

# Akcelerace předmětů magnetickým polem

Jan Němec

---

Bakalářská práce  
2020



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky

---

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně  
Fakulta aplikované informatiky  
Ústav bezpečnostního inženýrství

Akademický rok: 2019/2020

**ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**  
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan Němec**  
Osobní číslo: **A17378**  
Studijní program: **B3902 Inženýrská informatika**  
Studijní obor: **Bezpečnostní technologie, systémy a management**  
Forma studia: **Prezenční**  
Téma práce: **Akcelerace předmětů magnetickým polem**  
Téma práce anglicky: **The Acceleration of Objects by Magnetic Fields**

**Zásady pro vypracování**

1. Popište současný stav v oblasti akcelerace magnetickým polem.
2. Vypracujte literární rešerši zaměřenou na elektromagnetické fyzikální principy.
3. Navrhnete způsob akcelerace předmětů a matematicky ověřte návrh.
4. Ověřte výsledky výpočtů pomocí simulačního nástroje.
5. Zkonstruujte funkční vzorek a experimentálně ověřte vypočítané a nasimulované hodnoty.
6. Navrhnete využití v průmyslu komerční bezpečnosti.

Rozsah bakalářské práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam doporučené literatury:

1. SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibility: principy a poznámky. Brno: VUT v Brně, 2001. ISBN 9788021418738.
2. PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2006. ISBN 9780471758143.
3. ABDÖ, Tamer M., Ahmed L. ELREFAI, Amr A. ADLY a Osama A. MAHGÖUB. Performance analysis of coil-gun electromagnetic launcher using a finite element coupled model. In: 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 506-511 [cit. 2019-11-18]. DOI: 10.1109/MEPCON.2016.7836938. ISBN 978-1-4673-9063-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7836938/>
4. WINARNO, Basuki, Rakhmad Gust PUTRA, Indarto YUWONO, Agus Indra GUNAWAN a Bambang SUMANTRI. Control of Velocity Projectile on Multistage Coil gun. In: 2018 International Conference on Applied Science and Technology (ICAST) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 24-29 [cit. 2019-11-18]. DOI: 10.1109/ICAST1.2018.8751558. ISBN 978-1-5386-7548-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8751558/>

Vedoucí bakalářské práce:

**Ing. Stanislav Kovář**  
Ústav bezpečnostního inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: 17. prosince 2019  
Termín odevzdání bakalářské práce: 25. května 2020



---

doc. Mgr. Milan Adámek, Ph.D.  
děkan

Ing. Jan Valouch, Ph.D.  
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. prosince 2019

**Prohlašuji, že**

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

**Prohlašuji,**

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne 27.7.2020

.....  
podpis diplomanta

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce je zaměřena na urychlování předmětů pomocí magnetického pole. Teoretická práce uvádí akceleraci magnetickým polem a současné trendy s využitím tohoto principu. Dále popisuje fyzikální principy využívané, při akceleraci magnetickým polem, jež jsou důležité pro simulačním a experimentálním ověření funkčnosti. Poslední kapitola teoretické části je věnovaná návrhu akcelerace magnetickým polem. Praktická část obsahuje výsledky simulací a optimalizace návrhu. Praktická část zahrnuje také postup konstrukce experimentu a srovnání s výsledky simulací. Závěrečná kapitola je věnována průmyslovému využití a zejména pak využití v průmyslu komerční bezpečnosti.

Klíčová slova: Lorentzova síla, metoda konečných prvků, cívka, magnetismus, magnet, magnetické pole

## **ABSTRACT**

Bachelor's thesis is focused on the acceleration of objects by using magnetic fields. The theoretical part describes acceleration by using magnetic fields and ongoing trends in this field. There is also a description of used physics principles that are used to describe and calculate acceleration by using the magnetic field and principles used in simulations and experimental validation of results. The last chapter of the theoretical part is given to the conceptual drafting of experiments and simulations. The fifth chapter is focused on the construction and experiment outputs in comparison to the expected results from the simulations. The final section is given to industrial usage with a focus on usage in the commercial security industry.

Keywords: Lorentz force, finite element method, coil, magnetism, magnetic field, magnet

Chtěl bych zde poděkovat mému školiteli, za neskutečnou trpělivost, při sledování mého skokového postupu, při zpracování této práce a cenné rady, které mi poskytl v průběhu konzultací. Také bych chtěl poděkovat všem, kteří byli ochotní se se mnou na toto téma bavit, a ať už přímo, nebo nepřímo dopomohli k vyřešení některých problémů, které v průběhu tvorby práce nastaly.

„Ordinary people, they operate within a certain set of parameters, right? Rules. Limits.

Then there's blokes like me, yeah? We cheat.“

John Constantine

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

# OBSAH

<b>ÚVOD.....</b>	<b>9</b>
<b>I TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>10</b>
<b>1 AKCELERACE MAGNETICKÝM POLEM.....</b>	<b>11</b>
1.1 URYCHLOVAČE ČÁSTIC .....	11
1.1.1 Elektrostatické urychlovače částic .....	12
1.1.2 Elektromagnetické urychlovače částic .....	12
1.2 GAUSSOVA PUŠKA .....	13
1.2.1 Způsob napájení .....	14
1.2.2 Spínání segmentů .....	14
1.2.3 Využití Gaussovi pušky .....	15
1.3 IONTOVÉ MOTORY .....	15
1.3.1 Hallův motor .....	15
<b>2 POUŽITÉ FYZIKÁLNÍ PRINCIPY.....</b>	<b>17</b>
2.1 INDUKČNOST .....	17
2.1.1 Indukčnost Solenoidu.....	17
2.1.2 Empirické výpočty vícevrstvých cívek .....	18
2.1.3 Numerická metoda pro výpočet indukčnosti.....	19
2.2 LORENTZOVA SÍLA .....	20
2.3 MECHANICKÁ PRÁCE.....	21
2.4 VÝPOČET ČASU .....	22
<b>3 NÁVRH ZPŮSOBU AKCELERACE PŘEDMĚTŮ .....</b>	<b>23</b>
3.1 ROZMĚRY URYCHLOVACÍ CÍVKY .....	23
3.2 VÝPOČET SKUTEČNÝCH HODNOT CÍVKY.....	24
3.2.1 Průměr drátu.....	24
3.2.2 Indukčnost cívky .....	24
3.2.3 Celková délka drátu.....	25
3.2.5 Tavný proud .....	27
3.3 METODA SPÍNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH CÍVEK .....	27
3.3.1 Reléové spínače.....	28
3.3.2 Tranzistorové spínače.....	28
3.3.3 Zapojení platformy Arduino .....	29
3.3.4 Elektrotechnické schéma zapojení celého návrhu.....	30
<b>II PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>33</b>
<b>4 SIMULACE POHYBU TĚLESA.....</b>	<b>34</b>
4.1 SIMULAČNÍ NÁSTROJ .....	35
4.2 OPTIMALIZACE NÁVRHU.....	35
4.2.1 Optimalizace vzdálenosti cívek.....	37

4.2.2	Optimalizace počtu cívek .....	39
4.2.3	Velikost proudu .....	40
4.3	ZPŮSOB SPÍNÁNÍ CÍVEK .....	43
4.3.1	Postupné spínání.....	44
4.3.2	Postupné spínání s mezikroky .....	45
4.3.3	Postupné vypínání .....	47
4.3.4	Finální zhodnocení spínacích metod.....	49
<b>5</b>	<b>KONSTRUKCE A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NÁVRHU .....</b>	<b>50</b>
5.1	KONSTRUKCE NÁVRHU.....	50
5.1.1	Řídící část.....	51
5.1.2	Galvanický oddělovač .....	52
5.1.3	Spínací část.....	52
5.1.4	Urychlovací část.....	53
5.2	ČASOVÁNÍ CÍVEK A MĚŘENÍ RYCHLOSTI TĚLESA .....	54
5.2.1	Časování prvního segmentu postupného spínání .....	56
5.2.2	Časování druhého segmentu postupného spínání .....	57
5.2.3	Časování třetího segmentu postupného spínání .....	59
5.2.4	Časování postupného vypínání .....	61
5.3	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ SE SIMULACEMI.....	63
<b>6</b>	<b>PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ .....</b>	<b>66</b>
6.1	BĚŽNÉ PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ .....	66
6.1.1	Reléové spínače a stykače .....	66
6.1.2	Jazyčkové kontakty .....	66
6.1.3	Elektromagnety s posuvným jádrem .....	66
6.1.4	Elektromotory .....	67
6.2	EXPERIMENTÁLNÍ A MOŽNÉ BUDOUCÍ VYUŽITÍ.....	68
6.2.1	Způsob dopravy.....	68
6.3	ŘÍZENÉ ZNAČKOVÁNÍ NARUŠITELE PŘI PROBÍHAJÍCÍ KRÁDEŽI .....	68
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>69</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>70</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>73</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>74</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>75</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>76</b>



## ÚVOD

Cílem práce je zkoumání akcelerace předmětů pomocí magnetického pole. V teoretické části, je popsána akcelerace magnetickým polem a její limity. Dále jsou zmíněny moderní trendy, jako jsou Iontové motory, urychlovače částic, Gaussovy pušky a stručný popis jejich funkčnosti. Práce uvádí fyzikální principy, související s akcelerací tělesa a simulačním či experimentálním ověřením funkčnosti návrhu. Poslední část teoretické části je věnovaná návrhu akcelerace magnetickým polem, kde jsou stanoveny rozměry urychlovacího segmentu a vypočítány fyzikální vlastnosti či materiálové nároky na konstrukci.

Praktická část představuje simulační nástroj využívající metody konečných prvků a stručné nastínění funkce metody. Následuje proces optimalizace návrhu, pomocí výsledků simulací, kdy je upravován počet segmentů, vzdálenost mezi nimi a proud ovlivňující výslednou rychlost předmětu. V závěru kapitoly jsou zrekapitulovány všechny výsledky. Následuje kapitola věnovaná konstrukci samotného experimentu, věnovaná elektrickým prvkům, opatření proti úrazu elektrickým proudem a měřením skutečné úst'ové rychlosti předmětu. Závěr kapitoly prezentuje výsledky experimentu a srovnává s těmi získanými simulacemi. Poslední kapitola práce zmiňuje průmyslovou aplikaci akcelerace magnetickým polem, mezi něž patří elektromagnetické zámky, nebo experimentální využití ve vesmírné dopravě. Závěr bakalářské práce uvádí návrh potenciální aplikace s použitím magnetické kapaliny.

## **I. TEORETICKÁ ČÁST**

## 1 AKCELERACE MAGNETICKÝM POLEM

Akcelerace magnetickým polem se často využívá v místech, kde není možné se urychleného předmětu dotknout přímo, nebo okamžité zrychlení způsobené například řízenou explozí může způsobit poškození předmětu.

Urychlování předmětů například chemickým hořením dosahuje taktéž rychlostních limitů, které má samotné palivo. Na druhou stranu urychlování magnetickým polem, má teoretické limity ve vysokých procentech rychlosti světla, pokud tedy uvažujeme, že urychlovaný materiál vydrží takovou zátěž a máme dostatečně dlouhou dráhu pro zrychlení. [1]

Důvod, proč není možné dosáhnout rychlosti světla, lze vidět z upravené rovnice pro výpočet energie pohybujícího se předmětu v rychlostech blízcích se rychlosti světla. [2]

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left[ J, Kg, \frac{m}{s}, \frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

$$v = c \sqrt{1 - \left( \frac{mc^2}{E} \right)^2} \left[ \frac{m}{s}, Kg, \frac{m}{s}, J \right] \quad (2)$$

Z rovnice je zřejmé že rychlost, kterou se bude pohybovat bude vždy nějaký zlomek rychlosti světla. Jediná možnost, při které by mohla rychlost přesáhnout rychlost světla by byla, pokud by tělesu bylo dodáno nekonečně množství energie.

### 1.1 Urychlovače částic

Úvodní příklad, kde již dochází k využití akcelerace magnetickým polem je urychlovač částic. Urychlovače částic se dělí na dva typy elektrostatické a elektrodynamické jinak také nazývané elektromagnetické. [3]

Protože zrychlení nevychází z velkého špičkového zrychlení ale z postupného urychlování a může se využít elipsoidních tvarů čím lze uvažovat, že maximální potencionální dráha pro zrychlování, při zanedbání odstředivých sil je nekonečně dlouhá. [4]

Mají široké uplatnění ať u ve výzkumu částicové fyziky, kde je využívají například při potvrzování hypotéz fyziků v lékařství při částicové terapii kdy přesně řízený paprsek protonů, elektronů, nebo neutronů je použit na léčbu rakoviny nebo také při tvorbě polovodičů kdy ionty jednoho materiálu jsou vystřeleny do jiného materiálu a tím jsou změněny jeho vlastnosti. [4]



Obrázek 1: Elektromagnety urychlovače částic [5]

### 1.1.1 Elektrostatické urychlovače částic

Elektrostatické urychlovače částic jsou starší a jejich uplatnění se zužuje, protože jejich efektivita oproti elektromagnetickým je menší. Avšak stále se s nimi můžeme setkat, protože jejich konstrukce a energetické nároky nejsou tak finančně náročné jako novější elektromagnetické. [3]

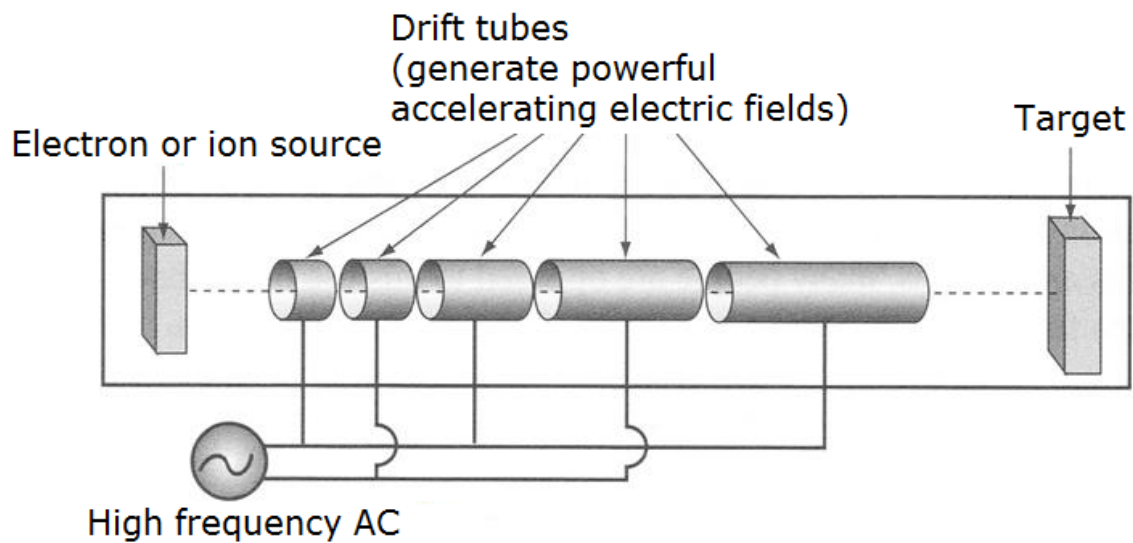
Jejich maximální urychlení je také omezeno velikostí napájecího napětí, které je omezené izolačními vlastnostmi celého zařízení. [3]

Příkladem elektrostatického urychlovače, který byl často používán je například CRT monitor, který využívá cívky pro ustálení a nasměrování elektronů na patřičnou souřadnici kde se následně díky fluorescenční substanci vzniklé elektromagnetické vlnění přemění na viditelné světlo.

### 1.1.2 Elektromagnetické urychlovače částic

Elektromagnetické urychlovače jsou v dnešní době častěji zmiňované. Využívají střídavého napětí pro maximalizaci efektivity tím, že polarita, které urychluje částici je vždy správně umístěná a nedochází tím k prostoji jako u elektrostatického při rozepnutí cívky. [4]

Asi nejznámější příklad v dnešní době je LHC umístěný v CERNu. Tento urychlovač je v současné době největší a využívá tekuté hélium a supravodiče, aby jeho výkon a efektivita byli co možná největší. Než se částice dostanou do LHC dochází k jejich postupnému urychlování v ostatních menších urychlovačích postupně se posouvající k většímu a většímu. Je to z důvodu že urychlovací segmenty nejsou po celém obvodu, proto, je potřeba aby částice měli dostatečnou počáteční rychlost, než dojde k jejich vypuštění do LHC. [4]



Obrázek 2: Diagram Elektromagnetického urychlovače částic [6]

## 1.2 Gaussova puška

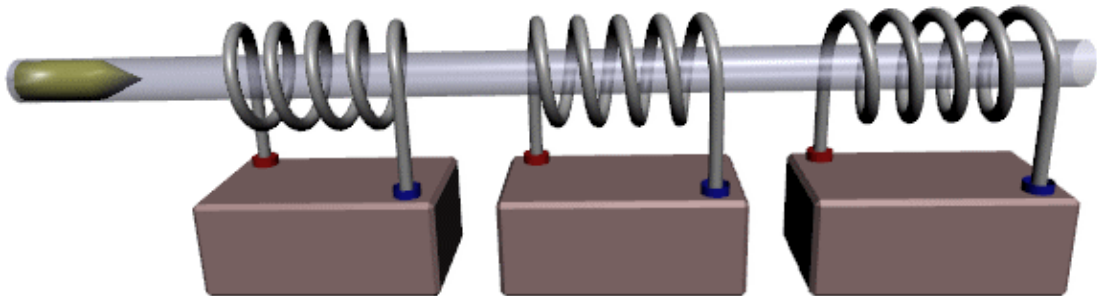
Pokud urychlovače částic jsou nejběžnějším příkladem na akademické půdě Gaussova puška je nejběžnější příklad kdy si lidé uvědomují, jak probíhá zrychlení v široké veřejnosti. Tomu všemu dopomáhá jejich hojné využití v herním průmyslu, jako způsobu přinesení futurismu to sci-fi příběhů.

Přes to že princip ve srovnání s urychlovačem částic je zde velmi podobný liší se tady několik parametrů. Těmito parametry je velikost urychlovaného předmětu délka dráhy, po které dochází k urychlení napájecí zdroj a samotná velikost zařízení.

Urychlované předměty jsou obecně větší minimálně v řádech milimetrů maximálně v řádech metrů. Materiál, ze kterého jsou tvořeny je obvykle feromagnetický kov nebo permanentní magnet.

Samotný předmět pak prochází středem cívky, která pokud je spínaná se správným načasováním působí na předmět Lorentzovou silou a tím ho přivádí k pohybu. Nejjednodušší Gaussovy pušky jsou tvořeny jedním solenoidem, kterého však účinná urychlovací dráha je pouze polovina jeho délky. [7], [8], [9]

Moderní zařízení využívá několik ideálně vícevrstevných cívek, které jsou postupně spínány, jak předmět cestuje. Zvyšuje se tím efektivita celého zařízení na úkor nutnosti správně načasovat spínání jednotlivých cívek. [7]



Obrázek 3: Grafická ukázka vícestupňové Gaussovy pušky [10]

### 1.2.1 Způsob napájení

Způsob napájení u Gaussových pušek je různý, protože u Gaussových pušek, které mají využívat vysokých výkonů je potřeba velký proud a napětí často se využívá vysokokapacitních kondenzátorů které jsou napájené zdrojem spolu s nabíjecím obvodem. Veškerý náboj je následně s dokonalým načasováním vypuštěný do urychlovacích segmentů. [7], [8], [9]

Další možnou variantou napájení je využití lithiových baterií, které mají velký vybíjecí proud tyto baterie pak v kombinaci se měniči napětí, které jsou dimenzované pro vysoké výkony je možné využít jako napájecí prvek.

Velikost proudu se přímo odvíjí od velikosti zařízení řádově desítky až stovky ampér u menších zařízení nebo klidně i desítkách tisíc v případě větších zařízení jako tomu je u návrhu od NASA. [7], [8]

### 1.2.2 Spínání segmentů

Jak bylo výše uvedeno jednotlivé segmenty musí být spínané v daném pořadí, aby bylo dosaženo maximální efektivity. Co si ovšem lidé často neuvědomují je fakt, že protože dochází k jednotlivému spínání je možné přímo kontrolovat výstupní rychlost urychlovaného tělesa od minimální rychlosti až po maximální kterou daná konstrukce zařízení dovoluje. Během konstruování jednotlivých Gaussových pušek vznikají různé provedení a také různé typy spínání. Například ve článku od Basukiho Winarma a jeho týmu

byl použit Genetický Algoritmus což je heuristický způsob, který má docílit největší možné efektivity s jejich zařízením. [7], [9]

### 1.2.3 Využití Gaussovi pušky

Své uplatnění si Gaussova puška našla v raketovém i zbraňovém průmyslu. Protože odpadá nutnost jakéhokoliv pevného nebo kapalného paliva moderní průmysl tato technologie začala zajímat. Schopnost odpálit raketu vysokou rychlostí bez toho, aby musela využít její vlastní palivo by odemknula nové možnosti v doletu. Stejně tak ve zbraňovém průmyslu, pokud projektil nemá žádné palivo umožňuje jeho levnější výrobu. [7]

## 1.3 Iontové motory

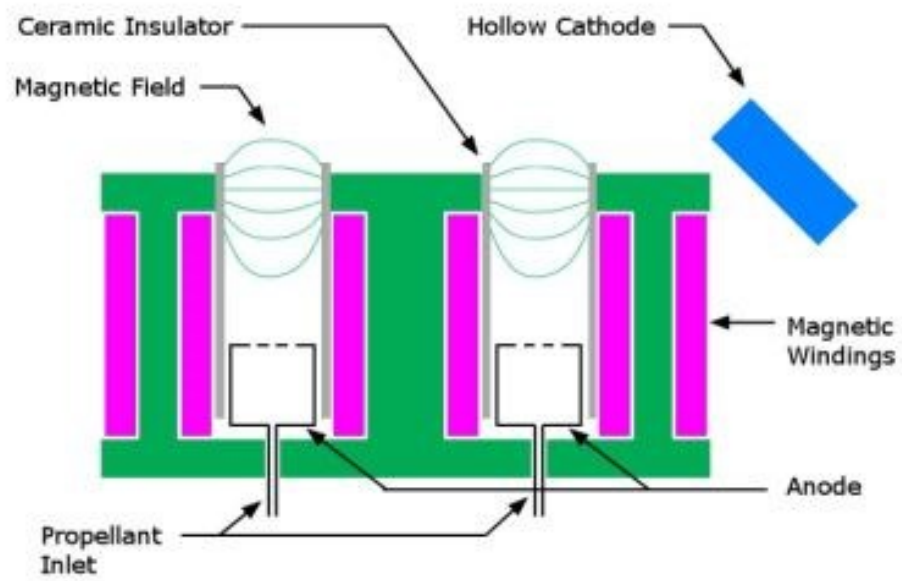
Iontový motor je typ motoru využívaného ve vesmírném průmyslu jako zdroj tahu nevyužívá chemické hoření, které zejména ve vesmíru je problematické z nutnosti umístit okysličovadlo, aby vůbec k hoření mohlo dojít. Iontový motor využívá vzácné plyny, které jsou ionizovány a ionizované částice jsou následně urychlovány. Přesný způsob urychlení se liší podle typu motoru. [1]

Přesto že tah tohoto typu motorů je velmi malý ve srovnání s ostatními motory jeho efektivita spočívá právě v čase je totiž schopný pracovat po dlouho vzdálenosti nepřetržitě a tím lineárně zvedat rychlost. NASA uvádí že její NEXT motor má až dvanáctkrát větší účinnost jak motory fungující na bázi chemického hoření. [11]

### 1.3.1 Hallův motor

Hallův motor je typ Iontového motoru, který je klasifikovaný jako elektrostatický i elektromagnetický. Přesto že Ionty jsou urychlovány elektrostatickým polem toto pole je do značné míry generováno interakcí plazmy s vířivým magnetickým polem. Jako palivo je zde použit Xenon, který je zvolen kvůli velké molekulové hmotnosti ale také nízkému ionizačnímu potenciálu. [12]

Radiální magnetické pole zde slouží k vytvoření rychle cirkulujícímu proudu elektronů kolem osy motoru. Skrze otvory v anodě motoru dochází k přivedení palivo do tohoto proudu elektronů, kde dochází ke srážce ionizaci atomu Xenonu. Ionty jsou urychleny elektrickým polem mezi anodou a katodou čím jsou vystřeleny vysokou rychlostí z motoru ven. Musí se však dbát na to, aby při výstupu kladně nabitých iontů z motoru odcházelo i stejné množství elektronů a výstupní plazma tak bylo elektricky neutrální.[12]



Obrázek 4: Grafický diagram Hallova Iontového motoru [12]



## 2 POUŽITÉ FYZIKÁLNÍ PRINCIPY

Při návrhu způsobu akcelerování magnetickým polem i při samotném akcelerování je využita celá škála fyzikálních principů ať už je to kinematika a mechanika pro výpočet rychlosti a energie tak magnetického pole které vytváří cívka, jež prochází proud.

### 2.1 Indukčnost

Indukčnost kvantitativně vyjadřuje schopnost elektrického prvku vytvářet magnetické pole. Je definována jako poměr magnetického indukčního toku a elektrického proudu a její jednotkou je Henry podle Josepha Henryho. Jedná se o jeden z nejzákladnějších údajů uváděných na cívkách. [13]

$$L = \frac{\Phi_B}{I} [H, Wb, A] \quad (3)$$

Kde L značí vlastní indukčnost cívky její jednotkou je Henry.  $\Phi$  značí magnetický indukční tok kde její jednotkou je Weber. Nakonec velké I značí proud s jednotkou Ampér.

Indukčnost se dá dělit na dva základní typy stacionární a dynamickou. Dynamická indukčnost je indukčnost při využití střídavého proudu jako napájení. V takovém případě neudává pouze schopnost vytvářet magnetické pole ale také elektrické pole a změnou dvou polí indukovat elektrické napětí, jak definoval Michael Faraday. [13]

$$d\Phi_B = B \cdot dS [Wb, T, m^2] \quad (4)$$

Stejně jako v rovnici předchozí,  $\Phi$  značí magnetický indukční tok s jednotkou Weber. Velké B je značení veličiny magnetické indukce její jednotkou je Tesla a plochu reprezentuje velké S s jednotkou metr čtvereční. Celá rovnice je pak derivace magnetického indukčního toku, podle plochy.

#### 2.1.1 Indukčnost Solenoidu

Protože indukčnost je hlavní veličina pro cívku musejí existovat způsoby výpočtu indukčnosti právě těchto prvků. Asi nejzákladnější je pak výpočet indukčnosti solenoidu tedy cívky, které délka je výrazně větší jak její šířka. Díky jeho geometrické konfiguraci lze uvažovat že magnetické siločáry jsou rovnoběžné s osou solenoidu a magnetické pole je téměř dokonale homogenní. [13]

$$B = \frac{\mu NI}{l} [T, Hm^{-1}, -, A, m] \quad (5)$$

Matematický popis magnetického pole uvnitř solenoidu se skládá ze součinu permeability jádra  $\mu$ , počtu závitů  $N$  protékajícího proudu  $I$  a převrácené hodnoty délky solenoidu  $l$ .

Pokud obecná rovnice indukčního toku reprezentuje indukční tok celého solenoidu rozdělením na sumu podle závitů vznikne rovnice popisující indukční tok součtu jednotlivých závitů. Protože solenoid má všechny závity stejné lze pak rovnici přepsat do tvaru  $N$ -násobek indukčního toku jednoho závitu. Když za  $B$  je dosazena rovnice pro výpočet magnetického pole po několika úpravách je zřejmé při srovnání s obecnou rovnicí pro výpočet magnetického indukčního toku, že indukčnost je reprezentována právě výsledným zlomkem. [13]

$$\Phi_B = \sum_{i=1}^N (BS)_i = NBS [Wb, -, T, m^2] \quad (6)$$

$$\Phi_B = N \frac{\mu NI}{l} S = \frac{\mu N^2 S}{l} I [Wb, Hm^{-1}, -, m^2, m, A] \quad (7)$$

$$\Phi_B = LI [Wb, H, A] \quad (8)$$

$$L = \frac{\mu N^2 S}{l} [H, Hm^{-1}, -, m^2, m] \quad (9)$$

Tento vzorec ovšem funguje pouze v případě, že jsou splněny podmínky pro nazývání cívky solenoidem.

### 2.1.2 Empirické výpočty vícevrstvých cívek

V praxi asi nejpoužívanější typ cívek cívky vícevrstvé ve zjednodušené formě se jedná o sériově zapojené cívky s postupně zvětšujícím se průměrem naskládané na sebe. Obvykle se jedná o stejný počet závitů na vrstvu.

Empirické rovnice se využívají pro výpočet úzce specifikovaných typů vícevrstvých cívek. Pro využití těchto vzorců cívky musí splňovat správné parametry jako je například poměr šířky s délkou. Pokud se tento poměr liší tak vzniká nepřímá úměra čím větší rozdíl tím menší přesnost výpočtu. Tyto vzorce obsahují koeficienty, které stanovili lidé, kteří tyto rovnice napsali. Jedna z nejběžnějších empirických rovnic je od J. H. Wheelera který definoval rovnici pro výpočet cívky u které se rovnají tři parametry. Poloměr cívky, poloměr vinutí a délka samotné cívky. Rovnice byla upravena, aby odpovídala výpočtům při zadávání milimetrů, nikoliv palců. A výsledná hodnota vycházela v mH. [14]

$$c = r_{coil} - r_{core} [mm] \quad (10)$$

$$r = \frac{c}{2} + r_{core} [mm] \quad (11)$$

$$L \cong (2 * 10^{-5}) * \frac{r^2 * n^2}{6r + 9l + 10c} [mH, mm, -, mm, mm, mm] \quad (12)$$

$r \approx l \approx c$

### 2.1.3 Numerická metoda pro výpočet indukčnosti

Díky výpočetnímu výkonu dnešní doby empirické způsoby výpočtů se přesouvají pomalu do pozadí a složí spíše k prvotnímu ověření parametrů. Pro kvalitní výpočty indukčnosti cívky se využívá rovnic, které nejsou omezené podmínkami přesných parametrů, ale jsou složité na výpočet analyticky.

Využívá se rovnice popisující vzájemnou indukčnost dvou kruhů, kterou definoval J. C. Maxwell. Jak z názvu vyplývá jedná se o rovnici, která integrálně počítá indukčnost dvou kruhů. [15]

$$M = -4\pi\sqrt{r_1 r_2} \left[ \left( k - \frac{2}{k} \right) K(k) + \frac{2}{k} E(k) \right] [H, m, m, -] \quad (13)$$

Kde  $k$  je:

$$k = \frac{2\sqrt{r_1 r_2}}{\sqrt{(r_1 + r_2)^2 + x^2}} [-, m, m, m] \quad (14)$$

V těchto rovnicích  $r_1$  a  $r_2$  reprezentují poloměry právě dvou kruhů a  $K(k)$  a  $E(k)$  jsou úplnými eliptickými integrály. Parametr  $x$  označuje jejich osovou vzdálenost.

Tato Maxwellova rovnice ovšem platila pouze v případě, že kruhy nebyly blízko u sebe. Což se v praxi nedá použít pro výpočet indukčnosti cívky kdy jsou kruhy od sebe často vzdálené pouze na vzdálenost dvojnásobku lakové izolace. Maxwell tedy odvodil druhou rovnici, která tento problém řeší. A protože nám rovnice dovoluje následně indukčnosti sčítat můžeme pomocí vhodného algoritmu spočítat všechny vzájemné kruhy v cívce. [15]

$$M = 8\pi \frac{\sqrt{r_1 r_2}}{\sqrt{k_1}} [K(k_1) - E(k_1)] [H, m, m, -] \quad (15)$$

Kde  $k_1$  je:

$$k_1 = \frac{x_1 - x_2}{x_1 + x_2} [-, m] \quad (16)$$

Kde  $x_1$  a  $x_2$  jsou:

$$x_{1,2} = \sqrt{(r_1 \pm r_2)^2 + x^2} [m] \quad (17)$$

Parametry zůstávají pospány stejně jako u předchozí rovnice.

Optimalizovanou numerickou metodu popsal L. V. King ve svém článku, kde výpočet zjednodušil a zrychlil. Po sérii úprav se dostal k finálnímu vzorci, který je v hodný pro využití v programování. [16]

$$M = \frac{2\pi^2}{a} \sum_{n=1}^{\infty} 2^{n-1} c_n^2 [H, m, -] \quad (18)$$

King pro tuto rovnici stanovil, také výpočet parametru  $c$  a s ním související výpočet dalších dvou parametrů. [16]

$$\left. \begin{array}{lll} a_0 = x_1 & b_0 = x_2 & c_0 = a_0 - b_0 \\ a_1 = \frac{1}{2}(a_0 + b_0) & b_1 = \sqrt{b_0 a_0} & c_1 = a_1 - b_1 \\ \dots & \dots & \dots \\ a_n = \frac{1}{2}(a_{n-1} + b_{n-1}) & b_n = \sqrt{b_{n-1} a_{n-1}} & c_n = a_n - b_n \end{array} \right\} \quad (19)$$

K tomu, aby tato numerická metoda byla možná naprogramovat je nutné stavit výstupní podmínku z opakujícího se cyklu. Při sledování přírůstků lze pozorovat, že hodnota  $c_n$  bývá větší než hodnota  $c_{n-1}$  z toho důvodu, toto bude sloužit jako výstupní podmínka. V momentě, kdy je tato podmínka naplněna tedy nová hodnota  $c$  je menší, než stará hodnota  $c$  cyklus se ukončí.

$$c_n < c_{n-1} \quad (20)$$

Tímto byl stanovený postup pro výpočet indukčnosti dvou blízkých kruhů. Tento postup už stačí pouze správně zapsat do cyklu, aby byly spočítány veškeré vzájemné indukčnosti v cívce.

## 2.2 Lorentzova síla

Lorentzova síla jde pojmout dvěma způsoby obecný způsob je takový kdy hovoří o síle která vzniká působením jak magnetickou silou, tak elektrostatickou silou. Často se však uvádí tvrzení, kdy Lorentzova síla popisuje pouze sílu magnetickou. Podle dvou následujících rovnic lze vidět že se nejedná o úplně špatné tvrzení a také v případě této práce budeme používat pouze pohled na magnetickou složku této síly.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} [N, C, NC^{-1}, C, ms^{-1}, T] \quad (21)$$

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} [N, C, ms^{-1}] \quad (22)$$

Zatím co první rovnice je úplný vektorový zápis rovnice pro výpočet Lorentzovi síly rovnice spodní slouží k výpočtu pouze magnetické síly. Protože v tomto případě se jedná o urychlování předmětů magnetickým polem pozornost bude věnována pouze magnetické složce síly. [17]

Rovnice popisuje sílu, kterou magnetické pole s indukcí o velikosti B působí na náboj q pohybující se rychlostí v. Při aplikaci pravidla pravé ruky je zřejmé, že v případě cívky Lorentzova síla bude působit ve směru středové osy cívky. [17]

### 2.3 Mechanická práce

Mechanická práce je fyzikální veličina, která popisuje, jak velkou energii těleso dostalo, pokud na něj bylo působeno silou po určité dráze. [18]

$$W = \int F dS [J, N, m^2] \quad (23)$$

Z výše uvedené rovnice jde vidět, že se jedná o integrálu pro případ, že se nejedná o stejně velké působení síly po celé dráze. To je i případ při urychlování magnetickým polem. Ale protože během simulací dochází k posunu tělesa o pevně danou vzdálenost lze při dostatečně malém kroku posunu uvažovat, že nedochází ke změně velikosti působící síly potom integrálu nahradí suma.

$$W = \sum_{x=0}^n F_x * S [J, N, m^2] \quad (24)$$

Tento tvar rovnice platí pouze v případě že dráha S, o kterou se těleso posune je v každém kroku stejná. Výsledná práce je pak součet všech prací v průběhu pohybu a získaný součet je pak energie tělesa na konci dráhy.

Protože experimentálně bude měřena rychlost optickou metodou. Bude změřena rychlost tělesa. Z rychlosti, kterou těleso na konci dráhy bude mít lze vypočítat energie pomocí úpravy rovnice na výpočet kinetické energie. Je nutné však předpokládat že nedocházelo ke zpomalení způsobené třením nebo jinými externími vlivy. [18]

$$W = \frac{1}{2}mv^2 [J, Kg, \frac{m}{s}] \quad (25)$$

$$v = \sqrt{\frac{2W}{m}} \left[ \frac{m}{s}, J, Kg \right] \quad (26)$$

Protože tato rovnice je aplikovatelná na kteroukoliv polohu v průběhu pohybu tělesa lze vytvořit také grafické znázornění nárůstu jak kinetické energie, tak rychlosti pohybu.

## 2.4 Výpočet času

Naprosto kritickou součástí při realizaci zařízení pro akceleraci těles magnetickým polem je správné načasování. A protože rychlost tělesa neroste lineárně bude nutné použít všechny známé veličiny. Protože rychlost rovnoměrně zrychleného tělesa s jistou počáteční rychlostí lze získat pomocí základní rovnice z kinematiky a sílu kterou na těleso působíme v daném bodě známe ze simulací lze kinematickou rovnici upravit následovně. [18]

$$v = v_0 + at \quad [ms^{-1}, ms^{-1}, ms^{-2}, s] \quad (27)$$

$$t = \frac{v - v_0}{a} \quad [s, ms^{-1}, ms^{-1}, ms^{-2}] \quad (28)$$

$$t = \frac{v - v_0}{\frac{F}{m}} \quad [s, ms^{-1}, ms^{-1}, N, Kg] \quad (29)$$

$$t = \frac{m(v - v_0)}{F} \quad [s, Kg, ms^{-1}, ms^{-1}, N] \quad (30)$$

Kde tedy celkový čas po dobu, kterou bylo těleso urychlováno je následně stanovenou sumou všech časů v jednotlivých krocích. Díky této sumě je možné pomocí simulací přesně načasovat spínání jednotlivých segmentů zařízení pro urychlování předmětů s pouze malými změnami jako kompenzací za tření vzniklé během pohybu.

### 3 NÁVRH ZPŮSOBU AKCELERACE PŘEDMĚTŮ

Tato kapitola bude věnována, návrhu cívek a výběru spínacích a ovládacích prvků. Ovládání bude prováděno pomocí mikropočítače Arduino, který bude pomocí pulzně šířkových výstupů spínat MOSFET tranzistory.

