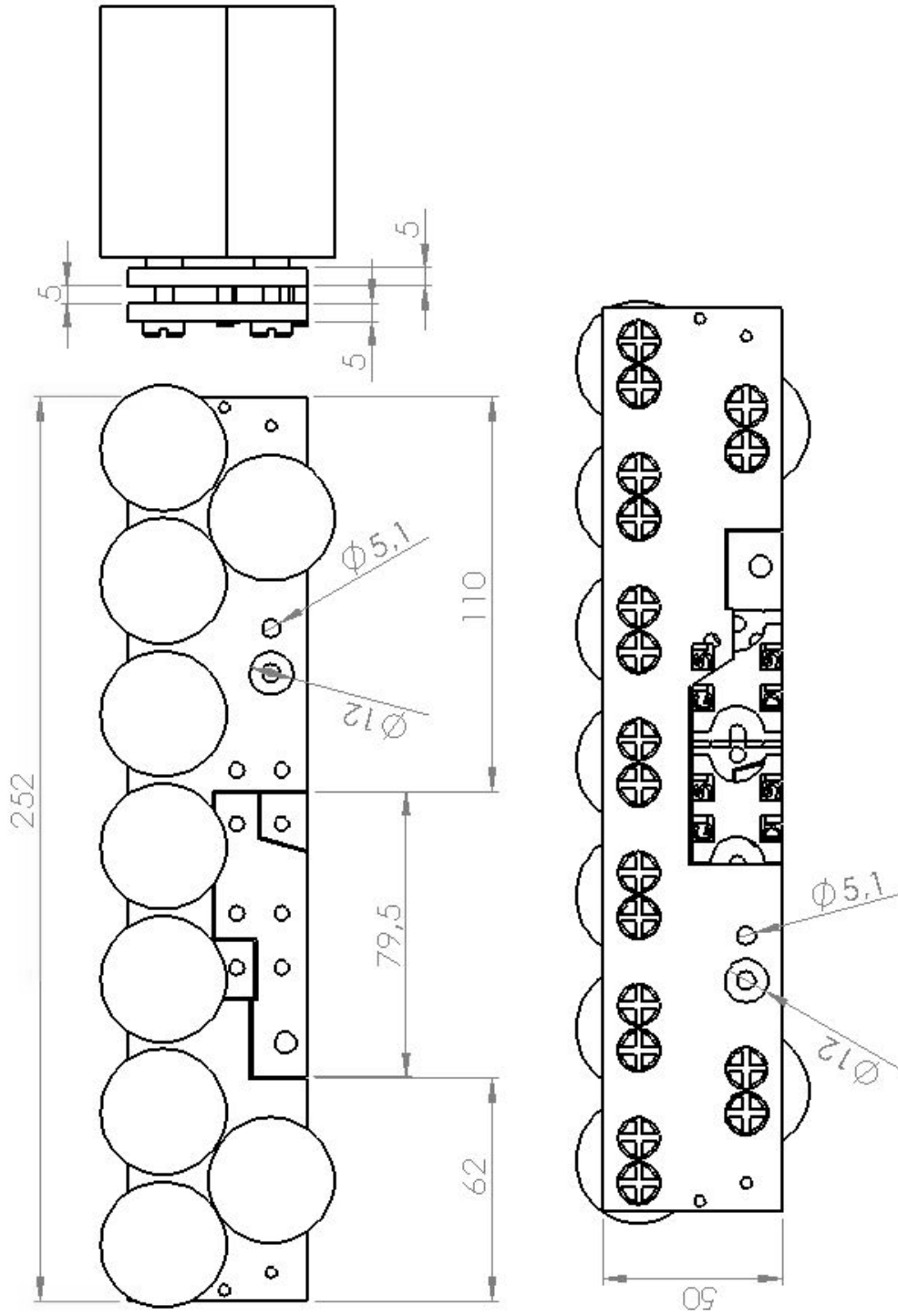
C. Výpočet polohy a rychlosti projektilu druhého stupně bez sériového rezistoru

Hrubý výpočet rychlosti a uražené vzdálenosti projektilu v druhém stupni magnetického děla, pokud v obvodu druhé cívky není vložen rezistor pro utlumení kmitavého přechodného děje a tento charakter není respektován je uveden v následující tabulce:

tab. C 1: kroky výpočtu polohy a rychlosti projektilu v druhém stupni cívky

| 2. stupeň | | | | | |
|-----------|---------|----------|-----------|----------|------------|
| t [s] | dt [s] | F [N] | I stř [A] | vi [m/s] | s celk [m] |
| 0,0143 | 0,00125 | 0,006407 | 50 | 7,690607 | 0,009613 |
| 0,01555 | 0,0015 | 0,609623 | 307 | 7,685223 | 0,021141 |
| 0,01705 | 0,00175 | 7,69823 | 510 | 7,805524 | 0,034801 |
| 0,0188 | 0,002 | 116,548 | 669 | 10,16443 | 0,05513 |
| 0,0208 | 0,00225 | 628,294 | 777 | 24,56748 | 0,110406 |

D. Náčrt kondenzátorové baterie pro napájení prvního stupně děla



obr. D 1: náčrt konstrukčního uspořádání kondenzátorové baterie pro napájení prvního stupně magnetického děla