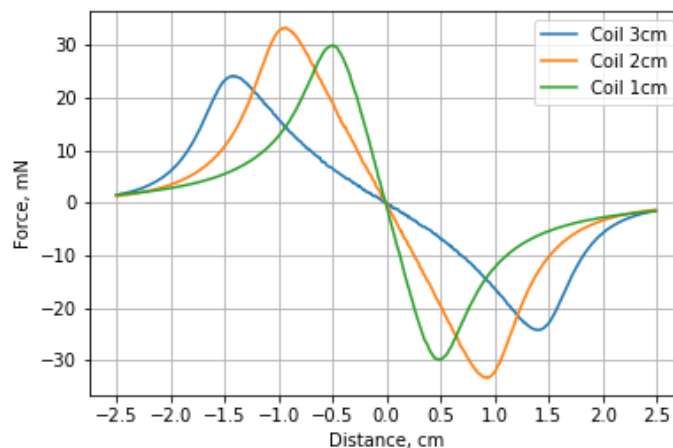
#### 3.1 Rozměry urychlovací cívky

Cívka produkující magnetické pole je bezpochyby nejdůležitější prvek celého návrhu. Protože velikost tělesa bude konstantních půl centimetr v průměru, které urychlováno ve funkčním vzorku lze počítat s konstantním vnitřním průměrem cívky šest milimetrů půl milimetru po celém obvodu jako tolerance pro tloušťku hlavně. Pro zjištění přijatelných rozměrů jsou potřeba další konstanty. Uvažován bude konstantní proud o velikosti 1 A počet závitů 1700 a aktivní průřez cívky 9 cm<sup>2</sup> aktivní průřez ve smyslu část celkového průřezu kudy prochází drát.

$$F = qv \times B [N, C, T] \quad (31)$$

Následujícím grafu lze vidět efektivitu jednotlivých cívek z pohledu působení Lorentzovi síly. Ale také lze že je cívka schopná zrychlovat pouze v polovině své délky, než dojde k obrácení polarity. Rozměry testovaných cívek byly následující:

- 3 x 3,5 cm
- 2 x 5 cm
- 1 x 9,5 cm



Obrázek 5: Silový průběh vzorových cívek

### 3.2 Výpočet skutečných hodnot cívky

Podle grafu lze sledovat, že cívka s délkou dva centimetry poskytuje největší špičkovou sílu, ale také pokrývá značnou část plochy. Proto pro účely experimentu bude zvolena cívka právě s těmito rozměry. Následujícími kroky bude výpočet průměru drátu vlastní indukčnost cívky její odpor a celkovou délku vodiče potřebného k navinutí. Nakonec maximálního možného proudového zatížení cívky.

#### 3.2.1 Průměr drátu

Pokud je uvažován průřez cívky  $9 \text{ cm}^2$  a počet závitů na 1700 tak zjištění průřezu drátu je o jednoduché geometrii. Když předpokládáme že dráty jsou dokonale na sebe naskládány, a to povede k zaplnění průřezu cívky drátem, asi na 80 %.

$$S = \frac{0,8 * \frac{S_c}{2}}{n} \text{ [mm}^2, \text{mm}^2, -] \quad (32)$$

$$S = \frac{0,8 * 450}{1700} = 0,212 \text{ mm}^2 \quad (33)$$

$$d = 2 * \sqrt{\frac{S}{\pi}} \text{ [mm, mm}^2] \quad (34)$$

$$d = 2 * \sqrt{\frac{0,212}{\pi}} = 0,52 \text{ mm} \quad (35)$$

Vyšel drát s průměrem 0,52. Díky zaplnění 80 %, tedy velmi rovnoměrnému rozložení drátů lze tedy předpokládat že výsledný drát bude o něco menší a tuto hodnotu je možné zaokrouhlit na 0,5 mm. Protože drát se obalený v izolaci tvořené polyuretanovým lakem je nutné tento lak odečíst od průměru vodiče. Přičemž běžná tloušťka lakové izolace je přibližně 8 až 10 % celkového průměru. Samotná měděná složka drátu bude tedy mít přibližně 0,459 mm.

#### 3.2.2 Indukčnost cívky

Pro výpočet vícevrstvé cívky bohužel není možné použít jednoduchý empirický vzorec jaký se používá pro výpočet solenoidu tedy jednovrstvé cívky s délkou výrazně větší jak výškou. Což v případě, kdy máme výšku výrazně větší nemůže fungovat.

Jeden empirický vzorec, který může nastínit, indukčnost cívky vytvořil H. A. Wheeler. [14]



- $c$  – výška vinutí
- $r$  – poloměr vinutí
- $l$  – délka vinutí
- $n$  – počet závitů

$$c = r_{coil} - r_{winding} [mm] \quad (36)$$

$$r = \frac{c}{2} + r_{core} [mm] \quad (37)$$

$$L \cong 0,02 * \frac{r^2 * n^2}{6r + 9l + 10c} [mH, mm, -, mm, mm, mm] \quad (38)$$

$$r \approx l \approx c$$

$$L \cong 0,02 * \frac{13,75^2 * 1700^2}{6 * 13,75 + 9 * 20 + 10 * 22,5} = 22,1 mH \quad (39)$$

Podle podmínek, které Wheeler určil pro empirický vzorec je viditelné, že přesnost výpočtu bude velmi malá. Proto s využitím numerické metody pro výpočet indukčnosti dvou kruhů, která vychází z Maxwellovi rovnice bude výsledná hodnota nahrazena hodnotou přesnou. [14], [15]

$$L = 35,6 mH \quad (40)$$

### 3.2.3 Celková délka drátu

Aby bylo možné cívku navinout je potřeba znát délku drátu pro přesný výpočet by bylo nutné spočítat délku kabelu pro jednotlivé vrstvy které cívka bude mít. To je časově náročné, avšak v dnešní době žádný velký problém s využitím počítače.

Podle jednoduchého cyklu, který předpokládá že každá vrstva se skládá ze 40 kruhů a je celkem 45 vrstev bylo zjištěné že na navinutí cívky bude potřeba přibližně 155 metrů drátu.

```
def CableLenght(pVrstev,prurezVodice,prurezCivky,delka):
    from math import pi
    otackyNaVrstvu = delka/prurezVodice
    startingPoint = (prurezCivky+prurezVodice)/2
    Lenght = float()
    for i in range(pVrstev):
        Lenght += 2*pi*startingPoint*otackyNaVrstvu
        startingPoint += prurezVodice
    return Lenght
```

Obrázek 6: Kód pro výpočet délky kabelu vícevrstvé cívky

Tento cyklus přepsaný do matematické rovnice čímž vznikne jednoduchý a reprodukovatelný proces, který lze používat nejen při znalosti programovacího jazyka Python. Nutno však podotknout že tento způsob výpočtu délky kabelu je vhodný pouze pro cívky s kruhovými závity.

$$l = 2\pi \sum_{j=0}^{\frac{r_{winding}}{d_{cable}}} \sum_{i=0}^{\frac{l_{coil}}{d_{cable}}} r_j \text{ [m]} \quad (41)$$

Kde r je:

$$\left. \begin{aligned} r_0 &= r_{core} + r_{cable} \\ r_1 &= r_0 + d_{cable} \\ &\dots \\ r_n &= r_{n-1} + d_{cable} \end{aligned} \right\} \quad (42)$$

Pro srovnání při využití výpočtu délky kabelu vycházející ze střední délky poloměru navíjení tedy z hodnoty, která byla využita již při odhadování indukčnosti cívky empirickým vzorcem.

$$l = 2\pi r N \text{ [m, m, -]} \quad (43)$$

$$l = 2\pi * 0,01375 * 1700 = 146,8 \text{ m} \quad (44)$$

Při porovnání výsledků ze dvou způsobů výpočtu je možné pozorovat jisté rozdíly způsobené zejména faktem že využití střední hodnoty průměru na rozdíl od rovnice cyklické vede k chybě způsobené předpokladem, že se jedná o solenoid. Pro účely práce bude vycházeno z hodnoty vyšší tedy z hodnoty 155 metrů.

### 3.2.4 Odpor cívky

Díky znalosti celkové délky drátu, potřebného k navinutí jednotlivých cívek je možné zcela jednoduše spočítat odpor který bude cívka mít. K výpočtu odporu je potřeba také znalost konstanty, která odpovídá konduktivitě v případě cívek se tedy jedná o měď. A díky tomu následně zjistit, jak vysoké napětí je nutné cívce dodat, aby bylo dosaženo požadovaného proudu 1 A.[19]

$$R = \frac{l}{\sigma_{cu} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \text{ [\Omega, m, Sm}^{-1}, \text{m]} \quad (45)$$

Kde  $\sigma$  je konstanta odpovídající hodnotě  $5,8 \cdot 10^7$  S/m, l je celková délka drátu a d jeho průměr.

$$R = \frac{146,8}{5,8 * 10^7 * \pi \left(\frac{0,459}{2}\right)^2} = 16,2 \Omega \quad (46)$$

Na základě výpočtu velikosti odporu lze pomocí Ohmova zákona dopočítat, jak velké napětí cívka vyžaduje pro odběr proudu o velikosti jeden ampér. Protože se jedná o součin proudu a odporu lze tak určit že požadované minimální napětí zdroje musí být 16,2 voltu. Takové napětí získat s využitím laboratorního zdroje by neměl být žádný problém. Proto se můžeme přesunout k dalšímu kroku.

### 3.2.5 Tavný proud

Tavný proud je proud, který způsobuje zahřátí vodiče na takovou teplotu kdy dojde k jeho roztavení nebo spíše v případě malých průřezů k přepálení. Přes to že je téměř jisté že proud 1 A by neměl být příliš velká zátěž pro vodič je dobré to ověřit. Tavný proud je ovšem pouze orientační, protože u cívek dochází k velkému nahuštění vodičů na sebe a odvod tepla bez chlazení může komplikovat situaci, a proto hledáme rezervu větší. [19]

$$I_{tav} = m\sqrt{d^3} [A, -, mm] \quad (47)$$

Kde m je konstanta, pro měď je  $m = 80$

$$I_{tav} = 80\sqrt{0,459^3} = 24,88 A \quad (48)$$

Tavný proud téměř 25 A poskytuje více než dostačující rezervu a měl by dovolit cívku zatěžovat opakovaně po dlouhou dobu bez rizika jejího zničení z důvodu roztavení lakové izolace.

## 3.3 Metoda spínání jednotlivých cívek

Při spínání jednotlivých cívek několik parametrů lze označit za velmi důležité. Prvním parametrem je proudová zatížitelnost druhý parametr je rychlost spínání a rozpínání třetí je schopnost ovládat prvek nízkým napětím které produkuje deska Arduino a posledním parametrem je bezpečnost, protože Arduino je mikrokontroler nesmí do něj být přivedeno větší napětí nebo proud, než na jaký je stavěný jinak dojde k nevratnému poškození polovodičových součástek.

### 3.3.1 Reléové spínače

Reléový spínače jsou častý způsob, jak spínat obvody s vysokými proudy pomocí proudů malých. Zařízení s jednoduchou konstrukcí, kdy se jedná o kontakt ovládaný elektromagnetem v podobě malé cívky.

Relé jsou dobrý způsob spínání, protože galvanicky oddělují dva obvody a nehrozí tedy nežádoucí vnik napětí ze silového obvodu do obvodu ovládacího. Jejich nevýhodou je však rychlost rozpínání a spínání kontaktů. Jsou neuvěřitelně pomalé ve srovnání s polovodičovými prvky což může znemožnit přesné časování spínání jednotlivých segmentů. Další nevýhodou je možnost vzniku elektrického oblouku, protože se jedná o mechanický kontakt v případě rozepnutí může vzniknout elektrický oblouk který způsobí opalování kontaktů které tak mohou být zničeny nebo přechodový odpor zvýší potřebné napětí pro dosažení požadovaného výkonu. Poslední nevýhodou, která se vztahuje k předchozí je přesný opak, možnost slepení kontaktů a tím neschopnost obvod rozpojit.

Existují Solid State Relé, které neobsahují žádné pohyblivé části ani indukční zátěže. Bývá tvořeno například triakem, který představuje riziko v případě prorazení a hrozí zničení řídicího prvku. Jsou rychlejší než běžná relé a nehrozí u nich elektrický oblouk, ale jsou dražší než běžný reléový spínač.

### 3.3.2 Tranzistorové spínače

Nejčastěji používaný spínací prvek v případě že rychlost je hlavní parametr je v současné době tranzistor. Polovodičová součástka, která má minimální úbytek napětí a je snadno dostupná. Tranzistory můžeme základně dělit na bipolární které jsou řízené proudem tekoucím do báze a unipolární které jsou řízené napětím na řídicím vývodu nazývaným GATE unipolární tranzistory jsou tedy řízeny elektrostatickým polem.

Během zapojování tranzistorů jako spínacích prvků je důležité se rozhodnout o způsobu zapojení. Jednou variantou je zapojení, které se jmenuje „High-Side“ neboli zapojení kde tranzistor je umístěný mezi kladnou elektrodu napájecího zdroje a spínanou zátěž. Nebo zapojení pojmenované „Low-Side“ které je umístěné mezi spínanou zátěží a zápornou elektrodou napájecího zdroje.

Oba způsoby zapojení mají svá pro a svá proti. Výhodou „High-Side“ zapojení je že skutečně odpojuje zařízení od zdroje napětí a pokud by se zařízení dotkla část lidského těla nehrozilo by poranění elektrickým proudem. Nehodí se však tam kde jsou potřeba vysoké proudy,

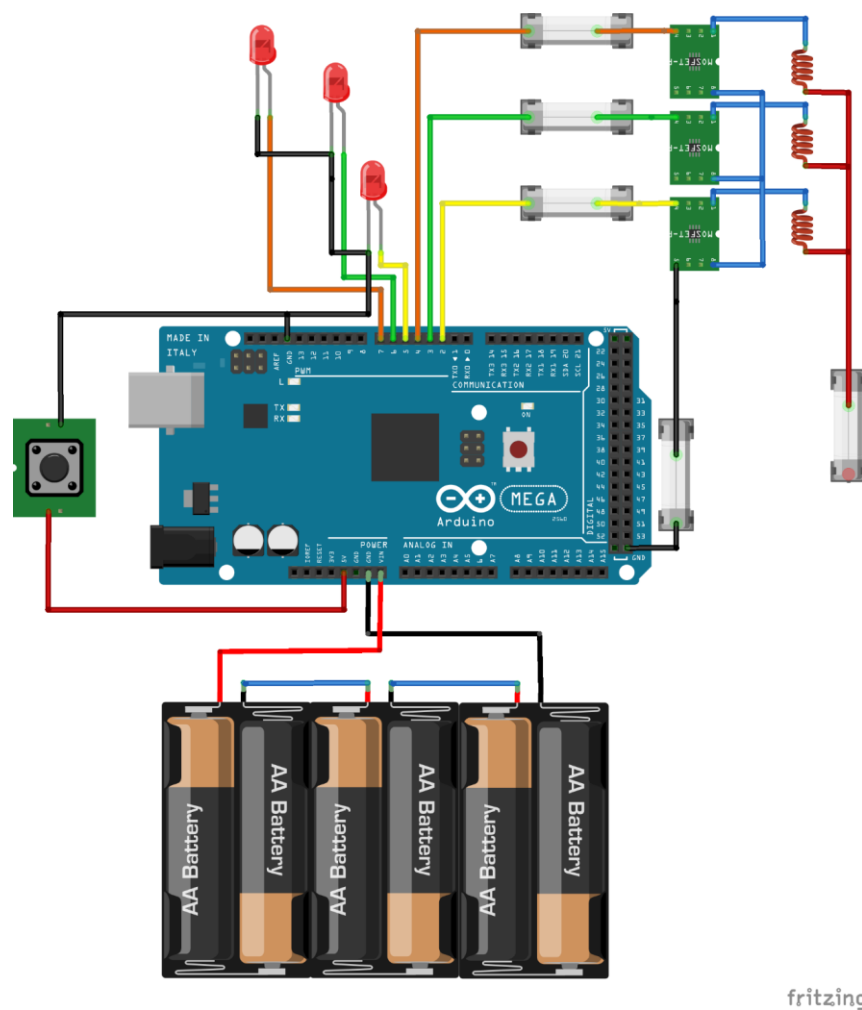
protože výkonové „High-Side“ tranzistory jsou často velmi nákladné a špatně se shánějí toto je způsobené tím, že „High-Side“ tranzistor musí být PNP které jsou obtížnější na výrobu a tedy nákladnější. „Low-Side“ způsob zapojení se tedy hodí tam kde vyžadujeme vysoké proudy a spínaná zátěž je dostatečně izolovaná od čehokoliv co by mohlo působit jako propojení se zemí.

Pro účely experimentu bude zvolený právě „Low-Side“ způsob zapojení. Tranzistor, pomocí kterého bude toto zapojení provedeno bude unipolární MOSFET. Tento typ unipolárního tranzistoru disponuje izolovanou GATE elektrodou což vede ke snížení rizika zničení řídicího prvku v případě průrazu tranzistoru. Výkonové varianty těchto MOSFETů jsou opatřeny také antiparalelně zapojenou diodou, která slouží jako ochrana při rozpínání indukčních zátěží, protože ty mají tendenci naindukovat špičkové napětí opačné polarity.

### 3.3.3 Zapojení platformy Arduino

Protože jednotlivé segmenty musí být sepnuty ve správném pořadí a ve velmi malém časovém okně s vysokou přesností musí tento proces být plně automatizovaný. Za tímto účelem je tedy vhodné využít mikrokontroler nebo jednodeskový počítač. Programovatelných mikrokontrolerů a jednodeskových počítačů je na trhu celá řada nejběžnější zástupci na trhu v současné době jsou mikrokontrolery Arduino a jednodeskové počítače Raspberry.

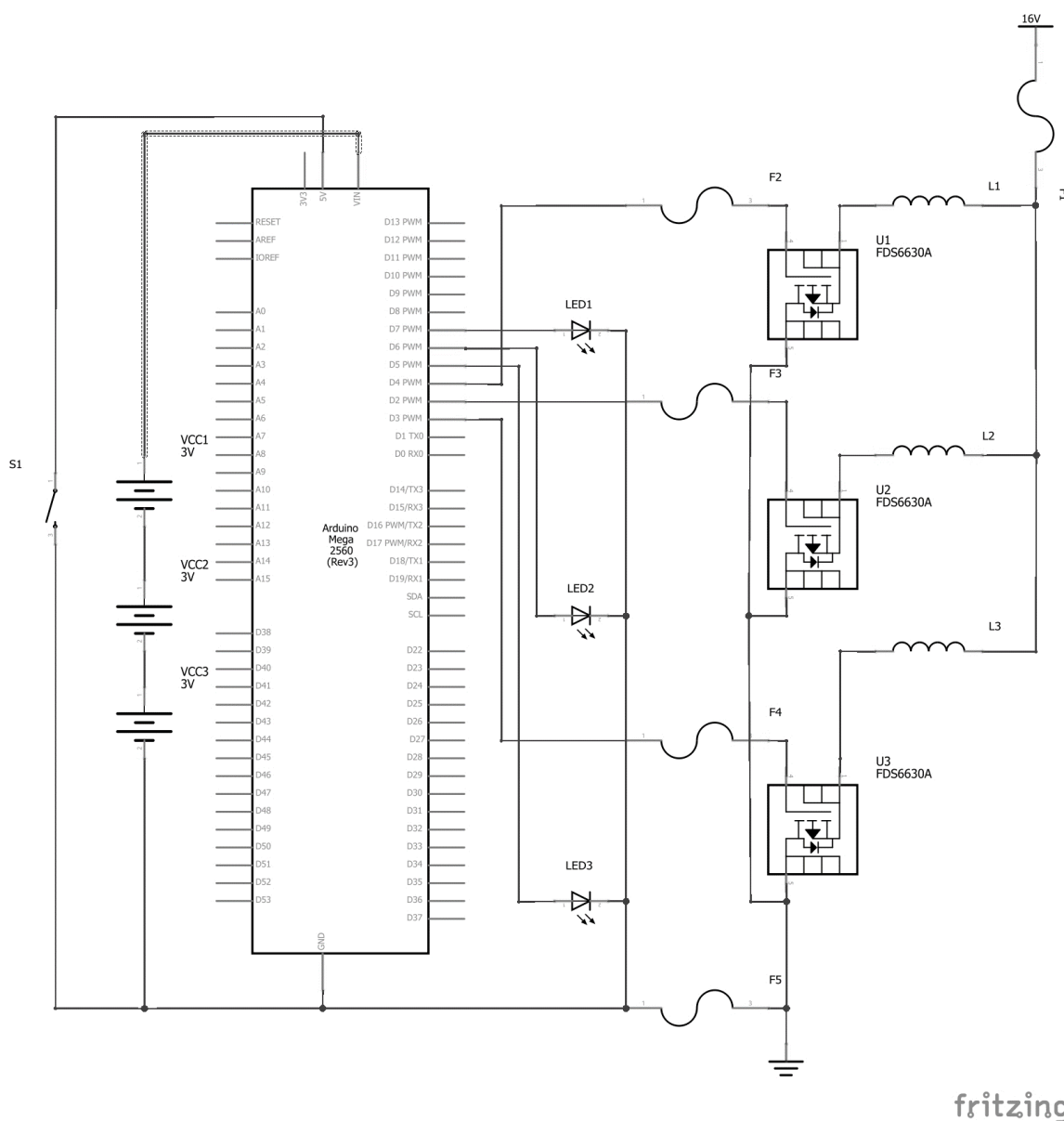
K základnímu zapojení experimentu je potřeba tlačítko pro spuštění, MOSFETy a samotné cívky. Ale protože pro testovací účely, před samotným připojením cívek je vhodné otestovat funkčnost pomocí LED diod poskytujících optickou odpověď, kde bude muset být minimálně desetkrát větší prodleva, aby jednotlivé kroky byly viditelné lidským okem.



Obrázek 7: Zapojení platformy Arduino

### 3.3.4 Elektrotechnické schéma zapojení celého návrhu

Schéma zapojení ukazuje primární propojení součástek a několika ochranných prvků které se budou nacházet v zařízení, pokud takto bude zapojeno. Protože se nejedná o galvanicky oddělený návrh musí být země Arduino propojena se zemí silového obvodu, a proto na dané linii nachází pojistka která slouží jako ochrana řídicího prvku proti poškození v případě, že by část silového proudu byla uzemněna skrze řídicí prvek.

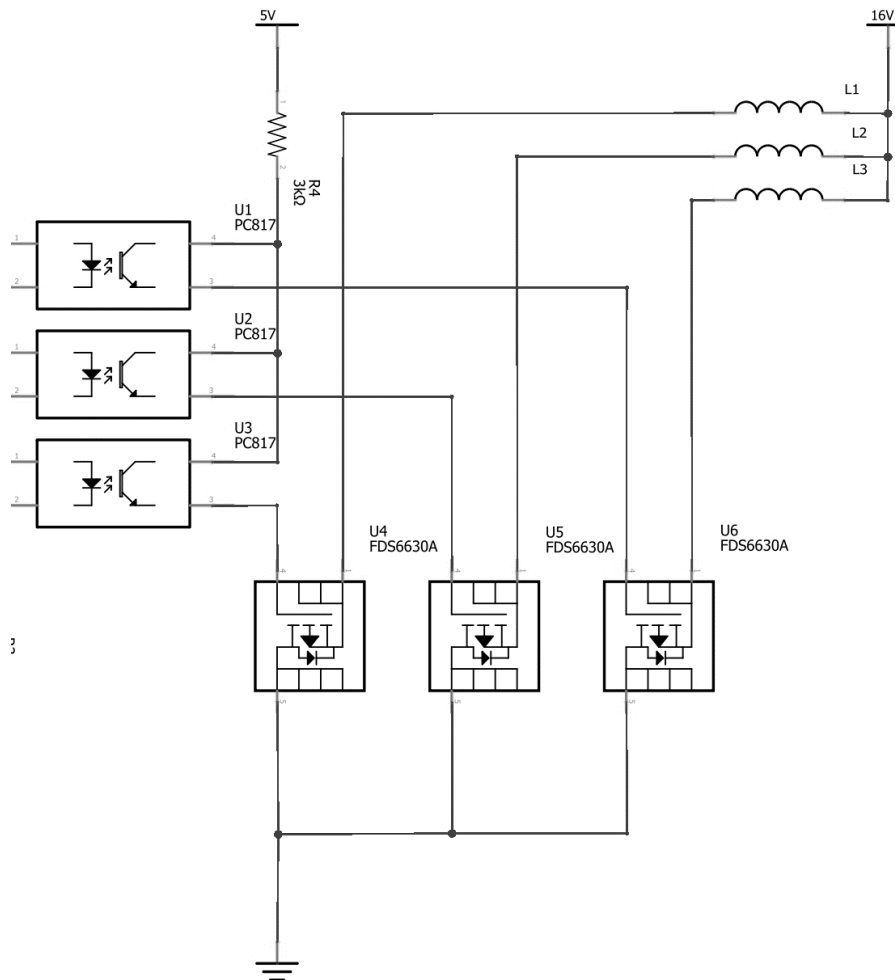


Obrázek 8: Elektrotechnické schéma zapojení

Protože dochází k uzemnění obvodu na dvou místech každé z nich má rozdílný potenciál a část proudu která vychází z MOSFETu je z GATE konektoru mohla by se na řídicí prvek dostat parazitní napěťová špička která nenávratně poškodí jeho citlivou polovodičovou strukturu.

Jedná se totiž o galvanickou vazbu, která v závislosti na době sepnutí MOSFETu na velikosti proudu a odporu vedení zemnicí části vedoucí k řídicímu prvku vysílá na jeho zemnicí vývod parazitní napětí. Protože už bylo zmíněno jde o rychlost spínání nemůžeme obvody galvanicky rozpojit reléovým obvodem. Proto jedinou schůdnou možností, jak galvanicky odpojit tyto prvky je použití optočlenu. V případě použití optočlenu pak jediná vazba, která

mezi nyní dvěma galvanicky rozpojenými obvody vzniká je vazba parazitní kapacitní vazba, k té ovšem dochází pouze v případě velkých kmitočtů. [21]



Obrázek 9: Návrh zapojení za optočleny

Na obrázku uvedeném výše lze vidět zapojení obsahující optočleny a jejich zapojení. Oproti předchozímu zapojení přibyl zdroj pěti voltů, které zajistí měnič, který umožní měnit napájecí napětí cívek ale udržet konstantní napětí pro ovládací spínače. Za normálních okolností by napětí MOSFETu přivedlo Arduino. To však není možné, protože řídicí prvek byl plně galvanicky oddělen právě pomocí optočlenu. Pokud by napětí přiváděné cívkám bylo konstantní v průběhu celého experimentu bylo by možné využít dělič napětí jako zdroj napětí pro sepnutí MOSFETů.

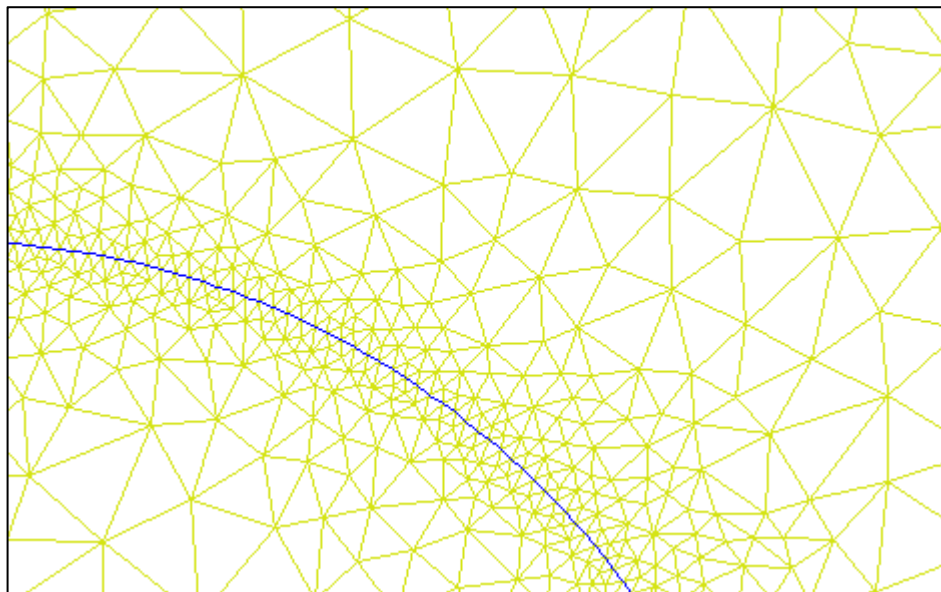


## **II. PRAKTICKÁ ČÁST**

## 4 SIMULACE POHYBU TĚLESA

Simulace slouží k prvotnímu ověření funkčnosti ale také k prověření různých možností bez riskování poškození nebo jinému znehodnocení fyzického návrhu. Pro simulování pohybu bude využita metoda konečných prvků, díky které lze sledovat silové působení cívky na těleso a díky této síle je možné následně spočítat v dané poloze aktuální energii rychlost tělesa ale také čas po který se těleso do daného momentu dostávalo. Což bude sloužit k správnému načasování sepnutí cívek.

Samotná metoda konečných prvků vychází z dělení spojitého prostoru na konečný počet prvků v tomto případě na trojúhelníky, které pospolu tvoří síť pokrývající celý simulovaný prostor. Velikost daného trojúhelníku závisí především na výpočetním výkonu, který je k dispozici menší trojúhelník znamená vyšší přesnost ale také vyšší výpočetní náročnost. Z toho důvodu některé simulační nástroje dovolují vytvořit „chytrou síť“ která pokud se blíží k hranici předmětu nebo prostoru zvýší hustotu trojúhelníku a tím obecně vylepší přesnost v nejkritičtějších bodech. [22]



Obrázek 10: Ukázka chytré sítě

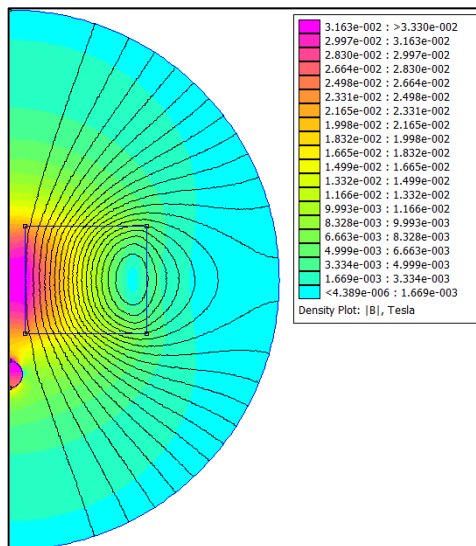
Na obrázku lze vidět ukázkou chytré sítě. Protože radiální hrana nemůže být přesně namapována při použití větších trojúhelníků algoritmus při tvorbě sítě rozhodl zvednout hustotu trojúhelníků v daném bodě, aby došlo ke zmapování prostoru bez poškození tvaru mapovaného prostoru. [22]

Analogicky by tedy šlo toto dělení přirovnat ke vzorkování spojitého signálu při převodu na signál digitální. Pouze v tomto případě je dělen prostor nebo jinak řečeno je vzorkovaný dvoudimensionální prostor.

## 4.1 Simulační nástroj

Pro simulace bude využita aplikace Finite Element Method Magnetics dále jen FEMM v kombinaci s programovacím jazykem Python pro tvorbu skriptů, které automatizují celý proces simulování. [22]

Aplikace FEMM byla vybrána, protože dovoluje tvorbu osově symetrických návrhů to znamená, že při tvorbě simulace je tvořena pouze polovina průřezu celého návrhu a ten je následně rotovaný. [22]



Obrázek 11: Ukázka vzhledu osově symetrického návrhu

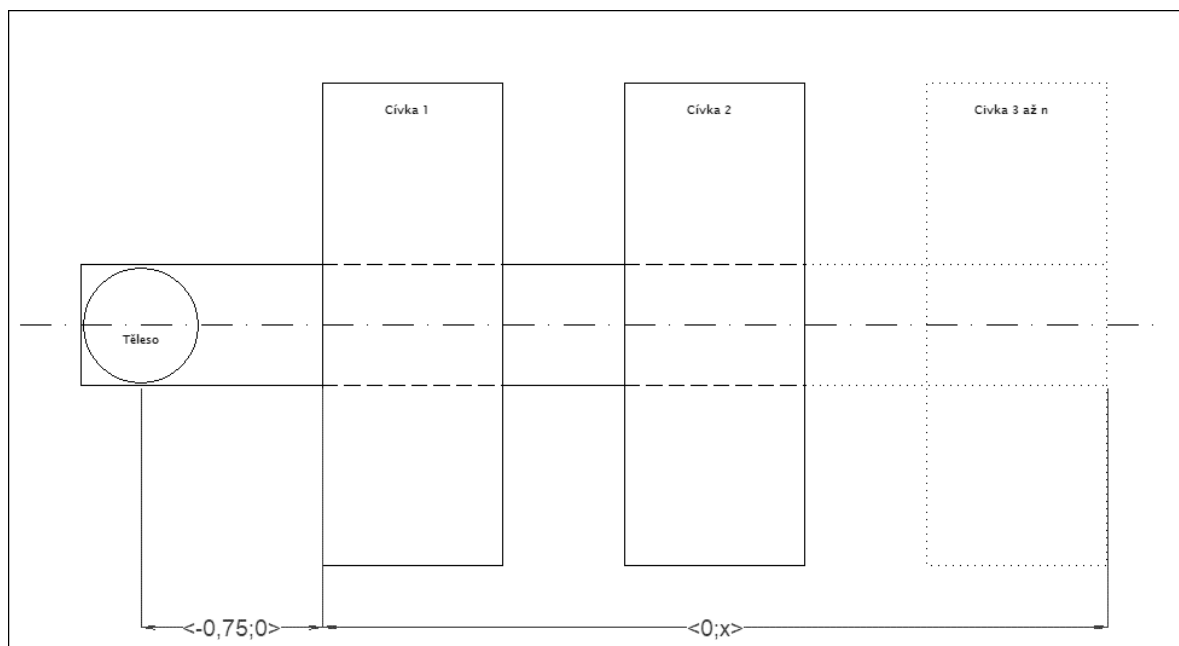
Původně dovoľovala aplikace pouze automatizování simulací pomocí Lua skriptů postupem vývoje ovšem došlo k vytvoření i knihoven pro jazyk Python, který je mnohem oblíbenější a mimo prosté vypisování síly působící na těleso v aktuálním kroku do konzole dokáže tuto hodnotu ukládat a dále s ní pracovat. [22]

## 4.2 Optimalizace návrhu

Optimalizace bude zaměřena především na vzdálenosti mezi cívkami a počtem daných cívek. Jako základní nastavení přitom bude postupné spínání cívek pro čtyři různé velikosti proudů. Jako pomocný nástroj pro predikování výsledků, které nebyly nasimulovány bude využita polynomiální interpolace.

Polynomiální interpolace byla zvolena z důvodu, že simulování pro větší množství možností je velmi časově náročné a v některých případech tato metoda může minimálně nastínit vývoj výsledků při změně daného parametru.

Váha tělesa byla stanovena na přibližně půl gramu a za předpokladu že se jedná o kouli s průměrem pět milimetrů a její materiál je z čistého železa. Veškeré uvedené tabulky a grafy, pokud nebylo stanoveno jinak vychází z dat nasimulovaných a uvedených v úplné podobě v přílohách práce.



Obrázek 12: Diagramový popis dráhy pohybu

Na obrázku je vyobrazený popis, jakým je znázorňována dráha. Dráha je tedy popisována s posunem do záporných čísel, a to proto že jako bod nula je považovaný bod začátku první cívky. Dráha pokračuje až po konec finálního segmentu.

$$x = ln + m(n - 1) \quad (49)$$

Rovnice slouží pro výpočet dráhy  $x$ , která se skládá počtu segmentů  $n$  a vzdálenosti mezi jednotlivými segmenty  $m$ . Délka jednoho segmentu je následně reprezentována pomocí proměnné  $l$  v prvním členu rovnice. Tato vzdálenost v našem případě jsou konstantní 2 centimetry. Protože veškeré proměnné mají základní jednotku metr. Při dosazování je nutné dosadit identické jednotky.

#### 4.2.1 Optimalizace vzdálenosti cívek

Jako kandidáti pro vzdálenost mezi cívkami byla zvolená minimální hodnota jednoho milimetru. Jeden milimetr byl zvolený jako minimální hodnota, protože při vyšších proudcích a možnostech spínat sousední cívky najednou je dobré používat izolační proklady které zabrání nechtěnému průrazu a tím zničení obou cívek. Porovnávány budou hodnoty pro dvě postupné spínané cívky. Proud, pro který budou tyto výsledky znázorněny je jeden ampér.

Tabulka 1: Vývoj energie a síly, vůči dráze a času pro 2 cívky

Dráha [cm]	1 mm			2 mm			4 mm		
	Síla [mN]	Energie [μJ]	Čas [ms]	Síla [mN]	Energie [μJ]	Čas [ms]	Síla [mN]	Energie [μJ]	Čas [ms]
-0,75	6,174	1,544	6,460	6,174	1,544	6,460	6,174	1,544	6,460
-0,50	10,982	22,929	20,556	10,982	22,929	20,556	10,982	22,929	20,556
-0,25	19,887	61,566	27,065	19,887	61,566	27,065	19,887	61,566	27,065
0,00	30,261	126,613	31,319	30,260	126,613	31,319	30,260	126,613	31,319
0,25	28,332	201,987	34,465	28,332	201,989	34,465	28,332	201,989	34,465
0,50	19,189	260,161	37,100	19,188	260,163	37,100	19,189	260,164	37,100
0,75	9,486	294,587	39,502	9,490	294,590	39,502	9,491	294,591	39,502
1,00	2,979	306,737	41,811	2,445	306,361	41,811	1,669	305,648	41,812
1,25	4,960	316,658	44,086	4,022	314,447	44,090	2,684	311,097	44,098
1,50	8,635	333,645	46,314	6,895	328,100	46,332	4,481	320,072	46,358
1,75	15,640	363,895	48,468	12,307	352,036	48,512	7,737	335,322	48,578
2,00	27,170	418,074	50,505	22,213	395,315	50,594	14,006	362,365	50,731
2,25	30,795	494,001	52,387	31,272	465,367	52,535	24,558	411,020	52,778
2,50	23,125	561,342	54,133	26,672	539,214	54,325	31,385	484,658	54,679
2,75	13,575	605,827	55,791	17,338	593,353	56,009	25,276	555,690	56,437
3,00	4,193	626,573	57,405	7,708	623,581	57,633	15,341	605,065	58,101
3,10	0,031	628,005	58,046	4,229	628,961	58,274	11,751	618,137	58,750
3,20	-	-	-	0,069	630,383	58,914	7,743	627,343	59,393
3,40	-	-	-	-	-	-	0,089	634,117	60,670

V tabulce je zobrazeno že dráha začíná v záporných hodnotách. To z toho důvodu že nulová dráha je počítána od momentu, kdy začala první cívka. Razantnější změna v hodnotách přišla až v prvním centimetru, a to z toho důvodu že v ten moment se těleso dostalo do středu cívky a začala na ni silou působit druhá cívka. Ve výstupní energii lze pozorovat minimální deviace. Fakt že se výstupní energie zvyšuje je způsobený tím, že zanedbáváme třecí sílu a těleso tak není ničím zpomalováno.

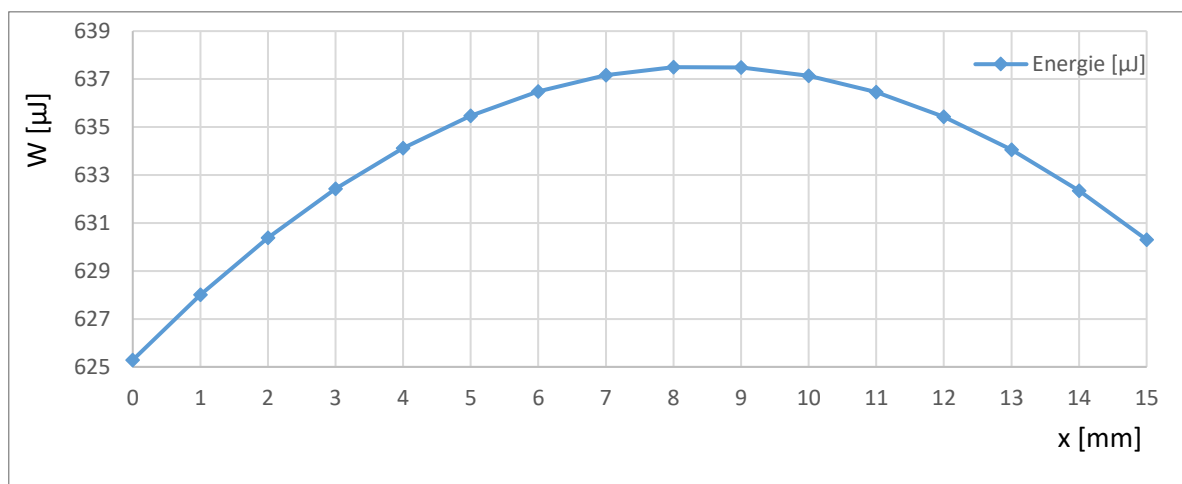
Během simulací tak bylo zjištěno že zvětšení oddělení cívek při zanedbání tření, může mít kladný vliv na výstupní energii a tím i rychlost tělesa. Proto byla provedena i polynomiální

interpolace za účelem zjistit do jaké vzdálenosti dochází ke zrychlování. Jedná se však pouze o odhad, který následně nutné ověřit experimentálně.

Tabulka 2: Výsledek polynomiální interpolace vzdálenosti cívek

x [mm]	Rychlost [m/s]	Energie [ $\mu$ J]
0	1,558	625,287
1	1,561	628,005
2	1,564	630,383
3	1,567	632,420
4	1,569	634,117
5	1,570	635,473
6	1,572	636,488
7	1,572	637,163
8	1,573	637,497
9	1,573	637,491
10	1,572	637,144
11	1,571	636,456
12	1,570	635,427
13	1,568	634,058
14	1,566	632,349
15	1,564	630,298

Podle tabulky uvedené výše dochází skutečně ke zvětšování kinetické energie tělesa na konci urychlovací dráhy, a tak i rychlosti ve svém maximu to je v osmi milimetrech úst'ová rychlost je o jeden a půl centimetru za sekundu vyšší, jak při předpokladu že jsou cívky hned vedle sebe. Pak už ovšem dochází k postupnému snižování, je možné vyčíst z následujícího grafu.



Obrázek 13: Graf vývoje kinetické energie při zvětšování vzdálenosti

I přes to že podle predikce je možné pozorovat že by cívky od sebe mohly být teoreticky dál simulace budou pokračovat pouze pro maximální odsazení o čtyři milimetry. Jak už bylo zmíněno dříve v simulacích jsou zanedbávány veškeré rušivé elementy jako je tření anebo náklon cívek a tím i dráhy. Protože simulace probíhají pro těleso o hmotnosti půl gramu lze lehce spočítat, že aby těleso při náklonu devadesát stupňů bylo zvednuto magnetickým polem je nutné na něj vyvinout sílu rovnající se minimálně šest miliNewtonů. A i přes to že těleso bude urychlováno po vodorovné dráze v době přepnutí cívek na těleso působí pouze síla jeden a půl Newtonu což by mohlo vést ke ztrátě rychlosti z důvodu třecí síly.

#### 4.2.2 Optimalizace počtu cívek

Optimalizace počtu cívek je důležitý článek při konstrukci. Jak bylo v teoretické části zmíněno více segmentů znamená efektivnější využití dráhy což vede k vyšší rychlosti. Protože ale rozměry jednoho segmentu jsou již stanoveny je nutné na základě simulací zjistit jaké výstupní hodnoty očekávat a zda je možné přesně načasovat přepínání při použití mikrokontroleru Arduino. Protože větší rychlost způsobuje zkrácení intervalů mezi jednotlivými přepnutími.

Porovnávané možnosti budou pro jednu dvě a tři cívky. Jejich přepínání bude opět postupné a proud o velikosti jedno ampéru a jejich vzdálenosti čtyři milimetry. Pro přehlednost jsou uvedené pouze hodnoty, ve kterých dochází k přepnutí mezi segmenty.

Tabulka 3: Koncové hodnoty pro počet cívek

Dráha [cm]	1 cívka			2 cívky			3 cívky		
	Energie [μJ]	Rychlost [m{s}	Čas [ms]	Energie [μJ]	Rychlost [m{s}	Čas [ms]	Energie [μJ]	Rychlost [m{s}	Čas [ms]
0,98	308,270	1,094	41,331	305,231	1,088	41,582	323,390	1,120	40,415
3,40	-	-	-	634,117	1,569	60,670	647,473	1,585	59,112
5,78	-	-	-	-	-	-	976,320	1,947	72,874

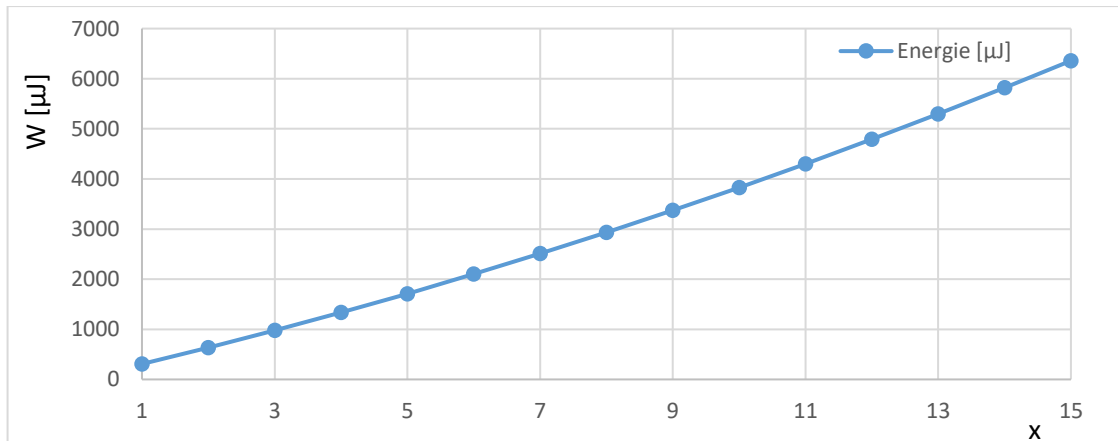
V tabulce uvedené výše lze pozorovat že energie postupně stoupá. Rozdíly mezi jednotlivými měřeními jsou způsobené drobnými chybami simulací a také faktem že v průběhu simulace pro dvě a tři cívky se namodelované cívky již nacházeli v celém modelu což změnilo okolní podmínky a vedlo to ke změně působení síly na těleso.

Tabulka 4: Predikce nárustu energie při zvyšování počtu cívek

x	Rychlost [m/s]	Energie [μJ]
1	1,094	308,270
2	1,569	634,117

x	Rychlost [m/s]	Energie [ $\mu$ J]
3	1,947	976,320
4	2,288	1334,880
5	2,589	1709,795
6	2,870	2101,067
7	3,137	2508,696
8	3,391	2932,680
9	3,637	3373,021
10	3,875	3829,718
11	4,108	4302,771
12	4,335	4792,181
13	4,558	5297,947
14	4,777	5820,069
15	4,994	6358,547

V tabulce tvořené predikcí nárůstu energie, kterou těleso na konci dráhy bude mít se energie zvětšuje s lehkým narůstajícím rozdílem. Z následujícího grafu vyplývá že nárůst rozdílů skutečně není velký.



Obrázek 14: Graf predikce nárůstu energie při zvyšování počtu cívek

Protože pro více jak 3 segmenty se jedná pouze o predikci vývoje nikoliv o simulaci potvrzený fakt, proto v dalších optimalizacích bude počítáno s nejvyšší nasimulovanou hodnotou.

### 4.2.3 Velikost proudu

Jak bylo v teoretické části zmíněno velký proud je často základní stavební kámen pro výkonné Gaussovi pušky. V kombinaci s použitím laboratorního zdroje jako napájení není



možné dosáhnout velmi vysokých proudů, proto simulované hodnoty jsou situované okolo proudů dosažitelných i s použitím jednoho laboratorního zdroje.

Protože během přechodných optimalizací bylo rozhodnuto že vzdálenost mezi segmenty bude čtyři milimetry a budou celkem tři segmenty v experimentu další optimalizace budou tedy probíhat pro hodnoty již s těmito parametry.

Tabulka 5: Důležité body v průběhu pohybu pro různé proudy

	0,5 A			1 A		
Dráha [cm]	Energie [ $\mu$ ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Energie [ $\mu$ ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,975	86,061	0,578	78,434	323,390	1,120	40,415
3,375	166,980	0,805	114,612	647,064	1,585	58,955
5,775	249,294	0,984	142,074	976,320	1,947	72,874
	2 A			4 A		
Dráha [cm]	Energie [ $\mu$ ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Energie [ $\mu$ ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,975	1252,805	2,205	20,522	4930,632	4,374	10,342
3,375	2547,499	3,144	29,909	10109,375	6,264	15,065
5,775	3864,524	3,873	36,916	15377,438	7,725	18,580

Při změně proudu lze pozorovat razantní změny ve výstupních veličinách. Podle výsledků simulací dochází k tak zásadním rozdílům, že jedno segmentová Gaussova puška by byla mnohem výkonnější při použití čtyř ampér než zařízení obsahující tři segmenty ale pouze půl ampéry. Takové výsledky potvrzují veškerá tvrzení v teoretické části, kdy se jako hlavní veličina uvádí velikost proudu. Podle predikce při optimalizaci počtu segmentů by při jednom ampéru muselo být segmentů deset abychom dosáhli stejné kinetické energie na konci dráhy jako bychom mohli dosáhnout při dvou ampérech a třech segmentech.

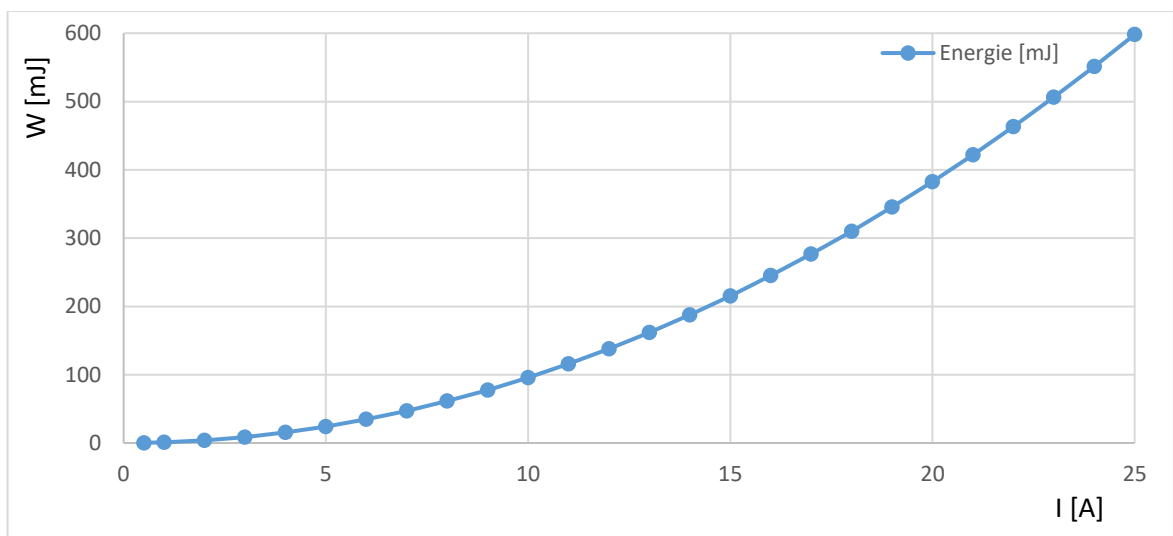
Kvůli tomuto zjištění byla provedena opět polynomiální interpolace, která měla účel zjistit velikost energie a úst'ové rychlosti při dosažení maximálního proudového zatížení všech segmentů.

Tabulka 6: Predikce výstupních veličin při zvyšování proudu

Proud [A]	Rychlost [m/s]	Energie [mJ]
0,5	0,984	0,249
1	1,947	0,976
2	3,873	3,865
3	5,799	8,665

Proud [A]	Rychlost [m/s]	Energie [mJ]
4	7,725	15,377
5	9,651	24,002
6	11,576	34,539
7	13,499	46,988
8	15,422	61,349
9	17,342	77,621
10	19,261	95,806
11	21,177	115,903
12	23,090	137,912
13	25,000	161,833
14	26,907	187,665
15	28,811	215,409
16	30,710	245,066
17	32,605	276,634
18	34,495	310,114
19	36,381	345,505
20	38,261	382,808
21	40,136	422,023
22	42,004	463,150
23	43,867	506,188
24	45,723	551,138
25	47,572	597,999

V případě, že by všechny segmenty cívky byly napájeny maximálním proudem úst'ová rychlost by se pohybovala okolo čtyřiceti sedmi metrů za sekundu.



Obrázek 15: Graf vývoje úst'ové kinetické na základě predikce

Na základě vypočítaných hodnot byla vyjádřena funkce, ze které pak po zaokrouhlení lze vytvořit kvadratickou rovnici pro výpočet energie na základě velikosti proudu.

$$W \cong 9,765 * I^2 * 10^{-4} [J] \quad (50)$$

Tato rovnice platí pouze v případě, že jsou dodrženy parametry uvedené výše. Důležité je zdůraznit fakt že tato rovnice vychází z predikovaných hodnot spočítaných pomocí polynomiální interpolace třetího stupně a vyjádřená rovnice je zaokrouhlená proto její přesnost klesá se vzdalováním se od čtyřech nasimulovaných proudů.

Protože při použití laboratorního zdroje je velikost proudu značně limitovaná zejména pak napětím, které zdroj poskytuje experiment bude probíhat pro jeden ampér.

### 4.3 Způsob spínání cívek

Způsob spínání cívek je nutné stanovit, protože magnetické pole generované každou cívkou může podpořit magnetické pole cívky předchozí, jelikož se magnetická pole o stejné polaritě spojují a dosahují tak většího výkonu na úkor vyššího proudu odebíraného ze zdroje.

Jednotlivé spínací sekvence jsou popisovány bitově, a to tak že nejvýznamnější bit reprezentuje cívkou nejbližší položenou počáteční poloze tělesa a nejméně významný bit reprezentuje nejdále položenou cívkou. Výsledné oktávové číslo reprezentuje, v jakém stavu se cívky nachází.

- 7 – Všechny cívky sepnuty
- 6 – První dvě cívky sepnuty
- 5 – První a poslední cívka sepnuta
- 4 – Pouze první cívka sepnuta
- 3 – Druhá a třetí cívka sepnuta
- 2 – Druhá cívka sepnuta
- 1 – Třetí cívka sepnuta
- 0 – Všechny cívky vypnuty

Číslo nula se v této podkapitole vůbec neobjeví, protože reprezentace všech cívek vypnutých nemá žádný význam. Číslo pět je také vynecháno, protože cívky jsou relativně daleko od sebe a působili by na sebe pouze minimálně.

Mezi hodnocené možnosti patří klasické postupné spínání cívek postupné spínání s mezikroky jako tomu je u krokových motorů, a nakonec postupné vypínání cívek.

#### 4.3.1 Postupné spínání

Postupné spínání cívek je nejběžnější možnou metodou, jakou jsou cívky u Gaussových pušek spínány. Obrovskou výhodou je že nezáleží na vzdálenosti mezi cívkami. Magnetická pole se pozitivně podporují pouze na krátkou vzdálenost, proto postupné spínání je nejčastější a nejflexibilnější.

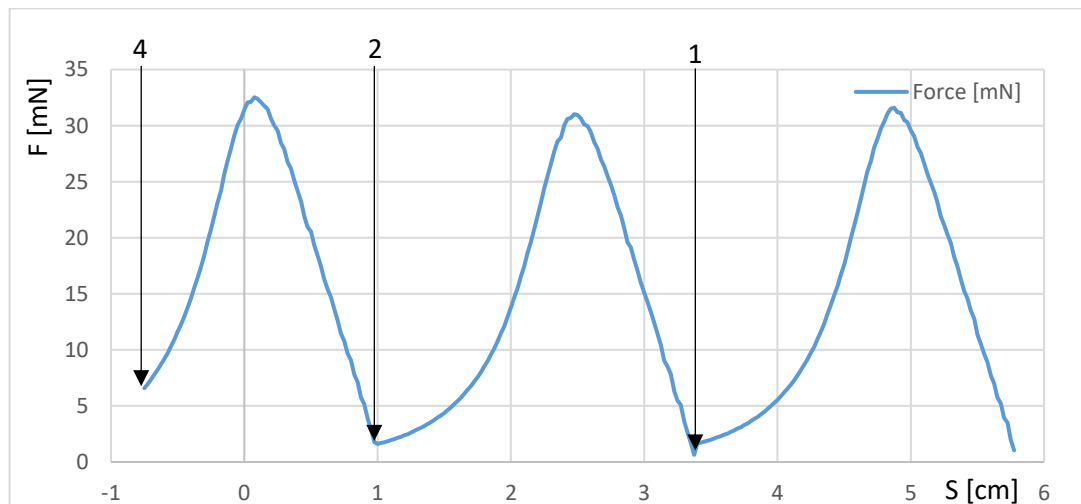
Postupné spínání je reprezentováno číselnou sekvencí 421 a podle výše uvedeného popisu jde tedy nejdříve o spuštění prvního segmentu a progresivně se spínají další segmenty sepnutý je přitom vždy jen jeden segment což přivádí k další výhodě této sekvence. Ze zdroje není nikdy odebrán proud větší, než proud potřebný pro chod jedné cívky a přívodní vodiče tedy nemusí být dimenzovány na větší proudy.

Tabulka 7: Vývoj veličin při sekvenci 421

Dráha [cm]	Síla [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Místo sepnutí
-0,750	6,583	1,646	0,080	6,256	-
-0,500	11,597	24,351	0,307	19,917	-
-0,250	20,700	64,825	0,502	26,244	-
0,000	31,448	132,586	0,717	30,396	-
0,250	29,549	211,247	0,905	33,471	-
0,500	20,543	272,558	1,028	36,047	-
0,750	10,793	310,109	1,097	38,391	-
0,975	1,748	323,390	1,120	40,415	X
1,000	1,608	323,792	1,121	40,638	-
1,250	2,628	329,092	1,130	42,860	-
1,500	4,365	337,871	1,145	45,059	-
1,750	7,560	352,831	1,170	47,221	-
2,000	13,751	379,405	1,213	49,322	-
2,250	24,449	427,574	1,288	51,326	-
2,500	30,941	500,216	1,393	53,194	-
2,750	24,723	570,283	1,488	54,927	-
3,000	15,094	618,875	1,550	56,570	-
3,250	5,468	643,638	1,580	58,165	-
3,375	0,642	647,064	1,585	58,955	X
3,500	1,992	649,330	1,587	59,743	-
4,000	5,537	666,990	1,609	62,875	-
4,500	17,621	720,359	1,672	65,934	-
5,000	29,556	857,031	1,824	68,805	-

Dráha [cm]	Síla [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Místo sepnutí
5,500	11,348	959,991	1,930	71,457	-
5,775	1,049	976,320	1,947	72,874	-

Některé hodnoty byly uvedeny při optimalizaci této podkapitola se, ale zaměřuje na samotné průběhy. Dráha ukazuje, v jakých bodech dochází k přepnutí pouze poslední řádek reprezentuje poslední kladnou hodnotu síly tedy těsně před rozepnutím poslední cívky. Velikost síly ukazuje že v době přepnutí mezi cívkami se skutečně blíží síla k nule což signalizuje, že magnetické pole je efektivně využito. Jednotlivé časové body ukazují že se těleso pohybuje v desítkách milisekund což pro experiment znamená možnost vysoké přesnosti plánování jednotlivých kroků, takže volba nižšího proudu se ukázala jako správná.



Obrázek 16: Graf silového průběhu působení sekvence 421

Graf přímo ukazuje silový průběh v jednotlivých polohách. V grafu jsou jasně zvýrazněny body, kdy došlo k přepnutí bod 4 je začátek sekvence tedy prvotní sepnutí body 2 a 1 tedy následně ukazují kdy došlo k přepnutí na další část sekvence, pokud by k tomuto přepnutí nedošlo síla působící na těleso by se stala zápornou, a to by způsobilo v nejlepším případě zpomalení tělesa v nejhorším případě obrácení směru pohybu.

#### 4.3.2 Postupné spínání s mezikroky

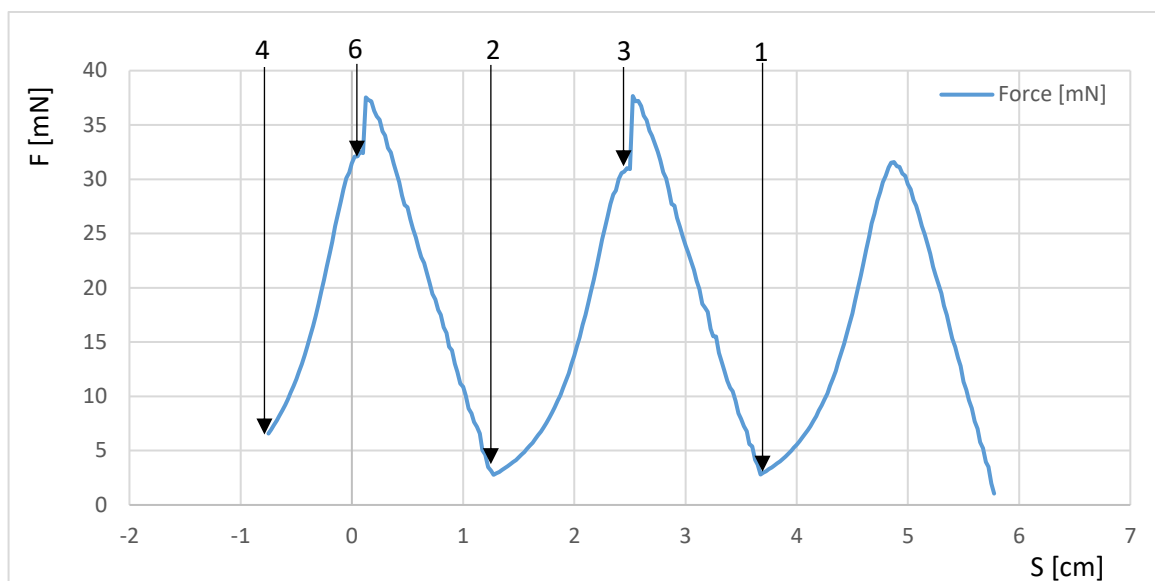
Postupné spínání s mezikroky je častý způsob spínání cívek u krokových motorů, kde jsou jednotlivé cívky spínané právě s mezikroky pro docílení co nejplynulejšího pohybu a zamezení prokluzování ke kterému dochází zejména při špatném načasování.

Do postupného spínání jsou přidány mezikroky což znamená, že v některé momenty na těleso působí síla magnetického pole, které je generované dvěma cívkami. Může to vést ke zvýšení kinetické energie tělesa za cenu zvýšení maximálního odebíraného proudu na dvojnásobek proudu který vyžaduje jedna cívka. Také časování se může stát mnohem složitější v případě dosažení vyšších rychlostí.

Tabulka 8: Vývoj veličin při sekvenci 46231

Dráha [cm]	Síla [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Místo sepnutí
-0,750	6,583	1,646	0,080	6,256	-
-0,500	11,597	24,351	0,307	19,917	-
-0,250	20,700	64,825	0,502	26,244	-
0,000	31,448	132,586	0,717	30,396	-
0,100	32,398	164,868	0,800	31,714	X
0,250	35,469	219,761	0,924	33,453	-
0,500	27,428	297,037	1,074	35,948	-
0,750	18,923	353,359	1,171	38,170	-
1,000	10,884	389,304	1,229	40,248	-
1,250	3,148	405,593	1,255	42,257	X
1,500	4,365	414,371	1,268	44,240	-
1,750	7,560	429,331	1,291	46,196	-
2,000	13,751	455,905	1,330	48,106	-
2,250	24,449	504,074	1,399	49,943	-
2,500	30,941	576,716	1,496	51,672	X
2,750	32,535	665,298	1,607	53,282	-
3,000	23,875	734,656	1,689	54,798	-
3,250	15,548	783,189	1,743	56,253	-
3,500	7,926	811,640	1,775	57,673	-
3,650	3,718	819,866	1,784	58,515	X
3,750	3,293	822,912	1,787	59,075	-
4,000	5,537	833,955	1,799	60,470	-
4,500	17,621	887,324	1,856	63,214	-
5,000	29,556	1023,997	1,993	65,820	-
5,500	11,348	1126,956	2,091	68,259	-
5,775	1,049	1143,286	2,106	69,568	-

V tabulce jsou vidět rozdíly oproti výsledkům postupného spínání je dosaženo vyšší úst'ové rychlosti i energie. Při zaměření na sloupec síly během prvního a třetího přepnutí jsou vidět nezvyklé skoky v síle působící na těleso na rozdíl od postupného spínání kdy nejdřív začalo docházet k poklesu a pak přišel nárůst zde dochází neustále k nárůstu. To jasně signalizuje že pravděpodobně nedochází k efektivnímu využití magnetického pole.



Obrázek 17: Graf silového průběhu působení sekvence 46231

Z grafu je viditelné že hned ve dvou případech v bodu 6 a 3 dochází ke skoku síly nahoru. Značí to velmi neefektivní využití dostupné síly. Proto tento spínací postup může být naprosto vyloučený z jakéhokoliv hledáčku i přes to že došlo ke zvýšení kinetické energie na konci dráhy. Protože k nárustu došlo v bodech 6 a 3 je možné předpokládat že optimalizovaná sekvence 631 by byla efektivnější. Finální testovaná sekvence 731 tak nejspíš bude nejsilnější testovanou.

### 4.3.3 Postupné vypínání

Postupné vypínání je sekvence, která nejdříve sepne všechny cívky a následně je postupně vypíná, díky skládání magnetických polí tak dosahuje největšího možného využití dráhy i síly magnetického pole. Má to však nevýhodu, že maximální odebíraný proud je trojnásobný oproti proudu odebíraném jednou cívkou.

Tato sekvence je použitelná pouze v případě že cívky se nachází dostatečně blízko sebe, aby se magnetická pole mohli vzájemně doplňovat.

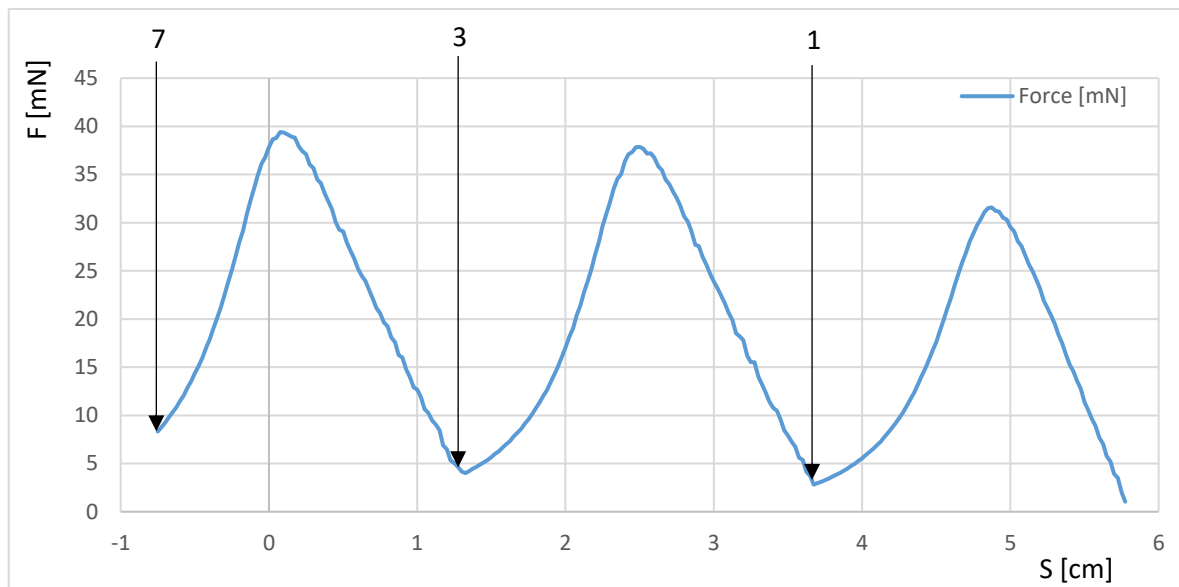
Tabulka 9: Vývoj veličin při sekvenci 731

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Místo sepnutí
-0,750	8,317	2,079	0,090	5,566	-
-0,500	14,335	30,394	0,343	17,749	-
-0,250	25,055	79,792	0,556	23,430	-
0,000	37,837	161,311	0,791	27,183	-
0,250	37,107	257,695	1,000	29,972	-

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Místo sepnutí
0,500	29,078	339,040	1,147	32,294	-
0,750	20,622	399,519	1,245	34,380	-
1,000	12,667	439,811	1,306	36,335	-
1,250	5,043	460,691	1,337	38,223	-
1,300	4,178	462,892	1,340	38,597	X
1,500	5,661	472,506	1,354	40,082	-
1,750	9,573	491,637	1,381	41,911	-
2,000	17,002	524,812	1,427	43,694	-
2,250	29,633	583,614	1,505	45,404	-
2,500	37,869	671,772	1,615	47,008	-
2,750	32,535	760,353	1,718	48,508	-
3,000	23,875	829,711	1,794	49,930	-
3,250	15,548	878,244	1,846	51,302	-
3,500	7,926	906,695	1,876	52,644	-
3,650	3,718	914,921	1,884	53,441	X
3,750	3,293	917,967	1,887	53,972	-
4,000	5,537	929,010	1,899	55,292	-
4,500	17,621	982,379	1,953	57,896	-
5,000	29,556	1119,052	2,084	60,380	-
5,500	11,348	1222,012	2,178	62,719	-
5,775	1,049	1238,341	2,192	63,976	-

V tabulce jsou vidět nejvyšší dosažené hodnoty ze všech sekvencí uvedených v této podkapitole. Při zaměření na vývoj síly je možné opět pozorovat že dochází k poklesu působení před sepnutím a následně k nárůstu působení bezprostředně po sepnutí. Doba cesty oproti postupnému spínání byla také snížena o přibližně osm milisekund.





Obrázek 18: Graf silového průběhu působení sekvence 731

#### 4.3.4 Finální zhodnocení spínacích metod

Ze všech třech představených spínacích sekvencí klasické postupné spínání se jeví jako nejuniverzálnější sekvence. Není závislá na blízkosti jiných cívek a také nepředstavuje vysokou zátěž pro zdroj, protože její maximální odebraný proud je nejnižší ze všech.

Sekvence postupného spínání s mezikroky se ukázala jako velmi neefektivní sekvence je dlouhá což ztěžuje časování a dovoluje řídicímu prvku nasčítat chyby při časování, ačkoliv ty by měli být v experimentu téměř nezaznamenané pro využití ve výkonnějším a větším zařízení by to mohlo představovat velký problém.

Postupné vypínání se ukázalo jako nejlepší varianta v případě, že jsou cívky blízko sebe a účelem je dosažení co možná největší možné výstupní energie. Velkou nevýhodou však představuje maximální proudový odběr. V případě, kdy proud procházející jednou cívkou je jeden ampér to nepředstavuje až tak závažný problém ovšem pokud by cívky měly být napájeny jejich maximálním proudem bylo by nutné zajistit zdroj schopný dodat téměř sedmdesát pět ampér.

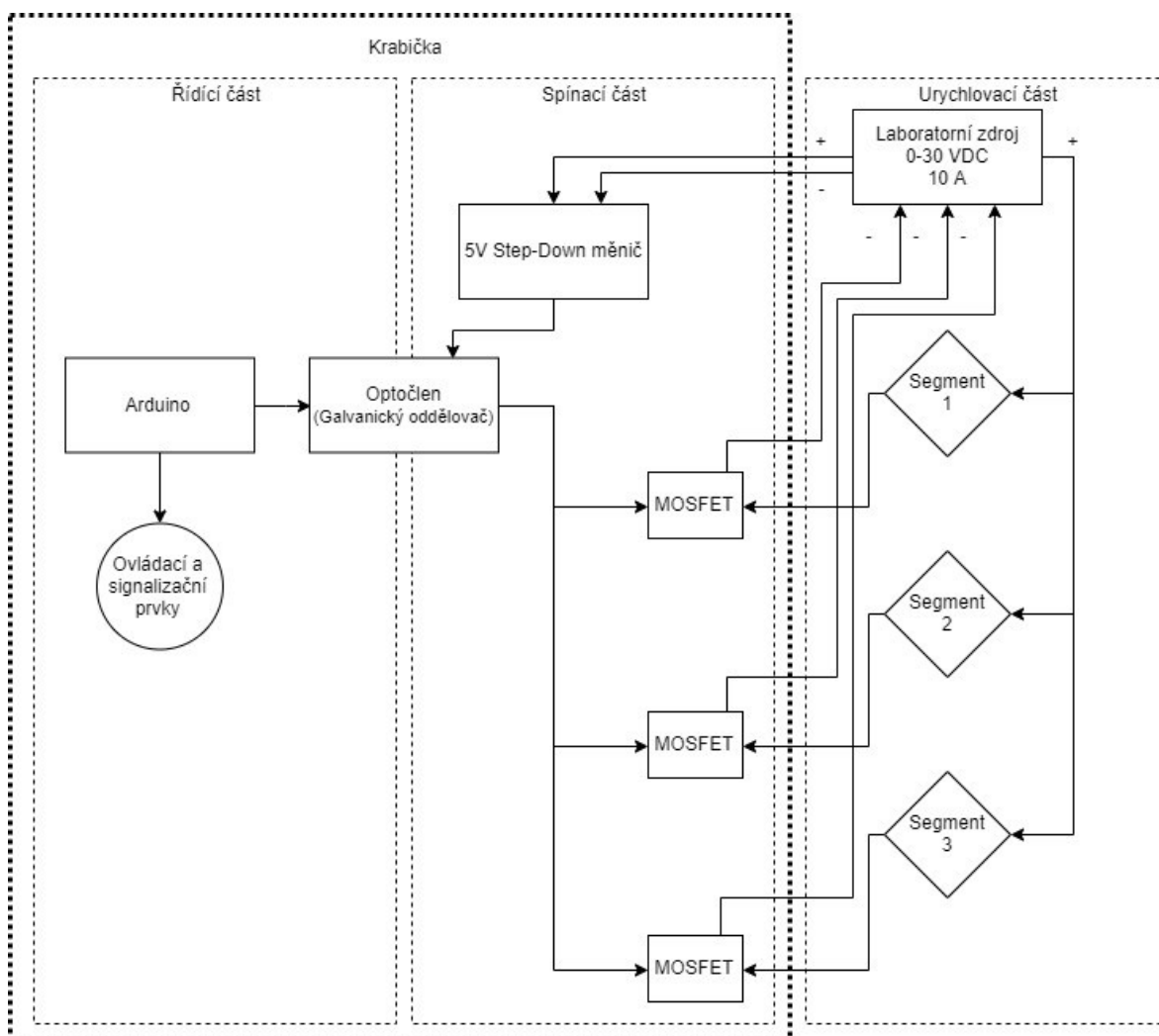
Protože spínání s mezikroky se ukázalo jako neefektivní kandidát z experimentu bude vyloučeno a experimentálním potvrzení bude věnováno pouze postupnému spínání a postupnému vypínání.

## 5 KONSTUKCE A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NÁVRHU

Tato kapitola je věnována celkové konstrukci a ověření funkčnosti návrhu jako celku to je jak samotná konstrukce a funkčnost řídicí části tak skutečné hodnoty jednotlivých navinutých cívek a jejich výsledná schopnost urychlit předmět.

### 5.1 Konstrukce návrhu

Celý návrh lze rozložit na čtyři základní části. Na část řídicí optočlen spínací část a urychlovací část. Řídicí část je tvořena deskou Arduino jednotlivými ovládacími prvky signalizací a první polovinou galvanického oddělovače. Část spínací se skládá z druhé poloviny galvanického oddělovače a „step-down“ měniče napětí a MOSFETů které spínají jednotlivé cívky. Poslední část část urychlovací je tvořena už pouze jednotlivými cívkovými segmenty.



Obrázek 19: Blokový diagram zapojení celého experimentu

Řídící a spínací části jsou uloženy spolu uvnitř plastové krabičky která je osazena všemi potřebnými konektory a spínači pro ovládání celého návrhu. Toto slouží pro zamezení úrazu elektrickým proudem, jelikož zdroj napětí napájějící jednotlivé segmenty je připojený zezadu a veškeré pájené spoje jsou uloženy uvnitř krabičky. Konektory na jednotlivé segmenty jsou situované na horní části krabičky tak aby cívky byly uloženy taktéž za člověk operujícím se ovládacím zařízením, a tedy nebyl v přímém kontaktu ani s cívkou ani v cestě dráhy letu tělesa.

### 5.1.1 Řídící část

Řídící část je složena z mikrokontroleru Arduino MEGA na kterou jsou připojeny spínače LED diody a první polovina galvanického oddělovače.

Spínače jsou připojeny takzvanou „pull-up“ metodou která zaručuje že se jednotlivé vstupní signály nebudou mísit, ale během samotného programování mikrokontroleru je nutné počítat s tím že kvůli „pull-up“ metodě při rozpojeném spínači na vstupu desky Arduino logická jednička. Při sepnutí spínače je potom napětí svedeno přímo na zem a sepnutý spínač signalizuje logickou nulu. Toto zapojení je provedeno pomocí rezistorů nacházejících se přímo na desce mikrokontroleru a není tak potřeba žádné dodatečné zapojení.

Na desce je připojený spouštěcí spínač, který má za následek spuštění sekvence při stisku tří přepínače, kterými se odemykají jednotlivé segmenty a jeden zámkový přepínač který slouží pro odemčení celého systému a tím bez softwarové úpravy zamezuje nedovolenému použití.

Dále jsou k desce připojeny LED diody spolu s jejich předřadnými odpory. Jejich funkce je signalizace odemčení jednotlivých segmentů a také signalizace odemčení celého systému, kdy všechny tři diody několikrát bliknou.

Důvodem jejich zapojení spolu s předřadným rezistorem je omezení odebíraného proudu stejně jako dioda disponuje proudovým limitem tak i deska Arduino by neměla být vytěžována více než je nezbytně nutné pro viditelný svit diod. Pro výpočet velikosti předřadného odporu je potom potřeba znalost parametrů diody. V tomto případě výrobce uvádí že jedna dioda vytváří úbytek napětí 1,79 voltu a odebírá proud o velikosti 20 mA.

$$R = \frac{U_z - U_d}{I_d} = \frac{5 - 1,79}{0,02} \cong 160 \Omega \quad (51)$$

Rovnice vychází z Ohmova zákona, kdy  $U_z$  udává velikost napětí na zdroji napájení  $U_d$  úbytek napětí na diodě a  $I_d$  proud odebíraný diodou. Protože deska Arduino na svých

logických výstupech využívá napětí 5 voltů není již žádný problém spočítat potřebnou velikost předřadného rezistoru. Protože rezistor udává velikost proud je nutné volit větší, pokud vypočtený odpor nespadá do dostupné řady stejně tomu bylo v tomto případě, proto diody byly opatřeny předřadným rezistorem o velikosti 168  $\Omega$ .

Bylo by možné využít pouze jeden odpor usazený za diodami ovšem pouze v případě že bychom předpokládali jejich svit současný v jiném případě bychom omezili jas diod v případě, že by svítila jen jedna nebo dvě.

### 5.1.2 Galvanický oddělovač

Pro galvanické oddělení obvodu byl využitý modul obsahující optočleny přesněji čtyři kanály. Část usazená v řídicí části se skládá pouze z rezistoru a diody která při průchodu napětí emituje světlo které dopadá na PN přechod fototranzistoru čímž se otevře průchod proudu mezi bází a emitorem. Tato součástka tedy využívá fotoelektrického jevu pro galvanické oddělení elektrických obvodů.

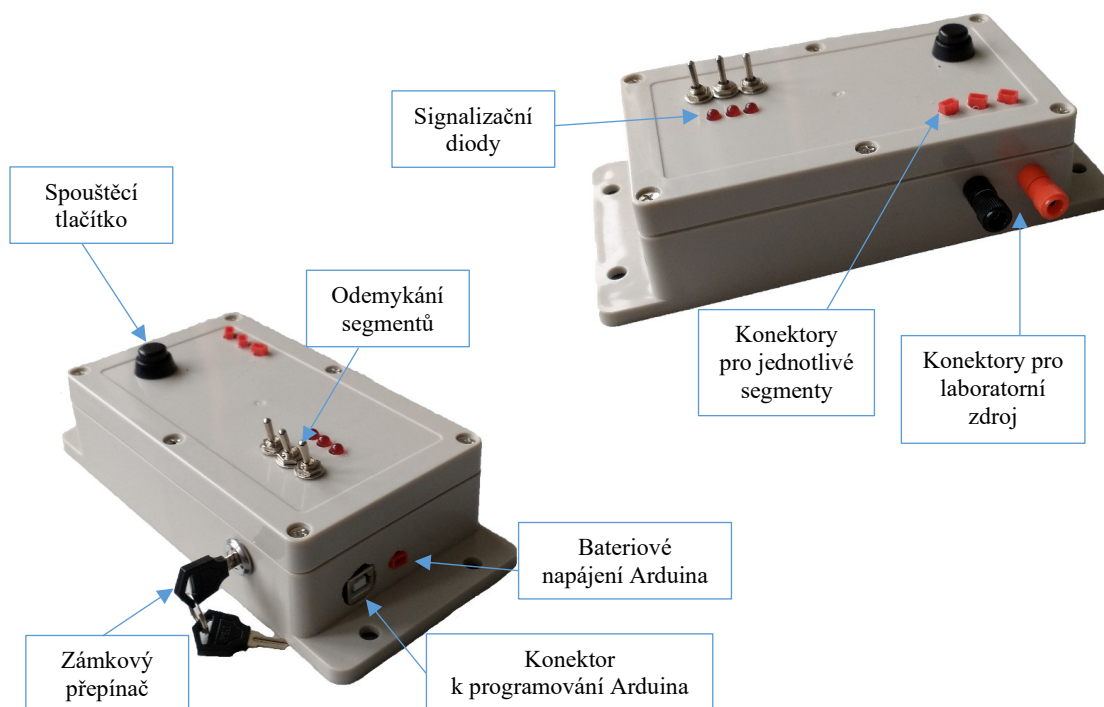
V experimentu je fototranzistor využíván pro přivedení napětí na GATE elektrodu MOSFETu a tím spuštění propojení cívky se zemí.

### 5.1.3 Spínací část

Spínací část je složena ze „step-down“ měniče napětí který redukuje napájecí napětí cívek na velikost napětí vhodnou k ovládání MOSFET spínačů.

Nastavení měniče je prováděno pomocí osazeného trimru. Dovoluje tedy plynule měnit jeho výstupní napětí v případě, že dojde ke zvětšení napájecího napětí zdroje pro dosažení vyšších výkonů. V samotném návrhu tento trimr není dostupný k přímé manipulaci a v případě že by bylo nutné jeho nastavení změnit by bylo nutné také otevřít plastovou krabičku. Toto rozhodnutí bylo provedeno na základě faktu, že neodborná manipulace s výstupním napětím za měničem by mohla vést k nenávratnému poškození součástek ve spínací části.

Fotorezistory optočlenu jsou přímo připojeny na vstupní piny MOSFETů propojení tak vzdáleně připomíná Darlingtonovo zapojení tranzistorů. Rozdílem je fakt že oba tranzistory jsou od výrobce opatřeny rezistory, které limitují proud procházející u fotorezistoru přes kolektor a u MOSFETu skrze GATE elektrodu na SOURCE elektrodu.



Obrázek 20: Ukázka ovládací krabičky

#### 5.1.4 Urychlovací část

Poslední částí je urychlovací část. Jedná se o část, kterou by bylo možné označit za nejjednodušší opak je tedy pravdou. Přes to, že se jedná pouze o stovky metrů měděného drátu během ručního navíjení se může pokazit daleko více věcí než v kterékoliv předchozí části. Protože drát je izolovaný není možné během navíjení zkontrolovat odpor a při malých chybách v tomto procesu tak může dojít k solidnímu poklesu požadovaných hodnot.

Tabulka 10: Skutečný odpor cívek a délka použitého drátu

Segment	Předpokládaný Odpor [ $\Omega$ ]	Skutečný odpor [ $\Omega$ ]	Skutečná délka kabelu [m]
1	16,2	14,8	142,04
2			
3		13,9	133,40

Po navinutí cívek byl změřený jejich skutečný odpor a spočítána skutečná délka použitého dráhu. Z tabulky je vidět že ani jeden segment nemá požadovanou velikost odporu ani délku drátu z toho důvodu lze předpokládat že výsledné urychlení bude menší než předpokládané urychlení ze simulací.

Důvodem rozdílu v odporu jsou drobné chyby, které byly vytvořeny při navíjení což vedlo ve svém součtu k velkému rozdílu ve výsledných hodnotách. Z toho vyplývá že ve všech budoucích experimentech zahrnující cívky se stovky závitů bude dobré zajistit strojově vinuté samonosné cívky a nepokoušet se o ruční vinutí.

## 5.2 Časování cívek a měření rychlosti tělesa

Ačkoliv simulace pomohly s výpočtem pohybu v průběhu celé dráhy je důležité započítat další faktory a rozdíly ve skutečných cívkách při hledání správného času přepnutí. Tyto faktory se skládají ze součtu času rozsvícení diody v optočlenu plného otevření fototranzistoru a MOSFETu ale také časové konstanty samotné cívky.

Časová konstanta cívky je čas, který musí uplynout, aby cívka dosáhla maximálního výkonu při daném proudu a tím vytvářela maximálně silné magnetické pole. To ovšem způsobuje zpoždění při vypnutí a cívka tak po velmi krátký čas snižuje sílu magnetického pole až do úplného zaniknutí.

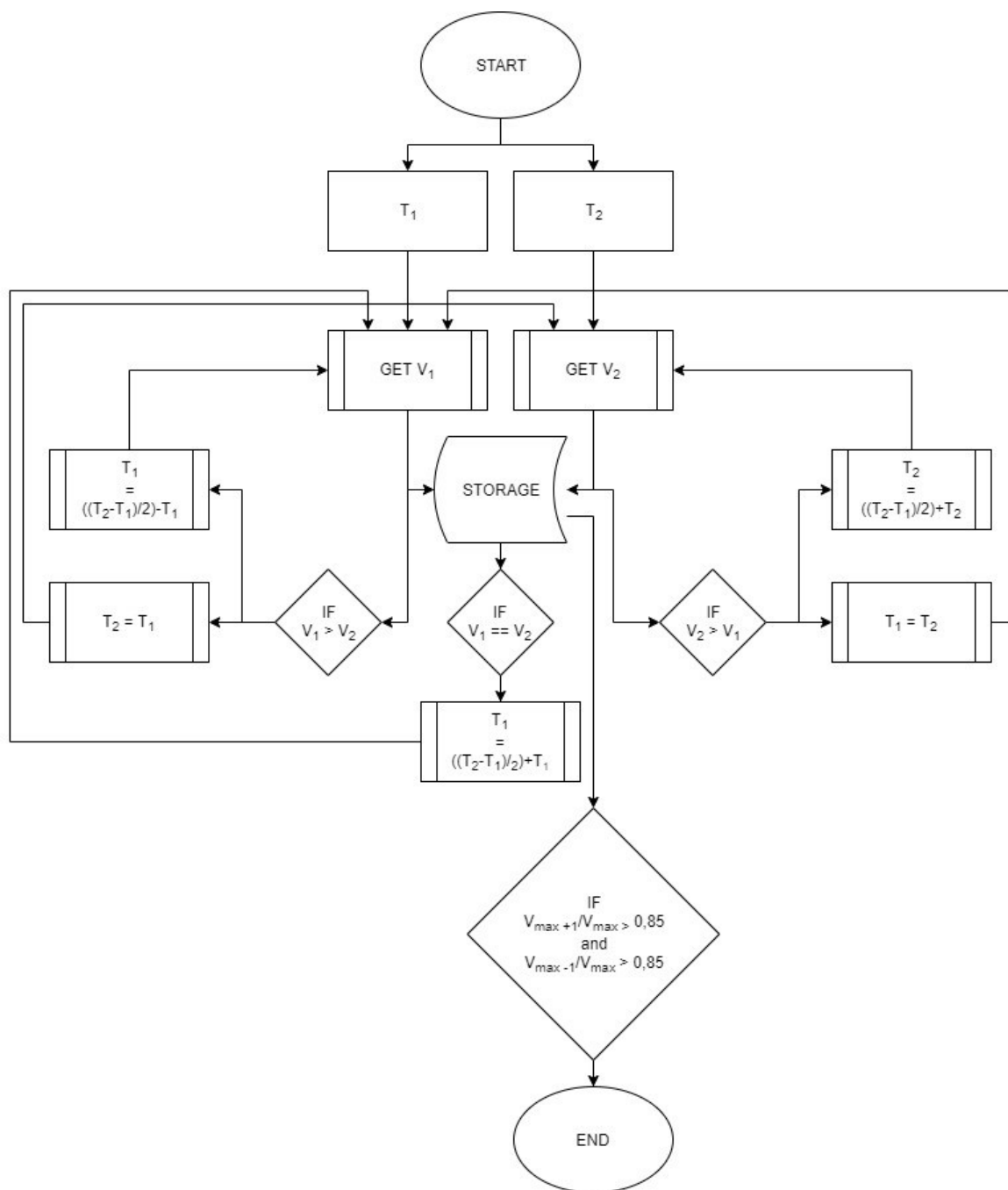
$$\tau = \frac{L}{R} [s, H, \Omega] \quad (52)$$

$$\tau = \frac{35,5 * 10^{-3}}{14,5} \cong 2,45 \text{ ms} \quad (53)$$

Tento přechodový jev se skládá z podílu indukčnosti a odporu cívky. Protože ale není žádný snadný způsob, jak změřit indukčnost navinutých cívek využita indukčnost pro výpočet byla indukčnost cívek ideálních. Použitý odpor je přibližná polovina odporu jednotlivých skutečných cívek. Podle spočítané hodnoty lze tedy vidět že přechodový jev trvá přibližně 2,5 ms, Tedy jakékoliv zpoždění, které vzniká při přepínání segmentů je minimálně dvojnásobek času trvání přechodového jevu.

Výrobce MOSFETových modulů a optočlenového modulu bohužel neudává ve svých dokumentacích zpoždění jejich výrobků a nežádoucí vlivy jako je tření celé časování je tedy nutné udělat ručně.

Všechny měření byly prováděny pro napětí o velikosti 19 V tedy pro vyšší napětí, než bylo předpokládáno, a to z důvodu snahy o mírnou kompenzaci nízké kvality navinutých cívek.



Obrázek 21: Rozhodovací diagram postupu měření

Pro vyhledání správného časování byl zvolený způsob postupného větvení. V počátku byly zvoleny dvě hodnoty časování a změřena rychlost tělesa při těchto načasováních. V případě že byly přibližně stejné další testované časování bylo umístěno přibližně mezi tyto dva body. Pokud byl jeden bod výrazněji větší, jak druhý vybrán další bod časování byl umístěný, tak aby vyšší dosažená hodnota byla uprostřed. V případě že naměřená hodnota byla nejvyšší z naměřených a po obou stranách byly hodnoty menší ale nikoliv výrazně menší měření bylo ukončeno a časování s nejvyšší dosaženou rychlostí bylo označeno za bod zlomu.

### 5.2.1 Časování prvního segmentu postupného spínání

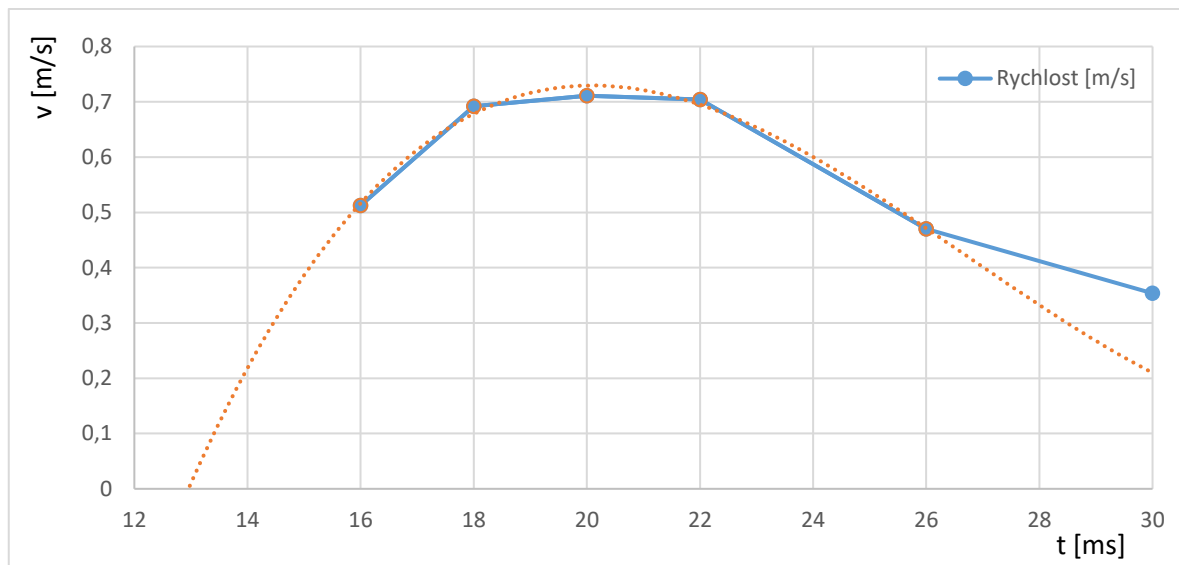
Pro načasování byla využita optická metoda měření. Hlaveň byla částečně otevřena a průlet byl nahraný na kameru. Následně tedy podle známé délky dráhy a podle počtu snímků byla spočítána rychlost při uvažování o nulovém zpomalení mezi prvním a posledním snímkem. Dráha, na které byla tato rychlost měřena byla úmyslně zvolena velmi malá. Protože hmotnost tělesa je velmi malá na delší vzdálenosti není schopné bez zdroje energie si uchovat vlastní hybnost.

Tabulka 11: Časování prvního segmentu

Časování [s]	Dráha [cm]	Čas [s]	Rychlost [m/s]	Průměrná rychlost [m/s]
26	0,035	0,083	0,420	0,470
	0,045	0,083	0,540	
	0,040	0,100	0,400	
	0,045	0,083	0,540	
	0,030	0,067	0,450	
22	0,035	0,067	0,525	0,704
	0,040	0,050	0,800	
	0,038	0,050	0,760	
	0,038	0,050	0,760	
	0,045	0,067	0,675	
20	0,040	0,083	0,480	0,711
	0,038	0,050	0,760	
	0,040	0,050	0,800	
	0,042	0,050	0,840	
	0,045	0,067	0,675	
18	0,035	0,067	0,525	0,692
	0,040	0,050	0,800	
	0,038	0,050	0,760	
	0,035	0,050	0,700	
	0,045	0,067	0,675	

Hodnoty uvedené v tabulce se skládají z vizuálně nerelevantnějších hodnot. Protože během časování se ukázalo že i minimální rozdíl v počátečním položení tělesa může znamenat velký rozdíl ve výstupní rychlosti. Proto pro výpočet průměrné rychlosti byly využity pouze výsledky měření, které se opakovali nejčastěji.





Obrázek 22: Graf vývoje rychlosti při různém časování prvního segmentu

Při pohledu na samotné hodnoty je možné pozorovat že bod zlomu se nachází při nastavení zpoždění na mikrokontroleru 20 ms. Při nižším zpoždění už pak dochází k nevyužití síly plně a při vyšším zpoždění těleso zpomalujeme zápornou polovinou magnetického pole. Při dalších měřeních by bylo možné předpokládat že se jedná o průběh připomínající Gaussovu funkci.

Oranžovou tečkovanou čarou je pak vytvořena polynomiální interpolace s využitím bodů v intervalu 16 ms až 26 ms. Tato čára nepřesně zobrazuje, jaký by byl vývoj rychlosti při vzdalování od vrcholového bodu. Důvod, proč je nepřesná je že můžeme očekávat mnohem menší pokles v případě brzkého vypnutí. Těleso by totiž přicházelo o rychlost pozvolna vlivem zejména tření na dráze nikoliv takto strmě. Naopak tedy při pozdějším vypnutí by došlo k daleko strmějšímu poklesu, protože druhá polovina cívky by se opět těleso snažila přitáhnout ke svému středu a tím by ho začala zpomalovat.

### 5.2.2 Časování druhého segmentu postupného spínání

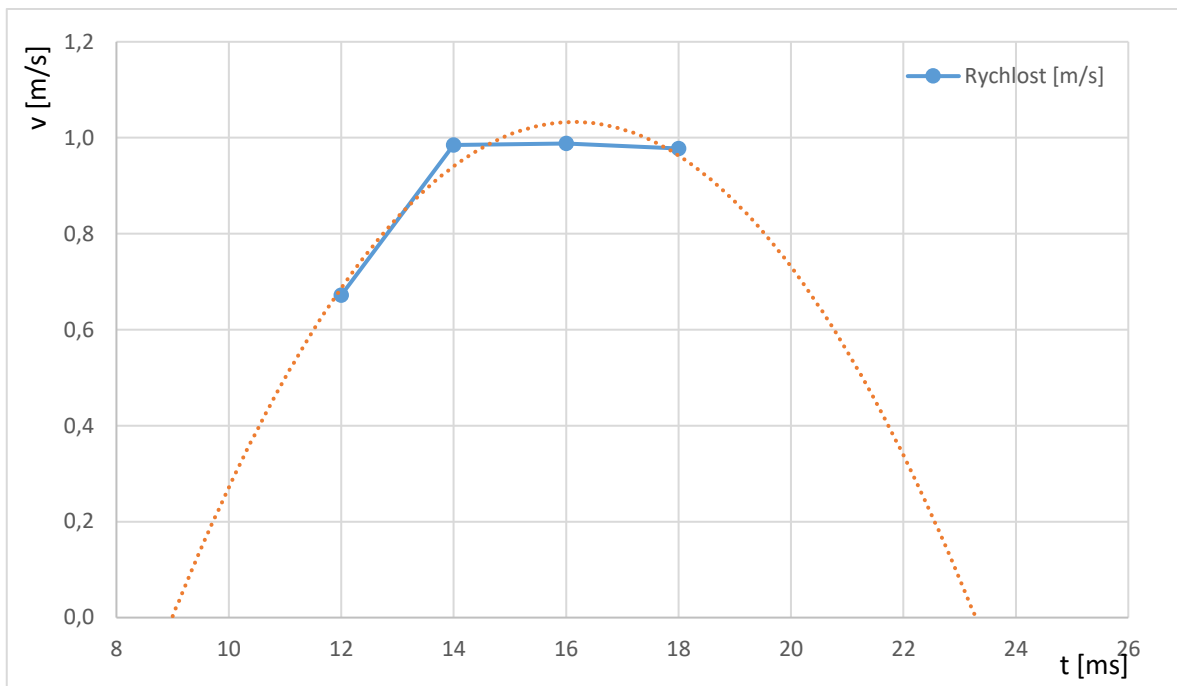
Při využití stejné metody byl načasovaný i druhý segment. Využitá hodnota pro načasování prvního segmentu je 20 ms která se ukázala jako nejlepší. Protože podle simulací je jasné že časování se bude zkracovat největší testovaný čas byl o dvě milisekundy nižší jak časování prvního segmentu.

Tabulka 12: Časování druhého segmentu

Časování [ms]	Dráha [cm]	Čas [s]	Rychlost [m/s]	Průměrná rychlost [m/s]
18	0,065	0,133	0,488	0,978
	0,045	0,033	1,350	
	0,045	0,033	1,350	
	0,060	0,050	1,200	
	0,050	0,100	0,500	
16	0,055	0,050	1,100	0,988
	0,075	0,067	1,125	
	0,065	0,067	0,975	
	0,075	0,083	0,900	
	0,070	0,083	0,840	
14	0,060	0,100	0,600	0,985
	0,065	0,067	0,975	
	0,060	0,050	1,200	
	0,055	0,050	1,100	
	0,070	0,067	1,050	
12	0,045	0,050	0,900	0,672
	0,060	0,083	0,720	
	0,050	0,100	0,500	
	0,045	0,083	0,540	
	0,070	0,100	0,700	

Podle hodnot je jasně vidět že snížení počátečního testovaného časování bylo téměř dokonalé. Lepší výsledky měla pouze skupina měření s časováním 16 ms. Opět je možné sledovat že dochází ke zvyšování a pak následně ke snižování.

Nižší počet testovaných časování byl následek právě prvotního snížení časování oproti prvnímu segmentu. Kdy pak následně stačilo snižovat časování do bodu kdy došlo ke strmému poklesu rychlosti tělesa což vedlo k potvrzení, že časování již bylo za bodem zlomu.



Obrázek 23: Graf vývoje rychlosti při různém časování druhého segmentu

Předpoklad, že by docházelo ke snižování potvrzuje také výše uvedený graf, který obsahuje vyobrazení skutečných naměřených hodnot a predikci jakou rychlost by mělo těleso v případě změny časování.

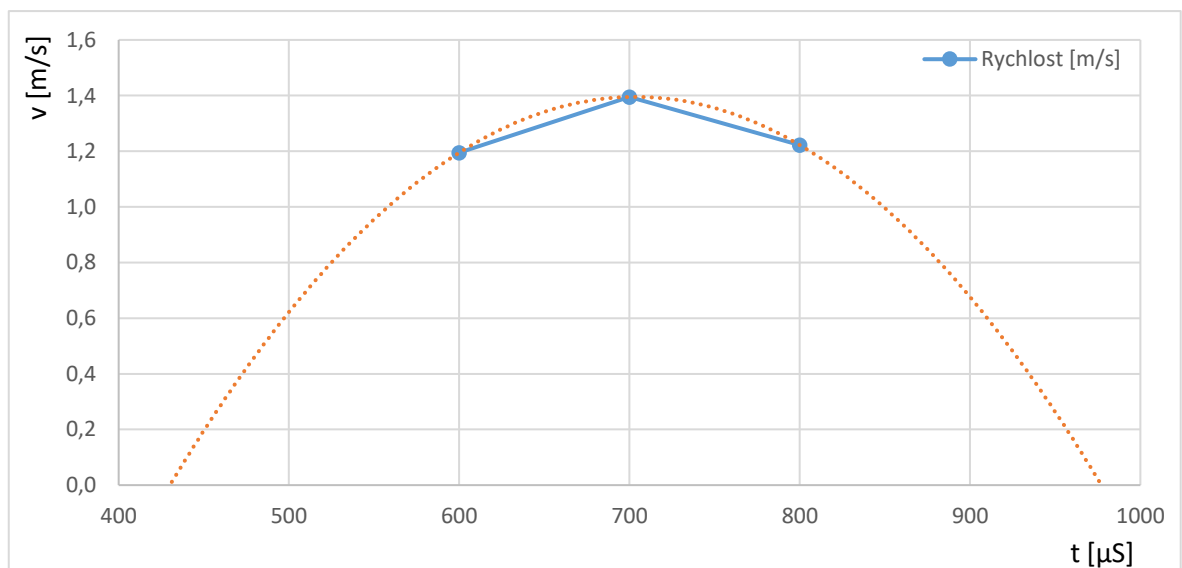
### 5.2.3 Časování třetího segmentu postupného spínání

Časování třetího segmentu se ukázalo jako nejvíce ovlivněné zpožděními obvodu. Během hledání správného načasování bylo nutné v mikrokontroleru změnit funkci která způsobovala zpoždění o určený počet milisekund na funkci která dovolovala zpoždění řádově v desítkách mikrosekund. Po sérii pokusů vedených metodou pokus-omyl která měla za účel najít přibližné rozmezí vhodné pro bližší inspekci se tak ukázalo, že časování je nižší než jedna milisekunda.

Tabulka 13: Časování třetího segmentu

Časování [μs]	Dráha [cm]	Čas [s]	Rychlost [m/s]	Průměrná rychlost [m/s]
800	0,065	0,050	1,300	1,222
	0,085	0,067	1,275	
	0,080	0,083	0,960	
	0,065	0,050	1,300	
	0,085	0,067	1,275	
700	0,060	0,050	1,200	1,395
	0,070	0,050	1,400	
	0,065	0,067	0,975	
	0,085	0,050	1,700	
	0,085	0,050	1,700	
600	0,075	0,067	1,125	1,195
	0,075	0,067	1,125	
	0,070	0,050	1,400	
	0,070	0,067	1,050	
	0,085	0,067	1,275	

V tabulce můžeme vidět že i přes pouze krátký čas sepnutí tohoto segmentu. V nejlepším případě je velmi důležitý ve výsledné rychlosti.



Obrázek 24: Graf vývoje rychlosti při různém časování třetího segmentu

Graf opět znázorňuje bod zlomu v časování. Oranžovou tečkovanou čarou je tedy opět znázorněný předpoklad poklesu, který je stejně jako v přechozích případech pravděpodobně

nepřesný. Další měření nebyla provedena ovšem právě z důvodu nalezení bodu zlomu, a tedy správného načasování.

#### 5.2.4 Časování postupného vypínání

Protože, ze simulací je možné pozorovat že postupné spínání i postupné vypínání mají přibližně podobné časy byly tyto časy použity také pro urychlení testování postupného vypínání.

Časování prvního segmentu tedy zůstane identické jako u postupného spínání a také jednotlivé prověřované hodnoty budou vycházet z nejúspěšnějších hodnot v předchozích měřeních.

Důvodem těchto „zrychlených“ měření byl fakt že postupné vypínání je mnohem sofistikovanější na správné načasování, protože se magnetická pole jednotlivých cívek doplňují a není tedy tak snadné postupné všechny segmenty časovat jako tomu bylo u postupného spínání.

Tabulka 14: Časování postupného vypínání (část 1.)

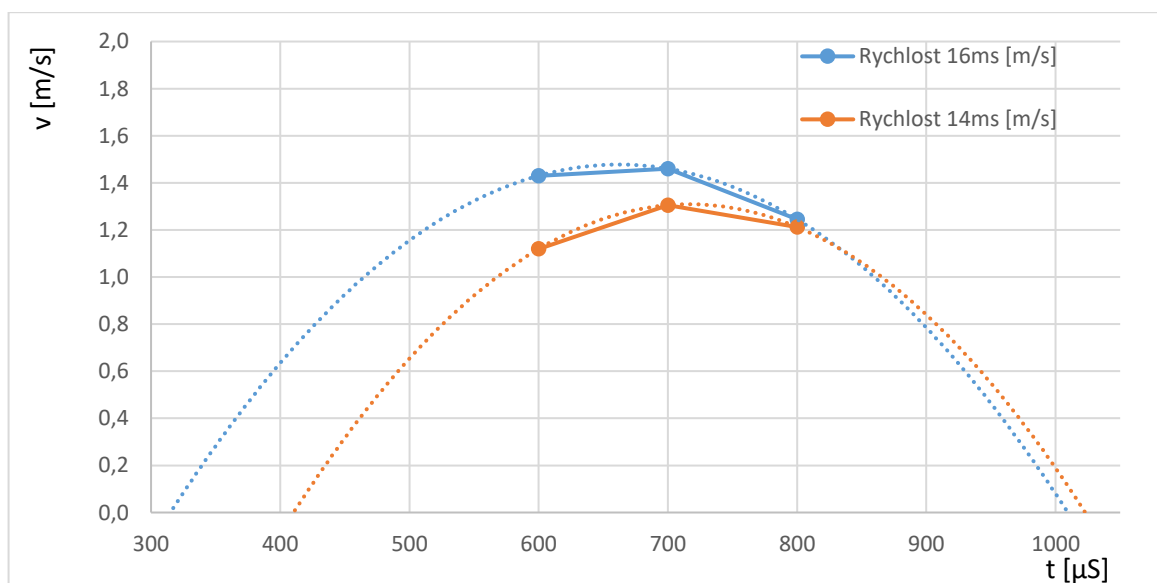
Časování 1. část [ms]	Časování 2. část [ms]	Časování 3. část [ $\mu$ s]	Dráha [cm]	Čas [s]	Rychlost [m/s]	Průměrná rychlost [m/s]
20	16	800	0,090	0,067	1,350	1,245
			0,075	0,067	1,125	
			0,095	0,067	1,425	
			0,080	0,067	1,200	
			0,075	0,067	1,125	
		700	0,070	0,050	1,400	1,460
			0,060	0,033	1,800	
			0,080	0,050	1,600	
			0,080	0,067	1,200	
			0,065	0,050	1,300	
		600	0,080	0,050	1,600	1,430
			0,070	0,067	1,050	
			0,075	0,050	1,500	
			0,070	0,050	1,400	
			0,080	0,050	1,600	

V první části tabulky je možné sledovat časování postupného vypínání při využití 16 ms u druhé části sekvence. Podle hodnot je možné sledovat že při správném načasování se hodnota průměrné rychlosti blíží téměř k 1,5 metrům za sekundu.

Tabulka 15: Časování postupného vypínání (část 2.)

Časování 1. část [ms]	Časování 2. část [ms]	Časování 3. část [ $\mu$ s]	Dráha [cm]	Čas [s]	Rychlost [m/s]	Průměrná rychlost [m/s]
20	14	800	0,080	0,083	0,960	1,212
			0,080	0,067	1,200	
			0,075	0,067	1,125	
			0,075	0,050	1,500	
			0,085	0,067	1,275	
		700	0,090	0,067	1,350	1,305
			0,080	0,067	1,200	
			0,065	0,050	1,300	
			0,070	0,050	1,400	
			0,085	0,067	1,275	
		600	0,070	0,067	1,050	1,119
			0,075	0,067	1,125	
			0,080	0,067	1,200	
			0,080	0,067	1,200	
			0,085	0,083	1,020	

Druhá část časování byla provedena pro načasování doby sepnutí druhé části sekvence na 14 ms podle průměrné rychlosti lze pozorovat že dochází k poklesu průměrné rychlosti což přivádí k závěru, že se nejedná o méně efektivní způsob načasování jak v případě využití 16 ms.



Obrázek 25: Graf vývoje rychlosti při postupném vypínání

Z grafu, který je uvedený výše je vidět že u obou případů byl nalezený bod zlomu a té je jasně vidět že využití 16 ms načasování byl správný krok, jelikož bod zlomu v tomto bodě je položený o více jak jednu desetinu výš. Z toho důvodu tedy finální použité časování u postupného vypínání bylo 20 ms pro první část sekvence 16 ms pro druhou část a nakonec 700  $\mu$ s pro třetí část.

### 5.3 Porovnání výsledků měření se simulacemi

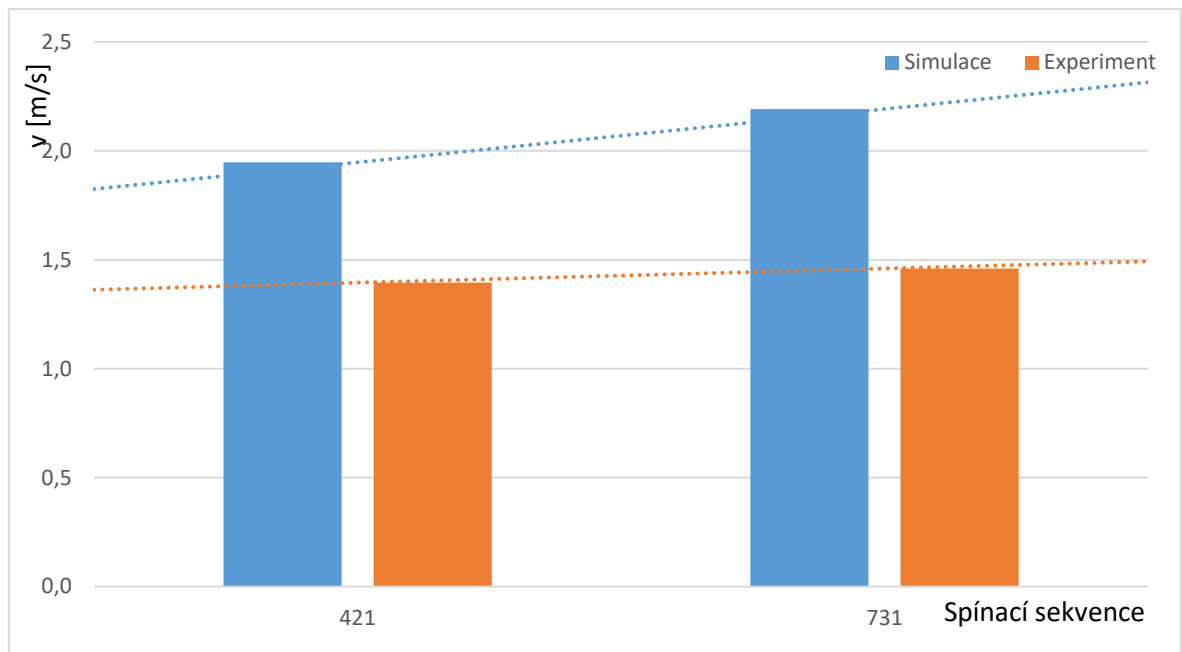
Během porovnávání s výsledky simulací je důležité si uvědomit že hodnoty pro které byly simulace prováděny jsou hodnoty ideální nikoliv hodnoty pro které bylo skutečně prováděno měření. Protože cívky nesplňovali parametry ani kompenzace zvýšeným příkonem evidentně nestačila pro dosažení simulovaného maxima.

Pokud je pozornost zaměřena spíše na průběh, a nikoliv na exaktní hodnoty. Je zřejmé že experiment byl úspěšný a simulace do jisté míry skutečně dovolují vytvářet předpoklady. Předběžné počítání času sepnutí se ukázalo jako velmi neefektivní a užitečné pouze pro vzdálené odhadnutí, jak postupovat při časování.

Tabulka 16: Srovnání rychlostí skutečných se simulovanými

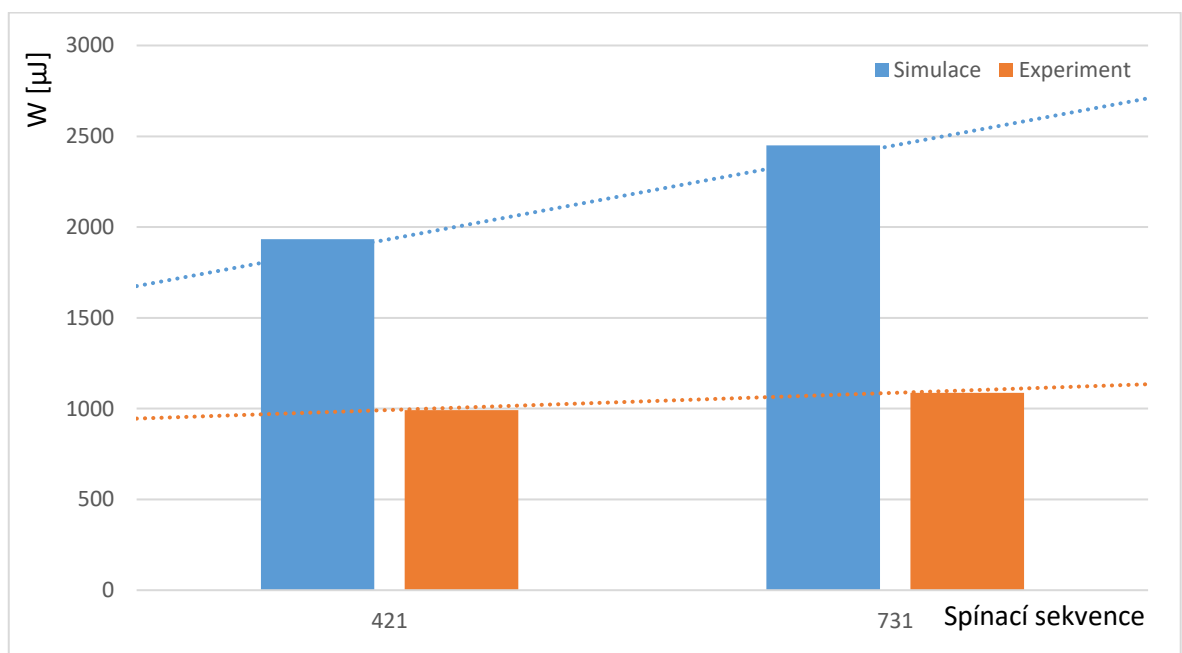
	421		731		Nárůst
	Rychlost [m/s]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Energie [ $\mu$ J]	
Simulace	1,947	1933,313	2,192	2450,481	12,58 %
Experiment	1,395	992,473	1,460	1087,116	4,66 %
Rozdíl	0,552	940,840	0,732	1363,365	

Hodnoty znázorněné v tabulce ukazují porovnání jednotlivých testovaných spínacích sekvencí v kombinaci se spočítaným rozdílem mezi simulací a experimentem. Navíc ještě doplněné o procentuální nárůst při změně sekvence. Nárůst zcela evidentně v případě experimentu nedosahuje tak velkého zlepšení oproti běžnému spínání jako tomu bylo v simulacích. Co se rozdílu mezi experimentem a simulací týče energie urychleného tělesa na konci dráhy je vždy přibližně o polovinu menší při experimentu jak při simulaci, a to i po pokusu o kompenzaci nedokonalostí cívky zvýšením proudu.



Obrázek 26: Graf srovnání výstupní rychlosti tělesa

Při grafickém znázornění je možné pozorovat že experiment skutečně nezaznamenal příliš velké rozdíly v rychlostech mezi spínacími sekvencemi, proto je oranžová spojovací čára téměř rovnoběžná s osou  $x$ , na rozdíl od modré spojovací čáry mezi hodnotami simulovanými, která je viditelně mnohem více nakloněná nahoru. Samotné rozdíly mezi experimentem a simulací jsou okolo 25 %.



Obrázek 27: Graf srovnání výstupní energie tělesa



Graf znázorňující srovnání výstupních energií tělesa na konci dráhy je mnohem horší. Experimentální hodnoty jsou o asi polovinu menší, jak v případě simulací to je způsobeno zejména faktem, že v rovnici pro výpočet kinetické energie se využívá čtverec rychlosti, proto tedy pokles energie je mnohem menší jak v případě rychlosti. Což také vede k velkému rozdílu náklonů spojujících křivek mezi spínacími metodami. Z pohledu energie se zdá postupné vypínání ještě méně významné při zaměření na simulované hodnoty.

Funkčnost samotného principu urychlování těles magnetickým polem byla potvrzena. Z důvodu rozdílných hodnot cívek vlivem chyb při navíjení však není možné jednoznačně potvrdit úplnou pravdivost hodnot nasimulovaných. Je však možné říct že simulace dovolují jakési přiblížení, zda návrh bude skutečně těleso uvádět do pohybu.

## 6 PRŮMYSLOVÉ VYUŽITÍ

Využití urychlování předmětů magnetickým polem v průmyslu je nesčetné množství. Urychlování ve své podstatě znamená uvádění do pohybu tedy jakékoliv zařízení využívající magnetické pole k uvedení čehokoliv do pohybu využívá právě tento princip.

### 6.1 Běžné průmyslové využití

Tato podkapitola bude věnována běžnému průmyslovému využití kdy zařízení už jsou uvedena na trhu.

#### 6.1.1 Reléové spínače a stykače

Jak bylo zmíněno již výše relé se skládá z cívky a kontaktu. Po přivedení napětí na cívku je vybuzeno magnetické pole, které uvede do pohybu kontakt, který je následně sepnut nebo rozepnut podle konstrukce samotného relé. Přes to že relé má i variantu pro střídavé napětí ve své podstatě je princip funkce téměř identický.

Stykače by se daly označit za silnoproudou variantu reléových spínačů. Často se s nimi můžeme setkat při ovládání motorů a čerpadel. Kromě jejich robustní konstrukce se od reléových spínačů ještě liší tím, že jsou přítomné kontakty sloužící pro tvorbu takzvaných stykačových kombinací, pomocí kterých dochází k ovládání daného obvodu. Jedná se tak o méně flexibilní verzi programovatelných automatů.

#### 6.1.2 Jazyčkové kontakty

Jazyčkové kontakty fungují velmi podobně jako reléové kontakty. Rozdílem je že jazyčkové kontakty jsou běžně manipulovány pomocí magnetickým polem, které dodává permanentní magnet, pokud se přiblíží. Jazyčkové kontakty jsou běžně používané v plášťové ochraně, jako detektory otevření.

#### 6.1.3 Elektromagnety s posuvným jádrem

Elektromagnet s posuvným jádrem se skládá ze solenoidu a volného jádra které se po přivedení napětí na solenoid posune a po vypnutí zdroje napětí, se díky pružině zasune zpět. Tento jednoduchý „push-pull“ mechanismus lze využít v bankomatech, zámcích, šicích strojích a mnoha dalších zařízeních.

Elektromagnetický zámek je čím dál častěji využívaný příklad využití elektromagnetu v průmyslu komerční bezpečnosti, protože dovoluje provedení plně automatizovaných elektronických přístupových systémů.

Tyto zámky jsou dodávány ve dvou konfiguracích. Jedna v případě ztráty napájení zůstane zamčená a druhá možnost se v případě ztráty napětí odemkne.

V případě že se jedná o možnost, která zůstane zamčená se obvykle jedná o domovní dveře, které mají možnost otevření mechanicky pomocí klíče. Aby nedošlo k momentu, kdy se vlastník domu nedostane do domu.

Možnost kdy v případě přesušení napětí dojde k otevření dveří může být použita například u vnitřních dveří nebo u veřejných budov s velkou koncentrací lidí. Pokud by velké množství lidí bylo zamčeno v uzavřeném prostoru mohlo by to způsobit nechtěnou paniku.

#### 6.1.4 Elektromotory

Většina zmíněných využití se zaměřovala na pohyb tělesa přímočaře. Ovšem i radiální pohyb který vytváří elektromotor je použitím magnetického nebo elektromagnetického pole. Následný pohyb je pak použití opět v nesčetném množství aplikací od moderních elektroaut po kompresory a čerpadla. Protože tato práce je o použití magnetického pole budou zde vynechány elektromotory využívající střídavé napětí.

Stejnoseměrný motor využívá buďto dvou elektromagnetů nebo jednoho elektromagnetu a jednoho permanentního magnetu. Ke generování točivého momentu dochází působením odpudivé síly i přitažné síly na magnetické pole rotoru polem které generuje stator. Pokud je rotor tvořený elektromagnetem hřídel je opatřena také komutátorem, který způsobuje přepólování rotorové cívky a tím zajišťuje že na rotor vždy působí síla která způsobuje pohyb a nedochází k ustálení.

Stále častěji používané jsou také krokové motory krokové se skládají z pólových dvojic uložených ve statoru, které mají za úkol generovat magnetické pole a buď to elektromagnetu na rotoru nebo permanentního magnetu. K tvorbě točivého momentu dochází postupným spínáním pólových dvojic čímž dovoluje přímo kontrolovat v jaké poloze dochází k jeho zastavení a také dovoluje jednoduchou změnu pohybu. Zvýšením počtu pólových dvojic dochází ke zvýšení přesnosti pohybu. Obvykle je uváděný minimální pohyb v úhlových jednotkách.

## 6.2 Experimentální a možné budoucí využití

Protože v současné době není možné efektivně uchovávat velké množství elektrické energie níže uvedené příklady není v současné době používat.

### 6.2.1 Způsob dopravy

Kromě použití elektroaut, jak již bylo zmíněno výše. Použití urychlování magnetickým polem ve vesmírném průmyslu je často zmiňované, protože v prostoru se sníženou nebo nulovou gravitací a žádnou atmosférou je možné předmět urychlit velmi rychle, a přitom neplýtvat drahocenným palivem které by mohlo být potřeba někdy v průběhu cesty. [7]

## 6.3 Řízené značkování narušitele při probíhající krádeži

Kombinací prvků chemické ochrany předmětů a ferrokapaliny, by bylo možné vytvořit kapalinu kterou je následně možné magnetickým polem urychlit a tím ji vypálit na narušitele což může dopomoci jeho následné identifikaci.

Protože ferrokapalina, je částečně tvořena suspendovanými magnetickými částicemi o mikroskopických rozměrech bylo by dokonce možné „označkováného“ narušitele detekovat běžným ručním detektorem kovů. Mikroskopické magnetické částice jsou schopny se zachytit na látce a zůstat tam následně tedy v kombinaci s prvky chemické ochrany by bylo možné vytvořit kombinaci která by nespolehala pouze na přítomnost kovu na textilu ale také samotném chemickém prvku v případě, že narušitel oblečení někde odhodil před tím, než byl dopaden.

## ZÁVĚR

Práce se věnovala urychlování předmětů magnetickým polem. Úvod práce zahrnuje představení moderních trendů a postupů v tomto odvětví. Následuje matematicko-fyzikální rešerši zaměřující se na hlavní principy, které tato technologie využívá, a které byly použity v pozdějších fázích práce. Poslední teoretickou částí byla příprava návrhu způsobu urychlování tělesa magnetickým polem, spolu s elektrotechnickým základem pro konstrukci návrhu.

Samotné urychlování bylo nejprve nasimulované použitím metody konečných prvků, které následně sloužilo k optimalizaci celého návrhu, vytvoření představy o výsledných hodnotách a pro usnadnění postupu při programování ovládacího mikrokontroleru Arduino. U simulací byla využita polynomiální interpolace, pro získání informací o vývoji sledovaných parametrů při změně optimalizovaných konstant.

Kapitola věnující se konstrukci a měření skutečných hodnot obsahovala popis součástí celého návrhu, jejich propojení a účelu. Předmluva měření obsahovala metodiku realizace experimentu a popis rozhodovacího procesu, při časování jednotlivých prepínacích časů. Samotné naměřené hodnoty uvedené v tabulkové a grafické formě predikovaly další vývoj měření. Nakonec byly hodnoty porovnané s hodnotami nasimulovanými a byly vyvozeny závěry z porovnání výsledků, ale také zdůvodněny rozdíly ve výsledcích.

Závěrem práce jsou uvedeny případy využití urychlování předmětů pomocí magnetického pole v průmyslu. Jsou zmíněny základní každodenní případy využití, jak v běžném průmyslu, tak v průmyslu komerční bezpečnosti. Obsaženy jsou také příklady experimentální, které mohou své místo najít v budoucnu, až se průmysl rozšíří mimo hranice planety Země či technologie dosáhne úrovně, kdy tento způsob vysoce přesáhne výhody způsobů urychlování mechanickým pohybem, nebo chemickým hořením.

**SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY**

- [1] Ion Propulsion: Farther, Faster, Cheaper [online]. Cleveland: NASA Glenn Research Center, 2004 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/Ion\\_Propulsion1.html](https://www.nasa.gov/centers/glenn/technology/Ion_Propulsion1.html)
- [2] KLEPPNER, Daniel a Robert J. KOLENKOW. An introduction to mechanics. 3rd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010, s. 499-500. ISBN 978-0-521-19821-9.
- [3] WILSON, Edmund. An Introduction to Particle Accelerators [online]. Oxford University Press, 2001 [cit. 2020-07-03]. DOI: 10.1093/acprof:oso/9780198508298.001.0001. ISBN 9780198508298.
- [4] Accelerators [online]. Geneva: CERN [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://home.cern/science/accelerators>
- [5] Particle Accelerator Magnets. KR Tech [online]. Daegu [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <http://www.krtech.co.kr/particle-accelerator-magnet-2/>
- [6] Particle Accelerator Magnets. Crimson Industries DuxCollege [online]. Daegu [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: <https://dc.edu.au/hsc-physics-quanta-to-quarks/>
- [7] POLZIN, Kurt A., Amanda B. CIPRIANO, Adam K. MARTIN a Connie Y. LIU. Coilgun Acceleration Model Containing Multiple Interacting Coils [online]. NASA, 7 Jan 2019 [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20190000731.pdf>
- [8] ABDO, Tamer M., Ahmed L. ELREFAI, Amr A. ADLY a Osama A. MAHGOUB. Performance analysis of coil-gun electromagnetic launcher using a finite element coupled model. In: 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON) [online]. IEEE, 2016, 2016, s. 506-511 [cit. 2020-07-03]. DOI: 10.1109/MEPCON.2016.7836938. ISBN 978-1-4673-9063-7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7836938/>
- [9] WINARNO, Basuki, Rakhmad Gust PUTRA, Indarto YUWONO, Agus Indra GUNAWAN a Bambang SUMANTRI. Control of Velocity Projectile on Multistage Coil gun. In: 2018 International Conference on Applied Science and Technology (ICAST) [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 24-29 [cit. 2020-07-03]. DOI:

- 10.1109/iCAST1.2018.8751558. ISBN 978-1-5386-7548-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8751558/>
- [10] File: Coilgun.png [online]. 2006 [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Coilgun.png>
- [11] Ion Thruster Sets World Record [online]. NASA, 2017 [cit. 2020-07-03]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_2416.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2416.html)
- [12] HALL EFFECT THRUSTERS. European Space Agency [online]. 2019 [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://sci.esa.int/web/smart-1/-/34201-electric-spacecraft-propulsion?fbodylongid=1538>
- [13] Elektřina a magnetismus: Elektromagnetická indukce. Ústav Fyziky a Materiálového Inženýství [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/el\\_mag/F1\\_12.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/el_mag/F1_12.pdf)
- [14] WHEELER, H.A. Simple Inductance Formulas for Radio Coils. Proceedings of the IRE. 1928, 16(10), 1398-1400. DOI: 10.1109/JRPROC.1928.221309. ISSN 0096-8390. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1669896/>
- [15] MAXWELL, Clerk James. Treatise on Electricity and Magnetism, Vol. 2. 3rd ed. New York: Dover Publications, 1954. ISBN 978-0-486-60637-8.
- [16] KING, Louis. On some new formulæ for the numerical calculation of the mutual induction of coaxial circles. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character [online]. 1997, 100(702), 60-66 [cit. 2020-07-13]. DOI: 10.1098/rspa.1921.0070. ISSN 0950-1207. Dostupné z: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspa.1921.0070>
- [17] Elektřina a magnetismus: Magnetické pole. Ústav Fyziky a Materiálového Inženýství [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/el\\_mag/F1\\_11.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/el_mag/F1_11.pdf)
- [18] Mechanika a termika: Dynamika II. Ústav Fyziky a Materiálového Inženýství [online]. [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/mech\\_term/F1\\_04.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/mech_term/F1_04.pdf)
- [19] PAUL, Clayton R. Introduction to electromagnetic compatibility. 2nd ed. Hoboken, New Jersey: Wiley-Interscience, 2006. ISBN 9780471758143

- [20] Tabulka zatížitelnosti DPS a tavný proud vodičů [online]. Praha: RIGOLETO, 2005 [cit. 2020-07-04]. Dostupné z: <http://stuntj.sweb.cz/file/tabmeddps.pdf>
- [21] SVAČINA, Jiří. Elektromagnetická kompatibility: principy a poznámky. Brno: VUT v Brně, 2001. ISBN 9788021418738
- [22] MEEKER, David. Finite Element Method Magnetics: User's Manual [online]. 2015 [cit. 2020-07-18]. Dostupné z: <http://www.femm.info/Archives/doc/manual.pdf>



**SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

CRT	Cathode Ray Tube
LHC	Large Hardron Colider
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NEXT	NASA's Evolutionary Xenon Thruster
$\Omega$	Fyzikální veličina symbolizující elektrický odpor
$\Phi$	Fyzikální veličina značící magnetický indukční tok
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
FEMM	Finite Element Method Magnetics

**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obrázek 1: Elektromagnety urychlovače částic [5] .....	12
Obrázek 2: Diagram Elektromagnetického urychlovače částic [6] .....	13
Obrázek 3: Grafická ukázka vícestupňové Gaussovy pušky [10] .....	14
Obrázek 4: Grafický diagram Hallova Iontového motoru [12] .....	16
Obrázek 5: Silový průběh vzorových cívek.....	23
Obrázek 6: Kód pro výpočet délky kabelu vícevrstvé cívky .....	25
Obrázek 7: Zapojení platformy Arduino .....	30
Obrázek 8: Elektrotechnické schéma zapojení .....	31
Obrázek 9: Návrh zapojení za optočleny .....	32
Obrázek 10: Ukázka chytré sítě .....	34
Obrázek 11: Ukázka vzhledu osově symetrického návrhu .....	35
Obrázek 12: Diagramový popis dráhy pohybu .....	36
Obrázek 13: Graf vývoje kinetické energie při zvětšování vzdálenosti .....	38
Obrázek 14: Graf predikce nárůstu energie při zvyšování počtu cívek .....	40
Obrázek 15: Graf vývoje úst'ové kinetické na základě predikce .....	42
Obrázek 16: Graf silového průběhu působení sekvence 421 .....	45
Obrázek 17: Graf silového průběhu působení sekvence 46231 .....	47
Obrázek 18: Graf silového průběhu působení sekvence 731 .....	49
Obrázek 19: Blokový diagram zapojení celého experimentu .....	50
Obrázek 20: Ukázka ovládací krabičky .....	53
Obrázek 21: Rozhodovací diagram postupu měření .....	55
Obrázek 22: Graf vývoje rychlosti při různém časování prvního segmentu .....	57
Obrázek 23: Graf vývoje rychlosti při různém časování druhého segmentu.....	59
Obrázek 24: Graf vývoje rychlosti při různém časování třetího segmentu .....	60
Obrázek 25: Graf vývoje rychlosti při postupném vypínání.....	62
Obrázek 26: Graf srovnání výstupní rychlosti tělesa.....	64
Obrázek 27: Graf srovnání výstupní energie tělesa .....	64

**SEZNAM TABULEK**

Tabulka 1: Vývoj energie a síly, vůči dráze a času pro 2 cívky .....	37
Tabulka 2: Výsledek polynomiální interpolace vzdálenosti cívek .....	38
Tabulka 3: Koncové hodnoty pro počet cívek .....	39
Tabulka 4: Predikce nárustu energie při zvyšování počtu cívek .....	39
Tabulka 5: Důležité body v průběhu pohybu pro různé proudy .....	41
Tabulka 6: Predikce výstupních veličin při zvyšování proudu.....	41
Tabulka 7: Vývoj veličin při sekvenci 421 .....	44
Tabulka 8: Vývoj veličin při sekvenci 46231 .....	46
Tabulka 9: Vývoj veličin při sekvenci 731 .....	47
Tabulka 10: Skutečný odpor cívek a délka použitého drátu .....	53
Tabulka 11: Časování prvního segmentu.....	56
Tabulka 12: Časování druhého segmentu .....	58
Tabulka 13: Časování třetího segmentu.....	60
Tabulka 14: Časování postupného vypínání (část 1.) .....	61
Tabulka 15: Časování postupného vypínání (část 2.) .....	62
Tabulka 16: Srovnání rychlostí skutečných se simulovanými.....	63

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P 1: Průběhy dvou cívek s odstupem 1 mm

Příloha P 2: Průběhy dvou cívek s odstupem 2 mm

Příloha P 3: Průběhy dvou cívek s odstupem 4 mm

Příloha P 4: Působení jedné cívky

Příloha P 5: Působení dvou cívek

Příloha P 6: Působení tří cívek

Příloha P 7: Vliv proudu na zrychlení tělesa 1. část

Příloha P 8: Vliv proudu na zrychlení tělesa 2. část

Příloha P 9: Metoda spínání 421

Příloha P 10: Metoda spínání 46231

Příloha P 11: Metoda spínání 731

## PŘÍLOHA P 1: PRŮBĚHY DVOU CÍVEK S ODSTUPEM 1 MM

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,174	1,544	0,077	6,460
-0,725	6,527	3,175	0,111	9,114
-0,700	6,908	4,902	0,138	11,123
-0,675	7,312	6,730	0,162	12,792
-0,650	7,740	8,665	0,183	14,241
-0,625	8,170	10,708	0,204	15,532
-0,600	8,637	12,867	0,223	16,702
-0,575	9,204	15,168	0,243	17,775
-0,550	9,733	17,601	0,261	18,767
-0,525	10,330	20,184	0,280	19,691
-0,500	10,982	22,929	0,298	20,556
-0,475	11,611	25,832	0,317	21,369
-0,450	12,324	28,913	0,335	22,136
-0,425	13,061	32,179	0,353	22,863
-0,400	13,841	35,639	0,372	23,552
-0,375	14,799	39,339	0,391	24,208
-0,350	15,693	43,262	0,410	24,832
-0,325	16,763	47,453	0,429	25,428
-0,300	17,754	51,891	0,449	25,998
-0,275	18,813	56,594	0,469	26,543
-0,250	19,887	61,566	0,489	27,065
-0,225	20,956	66,805	0,509	27,566
-0,200	22,175	72,349	0,530	28,047
-0,175	23,344	78,185	0,551	28,510
-0,150	24,528	84,317	0,572	28,955
-0,125	25,782	90,762	0,593	29,384
-0,100	26,901	97,488	0,615	29,798
-0,075	27,868	104,454	0,637	30,197
-0,050	28,745	111,641	0,658	30,584
-0,025	29,629	119,048	0,680	30,957
0,000	30,261	126,613	0,701	31,319
0,025	30,686	134,285	0,722	31,671
0,050	30,956	142,024	0,742	32,012
0,075	31,155	149,812	0,762	32,345
0,100	31,235	157,621	0,782	32,668
0,125	30,708	165,298	0,801	32,984
0,150	30,439	172,908	0,819	33,293
0,175	30,024	180,414	0,837	33,595
0,200	29,394	187,762	0,854	33,890
0,225	28,567	194,904	0,870	34,181
0,250	28,332	201,987	0,885	34,465

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,275	27,212	208,790	0,900	34,745
0,300	26,464	215,406	0,914	35,021
0,325	25,496	221,780	0,928	35,292
0,350	24,927	228,012	0,941	35,560
0,375	24,008	234,014	0,953	35,824
0,400	22,963	239,754	0,965	36,085
0,425	21,811	245,207	0,976	36,343
0,450	20,705	250,384	0,986	36,598
0,475	19,923	255,364	0,996	36,850
0,500	19,189	260,161	1,005	37,100
0,525	18,007	264,663	1,013	37,348
0,550	17,004	268,914	1,022	37,593
0,575	16,208	272,966	1,029	37,837
0,600	15,202	276,767	1,036	38,079
0,625	14,143	280,303	1,043	38,320
0,650	13,345	283,639	1,049	38,559
0,675	12,498	286,763	1,055	38,796
0,700	11,485	289,635	1,060	39,033
0,725	10,322	292,215	1,065	39,268
0,750	9,486	294,587	1,069	39,502
0,775	8,711	296,764	1,073	39,736
0,800	7,886	298,736	1,077	39,968
0,825	6,511	300,363	1,080	40,200
0,850	5,627	301,770	1,082	40,431
0,875	4,804	302,971	1,084	40,662
0,900	3,893	303,944	1,086	40,892
0,925	2,700	304,620	1,087	41,123
0,950	2,677	305,289	1,088	41,352
0,975	2,812	305,992	1,090	41,582
1,000	2,979	306,737	1,091	41,811
1,025	3,116	307,516	1,092	42,040
1,050	3,274	308,334	1,094	42,269
1,075	3,432	309,192	1,095	42,497
1,100	3,632	310,100	1,097	42,725
1,125	3,824	311,056	1,099	42,953
1,150	4,042	312,066	1,100	43,180
1,175	4,248	313,128	1,102	43,407
1,200	4,471	314,246	1,104	43,634
1,225	4,689	315,418	1,106	43,860
1,250	4,960	316,658	1,109	44,086
1,275	5,258	317,973	1,111	44,311
1,300	5,552	319,361	1,113	44,536
1,325	5,826	320,817	1,116	44,760

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,350	6,134	322,351	1,118	44,984
1,375	6,523	323,982	1,121	45,207
1,400	6,922	325,712	1,124	45,430
1,425	7,280	327,532	1,127	45,652
1,450	7,666	329,449	1,131	45,873
1,475	8,150	331,486	1,134	46,094
1,500	8,635	333,645	1,138	46,314
1,525	9,171	335,938	1,142	46,534
1,550	9,690	338,360	1,146	46,752
1,575	10,260	340,925	1,150	46,970
1,600	10,891	343,648	1,155	47,187
1,625	11,522	346,529	1,160	47,403
1,650	12,260	349,594	1,165	47,618
1,675	13,047	352,855	1,170	47,832
1,700	13,795	356,304	1,176	48,045
1,725	14,725	359,985	1,182	48,257
1,750	15,640	363,895	1,188	48,468
1,775	16,569	368,038	1,195	48,678
1,800	17,664	372,454	1,202	48,886
1,825	18,708	377,131	1,210	49,094
1,850	19,676	382,050	1,218	49,300
1,875	20,947	387,286	1,226	49,504
1,900	22,146	392,823	1,235	49,708
1,925	23,386	398,669	1,244	49,909
1,950	24,609	404,822	1,253	50,109
1,975	25,840	411,282	1,263	50,308
2,000	27,170	418,074	1,274	50,505
2,025	28,053	425,087	1,284	50,701
2,050	28,916	432,316	1,295	50,894
2,075	29,826	439,773	1,306	51,087
2,100	30,497	447,397	1,318	51,277
2,125	30,698	455,071	1,329	51,466
2,150	31,117	462,851	1,340	51,653
2,175	31,257	470,665	1,352	51,839
2,200	31,460	478,530	1,363	52,023
2,225	31,091	486,303	1,374	52,206
2,250	30,795	494,001	1,385	52,387
2,275	30,269	501,569	1,395	52,567
2,300	29,548	508,956	1,405	52,746
2,325	29,309	516,283	1,415	52,923
2,350	28,241	523,343	1,425	53,099
2,375	27,462	530,209	1,434	53,274
2,400	26,782	536,904	1,443	53,448

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,425	25,654	543,318	1,452	53,620
2,450	24,760	549,508	1,460	53,792
2,475	24,210	555,560	1,468	53,963
2,500	23,125	561,342	1,476	54,133
2,525	21,893	566,815	1,483	54,302
2,550	21,371	572,157	1,490	54,470
2,575	20,251	577,220	1,497	54,637
2,600	19,317	582,049	1,503	54,804
2,625	18,316	586,629	1,509	54,970
2,650	17,237	590,938	1,514	55,135
2,675	16,276	595,007	1,520	55,300
2,700	15,409	598,859	1,524	55,464
2,725	14,295	602,433	1,529	55,628
2,750	13,575	605,827	1,533	55,791
2,775	12,599	608,977	1,537	55,954
2,800	11,552	611,865	1,541	56,117
2,825	10,552	614,503	1,544	56,279
2,850	9,833	616,961	1,547	56,440
2,875	8,786	619,157	1,550	56,602
2,900	8,090	621,180	1,553	56,763
2,925	6,598	622,830	1,555	56,924
2,950	5,872	624,298	1,557	57,084
2,975	4,909	625,525	1,558	57,245
3,000	4,193	626,573	1,559	57,405
3,025	3,014	627,327	1,560	57,566
3,050	1,805	627,778	1,561	57,726
3,075	0,878	627,997	1,561	57,886
3,100	0,031	628,005	1,561	58,046



## PŘÍLOHA P2: PRŮBĚHY DVOU CÍVEK S ODSTUPEM 2 MM

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,174	1,544	0,077	6,460
-0,725	6,527	3,175	0,111	9,114
-0,700	6,908	4,902	0,138	11,123
-0,675	7,312	6,730	0,162	12,792
-0,650	7,740	8,665	0,183	14,241
-0,625	8,170	10,708	0,204	15,532
-0,600	8,637	12,867	0,223	16,702
-0,575	9,204	15,168	0,243	17,775
-0,550	9,733	17,602	0,261	18,767
-0,525	10,330	20,184	0,280	19,691
-0,500	10,982	22,929	0,298	20,556
-0,475	11,611	25,832	0,317	21,369
-0,450	12,324	28,913	0,335	22,136
-0,425	13,061	32,179	0,353	22,863
-0,400	13,841	35,639	0,372	23,552
-0,375	14,799	39,339	0,391	24,208
-0,350	15,692	43,262	0,410	24,832
-0,325	16,763	47,453	0,429	25,428
-0,300	17,754	51,891	0,449	25,998
-0,275	18,813	56,594	0,469	26,543
-0,250	19,887	61,566	0,489	27,065
-0,225	20,955	66,805	0,509	27,566
-0,200	22,175	72,349	0,530	28,047
-0,175	23,344	78,185	0,551	28,510
-0,150	24,528	84,317	0,572	28,955
-0,125	25,781	90,762	0,593	29,384
-0,100	26,901	97,487	0,615	29,798
-0,075	27,868	104,454	0,637	30,197
-0,050	28,745	111,641	0,658	30,584
-0,025	29,629	119,048	0,680	30,957
0,000	30,260	126,613	0,701	31,319
0,025	30,686	134,284	0,722	31,671
0,050	30,956	142,023	0,742	32,012
0,075	31,155	149,812	0,762	32,345
0,100	31,235	157,621	0,782	32,668
0,125	30,714	165,299	0,801	32,984
0,150	30,439	172,909	0,819	33,293
0,175	30,024	180,415	0,837	33,595
0,200	29,394	187,764	0,854	33,890
0,225	28,568	194,906	0,870	34,181
0,250	28,332	201,989	0,885	34,465

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,275	27,213	208,792	0,900	34,745
0,300	26,463	215,408	0,914	35,021
0,325	25,493	221,781	0,928	35,292
0,350	24,927	228,013	0,941	35,560
0,375	24,009	234,016	0,953	35,824
0,400	22,963	239,756	0,965	36,085
0,425	21,811	245,209	0,976	36,343
0,450	20,706	250,385	0,986	36,598
0,475	19,924	255,366	0,996	36,850
0,500	19,188	260,163	1,005	37,100
0,525	18,007	264,665	1,013	37,348
0,550	17,005	268,916	1,022	37,593
0,575	16,209	272,969	1,029	37,837
0,600	15,203	276,770	1,036	38,079
0,625	14,144	280,305	1,043	38,320
0,650	13,345	283,642	1,049	38,559
0,675	12,498	286,766	1,055	38,796
0,700	11,486	289,638	1,060	39,033
0,725	10,321	292,218	1,065	39,268
0,750	9,490	294,590	1,069	39,502
0,775	8,710	296,768	1,073	39,736
0,800	7,887	298,740	1,077	39,968
0,825	6,515	300,368	1,080	40,200
0,850	5,627	301,775	1,082	40,431
0,875	4,804	302,976	1,084	40,662
0,900	3,885	303,947	1,086	40,892
0,925	2,697	304,621	1,087	41,122
0,950	2,202	305,172	1,088	41,352
0,975	2,310	305,749	1,089	41,582
1,000	2,445	306,361	1,090	41,811
1,025	2,554	306,999	1,092	42,040
1,050	2,681	307,670	1,093	42,269
1,075	2,807	308,371	1,094	42,498
1,100	2,967	309,113	1,095	42,726
1,125	3,119	309,893	1,097	42,955
1,150	3,295	310,717	1,098	43,182
1,175	3,458	311,581	1,100	43,410
1,200	3,634	312,490	1,101	43,637
1,225	3,806	313,441	1,103	43,864
1,250	4,022	314,447	1,105	44,090
1,275	4,257	315,511	1,107	44,316
1,300	4,490	316,634	1,109	44,542
1,325	4,699	317,808	1,111	44,768

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,350	4,947	319,045	1,113	44,992
1,375	5,248	320,357	1,115	45,217
1,400	5,565	321,748	1,117	45,441
1,425	5,842	323,209	1,120	45,664
1,450	6,152	324,747	1,123	45,887
1,475	6,518	326,376	1,125	46,110
1,500	6,895	328,100	1,128	46,332
1,525	7,320	329,930	1,132	46,553
1,550	7,712	331,858	1,135	46,773
1,575	8,149	333,895	1,138	46,993
1,600	8,641	336,055	1,142	47,213
1,625	9,129	338,337	1,146	47,431
1,650	9,698	340,762	1,150	47,649
1,675	10,320	343,342	1,154	47,866
1,700	10,873	346,060	1,159	48,082
1,725	11,597	348,959	1,164	48,297
1,750	12,307	352,036	1,169	48,512
1,775	13,059	355,301	1,174	48,725
1,800	13,816	358,755	1,180	48,937
1,825	14,776	362,449	1,186	49,149
1,850	15,579	366,344	1,192	49,359
1,875	16,565	370,485	1,199	49,568
1,900	17,617	374,889	1,206	49,776
1,925	18,802	379,590	1,214	49,983
1,950	19,808	384,542	1,222	50,188
1,975	20,877	389,761	1,230	50,392
2,000	22,213	395,315	1,239	50,594
2,025	23,445	401,176	1,248	50,796
2,050	24,537	407,310	1,257	50,995
2,075	25,953	413,798	1,267	51,193
2,100	27,153	420,586	1,278	51,390
2,125	27,849	427,549	1,288	51,585
2,150	28,904	434,775	1,299	51,778
2,175	29,754	442,213	1,310	51,969
2,200	30,512	449,841	1,321	52,159
2,225	30,831	457,549	1,333	52,348
2,250	31,272	465,367	1,344	52,535
2,275	31,284	473,188	1,355	52,720
2,300	31,269	481,005	1,366	52,904
2,325	30,941	488,740	1,377	53,086
2,350	30,693	496,414	1,388	53,267
2,375	30,098	503,938	1,398	53,446
2,400	29,346	511,275	1,409	53,624

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,425	29,312	518,603	1,419	53,801
2,450	28,274	525,671	1,428	53,977
2,475	27,499	532,546	1,438	54,151
2,500	26,672	539,214	1,447	54,325
2,525	25,688	545,636	1,455	54,497
2,550	25,188	551,933	1,464	54,668
2,575	24,238	557,992	1,472	54,839
2,600	23,136	563,776	1,479	55,008
2,625	21,942	569,262	1,486	55,177
2,650	21,288	574,583	1,493	55,344
2,675	20,274	579,652	1,500	55,511
2,700	19,175	584,446	1,506	55,678
2,725	18,290	589,018	1,512	55,844
2,750	17,338	593,353	1,517	56,009
2,775	16,294	597,426	1,523	56,173
2,800	15,568	601,318	1,528	56,337
2,825	14,464	604,934	1,532	56,500
2,850	13,588	608,331	1,537	56,663
2,875	12,509	611,459	1,540	56,826
2,900	11,535	614,342	1,544	56,988
2,925	10,620	616,997	1,547	57,150
2,950	9,829	619,455	1,550	57,311
2,975	8,798	621,654	1,553	57,472
3,000	7,708	623,581	1,556	57,633
3,025	6,613	625,234	1,558	57,794
3,050	5,769	626,677	1,559	57,954
3,075	4,908	627,904	1,561	58,114
3,100	4,229	628,961	1,562	58,274
3,125	3,010	629,713	1,563	58,434
3,150	1,705	630,139	1,564	58,594
3,175	0,906	630,366	1,564	58,754
3,200	0,069	630,383	1,564	58,914

### PŘÍLOHA P3: PRŮBĚHY DVOU CÍVEK S ODSTUPEM 4 MM

Dráha [cm]	Síla [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,174	1,544	0,077	6,460
-0,725	6,527	3,175	0,111	9,114
-0,700	6,908	4,902	0,138	11,123
-0,675	7,312	6,730	0,162	12,792
-0,650	7,740	8,665	0,183	14,241
-0,625	8,170	10,708	0,204	15,532
-0,600	8,637	12,867	0,223	16,702
-0,575	9,204	15,168	0,243	17,775
-0,550	9,733	17,602	0,261	18,767
-0,525	10,330	20,184	0,280	19,691
-0,500	10,982	22,929	0,298	20,556
-0,475	11,611	25,832	0,317	21,369
-0,450	12,324	28,913	0,335	22,136
-0,425	13,061	32,179	0,353	22,863
-0,400	13,841	35,639	0,372	23,552
-0,375	14,799	39,339	0,391	24,208
-0,350	15,692	43,262	0,410	24,832
-0,325	16,763	47,453	0,429	25,428
-0,300	17,754	51,891	0,449	25,998
-0,275	18,813	56,594	0,469	26,543
-0,250	19,887	61,566	0,489	27,065
-0,225	20,955	66,805	0,509	27,566
-0,200	22,175	72,349	0,530	28,047
-0,175	23,344	78,185	0,551	28,510
-0,150	24,528	84,317	0,572	28,955
-0,125	25,781	90,762	0,593	29,384
-0,100	26,901	97,487	0,615	29,798
-0,075	27,868	104,454	0,637	30,197
-0,050	28,745	111,641	0,658	30,584
-0,025	29,629	119,048	0,680	30,957
0,000	30,260	126,613	0,701	31,319
0,025	30,686	134,285	0,722	31,671
0,050	30,956	142,023	0,742	32,012
0,075	31,155	149,812	0,762	32,345
0,100	31,235	157,621	0,782	32,668
0,125	30,714	165,300	0,801	32,984
0,150	30,439	172,909	0,819	33,293
0,175	30,024	180,416	0,837	33,595
0,200	29,393	187,764	0,854	33,890
0,225	28,568	194,906	0,870	34,181
0,250	28,332	201,989	0,885	34,465

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,275	27,213	208,792	0,900	34,745
0,300	26,463	215,408	0,914	35,021
0,325	25,493	221,781	0,928	35,292
0,350	24,927	228,013	0,941	35,560
0,375	24,009	234,016	0,953	35,824
0,400	22,962	239,756	0,965	36,085
0,425	21,811	245,209	0,976	36,343
0,450	20,706	250,386	0,986	36,598
0,475	19,924	255,366	0,996	36,850
0,500	19,189	260,164	1,005	37,100
0,525	18,007	264,665	1,013	37,348
0,550	17,005	268,917	1,022	37,593
0,575	16,208	272,969	1,029	37,837
0,600	15,203	276,770	1,036	38,079
0,625	14,145	280,306	1,043	38,320
0,650	13,345	283,642	1,049	38,559
0,675	12,499	286,767	1,055	38,796
0,700	11,485	289,638	1,060	39,033
0,725	10,321	292,218	1,065	39,268
0,750	9,491	294,591	1,069	39,502
0,775	8,710	296,768	1,073	39,736
0,800	7,887	298,740	1,077	39,968
0,825	6,515	300,369	1,080	40,200
0,850	5,626	301,775	1,082	40,431
0,875	4,804	302,976	1,084	40,662
0,900	3,885	303,948	1,086	40,892
0,925	2,700	304,623	1,087	41,122
0,950	1,742	305,058	1,088	41,352
0,975	0,690	305,231	1,088	41,582
1,000	1,669	305,648	1,089	41,812
1,025	1,740	306,083	1,090	42,041
1,050	1,822	306,538	1,091	42,270
1,075	1,904	307,014	1,092	42,500
1,100	2,008	307,517	1,092	42,728
1,125	2,107	308,043	1,093	42,957
1,150	2,220	308,598	1,094	43,186
1,175	2,325	309,180	1,095	43,414
1,200	2,438	309,789	1,096	43,642
1,225	2,546	310,426	1,098	43,870
1,250	2,684	311,097	1,099	44,098
1,275	2,835	311,806	1,100	44,325
1,300	2,984	312,552	1,101	44,552
1,325	3,114	313,330	1,103	44,779

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,350	3,269	314,147	1,104	45,006
1,375	3,460	315,013	1,106	45,232
1,400	3,659	315,927	1,107	45,458
1,425	3,830	316,885	1,109	45,684
1,450	4,021	317,890	1,111	45,909
1,475	4,248	318,952	1,113	46,134
1,500	4,481	320,072	1,115	46,358
1,525	4,744	321,258	1,117	46,582
1,550	4,980	322,503	1,119	46,806
1,575	5,243	323,814	1,121	47,029
1,600	5,541	325,199	1,123	47,252
1,625	5,840	326,659	1,126	47,474
1,650	6,186	328,206	1,129	47,696
1,675	6,553	329,844	1,131	47,917
1,700	6,886	331,565	1,134	48,138
1,725	7,288	333,387	1,137	48,358
1,750	7,737	335,322	1,141	48,578
1,775	8,193	337,370	1,144	48,796
1,800	8,667	339,537	1,148	49,014
1,825	9,189	341,834	1,152	49,232
1,850	9,680	344,254	1,156	49,449
1,875	10,291	346,827	1,160	49,664
1,900	11,009	349,579	1,165	49,880
1,925	11,738	352,514	1,170	50,094
1,950	12,315	355,592	1,175	50,307
1,975	13,086	358,864	1,180	50,519
2,000	14,006	362,365	1,186	50,731
2,025	14,852	366,078	1,192	50,941
2,050	15,712	370,006	1,198	51,150
2,075	16,776	374,200	1,205	51,358
2,100	17,710	378,628	1,212	51,565
2,125	18,723	383,309	1,220	51,771
2,150	19,828	388,266	1,228	51,975
2,175	20,858	393,480	1,236	52,178
2,200	22,226	399,037	1,244	52,380
2,225	23,375	404,881	1,254	52,580
2,250	24,558	411,020	1,263	52,778
2,275	25,940	417,505	1,273	52,976
2,300	27,019	424,260	1,283	53,171
2,325	28,074	431,278	1,294	53,365
2,350	28,870	438,496	1,305	53,558
2,375	29,604	445,897	1,315	53,748
2,400	30,386	453,493	1,327	53,938

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,425	30,783	461,189	1,338	54,125
2,450	31,200	468,989	1,349	54,311
2,475	31,291	476,812	1,360	54,496
2,500	31,385	484,658	1,371	54,679
2,525	30,884	492,379	1,382	54,861
2,550	30,650	500,042	1,393	55,041
2,575	30,195	507,590	1,404	55,220
2,600	29,493	514,964	1,414	55,397
2,625	29,098	522,238	1,424	55,573
2,650	28,291	529,311	1,433	55,748
2,675	27,648	536,223	1,443	55,922
2,700	26,633	542,881	1,451	56,095
2,725	25,962	549,371	1,460	56,267
2,750	25,276	555,690	1,469	56,437
2,775	24,273	561,759	1,477	56,607
2,800	23,158	567,548	1,484	56,776
2,825	22,004	573,049	1,491	56,944
2,850	21,174	578,342	1,498	57,111
2,875	20,213	583,396	1,505	57,278
2,900	19,330	588,228	1,511	57,444
2,925	18,170	592,770	1,517	57,609
2,950	17,583	597,166	1,522	57,773
2,975	16,255	601,230	1,528	57,937
3,000	15,341	605,065	1,532	58,101
3,025	14,317	608,645	1,537	58,264
3,050	13,661	612,060	1,541	58,426
3,075	12,558	615,199	1,545	58,588
3,100	11,751	618,137	1,549	58,750
3,125	10,509	620,765	1,552	58,911
3,150	9,741	623,200	1,555	59,072
3,175	8,831	625,407	1,558	59,232
3,200	7,743	627,343	1,560	59,393
3,225	6,587	628,990	1,562	59,553
3,250	5,829	630,447	1,564	59,713
3,275	4,933	631,681	1,566	59,872
3,300	4,273	632,749	1,567	60,032
3,325	2,768	633,441	1,568	60,192
3,350	1,795	633,889	1,568	60,351
3,375	0,822	634,095	1,569	60,510
3,400	0,089	634,117	1,569	60,670



## PŘÍLOHA P 4: PŮSOBNÍ JEDNÉ CÍVKY

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,269	1,567	0,078	6,411
-0,725	6,625	3,223	0,112	9,045
-0,700	6,996	4,972	0,139	11,039
-0,675	7,395	6,821	0,163	12,697
-0,650	7,824	8,777	0,185	14,137
-0,625	8,279	10,847	0,205	15,420
-0,600	8,771	13,040	0,225	16,582
-0,575	9,283	15,360	0,244	17,648
-0,550	9,840	17,821	0,263	18,634
-0,525	10,416	20,424	0,282	19,552
-0,500	11,042	23,185	0,300	20,412
-0,475	11,710	26,112	0,318	21,221
-0,450	12,435	29,221	0,337	21,984
-0,425	13,195	32,520	0,355	22,707
-0,400	14,038	36,029	0,374	23,392
-0,375	14,886	39,751	0,393	24,044
-0,350	15,815	43,705	0,412	24,666
-0,325	16,835	47,913	0,431	25,259
-0,300	17,839	52,373	0,451	25,826
-0,275	18,915	57,102	0,471	26,368
-0,250	20,005	62,103	0,491	26,888
-0,225	21,212	67,406	0,511	27,387
-0,200	22,362	72,997	0,532	27,866
-0,175	23,640	78,907	0,553	28,327
-0,150	24,816	85,111	0,575	28,770
-0,125	26,033	91,619	0,596	29,197
-0,100	27,279	98,439	0,618	29,609
-0,075	28,162	105,479	0,640	30,006
-0,050	29,101	112,754	0,661	30,390
-0,025	30,060	120,269	0,683	30,762
0,000	30,593	127,918	0,705	31,122
0,025	31,066	135,684	0,726	31,472
0,050	31,410	143,537	0,746	31,812
0,075	31,519	151,416	0,767	32,142
0,100	31,441	159,277	0,786	32,464
0,125	31,083	167,047	0,805	32,778
0,150	30,765	174,739	0,823	33,085
0,175	30,485	182,360	0,841	33,386
0,200	29,895	189,833	0,858	33,680
0,225	29,188	197,130	0,875	33,968
0,250	28,326	204,212	0,890	34,252

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,275	27,693	211,135	0,905	34,530
0,300	26,899	217,860	0,919	34,804
0,325	25,688	224,282	0,933	35,074
0,350	24,922	230,512	0,946	35,340
0,375	24,004	236,513	0,958	35,603
0,400	23,169	242,306	0,970	35,862
0,425	22,008	247,807	0,981	36,119
0,450	21,361	253,148	0,991	36,372
0,475	19,952	258,136	1,001	36,623
0,500	19,230	262,943	1,010	36,872
0,525	18,382	267,539	1,019	37,118
0,550	17,196	271,838	1,027	37,363
0,575	16,453	275,951	1,035	37,605
0,600	15,175	279,745	1,042	37,846
0,625	14,129	283,277	1,049	38,085
0,650	13,421	286,632	1,055	38,323
0,675	12,332	289,715	1,060	38,559
0,700	11,465	292,582	1,066	38,794
0,725	10,592	295,230	1,070	39,028
0,750	9,732	297,663	1,075	39,262
0,775	8,739	299,847	1,079	39,494
0,800	7,494	301,721	1,082	39,725
0,825	6,524	303,352	1,085	39,956
0,850	5,750	304,790	1,088	40,186
0,875	4,660	305,955	1,090	40,416
0,900	3,953	306,943	1,091	40,645
0,925	2,576	307,587	1,093	40,874
0,950	1,769	308,029	1,093	41,103
0,975	0,964	308,270	1,094	41,331

## PŘÍLOHA P 5: PŮSOBNÍ DVOU CÍVEK

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,174	1,544	0,077	6,460
-0,725	6,527	3,175	0,111	9,114
-0,700	6,908	4,902	0,138	11,123
-0,675	7,312	6,730	0,162	12,792
-0,650	7,740	8,665	0,183	14,241
-0,625	8,170	10,708	0,204	15,532
-0,600	8,637	12,867	0,223	16,702
-0,575	9,204	15,168	0,243	17,775
-0,550	9,733	17,602	0,261	18,767
-0,525	10,330	20,184	0,280	19,691
-0,500	10,982	22,929	0,298	20,556
-0,475	11,611	25,832	0,317	21,369
-0,450	12,324	28,913	0,335	22,136
-0,425	13,061	32,179	0,353	22,863
-0,400	13,841	35,639	0,372	23,552
-0,375	14,799	39,339	0,391	24,208
-0,350	15,692	43,262	0,410	24,832
-0,325	16,763	47,453	0,429	25,428
-0,300	17,754	51,891	0,449	25,998
-0,275	18,813	56,594	0,469	26,543
-0,250	19,887	61,566	0,489	27,065
-0,225	20,955	66,805	0,509	27,566
-0,200	22,175	72,349	0,530	28,047
-0,175	23,344	78,185	0,551	28,510
-0,150	24,528	84,317	0,572	28,955
-0,125	25,781	90,762	0,593	29,384
-0,100	26,901	97,487	0,615	29,798
-0,075	27,868	104,454	0,637	30,197
-0,050	28,745	111,641	0,658	30,584
-0,025	29,629	119,048	0,680	30,957
0,000	30,260	126,613	0,701	31,319
0,025	30,686	134,285	0,722	31,671
0,050	30,956	142,023	0,742	32,012
0,075	31,155	149,812	0,762	32,345
0,100	31,235	157,621	0,782	32,668
0,125	30,714	165,300	0,801	32,984
0,150	30,439	172,909	0,819	33,293
0,175	30,024	180,416	0,837	33,595
0,200	29,393	187,764	0,854	33,890
0,225	28,568	194,906	0,870	34,181
0,250	28,332	201,989	0,885	34,465

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,275	27,213	208,792	0,900	34,745
0,300	26,463	215,408	0,914	35,021
0,325	25,493	221,781	0,928	35,292
0,350	24,927	228,013	0,941	35,560
0,375	24,009	234,016	0,953	35,824
0,400	22,962	239,756	0,965	36,085
0,425	21,811	245,209	0,976	36,343
0,450	20,706	250,386	0,986	36,598
0,475	19,924	255,366	0,996	36,850
0,500	19,189	260,164	1,005	37,100
0,525	18,007	264,665	1,013	37,348
0,550	17,005	268,917	1,022	37,593
0,575	16,208	272,969	1,029	37,837
0,600	15,203	276,770	1,036	38,079
0,625	14,145	280,306	1,043	38,320
0,650	13,345	283,642	1,049	38,559
0,675	12,499	286,767	1,055	38,796
0,700	11,485	289,638	1,060	39,033
0,725	10,321	292,218	1,065	39,268
0,750	9,491	294,591	1,069	39,502
0,775	8,710	296,768	1,073	39,736
0,800	7,887	298,740	1,077	39,968
0,825	6,515	300,369	1,080	40,200
0,850	5,626	301,775	1,082	40,431
0,875	4,804	302,976	1,084	40,662
0,900	3,885	303,948	1,086	40,892
0,925	2,700	304,623	1,087	41,122
0,950	1,742	305,058	1,088	41,352
0,975	0,690	305,231	1,088	41,582
1,000	1,669	305,648	1,089	41,812
1,025	1,740	306,083	1,090	42,041
1,050	1,822	306,538	1,091	42,270
1,075	1,904	307,014	1,092	42,500
1,100	2,008	307,517	1,092	42,728
1,125	2,107	308,043	1,093	42,957
1,150	2,220	308,598	1,094	43,186
1,175	2,325	309,180	1,095	43,414
1,200	2,438	309,789	1,096	43,642
1,225	2,546	310,426	1,098	43,870
1,250	2,684	311,097	1,099	44,098
1,275	2,835	311,806	1,100	44,325
1,300	2,984	312,552	1,101	44,552
1,325	3,114	313,330	1,103	44,779

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,350	3,269	314,147	1,104	45,006
1,375	3,460	315,013	1,106	45,232
1,400	3,659	315,927	1,107	45,458
1,425	3,830	316,885	1,109	45,684
1,450	4,021	317,890	1,111	45,909
1,475	4,248	318,952	1,113	46,134
1,500	4,481	320,072	1,115	46,358
1,525	4,744	321,258	1,117	46,582
1,550	4,980	322,503	1,119	46,806
1,575	5,243	323,814	1,121	47,029
1,600	5,541	325,199	1,123	47,252
1,625	5,840	326,659	1,126	47,474
1,650	6,186	328,206	1,129	47,696
1,675	6,553	329,844	1,131	47,917
1,700	6,886	331,565	1,134	48,138
1,725	7,288	333,387	1,137	48,358
1,750	7,737	335,322	1,141	48,578
1,775	8,193	337,370	1,144	48,796
1,800	8,667	339,537	1,148	49,014
1,825	9,189	341,834	1,152	49,232
1,850	9,680	344,254	1,156	49,449
1,875	10,291	346,827	1,160	49,664
1,900	11,009	349,579	1,165	49,880
1,925	11,738	352,514	1,170	50,094
1,950	12,315	355,592	1,175	50,307
1,975	13,086	358,864	1,180	50,519
2,000	14,006	362,365	1,186	50,731
2,025	14,852	366,078	1,192	50,941
2,050	15,712	370,006	1,198	51,150
2,075	16,776	374,200	1,205	51,358
2,100	17,710	378,628	1,212	51,565
2,125	18,723	383,309	1,220	51,771
2,150	19,828	388,266	1,228	51,975
2,175	20,858	393,480	1,236	52,178
2,200	22,226	399,037	1,244	52,380
2,225	23,375	404,881	1,254	52,580
2,250	24,558	411,020	1,263	52,778
2,275	25,940	417,505	1,273	52,976
2,300	27,019	424,260	1,283	53,171
2,325	28,074	431,278	1,294	53,365
2,350	28,870	438,496	1,305	53,558
2,375	29,604	445,897	1,315	53,748
2,400	30,386	453,493	1,327	53,938

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,425	30,783	461,189	1,338	54,125
2,450	31,200	468,989	1,349	54,311
2,475	31,291	476,812	1,360	54,496
2,500	31,385	484,658	1,371	54,679
2,525	30,884	492,379	1,382	54,861
2,550	30,650	500,042	1,393	55,041
2,575	30,195	507,590	1,404	55,220
2,600	29,493	514,964	1,414	55,397
2,625	29,098	522,238	1,424	55,573
2,650	28,291	529,311	1,433	55,748
2,675	27,648	536,223	1,443	55,922
2,700	26,633	542,881	1,451	56,095
2,725	25,962	549,371	1,460	56,267
2,750	25,276	555,690	1,469	56,437
2,775	24,273	561,759	1,477	56,607
2,800	23,158	567,548	1,484	56,776
2,825	22,004	573,049	1,491	56,944
2,850	21,174	578,342	1,498	57,111
2,875	20,213	583,396	1,505	57,278
2,900	19,330	588,228	1,511	57,444
2,925	18,170	592,770	1,517	57,609
2,950	17,583	597,166	1,522	57,773
2,975	16,255	601,230	1,528	57,937
3,000	15,341	605,065	1,532	58,101
3,025	14,317	608,645	1,537	58,264
3,050	13,661	612,060	1,541	58,426
3,075	12,558	615,199	1,545	58,588
3,100	11,751	618,137	1,549	58,750
3,125	10,509	620,765	1,552	58,911
3,150	9,741	623,200	1,555	59,072
3,175	8,831	625,407	1,558	59,232
3,200	7,743	627,343	1,560	59,393
3,225	6,587	628,990	1,562	59,553
3,250	5,829	630,447	1,564	59,713
3,275	4,933	631,681	1,566	59,872
3,300	4,273	632,749	1,567	60,032
3,325	2,768	633,441	1,568	60,192
3,350	1,795	633,889	1,568	60,351
3,375	0,822	634,095	1,569	60,510
3,400	0,089	634,117	1,569	60,670

## PŘÍLOHA P 6: PŮSOBENÍ TŘÍ CÍVEK

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,583	1,646	0,080	6,256
-0,725	6,943	3,382	0,115	8,827
-0,700	7,365	5,223	0,142	10,773
-0,675	7,792	7,171	0,167	12,390
-0,650	8,233	9,229	0,189	13,795
-0,625	8,686	11,401	0,210	15,046
-0,600	9,204	13,702	0,231	16,180
-0,575	9,705	16,128	0,250	17,220
-0,550	10,358	18,717	0,270	18,182
-0,525	10,936	21,451	0,289	19,078
-0,500	11,597	24,351	0,307	19,917
-0,475	12,258	27,415	0,326	20,706
-0,450	12,979	30,660	0,345	21,451
-0,425	13,811	34,113	0,364	22,156
-0,400	14,598	37,762	0,383	22,826
-0,375	15,526	41,644	0,402	23,463
-0,350	16,460	45,759	0,421	24,070
-0,325	17,372	50,102	0,441	24,650
-0,300	18,495	54,726	0,461	25,205
-0,275	19,698	59,650	0,481	25,735
-0,250	20,700	64,825	0,502	26,244
-0,225	21,967	70,317	0,522	26,733
-0,200	23,152	76,105	0,543	27,202
-0,175	24,224	82,161	0,565	27,653
-0,150	25,678	88,580	0,586	28,087
-0,125	26,833	95,288	0,608	28,506
-0,100	27,977	102,283	0,630	28,910
-0,075	29,074	109,551	0,652	29,300
-0,050	30,091	117,074	0,674	29,677
-0,025	30,602	124,724	0,696	30,042
0,000	31,448	132,586	0,717	30,396
0,025	32,079	140,606	0,739	30,739
0,050	32,120	148,636	0,759	31,073
0,075	32,528	156,768	0,780	31,398
0,100	32,398	164,868	0,800	31,714
0,125	32,088	172,890	0,819	32,023
0,150	31,753	180,828	0,838	32,325
0,175	31,510	188,705	0,856	32,620
0,200	30,609	196,357	0,873	32,909

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,225	30,009	203,860	0,889	33,193
0,250	29,549	211,247	0,905	33,471
0,275	28,455	218,361	0,921	33,745
0,300	27,933	225,344	0,935	34,015
0,325	26,741	232,029	0,949	34,280
0,350	26,186	238,576	0,962	34,542
0,375	25,086	244,847	0,975	34,800
0,400	24,195	250,896	0,987	35,055
0,425	23,232	256,704	0,998	35,307
0,450	21,909	262,181	1,009	35,556
0,475	20,963	267,422	1,019	35,802
0,500	20,543	272,558	1,028	36,047
0,525	19,358	277,397	1,038	36,289
0,550	18,376	281,991	1,046	36,529
0,575	17,469	286,358	1,054	36,767
0,600	16,332	290,441	1,062	37,003
0,625	15,411	294,294	1,069	37,238
0,650	14,709	297,971	1,075	37,471
0,675	13,610	301,374	1,081	37,703
0,700	12,647	304,535	1,087	37,933
0,725	11,503	307,411	1,092	38,163
0,750	10,793	310,109	1,097	38,391
0,775	9,691	312,532	1,101	38,618
0,800	9,058	314,797	1,105	38,845
0,825	7,819	316,751	1,109	39,071
0,850	7,089	318,524	1,112	39,296
0,875	5,747	319,960	1,114	39,521
0,900	5,170	321,253	1,117	39,745
0,925	3,866	322,219	1,118	39,969
0,950	2,935	322,953	1,120	40,192
0,975	1,748	323,390	1,120	40,415
1,000	1,608	323,792	1,121	40,638
1,025	1,688	324,214	1,122	40,861
1,050	1,760	324,654	1,122	41,084
1,075	1,856	325,118	1,123	41,307
1,100	1,947	325,604	1,124	41,529
1,125	2,052	326,118	1,125	41,751
1,150	2,165	326,659	1,126	41,974
1,175	2,251	327,222	1,127	42,196
1,200	2,373	327,815	1,128	42,417
1,225	2,482	328,435	1,129	42,639



Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,250	2,628	329,092	1,130	42,860
1,275	2,775	329,786	1,131	43,081
1,300	2,920	330,516	1,133	43,302
1,325	3,039	331,276	1,134	43,523
1,350	3,204	332,077	1,135	43,743
1,375	3,397	332,926	1,137	43,963
1,400	3,567	333,818	1,138	44,183
1,425	3,755	334,757	1,140	44,402
1,450	3,950	335,744	1,141	44,622
1,475	4,142	336,780	1,143	44,840
1,500	4,365	337,871	1,145	45,059
1,525	4,632	339,029	1,147	45,277
1,550	4,860	340,244	1,149	45,495
1,575	5,164	341,535	1,151	45,712
1,600	5,454	342,898	1,154	45,929
1,625	5,717	344,328	1,156	46,146
1,650	6,098	345,852	1,159	46,362
1,675	6,435	347,461	1,161	46,577
1,700	6,744	349,147	1,164	46,792
1,725	7,175	350,941	1,167	47,007
1,750	7,560	352,831	1,170	47,221
1,775	8,021	354,836	1,173	47,434
1,800	8,521	356,966	1,177	47,647
1,825	9,009	359,219	1,181	47,859
1,850	9,578	361,613	1,185	48,070
1,875	10,101	364,138	1,189	48,281
1,900	10,773	366,831	1,193	48,491
1,925	11,456	369,695	1,198	48,700
1,950	12,134	372,729	1,203	48,908
1,975	12,953	375,967	1,208	49,116
2,000	13,751	379,405	1,213	49,322
2,025	14,685	383,076	1,219	49,528
2,050	15,460	386,941	1,225	49,732
2,075	16,575	391,085	1,232	49,936
2,100	17,472	395,453	1,239	50,138
2,125	18,597	400,102	1,246	50,339
2,150	19,626	405,008	1,254	50,539
2,175	20,737	410,193	1,262	50,738
2,200	21,967	415,684	1,270	50,935
2,225	23,108	421,461	1,279	51,132
2,250	24,449	427,574	1,288	51,326

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,275	25,525	433,955	1,298	51,520
2,300	26,534	440,588	1,308	51,712
2,325	27,706	447,515	1,318	51,902
2,350	28,600	454,665	1,328	52,091
2,375	28,947	461,901	1,339	52,279
2,400	30,030	469,409	1,350	52,465
2,425	30,582	477,054	1,361	52,649
2,450	30,693	484,728	1,372	52,832
2,475	31,012	492,481	1,382	53,014
2,500	30,941	500,216	1,393	53,194
2,525	30,649	507,878	1,404	53,372
2,550	30,105	515,405	1,414	53,550
2,575	29,978	522,899	1,425	53,726
2,600	29,428	530,256	1,435	53,901
2,625	28,519	537,386	1,444	54,075
2,650	27,979	544,380	1,453	54,247
2,675	26,975	551,124	1,462	54,419
2,700	26,367	557,716	1,471	54,589
2,725	25,548	564,103	1,480	54,758
2,750	24,723	570,283	1,488	54,927
2,775	23,833	576,242	1,495	55,095
2,800	22,704	581,918	1,503	55,261
2,825	21,990	587,415	1,510	55,427
2,850	20,929	592,647	1,517	55,593
2,875	19,572	597,540	1,523	55,757
2,900	19,155	602,329	1,529	55,921
2,925	17,997	606,829	1,535	56,084
2,950	17,049	611,091	1,540	56,247
2,975	16,042	615,101	1,545	56,409
3,000	15,094	618,875	1,550	56,570
3,025	14,281	622,445	1,554	56,731
3,050	13,353	625,784	1,558	56,892
3,075	12,433	628,892	1,562	57,052
3,100	11,367	631,734	1,566	57,212
3,125	10,440	634,344	1,569	57,372
3,150	9,075	636,612	1,572	57,531
3,175	8,483	638,733	1,574	57,690
3,200	7,842	640,694	1,577	57,848
3,225	6,310	642,271	1,579	58,007
3,250	5,468	643,638	1,580	58,165
3,275	5,086	644,910	1,582	58,323

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
3,300	3,623	645,815	1,583	58,481
3,325	2,678	646,485	1,584	58,639
3,350	1,674	646,903	1,584	58,797
3,375	0,642	647,064	1,585	58,955
3,400	1,638	647,473	1,585	59,112
3,425	1,730	647,906	1,586	59,270
3,450	1,811	648,359	1,586	59,428
3,475	1,893	648,832	1,587	59,585
3,500	1,992	649,330	1,587	59,743
3,525	2,095	649,854	1,588	59,900
3,550	2,207	650,405	1,589	60,058
3,575	2,308	650,982	1,589	60,215
3,600	2,440	651,592	1,590	60,372
3,625	2,542	652,228	1,591	60,529
3,650	2,691	652,900	1,592	60,686
3,675	2,814	653,604	1,593	60,843
3,700	2,979	654,349	1,594	61,000
3,725	3,099	655,124	1,595	61,157
3,750	3,293	655,947	1,596	61,314
3,775	3,446	656,808	1,597	61,471
3,800	3,633	657,716	1,598	61,627
3,825	3,836	658,675	1,599	61,784
3,850	4,024	659,681	1,600	61,940
3,875	4,249	660,743	1,601	62,096
3,900	4,465	661,860	1,603	62,252
3,925	4,728	663,042	1,604	62,408
3,950	4,976	664,286	1,606	62,564
3,975	5,279	665,605	1,607	62,719
4,000	5,537	666,990	1,609	62,875
4,025	5,856	668,453	1,611	63,030
4,050	6,200	670,003	1,613	63,185
4,075	6,544	671,639	1,614	63,340
4,100	6,888	673,361	1,617	63,495
4,125	7,266	675,178	1,619	63,650
4,150	7,728	677,110	1,621	63,804
4,175	8,183	679,156	1,623	63,958
4,200	8,693	681,329	1,626	64,112
4,225	9,158	683,618	1,629	64,266
4,250	9,731	686,051	1,632	64,419
4,275	10,267	688,618	1,635	64,572
4,300	10,964	691,359	1,638	64,725

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
4,350	12,312	697,344	1,645	65,029
4,375	13,191	700,642	1,649	65,181
4,400	14,005	704,143	1,653	65,333
4,425	14,840	707,853	1,657	65,484
4,450	15,702	711,779	1,662	65,634
4,475	16,698	715,953	1,667	65,784
4,500	17,621	720,359	1,672	65,934
4,525	18,759	725,048	1,677	66,083
4,550	19,920	730,028	1,683	66,232
4,575	21,098	735,303	1,689	66,380
4,600	22,210	740,855	1,696	66,528
4,625	23,486	746,727	1,702	66,675
4,650	24,691	752,900	1,709	66,822
4,675	25,915	759,378	1,717	66,968
4,700	26,820	766,083	1,724	67,113
4,725	28,021	773,089	1,732	67,258
4,750	28,840	780,299	1,740	67,402
4,775	29,707	787,725	1,748	67,545
4,800	30,306	795,302	1,757	67,688
4,825	31,090	803,075	1,765	67,830
4,850	31,513	810,953	1,774	67,971
4,875	31,585	818,849	1,783	68,112
4,900	31,205	826,650	1,791	68,251
4,925	31,144	834,436	1,800	68,391
4,950	30,508	842,063	1,808	68,529
4,975	30,316	849,642	1,816	68,667
5,000	29,556	857,031	1,824	68,805
5,025	29,086	864,303	1,831	68,941
5,050	28,079	871,322	1,839	69,078
5,075	27,567	878,214	1,846	69,213
5,100	26,672	884,882	1,853	69,349
5,125	25,676	891,301	1,860	69,483
5,150	24,923	897,532	1,866	69,617
5,175	24,095	903,555	1,873	69,751
5,200	23,156	909,344	1,879	69,884
5,225	21,943	914,830	1,884	70,017
5,250	21,152	920,118	1,890	70,150
5,275	20,323	925,199	1,895	70,282
5,300	19,504	930,075	1,900	70,414
5,325	18,330	934,657	1,905	70,545
5,350	17,488	939,029	1,909	70,676

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
5,375	16,308	943,106	1,913	70,807
5,400	15,301	946,932	1,917	70,938
5,425	14,569	950,574	1,921	71,068
5,450	13,531	953,957	1,924	71,198
5,475	12,789	957,154	1,927	71,328
5,500	11,348	959,991	1,930	71,457
5,525	10,577	962,635	1,933	71,587
5,550	9,636	965,044	1,935	71,716
5,575	8,917	967,273	1,937	71,845
5,600	7,693	969,197	1,939	71,974
5,625	7,021	970,952	1,941	72,103
5,650	5,770	972,395	1,943	72,232
5,675	5,216	973,699	1,944	72,360
5,700	3,952	974,687	1,945	72,489
5,725	3,509	975,564	1,946	72,617
5,750	1,977	976,058	1,946	72,746
5,775	1,049	976,320	1,947	72,874

## PŘÍLOHA P 7: VLIV PROUDU NA ZRYCHLENÍ TĚLESA 1. ČÁST

Dráha [cm]	0,5 A				1 A			
	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	1,760	0,440	0,041	12,099	6,583	1,646	0,080	6,256
-0,725	1,855	0,904	0,059	17,072	6,943	3,382	0,115	8,827
-0,700	1,966	1,395	0,074	20,837	7,365	5,223	0,142	10,773
-0,675	2,077	1,914	0,086	23,966	7,792	7,171	0,167	12,390
-0,650	2,193	2,463	0,098	26,684	8,233	9,229	0,189	13,795
-0,625	2,312	3,041	0,109	29,107	8,686	11,401	0,210	15,046
-0,600	2,447	3,652	0,119	31,303	9,204	13,702	0,231	16,180
-0,575	2,578	4,297	0,129	33,317	9,705	16,128	0,250	17,220
-0,550	2,749	4,984	0,139	35,182	10,358	18,717	0,270	18,182
-0,525	2,900	5,709	0,149	36,918	10,936	21,451	0,289	19,078
-0,500	3,072	6,477	0,159	38,545	11,597	24,351	0,307	19,917
-0,475	3,244	7,288	0,168	40,075	12,258	27,415	0,326	20,706
-0,450	3,432	8,146	0,178	41,520	12,979	30,660	0,345	21,451
-0,425	3,649	9,058	0,187	42,889	13,811	34,113	0,364	22,156
-0,400	3,853	10,021	0,197	44,189	14,598	37,762	0,383	22,826
-0,375	4,095	11,045	0,207	45,426	15,526	41,644	0,402	23,463
-0,350	4,337	12,129	0,217	46,605	16,460	45,759	0,421	24,070
-0,325	4,573	13,273	0,227	47,731	17,372	50,102	0,441	24,650
-0,300	4,865	14,489	0,237	48,809	18,495	54,726	0,461	25,205
-0,275	5,178	15,783	0,247	49,840	19,698	59,650	0,481	25,735
-0,250	5,436	17,143	0,258	50,830	20,700	64,825	0,502	26,244
-0,225	5,765	18,584	0,269	51,779	21,967	70,317	0,522	26,733
-0,200	6,071	20,101	0,279	52,692	23,152	76,105	0,543	27,202
-0,175	6,348	21,688	0,290	53,570	24,224	82,161	0,565	27,653
-0,150	6,726	23,370	0,301	54,416	25,678	88,580	0,586	28,087
-0,125	7,024	25,126	0,312	55,231	26,833	95,288	0,608	28,506
-0,100	7,320	26,956	0,323	56,017	27,977	102,283	0,630	28,910
-0,075	7,604	28,857	0,335	56,777	29,074	109,551	0,652	29,300
-0,050	7,868	30,824	0,346	57,512	30,091	117,074	0,674	29,677
-0,025	7,998	32,823	0,357	58,223	30,602	124,724	0,696	30,042
0,000	8,219	34,878	0,368	58,913	31,448	132,586	0,717	30,396
0,025	8,384	36,974	0,379	59,583	32,079	140,606	0,739	30,739
0,050	8,395	39,073	0,389	60,234	32,120	148,636	0,759	31,073
0,075	8,505	41,199	0,400	60,867	32,528	156,768	0,780	31,398
0,100	8,473	43,318	0,410	61,485	32,398	164,868	0,800	31,714
0,125	8,395	45,416	0,420	62,087	32,088	172,890	0,819	32,023
0,150	8,312	47,494	0,429	62,676	31,753	180,828	0,838	32,325
0,175	8,254	49,558	0,439	63,252	31,510	188,705	0,856	32,620
0,200	8,024	51,564	0,447	63,817	30,609	196,357	0,873	32,909

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,225	7,874	53,532	0,456	64,370	30,009	203,860	0,889	33,193
0,250	7,761	55,472	0,464	64,914	29,549	211,247	0,905	33,471
0,275	7,482	57,343	0,472	65,448	28,455	218,361	0,921	33,745
0,300	7,354	59,182	0,479	65,974	27,933	225,344	0,935	34,015
0,325	7,050	60,944	0,486	66,492	26,741	232,029	0,949	34,280
0,350	6,914	62,673	0,493	67,002	26,186	238,576	0,962	34,542
0,375	6,635	64,331	0,500	67,506	25,086	244,847	0,975	34,800
0,400	6,412	65,934	0,506	68,003	24,195	250,896	0,987	35,055
0,425	6,169	67,477	0,512	68,494	23,232	256,704	0,998	35,307
0,450	5,832	68,935	0,517	68,980	21,909	262,181	1,009	35,556
0,475	5,595	70,333	0,522	69,461	20,963	267,422	1,019	35,802
0,500	5,497	71,708	0,528	69,937	20,543	272,558	1,028	36,047
0,525	5,196	73,007	0,532	70,409	19,358	277,397	1,038	36,289
0,550	4,949	74,244	0,537	70,877	18,376	281,991	1,046	36,529
0,575	4,722	75,424	0,541	71,341	17,469	286,358	1,054	36,767
0,600	4,434	76,533	0,545	71,801	16,332	290,441	1,062	37,003
0,625	4,204	77,584	0,549	72,258	15,411	294,294	1,069	37,238
0,650	4,031	78,591	0,552	72,713	14,709	297,971	1,075	37,471
0,675	3,754	79,530	0,556	73,164	13,610	301,374	1,081	37,703
0,700	3,511	80,408	0,559	73,613	12,647	304,535	1,087	37,933
0,725	3,222	81,213	0,561	74,059	11,503	307,411	1,092	38,163
0,750	3,047	81,975	0,564	74,503	10,793	310,109	1,097	38,391
0,775	2,769	82,667	0,566	74,946	9,691	312,532	1,101	38,618
0,800	2,614	83,320	0,569	75,386	9,058	314,797	1,105	38,845
0,825	2,299	83,895	0,571	75,825	7,819	316,751	1,109	39,071
0,850	2,118	84,425	0,572	76,262	7,089	318,524	1,112	39,296
0,875	1,775	84,868	0,574	76,699	5,747	319,960	1,114	39,521
0,900	1,636	85,277	0,575	77,134	5,170	321,253	1,117	39,745
0,925	1,302	85,603	0,576	77,568	3,866	322,219	1,118	39,969
0,950	1,068	85,870	0,577	78,001	2,935	322,953	1,120	40,192
0,975	0,765	86,061	0,578	78,434	1,748	323,390	1,120	40,415
1,000	0,402	86,162	0,578	78,867	1,608	323,792	1,121	40,638
1,025	0,422	86,267	0,579	79,299	1,688	324,214	1,122	40,861
1,050	0,440	86,377	0,579	79,731	1,760	324,654	1,122	41,084
1,075	0,464	86,493	0,579	80,162	1,856	325,118	1,123	41,307
1,100	0,487	86,615	0,580	80,594	1,947	325,604	1,124	41,529
1,125	0,513	86,743	0,580	81,025	2,052	326,118	1,125	41,751
1,150	0,541	86,878	0,581	81,455	2,165	326,659	1,126	41,974
1,175	0,563	87,019	0,581	81,886	2,251	327,222	1,127	42,196
1,200	0,593	87,168	0,582	82,316	2,373	327,815	1,128	42,417
1,225	0,620	87,323	0,582	82,746	2,482	328,435	1,129	42,639
1,250	0,657	87,487	0,583	83,175	2,628	329,092	1,130	42,860
1,275	0,694	87,660	0,583	83,604	2,775	329,786	1,131	43,081

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,300	0,730	87,843	0,584	84,032	2,920	330,516	1,133	43,302
1,325	0,760	88,033	0,585	84,460	3,039	331,276	1,134	43,523
1,350	0,801	88,233	0,585	84,887	3,204	332,077	1,135	43,743
1,375	0,849	88,445	0,586	85,314	3,397	332,926	1,137	43,963
1,400	0,892	88,668	0,587	85,741	3,567	333,818	1,138	44,183
1,425	0,939	88,903	0,587	86,167	3,755	334,757	1,140	44,402
1,450	0,987	89,150	0,588	86,592	3,950	335,744	1,141	44,622
1,475	1,036	89,409	0,589	87,017	4,142	336,780	1,143	44,840
1,500	1,091	89,682	0,590	87,441	4,365	337,871	1,145	45,059
1,525	1,158	89,971	0,591	87,864	4,632	339,029	1,147	45,277
1,550	1,215	90,275	0,592	88,287	4,860	340,244	1,149	45,495
1,575	1,291	90,598	0,593	88,709	5,164	341,535	1,151	45,712
1,600	1,364	90,938	0,594	89,130	5,454	342,898	1,154	45,929
1,625	1,429	91,296	0,595	89,551	5,717	344,328	1,156	46,146
1,650	1,525	91,677	0,596	89,970	6,098	345,852	1,159	46,362
1,675	1,609	92,079	0,598	90,389	6,435	347,461	1,161	46,577
1,700	1,686	92,501	0,599	90,807	6,744	349,147	1,164	46,792
1,725	1,794	92,949	0,601	91,223	7,175	350,941	1,167	47,007
1,750	1,890	93,422	0,602	91,639	7,560	352,831	1,170	47,221
1,775	2,005	93,923	0,604	92,054	8,021	354,836	1,173	47,434
1,800	2,130	94,455	0,605	92,467	8,521	356,966	1,177	47,647
1,825	2,252	95,018	0,607	92,880	9,009	359,219	1,181	47,859
1,850	2,394	95,617	0,609	93,291	9,578	361,613	1,185	48,070
1,875	2,525	96,248	0,611	93,700	10,101	364,138	1,189	48,281
1,900	2,693	96,922	0,613	94,109	10,773	366,831	1,193	48,491
1,925	2,864	97,638	0,616	94,516	11,456	369,695	1,198	48,700
1,950	3,033	98,396	0,618	94,921	12,134	372,729	1,203	48,908
1,975	3,238	99,206	0,620	95,325	12,953	375,967	1,208	49,116
2,000	3,438	100,065	0,623	95,727	13,751	379,405	1,213	49,322
2,025	3,671	100,983	0,626	96,127	14,685	383,076	1,219	49,528
2,050	3,865	101,949	0,629	96,525	15,460	386,941	1,225	49,732
2,075	4,144	102,985	0,632	96,922	16,575	391,085	1,232	49,936
2,100	4,368	104,077	0,636	97,316	17,472	395,453	1,239	50,138
2,125	4,649	105,239	0,639	97,708	18,597	400,102	1,246	50,339
2,150	4,907	106,466	0,643	98,099	19,626	405,008	1,254	50,539
2,175	5,184	107,762	0,647	98,486	20,737	410,193	1,262	50,738
2,200	5,492	109,135	0,651	98,872	21,967	415,684	1,270	50,935
2,225	5,777	110,579	0,655	99,255	23,108	421,461	1,279	51,132
2,250	6,112	112,107	0,660	99,635	24,449	427,574	1,288	51,326
2,275	6,381	113,703	0,664	100,013	25,525	433,955	1,298	51,520
2,300	6,633	115,361	0,669	100,388	26,534	440,588	1,308	51,712
2,325	6,926	117,092	0,674	100,760	27,706	447,515	1,318	51,902
2,350	7,150	118,880	0,679	101,129	28,600	454,665	1,328	52,091



Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,375	7,237	120,689	0,684	101,496	28,947	461,901	1,339	52,279
2,400	7,508	122,566	0,690	101,860	30,030	469,409	1,350	52,465
2,425	7,645	124,477	0,695	102,221	30,582	477,054	1,361	52,649
2,450	7,673	126,396	0,700	102,579	30,693	484,728	1,372	52,832
2,475	7,753	128,334	0,706	102,935	31,012	492,481	1,382	53,014
2,500	7,735	130,268	0,711	103,288	30,941	500,216	1,393	53,194
2,525	7,662	132,183	0,716	103,638	30,649	507,878	1,404	53,372
2,550	7,526	134,065	0,721	103,986	30,105	515,405	1,414	53,550
2,575	7,494	135,939	0,726	104,331	29,978	522,899	1,425	53,726
2,600	7,357	137,778	0,731	104,674	29,428	530,256	1,435	53,901
2,625	7,130	139,560	0,736	105,015	28,519	537,386	1,444	54,075
2,650	6,995	141,309	0,741	105,354	27,979	544,380	1,453	54,247
2,675	6,744	142,995	0,745	105,690	26,975	551,124	1,462	54,419
2,700	6,592	144,643	0,749	106,025	26,367	557,716	1,471	54,589
2,725	6,387	146,239	0,753	106,358	25,548	564,103	1,480	54,758
2,750	6,181	147,785	0,757	106,689	24,723	570,283	1,488	54,927
2,775	5,958	149,274	0,761	107,018	23,833	576,242	1,495	55,095
2,800	5,676	150,693	0,765	107,346	22,704	581,918	1,503	55,261
2,825	5,497	152,068	0,768	107,672	21,990	587,415	1,510	55,427
2,850	5,232	153,376	0,772	107,997	20,929	592,647	1,517	55,593
2,875	4,893	154,599	0,775	108,320	19,572	597,540	1,523	55,757
2,900	4,789	155,796	0,778	108,642	19,155	602,329	1,529	55,921
2,925	4,499	156,921	0,780	108,963	17,997	606,829	1,535	56,084
2,950	4,262	157,987	0,783	109,283	17,049	611,091	1,540	56,247
2,975	4,011	158,989	0,786	109,602	16,042	615,101	1,545	56,409
3,000	3,774	159,933	0,788	109,919	15,094	618,875	1,550	56,570
3,025	3,570	160,825	0,790	110,236	14,281	622,445	1,554	56,731
3,050	3,338	161,660	0,792	110,552	13,353	625,784	1,558	56,892
3,075	3,108	162,437	0,794	110,868	12,433	628,892	1,562	57,052
3,100	2,842	163,147	0,796	111,182	11,367	631,734	1,566	57,212
3,125	2,610	163,800	0,797	111,496	10,440	634,344	1,569	57,372
3,150	2,269	164,367	0,799	111,809	9,075	636,612	1,572	57,531
3,175	2,121	164,897	0,800	112,122	8,483	638,733	1,574	57,690
3,200	1,960	165,387	0,801	112,434	7,842	640,694	1,577	57,848
3,225	1,578	165,782	0,802	112,746	6,310	642,271	1,579	58,007
3,250	1,367	166,123	0,803	113,058	5,468	643,638	1,580	58,165
3,275	1,271	166,441	0,804	113,369	5,086	644,910	1,582	58,323
3,300	0,906	166,668	0,804	113,680	3,623	645,815	1,583	58,481
3,325	0,669	166,835	0,805	113,991	2,678	646,485	1,584	58,639
3,350	0,418	166,940	0,805	114,301	1,674	646,903	1,584	58,797
3,375	0,160	166,980	0,805	114,612	0,642	647,064	1,585	58,955
3,400	0,410	167,082	0,805	114,922	1,638	647,473	1,585	59,112
3,425	0,433	167,190	0,806	115,233	1,730	647,906	1,586	59,270

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
3,450	0,453	167,303	0,806	115,543	1,811	648,359	1,586	59,428
3,475	0,473	167,422	0,806	115,853	1,893	648,832	1,587	59,585
3,500	0,498	167,546	0,806	116,163	1,992	649,330	1,587	59,743
3,525	0,524	167,677	0,807	116,473	2,095	649,854	1,588	59,900
3,550	0,552	167,815	0,807	116,783	2,207	650,405	1,589	60,058
3,575	0,577	167,959	0,807	117,093	2,308	650,982	1,589	60,215
3,600	0,610	168,112	0,808	117,402	2,440	651,592	1,590	60,372
3,625	0,635	168,271	0,808	117,712	2,542	652,228	1,591	60,529
3,650	0,673	168,439	0,809	118,021	2,691	652,900	1,592	60,686
3,675	0,704	168,615	0,809	118,330	2,814	653,604	1,593	60,843
3,700	0,745	168,801	0,809	118,639	2,979	654,349	1,594	61,000
3,725	0,775	168,995	0,810	118,948	3,099	655,124	1,595	61,157
3,750	0,823	169,201	0,810	119,257	3,293	655,947	1,596	61,314
3,775	0,861	169,416	0,811	119,565	3,446	656,808	1,597	61,471
3,800	0,908	169,643	0,811	119,873	3,633	657,716	1,598	61,627
3,825	0,959	169,883	0,812	120,181	3,836	658,675	1,599	61,784
3,850	1,006	170,134	0,813	120,489	4,024	659,681	1,600	61,940
3,875	1,062	170,400	0,813	120,797	4,249	660,743	1,601	62,096
3,900	1,116	170,679	0,814	121,104	4,465	661,860	1,603	62,252
3,925	1,182	170,974	0,815	121,411	4,728	663,042	1,604	62,408
3,950	1,244	171,285	0,815	121,718	4,976	664,286	1,606	62,564
3,975	1,320	171,615	0,816	122,024	5,279	665,605	1,607	62,719
4,000	1,384	171,961	0,817	122,330	5,537	666,990	1,609	62,875
4,025	1,464	172,327	0,818	122,636	5,856	668,453	1,611	63,030
4,050	1,550	172,715	0,819	122,942	6,200	670,003	1,613	63,185
4,075	1,636	173,124	0,820	123,247	6,544	671,639	1,614	63,340
4,100	1,722	173,554	0,821	123,552	6,888	673,361	1,617	63,495
4,125	1,817	174,008	0,822	123,856	7,266	675,178	1,619	63,650
4,150	1,932	174,491	0,823	124,160	7,728	677,110	1,621	63,804
4,175	2,046	175,003	0,824	124,464	8,183	679,156	1,623	63,958
4,200	2,173	175,546	0,825	124,767	8,693	681,329	1,626	64,112
4,225	2,290	176,118	0,827	125,070	9,158	683,618	1,629	64,266
4,250	2,433	176,727	0,828	125,372	9,731	686,051	1,632	64,419
4,275	2,567	177,368	0,830	125,673	10,267	688,618	1,635	64,572
4,300	2,741	178,054	0,831	125,974	10,964	691,359	1,638	64,725
4,325	2,907	178,780	0,833	126,275	11,628	694,266	1,641	64,877
4,350	3,078	179,550	0,835	126,575	12,312	697,344	1,645	65,029
4,375	3,298	180,374	0,837	126,874	13,191	700,642	1,649	65,181
4,400	3,501	181,250	0,839	127,172	14,005	704,143	1,653	65,333
4,425	3,710	182,177	0,841	127,470	14,840	707,853	1,657	65,484
4,450	3,926	183,159	0,843	127,767	15,702	711,779	1,662	65,634

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
4,475	4,174	184,202	0,845	128,063	16,698	715,953	1,667	65,784
4,500	4,405	185,303	0,848	128,358	17,621	720,359	1,672	65,934
4,525	4,690	186,476	0,851	128,653	18,759	725,048	1,677	66,083
4,550	4,980	187,721	0,854	128,946	19,920	730,028	1,683	66,232
4,575	5,274	189,040	0,857	129,238	21,098	735,303	1,689	66,380
4,600	5,553	190,428	0,860	129,530	22,210	740,855	1,696	66,528
4,625	5,872	191,896	0,863	129,820	23,486	746,727	1,702	66,675
4,650	6,173	193,439	0,866	130,109	24,691	752,900	1,709	66,822
4,675	6,479	195,058	0,870	130,397	25,915	759,378	1,717	66,968
4,700	6,705	196,735	0,874	130,684	26,820	766,083	1,724	67,113
4,725	7,005	198,486	0,878	130,969	28,021	773,089	1,732	67,258
4,750	7,210	200,289	0,882	131,253	28,840	780,299	1,740	67,402
4,775	7,427	202,145	0,886	131,536	29,707	787,725	1,748	67,545
4,800	7,577	204,039	0,890	131,818	30,306	795,302	1,757	67,688
4,825	7,773	205,982	0,894	132,098	31,090	803,075	1,765	67,830
4,850	7,878	207,952	0,898	132,377	31,513	810,953	1,774	67,971
4,875	7,896	209,926	0,903	132,655	31,585	818,849	1,783	68,112
4,900	7,801	211,876	0,907	132,931	31,205	826,650	1,791	68,251
4,925	7,786	213,823	0,911	133,206	31,144	834,436	1,800	68,391
4,950	7,627	215,730	0,915	133,480	30,508	842,063	1,808	68,529
4,975	7,579	217,624	0,919	133,753	30,316	849,642	1,816	68,667
5,000	7,389	219,472	0,923	134,024	29,556	857,031	1,824	68,805
5,025	7,271	221,289	0,927	134,294	29,086	864,303	1,831	68,941
5,050	7,020	223,044	0,930	134,564	28,079	871,322	1,839	69,078
5,075	6,892	224,767	0,934	134,832	27,567	878,214	1,846	69,213
5,100	6,668	226,434	0,937	135,099	26,672	884,882	1,853	69,349
5,125	6,419	228,039	0,941	135,365	25,676	891,301	1,860	69,483
5,150	6,231	229,597	0,944	135,631	24,923	897,532	1,866	69,617
5,175	6,024	231,103	0,947	135,895	24,095	903,555	1,873	69,751
5,200	5,789	232,550	0,950	136,159	23,156	909,344	1,879	69,884
5,225	5,486	233,921	0,953	136,421	21,943	914,830	1,884	70,017
5,250	5,288	235,243	0,955	136,683	21,152	920,118	1,890	70,150
5,275	5,081	236,514	0,958	136,945	20,323	925,199	1,895	70,282
5,300	4,876	237,733	0,961	137,205	19,504	930,075	1,900	70,414
5,325	4,583	238,878	0,963	137,465	18,330	934,657	1,905	70,545
5,350	4,372	239,971	0,965	137,725	17,488	939,029	1,909	70,676
5,375	4,077	240,990	0,967	137,983	16,308	943,106	1,913	70,807
5,400	3,825	241,947	0,969	138,242	15,301	946,932	1,917	70,938
5,425	3,642	242,857	0,971	138,499	14,569	950,574	1,921	71,068
5,450	3,383	243,703	0,973	138,757	13,531	953,957	1,924	71,198
5,475	3,197	244,502	0,974	139,013	12,789	957,154	1,927	71,328

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
5,500	2,837	245,212	0,976	139,270	11,348	959,991	1,930	71,457
5,525	2,644	245,873	0,977	139,526	10,577	962,635	1,933	71,587
5,550	2,409	246,475	0,978	139,782	9,636	965,044	1,935	71,716
5,575	2,229	247,032	0,979	140,037	8,917	967,273	1,937	71,845
5,600	1,923	247,513	0,980	140,293	7,693	969,197	1,939	71,974
5,625	1,755	247,952	0,981	140,547	7,021	970,952	1,941	72,103
5,650	1,443	248,312	0,982	140,802	5,770	972,395	1,943	72,232
5,675	1,304	248,638	0,982	141,057	5,216	973,699	1,944	72,360
5,700	0,988	248,885	0,983	141,311	3,952	974,687	1,945	72,489
5,725	0,877	249,105	0,983	141,566	3,509	975,564	1,946	72,617
5,750	0,494	249,228	0,983	141,820	1,977	976,058	1,946	72,746
5,775	0,262	249,294	0,984	142,074	1,049	976,320	1,947	72,874

## PŘÍLOHA P 8: VLIV PROUDU NA ZRYCHLENÍ TĚLESA 2. ČÁST

Dráha [cm]	2 A				4 A			
	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	25,438	6,360	0,157	3,183	99,982	24,995	0,311	1,605
-0,725	26,842	13,070	0,225	4,490	105,526	51,377	0,447	2,265
-0,700	28,489	20,192	0,280	5,480	112,031	79,385	0,555	2,764
-0,675	30,152	27,730	0,328	6,303	118,602	109,035	0,650	3,179
-0,650	31,879	35,700	0,372	7,017	125,427	140,392	0,738	3,539
-0,625	33,648	44,112	0,414	7,653	132,418	173,496	0,821	3,860
-0,600	35,669	53,029	0,454	8,229	140,406	208,598	0,900	4,150
-0,575	37,632	62,437	0,492	8,758	148,170	245,640	0,976	4,417
-0,550	40,180	72,482	0,530	9,247	158,244	285,201	1,052	4,663
-0,525	42,444	83,093	0,568	9,702	167,201	327,001	1,127	4,893
-0,500	45,031	94,351	0,605	10,128	177,435	371,360	1,200	5,108
-0,475	47,621	106,256	0,642	10,529	187,686	418,282	1,274	5,310
-0,450	50,445	118,867	0,679	10,908	198,863	467,998	1,348	5,501
-0,425	53,703	132,293	0,717	11,266	211,754	520,936	1,422	5,681
-0,400	56,788	146,490	0,754	11,606	223,972	576,929	1,496	5,853
-0,375	60,430	161,597	0,792	11,929	238,396	636,528	1,572	6,015
-0,350	64,093	177,620	0,830	12,238	252,906	699,755	1,648	6,171
-0,325	67,676	194,539	0,869	12,532	267,107	766,531	1,725	6,319
-0,300	72,082	212,560	0,908	12,813	284,561	837,672	1,803	6,461
-0,275	76,798	231,760	0,948	13,082	303,238	913,481	1,883	6,596
-0,250	80,740	251,945	0,989	13,341	318,873	993,199	1,963	6,726
-0,225	85,716	273,374	1,030	13,588	338,597	1077,848	2,045	6,851
-0,200	90,376	295,968	1,072	13,826	357,073	1167,117	2,128	6,971
-0,175	94,594	319,616	1,114	14,055	373,807	1260,569	2,212	7,086
-0,150	100,296	344,690	1,157	14,275	396,392	1359,667	2,297	7,197
-0,125	104,841	370,900	1,200	14,487	414,419	1463,271	2,383	7,304
-0,100	109,342	398,236	1,243	14,692	432,268	1571,338	2,469	7,407
-0,075	113,650	426,648	1,287	14,890	449,345	1683,675	2,556	7,506
-0,050	117,642	456,059	1,330	15,081	465,163	1799,965	2,643	7,603
-0,025	119,664	485,975	1,373	15,266	473,205	1918,267	2,728	7,696
0,000	122,974	516,718	1,416	15,445	486,300	2039,842	2,814	7,786
0,025	125,441	548,079	1,458	15,619	496,052	2163,855	2,898	7,873
0,050	125,598	579,478	1,500	15,788	496,671	2288,023	2,980	7,959
0,075	127,174	611,272	1,540	15,952	502,866	2413,739	3,061	8,041
0,100	126,651	642,935	1,580	16,113	500,765	2538,930	3,139	8,122
0,125	125,411	674,287	1,618	16,269	495,810	2662,883	3,215	8,201
0,150	124,070	705,305	1,654	16,422	490,442	2785,493	3,288	8,278
0,175	123,073	736,073	1,690	16,571	486,406	2907,095	3,359	8,353
0,200	119,515	765,952	1,724	16,718	472,268	3025,162	3,426	8,426

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,225	117,117	795,231	1,757	16,861	462,678	3140,831	3,491	8,499
0,250	115,262	824,046	1,788	17,002	455,228	3254,638	3,554	8,570
0,275	110,930	851,779	1,818	17,141	437,991	3364,136	3,613	8,639
0,300	108,823	878,985	1,847	17,278	429,528	3471,518	3,670	8,708
0,325	104,102	905,010	1,874	17,412	410,740	3574,203	3,724	8,776
0,350	101,860	930,475	1,900	17,544	401,727	3674,635	3,776	8,842
0,375	97,495	954,849	1,925	17,675	384,338	3770,719	3,825	8,908
0,400	93,939	978,334	1,949	17,804	370,131	3863,252	3,872	8,973
0,425	90,102	1000,859	1,971	17,932	354,818	3951,956	3,916	9,037
0,450	84,861	1022,074	1,992	18,058	333,959	4035,446	3,957	9,101
0,475	81,090	1042,347	2,011	18,183	318,897	4115,170	3,996	9,164
0,500	79,359	1062,187	2,030	18,307	311,874	4193,139	4,034	9,226
0,525	74,651	1080,849	2,048	18,429	293,115	4266,418	4,069	9,288
0,550	70,738	1098,534	2,065	18,551	277,492	4335,791	4,102	9,349
0,575	67,116	1115,313	2,080	18,671	263,020	4401,546	4,133	9,410
0,600	62,597	1130,962	2,095	18,791	245,003	4462,796	4,162	9,470
0,625	58,918	1145,692	2,109	18,910	230,297	4520,371	4,188	9,530
0,650	56,089	1159,714	2,121	19,028	218,943	4575,106	4,214	9,589
0,675	51,718	1172,643	2,133	19,146	201,509	4625,484	4,237	9,648
0,700	47,882	1184,614	2,144	19,263	186,201	4672,034	4,258	9,707
0,725	43,338	1195,448	2,154	19,379	168,088	4714,056	4,277	9,766
0,750	40,476	1205,567	2,163	19,495	156,606	4753,207	4,295	9,824
0,775	36,092	1214,590	2,171	19,610	139,120	4787,987	4,311	9,882
0,800	33,541	1222,975	2,179	19,725	128,876	4820,206	4,325	9,940
0,825	28,626	1230,132	2,185	19,840	109,310	4847,534	4,337	9,998
0,850	25,693	1236,555	2,191	19,954	97,556	4871,923	4,348	10,055
0,875	20,390	1241,653	2,195	20,068	76,473	4891,041	4,357	10,113
0,900	18,046	1246,164	2,199	20,182	67,025	4907,797	4,364	10,170
0,925	12,893	1249,387	2,202	20,295	46,547	4919,434	4,369	10,227
0,950	9,183	1251,683	2,204	20,409	31,739	4927,368	4,373	10,285
0,975	4,486	1252,805	2,205	20,522	13,055	4930,632	4,374	10,342
1,000	6,431	1254,412	2,206	20,636	25,724	4937,063	4,377	10,399
1,025	6,753	1256,100	2,208	20,749	27,010	4943,816	4,380	10,456
1,050	7,039	1257,860	2,209	20,862	28,156	4950,855	4,383	10,513
1,075	7,423	1259,716	2,211	20,975	29,693	4958,278	4,387	10,570
1,100	7,789	1261,663	2,213	21,088	31,155	4966,067	4,390	10,627
1,125	8,210	1263,716	2,215	21,201	32,838	4974,276	4,394	10,684
1,150	8,659	1265,880	2,216	21,314	34,635	4982,935	4,397	10,741
1,175	9,004	1268,131	2,218	21,427	36,017	4991,939	4,401	10,798
1,200	9,493	1270,505	2,221	21,539	37,972	5001,432	4,406	10,854
1,225	9,927	1272,986	2,223	21,652	39,707	5011,359	4,410	10,911
1,250	10,512	1275,614	2,225	21,764	42,049	5021,871	4,415	10,968
1,275	11,100	1278,389	2,227	21,877	44,400	5032,971	4,420	11,024

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,300	11,681	1281,310	2,230	21,989	46,723	5044,652	4,425	11,081
1,325	12,158	1284,349	2,233	22,101	48,631	5056,810	4,430	11,137
1,350	12,815	1287,553	2,235	22,213	51,262	5069,625	4,436	11,194
1,375	13,587	1290,950	2,238	22,324	54,348	5083,212	4,442	11,250
1,400	14,268	1294,517	2,241	22,436	57,073	5097,481	4,448	11,306
1,425	15,022	1298,272	2,245	22,548	60,088	5112,503	4,454	11,363
1,450	15,800	1302,222	2,248	22,659	63,199	5128,302	4,461	11,419
1,475	16,568	1306,364	2,252	22,770	66,272	5144,870	4,468	11,475
1,500	17,462	1310,730	2,255	22,881	69,847	5162,332	4,476	11,531
1,525	18,527	1315,362	2,259	22,992	74,110	5180,860	4,484	11,586
1,550	19,439	1320,221	2,264	23,102	77,756	5200,299	4,492	11,642
1,575	20,655	1325,385	2,268	23,213	82,618	5220,953	4,501	11,698
1,600	21,816	1330,839	2,273	23,323	87,265	5242,769	4,511	11,753
1,625	22,869	1336,556	2,277	23,433	91,478	5265,639	4,521	11,808
1,650	24,394	1342,655	2,283	23,542	97,576	5290,033	4,531	11,864
1,675	25,739	1349,090	2,288	23,652	102,957	5315,772	4,542	11,919
1,700	26,976	1355,834	2,294	23,761	107,904	5342,748	4,553	11,974
1,725	28,701	1363,009	2,300	23,870	114,803	5371,449	4,566	12,029
1,750	30,239	1370,568	2,306	23,978	120,954	5401,687	4,579	12,083
1,775	32,084	1378,590	2,313	24,086	128,338	5433,772	4,592	12,138
1,800	34,083	1387,110	2,320	24,194	136,334	5467,855	4,607	12,192
1,825	36,035	1396,119	2,328	24,302	144,141	5503,891	4,622	12,246
1,850	38,311	1405,697	2,336	24,409	153,243	5542,201	4,638	12,300
1,875	40,404	1415,798	2,344	24,516	161,615	5582,605	4,655	12,354
1,900	43,093	1426,571	2,353	24,622	172,370	5625,698	4,673	12,408
1,925	45,822	1438,027	2,362	24,728	183,288	5671,520	4,692	12,461
1,950	48,535	1450,160	2,372	24,834	194,138	5720,054	4,712	12,514
1,975	51,812	1463,113	2,383	24,939	207,248	5771,866	4,733	12,567
2,000	55,003	1476,864	2,394	25,044	220,013	5826,869	4,755	12,620
2,025	58,739	1491,549	2,406	25,148	234,955	5885,608	4,779	12,672
2,050	61,840	1507,009	2,418	25,252	247,359	5947,448	4,804	12,725
2,075	66,299	1523,583	2,432	25,355	265,195	6013,747	4,831	12,777
2,100	69,887	1541,055	2,446	25,457	279,548	6083,633	4,859	12,828
2,125	74,389	1559,652	2,460	25,559	297,554	6158,022	4,889	12,879
2,150	78,506	1579,279	2,476	25,660	314,023	6236,528	4,920	12,930
2,175	82,948	1600,016	2,492	25,761	331,791	6319,475	4,952	12,981
2,200	87,868	1621,983	2,509	25,861	351,472	6407,343	4,987	13,031
2,225	92,431	1645,091	2,527	25,960	369,724	6499,775	5,022	13,081
2,250	97,796	1669,540	2,545	26,059	391,184	6597,571	5,060	13,131
2,275	102,099	1695,064	2,565	26,157	408,394	6699,669	5,099	13,180
2,300	106,134	1721,598	2,585	26,254	424,536	6805,803	5,139	13,229
2,325	110,823	1749,304	2,606	26,350	443,289	6916,625	5,181	13,277
2,350	114,398	1777,903	2,627	26,446	457,591	7031,023	5,224	13,325

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,375	115,789	1806,850	2,648	26,541	463,155	7146,812	5,266	13,373
2,400	120,122	1836,881	2,670	26,635	480,485	7266,933	5,311	13,420
2,425	122,328	1867,463	2,692	26,728	489,309	7389,260	5,355	13,467
2,450	122,774	1898,156	2,714	26,820	491,093	7512,034	5,399	13,514
2,475	124,049	1929,168	2,736	26,912	496,195	7636,082	5,444	13,560
2,500	123,764	1960,109	2,758	27,003	495,055	7759,846	5,488	13,606
2,525	122,596	1990,759	2,780	27,093	490,382	7882,442	5,531	13,651
2,550	120,419	2020,863	2,800	27,183	481,675	8002,860	5,573	13,696
2,575	119,910	2050,841	2,821	27,272	479,638	8122,770	5,615	13,741
2,600	117,710	2080,268	2,841	27,360	470,838	8240,479	5,655	13,785
2,625	114,075	2108,787	2,861	27,448	456,296	8354,553	5,694	13,829
2,650	111,915	2136,766	2,880	27,535	447,655	8466,467	5,732	13,873
2,675	107,899	2163,741	2,898	27,622	431,594	8574,366	5,769	13,916
2,700	105,467	2190,107	2,915	27,708	421,864	8679,832	5,804	13,960
2,725	102,191	2215,655	2,932	27,793	408,758	8782,021	5,838	14,003
2,750	98,892	2240,378	2,949	27,878	395,566	8880,913	5,871	14,045
2,775	95,333	2264,212	2,964	27,963	381,328	8976,245	5,902	14,088
2,800	90,815	2286,915	2,979	28,047	363,255	9067,059	5,932	14,130
2,825	87,959	2308,905	2,993	28,130	351,830	9155,016	5,961	14,172
2,850	83,716	2329,834	3,007	28,214	334,859	9238,731	5,988	14,214
2,875	78,288	2349,406	3,020	28,297	313,148	9317,018	6,013	14,256
2,900	76,620	2368,561	3,032	28,379	306,475	9393,637	6,038	14,297
2,925	71,989	2386,558	3,043	28,462	287,953	9465,625	6,061	14,338
2,950	68,197	2403,607	3,054	28,544	272,783	9533,821	6,083	14,379
2,975	64,168	2419,649	3,064	28,625	256,667	9597,987	6,103	14,421
3,000	60,377	2434,744	3,074	28,707	241,504	9658,363	6,122	14,461
3,025	57,125	2449,025	3,083	28,788	228,497	9715,488	6,140	14,502
3,050	53,414	2462,378	3,091	28,869	213,651	9768,900	6,157	14,543
3,075	49,732	2474,812	3,099	28,950	198,925	9818,632	6,173	14,583
3,100	45,469	2486,179	3,106	29,030	181,872	9864,100	6,187	14,624
3,125	41,759	2496,619	3,113	29,111	167,033	9905,858	6,200	14,664
3,150	36,301	2505,694	3,118	29,191	145,200	9942,158	6,212	14,705
3,175	33,931	2514,176	3,124	29,271	135,720	9976,088	6,222	14,745
3,200	31,367	2522,018	3,129	29,351	125,466	10007,454	6,232	14,785
3,225	25,240	2528,328	3,132	29,431	100,958	10032,694	6,240	14,825
3,250	21,874	2533,797	3,136	29,511	87,493	10054,567	6,247	14,865
3,275	20,344	2538,883	3,139	29,590	81,372	10074,910	6,253	14,905
3,300	14,493	2542,506	3,141	29,670	57,969	10089,403	6,257	14,945
3,325	10,710	2545,183	3,143	29,750	42,840	10100,113	6,261	14,985
3,350	6,695	2546,857	3,144	29,829	26,779	10106,807	6,263	15,025
3,375	2,568	2547,499	3,144	29,909	10,272	10109,375	6,264	15,065
3,400	6,553	2549,137	3,145	29,988	26,214	10115,929	6,266	15,105
3,425	6,921	2550,867	3,146	30,068	27,683	10122,850	6,268	15,145



Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
3,450	7,245	2552,679	3,147	30,147	28,980	10130,095	6,270	15,184
3,475	7,571	2554,572	3,149	30,227	30,285	10137,666	6,272	15,224
3,500	7,967	2556,563	3,150	30,306	31,869	10145,633	6,275	15,264
3,525	8,381	2558,659	3,151	30,385	33,525	10154,014	6,277	15,304
3,550	8,829	2560,866	3,153	30,465	35,316	10162,843	6,280	15,344
3,575	9,230	2563,173	3,154	30,544	36,921	10172,073	6,283	15,384
3,600	9,758	2565,613	3,155	30,623	39,033	10181,832	6,286	15,423
3,625	10,166	2568,155	3,157	30,702	40,664	10191,998	6,289	15,463
3,650	10,763	2570,845	3,159	30,781	43,053	10202,761	6,292	15,503
3,675	11,257	2573,660	3,160	30,861	45,028	10214,018	6,296	15,543
3,700	11,917	2576,639	3,162	30,940	47,668	10225,935	6,300	15,582
3,725	12,396	2579,738	3,164	31,019	49,586	10238,332	6,303	15,622
3,750	13,173	2583,031	3,166	31,098	52,690	10251,504	6,307	15,662
3,775	13,783	2586,477	3,168	31,177	55,134	10265,288	6,312	15,701
3,800	14,530	2590,110	3,170	31,256	58,120	10279,818	6,316	15,741
3,825	15,344	2593,946	3,173	31,334	61,377	10295,162	6,321	15,780
3,850	16,095	2597,969	3,175	31,413	64,380	10311,257	6,326	15,820
3,875	16,995	2602,218	3,178	31,492	67,978	10328,251	6,331	15,859
3,900	17,860	2606,683	3,181	31,570	71,438	10346,111	6,337	15,899
3,925	18,912	2611,411	3,183	31,649	75,647	10365,022	6,342	15,938
3,950	19,902	2616,386	3,186	31,728	79,609	10384,925	6,348	15,978
3,975	21,115	2621,665	3,190	31,806	84,460	10406,040	6,355	16,017
4,000	22,148	2627,202	3,193	31,884	88,591	10428,187	6,362	16,056
4,025	23,423	2633,058	3,197	31,963	93,693	10451,611	6,369	16,096
4,050	24,799	2639,258	3,200	32,041	99,197	10476,410	6,376	16,135
4,075	26,176	2645,802	3,204	32,119	104,706	10502,586	6,384	16,174
4,100	27,551	2652,689	3,209	32,197	110,203	10530,137	6,393	16,213
4,125	29,065	2659,956	3,213	32,275	116,259	10559,202	6,401	16,252
4,150	30,910	2667,683	3,218	32,352	123,642	10590,112	6,411	16,291
4,175	32,733	2675,866	3,223	32,430	130,931	10622,845	6,421	16,330
4,200	34,771	2684,559	3,228	32,507	139,084	10657,616	6,431	16,369
4,225	36,633	2693,718	3,233	32,585	146,533	10694,249	6,442	16,408
4,250	38,923	2703,448	3,239	32,662	155,691	10733,172	6,454	16,447
4,275	41,069	2713,715	3,245	32,739	164,274	10774,241	6,466	16,486
4,300	43,856	2724,679	3,252	32,816	175,422	10818,096	6,479	16,524
4,325	46,514	2736,308	3,259	32,893	186,055	10864,610	6,493	16,563
4,350	49,249	2748,620	3,266	32,970	196,996	10913,859	6,508	16,601
4,375	52,763	2761,811	3,274	33,046	211,053	10966,622	6,524	16,640
4,400	56,021	2775,816	3,282	33,122	224,084	11022,643	6,540	16,678
4,425	59,362	2790,657	3,291	33,198	237,446	11082,005	6,558	16,716
4,450	62,809	2806,359	3,300	33,274	251,237	11144,814	6,577	16,754
4,475	66,791	2823,057	3,310	33,350	267,165	11211,605	6,596	16,792
4,500	70,486	2840,678	3,320	33,425	281,943	11282,091	6,617	16,830

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
4,525	75,037	2859,437	3,331	33,500	300,147	11357,128	6,639	16,868
4,550	79,680	2879,357	3,343	33,575	318,718	11436,807	6,662	16,905
4,575	84,390	2900,455	3,355	33,650	337,561	11521,198	6,687	16,943
4,600	88,841	2922,665	3,368	33,724	355,364	11610,038	6,712	16,980
4,625	93,945	2946,151	3,381	33,799	375,780	11703,983	6,740	17,017
4,650	98,763	2970,842	3,395	33,872	395,053	11802,747	6,768	17,054
4,675	103,660	2996,757	3,410	33,946	414,640	11906,407	6,798	17,091
4,700	107,280	3023,577	3,425	34,019	429,118	12013,686	6,828	17,128
4,725	112,083	3051,598	3,441	34,092	448,333	12125,770	6,860	17,164
4,750	115,362	3080,439	3,458	34,164	461,446	12241,131	6,892	17,201
4,775	118,828	3110,146	3,474	34,236	475,310	12359,958	6,926	17,237
4,800	121,224	3140,452	3,491	34,308	484,894	12481,182	6,960	17,273
4,825	124,361	3171,542	3,508	34,380	497,441	12605,542	6,994	17,309
4,850	126,053	3203,055	3,526	34,451	504,212	12731,595	7,029	17,344
4,875	126,340	3234,640	3,543	34,521	505,357	12857,934	7,064	17,380
4,900	124,818	3265,845	3,560	34,592	499,271	12982,752	7,098	17,415
4,925	124,577	3296,989	3,577	34,662	498,306	13107,329	7,132	17,450
4,950	122,031	3327,497	3,594	34,732	488,123	13229,359	7,165	17,485
4,975	121,262	3357,812	3,610	34,801	485,046	13350,621	7,198	17,520
5,000	118,222	3387,368	3,626	34,870	472,885	13468,842	7,230	17,555
5,025	116,342	3416,453	3,641	34,939	465,365	13585,184	7,261	17,589
5,050	112,315	3444,532	3,656	35,007	449,257	13697,498	7,291	17,623
5,075	110,266	3472,099	3,671	35,076	441,060	13807,763	7,320	17,658
5,100	106,686	3498,770	3,685	35,144	426,741	13914,448	7,348	17,692
5,125	102,704	3524,446	3,698	35,211	410,813	14017,151	7,376	17,726
5,150	99,692	3549,369	3,711	35,279	398,765	14116,843	7,402	17,760
5,175	96,382	3573,465	3,724	35,346	385,522	14213,223	7,427	17,793
5,200	92,623	3596,620	3,736	35,413	370,486	14305,845	7,451	17,827
5,225	87,771	3618,563	3,747	35,480	351,080	14393,615	7,474	17,860
5,250	84,607	3639,715	3,758	35,546	338,424	14478,221	7,496	17,894
5,275	81,291	3660,038	3,769	35,613	325,160	14559,511	7,517	17,927
5,300	78,017	3679,542	3,779	35,679	312,064	14637,527	7,537	17,960
5,325	73,321	3697,872	3,788	35,745	293,278	14710,846	7,556	17,993
5,350	69,952	3715,360	3,797	35,811	279,803	14780,797	7,574	18,026
5,375	65,232	3731,668	3,806	35,877	260,924	14846,028	7,590	18,059
5,400	61,205	3746,970	3,813	35,943	244,814	14907,232	7,606	18,092
5,425	58,277	3761,539	3,821	36,008	233,105	14965,508	7,621	18,125
5,450	54,126	3775,070	3,828	36,073	216,499	15019,633	7,635	18,158
5,475	51,154	3787,859	3,834	36,139	204,612	15070,786	7,648	18,191
5,500	45,390	3799,206	3,840	36,204	181,557	15116,175	7,659	18,223
5,525	42,307	3809,783	3,845	36,269	169,224	15158,481	7,670	18,256
5,550	38,544	3819,419	3,850	36,334	154,174	15197,024	7,680	18,289
5,575	35,669	3828,336	3,854	36,399	142,672	15232,692	7,689	18,321

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
5,600	30,773	3836,030	3,858	36,464	123,091	15263,465	7,696	18,354
5,625	28,084	3843,051	3,862	36,528	112,334	15291,549	7,704	18,386
5,650	23,081	3848,821	3,865	36,593	92,322	15314,629	7,709	18,418
5,675	20,863	3854,037	3,867	36,658	83,451	15335,492	7,715	18,451
5,700	15,808	3857,989	3,869	36,722	63,229	15351,299	7,719	18,483
5,725	14,035	3861,497	3,871	36,787	56,137	15365,333	7,722	18,516
5,750	7,908	3863,475	3,872	36,852	31,633	15373,242	7,724	18,548
5,775	4,196	3864,524	3,873	36,916	16,783	15377,438	7,725	18,580

## PŘÍLOHA P 9: METODA SPÍNÁNÍ 421

421				
Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,583	1,646	0,080	6,256
-0,725	6,943	3,382	0,115	8,827
-0,700	7,365	5,223	0,142	10,773
-0,675	7,792	7,171	0,167	12,390
-0,650	8,233	9,229	0,189	13,795
-0,625	8,686	11,401	0,210	15,046
-0,600	9,204	13,702	0,231	16,180
-0,575	9,705	16,128	0,250	17,220
-0,550	10,358	18,717	0,270	18,182
-0,525	10,936	21,451	0,289	19,078
-0,500	11,597	24,351	0,307	19,917
-0,475	12,258	27,415	0,326	20,706
-0,450	12,979	30,660	0,345	21,451
-0,425	13,811	34,113	0,364	22,156
-0,400	14,598	37,762	0,383	22,826
-0,375	15,526	41,644	0,402	23,463
-0,350	16,460	45,759	0,421	24,070
-0,325	17,372	50,102	0,441	24,650
-0,300	18,495	54,726	0,461	25,205
-0,275	19,698	59,650	0,481	25,735
-0,250	20,700	64,825	0,502	26,244
-0,225	21,967	70,317	0,522	26,733
-0,200	23,152	76,105	0,543	27,202
-0,175	24,224	82,161	0,565	27,653
-0,150	25,678	88,580	0,586	28,087
-0,125	26,833	95,288	0,608	28,506
-0,100	27,977	102,283	0,630	28,910
-0,075	29,074	109,551	0,652	29,300
-0,050	30,091	117,074	0,674	29,677
-0,025	30,602	124,724	0,696	30,042
0,000	31,448	132,586	0,717	30,396
0,025	32,079	140,606	0,739	30,739
0,050	32,120	148,636	0,759	31,073
0,075	32,528	156,768	0,780	31,398
0,100	32,398	164,868	0,800	31,714
0,125	32,088	172,890	0,819	32,023
0,150	31,753	180,828	0,838	32,325
0,175	31,510	188,705	0,856	32,620
0,200	30,609	196,357	0,873	32,909

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,225	30,009	203,860	0,889	33,193
0,250	29,549	211,247	0,905	33,471
0,275	28,455	218,361	0,921	33,745
0,300	27,933	225,344	0,935	34,015
0,325	26,741	232,029	0,949	34,280
0,350	26,186	238,576	0,962	34,542
0,375	25,086	244,847	0,975	34,800
0,400	24,195	250,896	0,987	35,055
0,425	23,232	256,704	0,998	35,307
0,450	21,909	262,181	1,009	35,556
0,475	20,963	267,422	1,019	35,802
0,500	20,543	272,558	1,028	36,047
0,525	19,358	277,397	1,038	36,289
0,550	18,376	281,991	1,046	36,529
0,575	17,469	286,358	1,054	36,767
0,600	16,332	290,441	1,062	37,003
0,625	15,411	294,294	1,069	37,238
0,650	14,709	297,971	1,075	37,471
0,675	13,610	301,374	1,081	37,703
0,700	12,647	304,535	1,087	37,933
0,725	11,503	307,411	1,092	38,163
0,750	10,793	310,109	1,097	38,391
0,775	9,691	312,532	1,101	38,618
0,800	9,058	314,797	1,105	38,845
0,825	7,819	316,751	1,109	39,071
0,850	7,089	318,524	1,112	39,296
0,875	5,747	319,960	1,114	39,521
0,900	5,170	321,253	1,117	39,745
0,925	3,866	322,219	1,118	39,969
0,950	2,935	322,953	1,120	40,192
0,975	1,748	323,390	1,120	40,415
1,000	1,608	323,792	1,121	40,638
1,025	1,688	324,214	1,122	40,861
1,050	1,760	324,654	1,122	41,084
1,075	1,856	325,118	1,123	41,307
1,100	1,947	325,604	1,124	41,529
1,125	2,052	326,118	1,125	41,751
1,150	2,165	326,659	1,126	41,974
1,175	2,251	327,222	1,127	42,196
1,200	2,373	327,815	1,128	42,417
1,225	2,482	328,435	1,129	42,639
1,250	2,628	329,092	1,130	42,860
1,275	2,775	329,786	1,131	43,081

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,300	2,920	330,516	1,133	43,302
1,325	3,039	331,276	1,134	43,523
1,350	3,204	332,077	1,135	43,743
1,375	3,397	332,926	1,137	43,963
1,400	3,567	333,818	1,138	44,183
1,425	3,755	334,757	1,140	44,402
1,450	3,950	335,744	1,141	44,622
1,475	4,142	336,780	1,143	44,840
1,500	4,365	337,871	1,145	45,059
1,525	4,632	339,029	1,147	45,277
1,550	4,860	340,244	1,149	45,495
1,575	5,164	341,535	1,151	45,712
1,600	5,454	342,898	1,154	45,929
1,625	5,717	344,328	1,156	46,146
1,650	6,098	345,852	1,159	46,362
1,675	6,435	347,461	1,161	46,577
1,700	6,744	349,147	1,164	46,792
1,725	7,175	350,941	1,167	47,007
1,750	7,560	352,831	1,170	47,221
1,775	8,021	354,836	1,173	47,434
1,800	8,521	356,966	1,177	47,647
1,825	9,009	359,219	1,181	47,859
1,850	9,578	361,613	1,185	48,070
1,875	10,101	364,138	1,189	48,281
1,900	10,773	366,831	1,193	48,491
1,925	11,456	369,695	1,198	48,700
1,950	12,134	372,729	1,203	48,908
1,975	12,953	375,967	1,208	49,116
2,000	13,751	379,405	1,213	49,322
2,025	14,685	383,076	1,219	49,528
2,050	15,460	386,941	1,225	49,732
2,075	16,575	391,085	1,232	49,936
2,100	17,472	395,453	1,239	50,138
2,125	18,597	400,102	1,246	50,339
2,150	19,626	405,008	1,254	50,539
2,175	20,737	410,193	1,262	50,738
2,200	21,967	415,684	1,270	50,935
2,225	23,108	421,461	1,279	51,132
2,250	24,449	427,574	1,288	51,326
2,275	25,525	433,955	1,298	51,520
2,300	26,534	440,588	1,308	51,712
2,325	27,706	447,515	1,318	51,902
2,350	28,600	454,665	1,328	52,091

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,375	28,947	461,901	1,339	52,279
2,400	30,030	469,409	1,350	52,465
2,425	30,582	477,054	1,361	52,649
2,450	30,693	484,728	1,372	52,832
2,475	31,012	492,481	1,382	53,014
2,500	30,941	500,216	1,393	53,194
2,525	30,649	507,878	1,404	53,372
2,550	30,105	515,405	1,414	53,550
2,575	29,978	522,899	1,425	53,726
2,600	29,428	530,256	1,435	53,901
2,625	28,519	537,386	1,444	54,075
2,650	27,979	544,380	1,453	54,247
2,675	26,975	551,124	1,462	54,419
2,700	26,367	557,716	1,471	54,589
2,725	25,548	564,103	1,480	54,758
2,750	24,723	570,283	1,488	54,927
2,775	23,833	576,242	1,495	55,095
2,800	22,704	581,918	1,503	55,261
2,825	21,990	587,415	1,510	55,427
2,850	20,929	592,647	1,517	55,593
2,875	19,572	597,540	1,523	55,757
2,900	19,155	602,329	1,529	55,921
2,925	17,997	606,829	1,535	56,084
2,950	17,049	611,091	1,540	56,247
2,975	16,042	615,101	1,545	56,409
3,000	15,094	618,875	1,550	56,570
3,025	14,281	622,445	1,554	56,731
3,050	13,353	625,784	1,558	56,892
3,075	12,433	628,892	1,562	57,052
3,100	11,367	631,734	1,566	57,212
3,125	10,440	634,344	1,569	57,372
3,150	9,075	636,612	1,572	57,531
3,175	8,483	638,733	1,574	57,690
3,200	7,842	640,694	1,577	57,848
3,225	6,310	642,271	1,579	58,007
3,250	5,468	643,638	1,580	58,165
3,275	5,086	644,910	1,582	58,323
3,300	3,623	645,815	1,583	58,481
3,325	2,678	646,485	1,584	58,639
3,350	1,674	646,903	1,584	58,797
3,375	0,642	647,064	1,585	58,955
3,400	1,638	647,473	1,585	59,112
3,425	1,730	647,906	1,586	59,270

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
3,450	1,811	648,359	1,586	59,428
3,475	1,893	648,832	1,587	59,585
3,500	1,992	649,330	1,587	59,743
3,525	2,095	649,854	1,588	59,900
3,550	2,207	650,405	1,589	60,058
3,575	2,308	650,982	1,589	60,215
3,600	2,440	651,592	1,590	60,372
3,625	2,542	652,228	1,591	60,529
3,650	2,691	652,900	1,592	60,686
3,675	2,814	653,604	1,593	60,843
3,700	2,979	654,349	1,594	61,000
3,725	3,099	655,124	1,595	61,157
3,750	3,293	655,947	1,596	61,314
3,775	3,446	656,808	1,597	61,471
3,800	3,633	657,716	1,598	61,627
3,825	3,836	658,675	1,599	61,784
3,850	4,024	659,681	1,600	61,940
3,875	4,249	660,743	1,601	62,096
3,900	4,465	661,860	1,603	62,252
3,925	4,728	663,042	1,604	62,408
3,950	4,976	664,286	1,606	62,564
3,975	5,279	665,605	1,607	62,719
4,000	5,537	666,990	1,609	62,875
4,025	5,856	668,453	1,611	63,030
4,050	6,200	670,003	1,613	63,185
4,075	6,544	671,639	1,614	63,340
4,100	6,888	673,361	1,617	63,495
4,125	7,266	675,178	1,619	63,650
4,150	7,728	677,110	1,621	63,804
4,175	8,183	679,156	1,623	63,958
4,200	8,693	681,329	1,626	64,112
4,225	9,158	683,618	1,629	64,266
4,250	9,731	686,051	1,632	64,419
4,275	10,267	688,618	1,635	64,572
4,300	10,964	691,359	1,638	64,725
4,325	11,628	694,266	1,641	64,877
4,350	12,312	697,344	1,645	65,029
4,375	13,191	700,642	1,649	65,181
4,400	14,005	704,143	1,653	65,333
4,425	14,840	707,853	1,657	65,484
4,450	15,702	711,779	1,662	65,634
4,475	16,698	715,953	1,667	65,784
4,500	17,621	720,359	1,672	65,934



Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
4,525	18,759	725,048	1,677	66,083
4,550	19,920	730,028	1,683	66,232
4,575	21,098	735,303	1,689	66,380
4,600	22,210	740,855	1,696	66,528
4,625	23,486	746,727	1,702	66,675
4,650	24,691	752,900	1,709	66,822
4,675	25,915	759,378	1,717	66,968
4,700	26,820	766,083	1,724	67,113
4,725	28,021	773,089	1,732	67,258
4,750	28,840	780,299	1,740	67,402
4,775	29,707	787,725	1,748	67,545
4,800	30,306	795,302	1,757	67,688
4,825	31,090	803,075	1,765	67,830
4,850	31,513	810,953	1,774	67,971
4,875	31,585	818,849	1,783	68,112
4,900	31,205	826,650	1,791	68,251
4,925	31,144	834,436	1,800	68,391
4,950	30,508	842,063	1,808	68,529
4,975	30,316	849,642	1,816	68,667
5,000	29,556	857,031	1,824	68,805
5,025	29,086	864,303	1,831	68,941
5,050	28,079	871,322	1,839	69,078
5,075	27,567	878,214	1,846	69,213
5,100	26,672	884,882	1,853	69,349
5,125	25,676	891,301	1,860	69,483
5,150	24,923	897,532	1,866	69,617
5,175	24,095	903,555	1,873	69,751
5,200	23,156	909,344	1,879	69,884
5,225	21,943	914,830	1,884	70,017
5,250	21,152	920,118	1,890	70,150
5,275	20,323	925,199	1,895	70,282
5,300	19,504	930,075	1,900	70,414
5,325	18,330	934,657	1,905	70,545
5,350	17,488	939,029	1,909	70,676
5,375	16,308	943,106	1,913	70,807
5,400	15,301	946,932	1,917	70,938
5,425	14,569	950,574	1,921	71,068
5,450	13,531	953,957	1,924	71,198
5,475	12,789	957,154	1,927	71,328
5,500	11,348	959,991	1,930	71,457
5,525	10,577	962,635	1,933	71,587
5,550	9,636	965,044	1,935	71,716
5,575	8,917	967,273	1,937	71,845

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
5,600	7,693	969,197	1,939	71,974
5,625	7,021	970,952	1,941	72,103
5,650	5,770	972,395	1,943	72,232
5,675	5,216	973,699	1,944	72,360
5,700	3,952	974,687	1,945	72,489
5,725	3,509	975,564	1,946	72,617
5,750	1,977	976,058	1,946	72,746
5,775	1,049	976,320	1,947	72,874

## PŘÍLOHA P 10: METODA SPÍNÁNÍ 46231

46231				
Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [μJ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	6,583	1,646	0,080	6,256
-0,725	6,943	3,382	0,115	8,827
-0,700	7,365	5,223	0,142	10,773
-0,675	7,792	7,171	0,167	12,390
-0,650	8,233	9,229	0,189	13,795
-0,625	8,686	11,401	0,210	15,046
-0,600	9,204	13,702	0,231	16,180
-0,575	9,705	16,128	0,250	17,220
-0,550	10,358	18,717	0,270	18,182
-0,525	10,936	21,451	0,289	19,078
-0,500	11,597	24,351	0,307	19,917
-0,475	12,258	27,415	0,326	20,706
-0,450	12,979	30,660	0,345	21,451
-0,425	13,811	34,113	0,364	22,156
-0,400	14,598	37,762	0,383	22,826
-0,375	15,526	41,644	0,402	23,463
-0,350	16,460	45,759	0,421	24,070
-0,325	17,372	50,102	0,441	24,650
-0,300	18,495	54,726	0,461	25,205
-0,275	19,698	59,650	0,481	25,735
-0,250	20,700	64,825	0,502	26,244
-0,225	21,967	70,317	0,522	26,733
-0,200	23,152	76,105	0,543	27,202
-0,175	24,224	82,161	0,565	27,653
-0,150	25,678	88,580	0,586	28,087
-0,125	26,833	95,288	0,608	28,506
-0,100	27,977	102,283	0,630	28,910
-0,075	29,074	109,551	0,652	29,300
-0,050	30,091	117,074	0,674	29,677
-0,025	30,602	124,724	0,696	30,042
0,000	31,448	132,586	0,717	30,396
0,025	32,079	140,606	0,739	30,739
0,050	32,120	148,636	0,759	31,073
0,075	32,528	156,768	0,780	31,398
0,100	32,398	164,868	0,800	31,714
0,125	37,532	174,251	0,822	32,022
0,150	37,292	183,574	0,844	32,322
0,175	37,178	192,868	0,865	32,615
0,200	36,304	201,944	0,885	32,900

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,225	35,800	210,894	0,905	33,180
0,250	35,469	219,761	0,924	33,453
0,275	34,409	228,364	0,941	33,721
0,300	34,027	236,870	0,959	33,985
0,325	32,867	245,087	0,975	34,243
0,350	32,459	253,202	0,991	34,497
0,375	31,418	261,056	1,007	34,748
0,400	30,632	268,714	1,021	34,994
0,425	29,763	276,155	1,035	35,237
0,450	28,471	283,273	1,048	35,477
0,475	27,631	290,181	1,061	35,714
0,500	27,428	297,037	1,074	35,948
0,525	26,313	303,616	1,085	36,180
0,550	25,437	309,975	1,097	36,409
0,575	24,658	316,139	1,108	36,636
0,600	23,607	322,041	1,118	36,861
0,625	22,827	327,748	1,128	37,083
0,650	22,305	333,324	1,137	37,304
0,675	21,320	338,654	1,146	37,523
0,700	20,468	343,771	1,155	37,740
0,725	19,429	348,628	1,163	37,956
0,750	18,923	353,359	1,171	38,170
0,775	17,946	357,845	1,178	38,383
0,800	17,514	362,224	1,186	38,594
0,825	16,370	366,316	1,192	38,805
0,850	15,840	370,276	1,199	39,014
0,875	14,554	373,915	1,205	39,222
0,900	14,250	377,477	1,210	39,429
0,925	13,010	380,730	1,216	39,635
0,950	12,248	383,792	1,220	39,840
0,975	11,163	386,583	1,225	40,045
1,000	10,884	389,304	1,229	40,248
1,025	10,095	391,827	1,233	40,452
1,050	8,878	394,047	1,237	40,654
1,075	8,444	396,158	1,240	40,856
1,100	7,653	398,071	1,243	41,057
1,125	7,200	399,871	1,246	41,258
1,150	6,591	401,519	1,248	41,459
1,175	5,049	402,781	1,250	41,659
1,200	4,617	403,935	1,252	41,859
1,225	3,481	404,805	1,253	42,058
1,250	3,148	405,593	1,255	42,257
1,275	2,775	406,286	1,256	42,457

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,300	2,920	407,016	1,257	42,656
1,325	3,039	407,776	1,258	42,855
1,350	3,204	408,577	1,259	43,053
1,375	3,397	409,426	1,261	43,252
1,400	3,567	410,318	1,262	43,450
1,425	3,755	411,257	1,263	43,648
1,450	3,950	412,245	1,265	43,846
1,475	4,142	413,280	1,266	44,043
1,500	4,365	414,371	1,268	44,240
1,525	4,632	415,529	1,270	44,437
1,550	4,860	416,744	1,272	44,634
1,575	5,164	418,035	1,274	44,831
1,600	5,454	419,399	1,276	45,027
1,625	5,717	420,828	1,278	45,222
1,650	6,098	422,353	1,280	45,418
1,675	6,435	423,961	1,283	45,613
1,700	6,744	425,647	1,285	45,808
1,725	7,175	427,441	1,288	46,002
1,750	7,560	429,331	1,291	46,196
1,775	8,021	431,336	1,294	46,389
1,800	8,521	433,467	1,297	46,582
1,825	9,009	435,719	1,300	46,775
1,850	9,578	438,113	1,304	46,967
1,875	10,101	440,638	1,308	47,158
1,900	10,773	443,332	1,312	47,349
1,925	11,456	446,196	1,316	47,539
1,950	12,134	449,229	1,320	47,729
1,975	12,953	452,467	1,325	47,918
2,000	13,751	455,905	1,330	48,106
2,025	14,685	459,576	1,335	48,294
2,050	15,460	463,441	1,341	48,481
2,075	16,575	467,585	1,347	48,667
2,100	17,472	471,953	1,353	48,852
2,125	18,597	476,602	1,360	49,036
2,150	19,626	481,509	1,367	49,220
2,175	20,737	486,693	1,374	49,402
2,200	21,967	492,185	1,382	49,583
2,225	23,108	497,962	1,390	49,764
2,250	24,449	504,074	1,399	49,943
2,275	25,525	510,455	1,407	50,121
2,300	26,534	517,089	1,417	50,298
2,325	27,706	524,015	1,426	50,474
2,350	28,600	531,165	1,436	50,649

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,375	28,947	538,402	1,445	50,822
2,400	30,030	545,909	1,456	50,995
2,425	30,582	553,555	1,466	51,166
2,450	30,693	561,228	1,476	51,336
2,475	31,012	568,981	1,486	51,505
2,500	30,941	576,716	1,496	51,672
2,525	37,660	586,132	1,508	51,839
2,550	37,167	595,423	1,520	52,004
2,575	37,211	604,726	1,532	52,168
2,600	36,746	613,913	1,544	52,330
2,625	35,858	622,877	1,555	52,492
2,650	35,438	631,737	1,566	52,652
2,675	34,458	640,351	1,576	52,811
2,700	33,991	648,849	1,587	52,969
2,725	33,259	657,164	1,597	53,126
2,750	32,535	665,298	1,607	53,282
2,775	31,737	673,232	1,616	53,437
2,800	30,640	680,892	1,626	53,592
2,825	30,077	688,411	1,635	53,745
2,850	29,080	695,681	1,643	53,897
2,875	27,709	702,609	1,651	54,049
2,900	27,556	709,498	1,659	54,200
2,925	26,443	716,108	1,667	54,351
2,950	25,616	722,512	1,675	54,500
2,975	24,699	728,687	1,682	54,649
3,000	23,875	734,656	1,689	54,798
3,025	23,224	740,462	1,695	54,945
3,050	22,428	746,069	1,702	55,093
3,075	21,650	751,481	1,708	55,239
3,100	20,669	756,649	1,714	55,385
3,125	19,885	761,620	1,719	55,531
3,150	18,520	766,250	1,724	55,676
3,175	18,206	770,801	1,730	55,821
3,200	17,788	775,248	1,735	55,965
3,225	16,216	779,302	1,739	56,109
3,250	15,548	783,189	1,743	56,253
3,275	15,512	787,067	1,748	56,396
3,300	14,020	790,572	1,752	56,539
3,325	13,243	793,883	1,755	56,681
3,350	12,359	796,972	1,759	56,824
3,375	11,451	799,835	1,762	56,966
3,400	10,780	802,530	1,765	57,108
3,425	10,479	805,150	1,768	57,249

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
3,450	9,592	807,548	1,770	57,390
3,475	8,442	809,658	1,773	57,532
3,500	7,926	811,640	1,775	57,673
3,525	7,259	813,455	1,777	57,813
3,550	6,775	815,148	1,779	57,954
3,575	5,613	816,552	1,780	58,094
3,600	5,383	817,897	1,782	58,235
3,625	4,156	818,936	1,783	58,375
3,650	3,718	819,866	1,784	58,515
3,675	2,814	820,569	1,785	58,655
3,700	2,979	821,314	1,785	58,795
3,725	3,099	822,089	1,786	58,935
3,750	3,293	822,912	1,787	59,075
3,775	3,446	823,774	1,788	59,215
3,800	3,633	824,682	1,789	59,355
3,825	3,836	825,641	1,790	59,495
3,850	4,024	826,647	1,791	59,634
3,875	4,249	827,709	1,792	59,774
3,900	4,465	828,825	1,793	59,913
3,925	4,728	830,007	1,795	60,053
3,950	4,976	831,251	1,796	60,192
3,975	5,279	832,571	1,798	60,331
4,000	5,537	833,955	1,799	60,470
4,025	5,856	835,419	1,801	60,609
4,050	6,200	836,969	1,802	60,748
4,075	6,544	838,605	1,804	60,886
4,100	6,888	840,327	1,806	61,025
4,125	7,266	842,143	1,808	61,163
4,150	7,728	844,075	1,810	61,301
4,175	8,183	846,121	1,812	61,440
4,200	8,693	848,294	1,814	61,577
4,225	9,158	850,584	1,817	61,715
4,250	9,731	853,017	1,819	61,853
4,275	10,267	855,583	1,822	61,990
4,300	10,964	858,324	1,825	62,127
4,325	11,628	861,231	1,828	62,264
4,350	12,312	864,309	1,831	62,400
4,375	13,191	867,607	1,835	62,537
4,400	14,005	871,108	1,839	62,673
4,425	14,840	874,819	1,843	62,809
4,450	15,702	878,744	1,847	62,944
4,475	16,698	882,919	1,851	63,080
4,500	17,621	887,324	1,856	63,214

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
4,525	18,759	892,014	1,861	63,349
4,550	19,920	896,994	1,866	63,483
4,575	21,098	902,268	1,871	63,617
4,600	22,210	907,821	1,877	63,750
4,625	23,486	913,692	1,883	63,883
4,650	24,691	919,865	1,889	64,016
4,675	25,915	926,344	1,896	64,148
4,700	26,820	933,049	1,903	64,280
4,725	28,021	940,054	1,910	64,411
4,750	28,840	947,264	1,917	64,541
4,775	29,707	954,691	1,925	64,671
4,800	30,306	962,267	1,932	64,801
4,825	31,090	970,040	1,940	64,930
4,850	31,513	977,918	1,948	65,059
4,875	31,585	985,815	1,956	65,187
4,900	31,205	993,616	1,964	65,314
4,925	31,144	1001,402	1,971	65,441
4,950	30,508	1009,029	1,979	65,568
4,975	30,316	1016,608	1,986	65,694
5,000	29,556	1023,997	1,993	65,820
5,025	29,086	1031,268	2,001	65,945
5,050	28,079	1038,288	2,007	66,070
5,075	27,567	1045,179	2,014	66,194
5,100	26,672	1051,847	2,020	66,318
5,125	25,676	1058,266	2,027	66,442
5,150	24,923	1064,497	2,033	66,565
5,175	24,095	1070,521	2,038	66,688
5,200	23,156	1076,310	2,044	66,810
5,225	21,943	1081,796	2,049	66,932
5,250	21,152	1087,083	2,054	67,054
5,275	20,323	1092,164	2,059	67,176
5,300	19,504	1097,040	2,063	67,297
5,325	18,330	1101,623	2,068	67,418
5,350	17,488	1105,995	2,072	67,539
5,375	16,308	1110,072	2,076	67,659
5,400	15,301	1113,897	2,079	67,780
5,425	14,569	1117,539	2,083	67,900
5,450	13,531	1120,922	2,086	68,020
5,475	12,789	1124,119	2,089	68,140
5,500	11,348	1126,956	2,091	68,259
5,525	10,577	1129,601	2,094	68,379
5,550	9,636	1132,010	2,096	68,498
5,575	8,917	1134,239	2,098	68,617



Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
5,600	7,693	1136,162	2,100	68,736
5,625	7,021	1137,917	2,101	68,855
5,650	5,770	1139,360	2,103	68,974
5,675	5,216	1140,664	2,104	69,093
5,700	3,952	1141,652	2,105	69,212
5,725	3,509	1142,529	2,106	69,331
5,750	1,977	1143,023	2,106	69,449
5,775	1,049	1143,286	2,106	69,568

## PŘÍLOHA P 11: METODA SPÍNÁNÍ 721

721				
Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
-0,750	8,317	2,079	0,090	5,566
-0,725	8,752	4,267	0,129	7,854
-0,700	9,264	6,583	0,160	9,587
-0,675	9,779	9,028	0,187	11,028
-0,650	10,310	11,606	0,212	12,280
-0,625	10,855	14,319	0,236	13,396
-0,600	11,478	17,189	0,258	14,408
-0,575	12,077	20,208	0,280	15,337
-0,550	12,860	23,423	0,301	16,197
-0,525	13,549	26,810	0,323	16,998
-0,500	14,335	30,394	0,343	17,749
-0,475	15,121	34,174	0,364	18,455
-0,450	15,974	38,168	0,385	19,123
-0,425	16,964	42,409	0,406	19,755
-0,400	17,890	46,881	0,427	20,356
-0,375	18,986	51,628	0,448	20,928
-0,350	20,085	56,649	0,469	21,474
-0,325	21,152	61,937	0,490	21,995
-0,300	22,473	67,555	0,512	22,494
-0,275	23,891	73,528	0,534	22,972
-0,250	25,055	79,792	0,556	23,430
-0,225	26,541	86,427	0,579	23,870
-0,200	27,927	93,409	0,602	24,294
-0,175	29,174	100,702	0,625	24,701
-0,150	30,900	108,427	0,649	25,094
-0,125	32,255	116,491	0,672	25,472
-0,100	33,608	124,893	0,696	25,837
-0,075	34,917	133,622	0,720	26,191
-0,050	36,148	142,659	0,744	26,532
-0,025	36,771	151,852	0,768	26,863
0,000	37,837	161,311	0,791	27,183
0,025	38,661	170,977	0,815	27,495
0,050	38,789	180,674	0,837	27,798
0,075	39,398	190,523	0,860	28,092
0,100	39,367	200,365	0,882	28,379
0,125	39,144	210,151	0,903	28,659
0,150	38,910	219,879	0,924	28,933
0,175	38,815	229,582	0,944	29,201
0,200	37,921	239,063	0,963	29,463

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
0,225	37,422	248,418	0,982	29,720
0,250	37,107	257,695	1,000	29,972
0,275	36,029	266,702	1,017	30,220
0,300	35,665	275,619	1,034	30,464
0,325	34,485	284,240	1,050	30,704
0,350	34,097	292,764	1,066	30,940
0,375	33,045	301,025	1,081	31,173
0,400	32,263	309,091	1,095	31,403
0,425	31,393	316,939	1,109	31,629
0,450	30,081	324,459	1,122	31,854
0,475	29,244	331,770	1,135	32,075
0,500	29,078	339,040	1,147	32,294
0,525	27,953	346,028	1,159	32,511
0,550	27,080	352,798	1,170	32,726
0,575	26,307	359,375	1,181	32,938
0,600	25,251	365,688	1,191	33,149
0,625	24,479	371,808	1,201	33,358
0,650	23,982	377,803	1,211	33,565
0,675	22,995	383,552	1,220	33,771
0,700	22,146	389,088	1,229	33,975
0,725	21,103	394,364	1,237	34,178
0,750	20,622	399,519	1,245	34,380
0,775	19,646	404,431	1,253	34,580
0,800	19,240	409,241	1,260	34,779
0,825	18,086	413,762	1,267	34,976
0,850	17,580	418,157	1,274	35,173
0,875	16,275	422,226	1,280	35,369
0,900	16,011	426,229	1,286	35,564
0,925	14,752	429,917	1,292	35,758
0,950	14,001	433,417	1,297	35,951
0,975	12,908	436,644	1,302	36,143
1,000	12,667	439,811	1,306	36,335
1,025	11,889	442,783	1,311	36,526
1,050	10,655	445,447	1,315	36,717
1,075	10,253	448,010	1,319	36,906
1,100	9,471	450,378	1,322	37,096
1,125	9,049	452,640	1,325	37,285
1,150	8,464	454,756	1,328	37,473
1,175	6,884	456,477	1,331	37,661
1,200	6,481	458,097	1,333	37,849
1,225	5,331	459,430	1,335	38,036
1,250	5,043	460,691	1,337	38,223
1,275	4,628	461,848	1,339	38,410

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
1,300	4,178	462,892	1,340	38,597
1,325	4,008	463,894	1,342	38,783
1,350	4,214	464,948	1,343	38,969
1,375	4,460	466,063	1,345	39,155
1,400	4,672	467,231	1,347	39,341
1,425	4,907	468,458	1,348	39,527
1,450	5,148	469,745	1,350	39,712
1,475	5,384	471,091	1,352	39,897
1,500	5,661	472,506	1,354	40,082
1,525	5,995	474,005	1,356	40,266
1,550	6,273	475,573	1,359	40,450
1,575	6,650	477,235	1,361	40,634
1,600	7,009	478,988	1,363	40,818
1,625	7,327	480,819	1,366	41,001
1,650	7,800	482,769	1,369	41,184
1,675	8,210	484,822	1,372	41,366
1,700	8,580	486,967	1,375	41,548
1,725	9,110	489,244	1,378	41,730
1,750	9,573	491,637	1,381	41,911
1,775	10,134	494,171	1,385	42,092
1,800	10,739	496,856	1,389	42,272
1,825	11,328	499,688	1,393	42,452
1,850	12,015	502,691	1,397	42,631
1,875	12,637	505,850	1,401	42,810
1,900	13,449	509,213	1,406	42,988
1,925	14,267	512,780	1,411	43,166
1,950	15,073	516,548	1,416	43,342
1,975	16,053	520,561	1,421	43,519
2,000	17,002	524,812	1,427	43,694
2,025	18,120	529,341	1,433	43,869
2,050	19,025	534,098	1,440	44,043
2,075	20,357	539,187	1,447	44,216
2,100	21,408	544,539	1,454	44,389
2,125	22,739	550,224	1,461	44,560
2,150	23,941	556,209	1,469	44,731
2,175	25,248	562,521	1,478	44,901
2,200	26,698	569,195	1,486	45,069
2,225	28,041	576,206	1,495	45,237
2,250	29,633	583,614	1,505	45,404
2,275	30,903	591,339	1,515	45,569
2,300	32,094	599,363	1,525	45,734
2,325	33,507	607,740	1,536	45,897
2,350	34,589	616,387	1,547	46,059

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
2,375	35,017	625,141	1,558	46,220
2,400	36,383	634,237	1,569	46,380
2,425	37,115	643,516	1,580	46,539
2,450	37,329	652,848	1,592	46,697
2,475	37,825	662,304	1,603	46,853
2,500	37,869	671,772	1,615	47,008
2,525	37,660	681,187	1,626	47,163
2,550	37,167	690,479	1,637	47,316
2,575	37,211	699,781	1,648	47,468
2,600	36,746	708,968	1,659	47,619
2,625	35,858	717,933	1,669	47,770
2,650	35,438	726,792	1,679	47,919
2,675	34,458	735,406	1,689	48,067
2,700	33,991	743,904	1,699	48,215
2,725	33,259	752,219	1,709	48,362
2,750	32,535	760,353	1,718	48,508
2,775	31,737	768,287	1,727	48,653
2,800	30,640	775,947	1,735	48,797
2,825	30,077	783,466	1,744	48,941
2,850	29,080	790,736	1,752	49,084
2,875	27,709	797,664	1,759	49,226
2,900	27,556	804,553	1,767	49,368
2,925	26,443	811,164	1,774	49,509
2,950	25,616	817,567	1,781	49,650
2,975	24,699	823,742	1,788	49,790
3,000	23,875	829,711	1,794	49,930
3,025	23,224	835,517	1,801	50,069
3,050	22,428	841,124	1,807	50,207
3,075	21,650	846,537	1,813	50,345
3,100	20,669	851,704	1,818	50,483
3,125	19,885	856,675	1,823	50,620
3,150	18,520	861,305	1,828	50,757
3,175	18,206	865,856	1,833	50,894
3,200	17,788	870,303	1,838	51,030
3,225	16,216	874,357	1,842	51,166
3,250	15,548	878,244	1,846	51,302
3,275	15,512	882,122	1,850	51,437
3,300	14,020	885,627	1,854	51,572
3,325	13,243	888,938	1,857	51,707
3,350	12,359	892,027	1,861	51,841
3,375	11,451	894,890	1,864	51,975
3,400	10,780	897,585	1,866	52,109
3,425	10,479	900,205	1,869	52,243

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
3,450	9,592	902,603	1,872	52,377
3,475	8,442	904,713	1,874	52,510
3,500	7,926	906,695	1,876	52,644
3,525	7,259	908,510	1,878	52,777
3,550	6,775	910,204	1,879	52,910
3,575	5,613	911,607	1,881	53,043
3,600	5,383	912,952	1,882	53,176
3,625	4,156	913,991	1,883	53,309
3,650	3,718	914,921	1,884	53,441
3,675	2,814	915,625	1,885	53,574
3,700	2,979	916,369	1,886	53,707
3,725	3,099	917,144	1,887	53,839
3,750	3,293	917,967	1,887	53,972
3,775	3,446	918,829	1,888	54,104
3,800	3,633	919,737	1,889	54,236
3,825	3,836	920,696	1,890	54,369
3,850	4,024	921,702	1,891	54,501
3,875	4,249	922,764	1,892	54,633
3,900	4,465	923,880	1,894	54,765
3,925	4,728	925,062	1,895	54,897
3,950	4,976	926,306	1,896	55,029
3,975	5,279	927,626	1,897	55,161
4,000	5,537	929,010	1,899	55,292
4,025	5,856	930,474	1,900	55,424
4,050	6,200	932,024	1,902	55,556
4,075	6,544	933,660	1,904	55,687
4,100	6,888	935,382	1,905	55,818
4,125	7,266	937,199	1,907	55,949
4,150	7,728	939,130	1,909	56,080
4,175	8,183	941,176	1,911	56,211
4,200	8,693	943,349	1,913	56,342
4,225	9,158	945,639	1,916	56,473
4,250	9,731	948,072	1,918	56,603
4,275	10,267	950,638	1,921	56,733
4,300	10,964	953,379	1,924	56,863
4,325	11,628	956,287	1,926	56,993
4,350	12,312	959,365	1,930	57,123
4,375	13,191	962,662	1,933	57,252
4,400	14,005	966,164	1,936	57,382
4,425	14,840	969,874	1,940	57,511
4,450	15,702	973,799	1,944	57,639
4,475	16,698	977,974	1,948	57,768
4,500	17,621	982,379	1,953	57,896

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ J]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
4,525	18,759	987,069	1,957	58,024
4,550	19,920	992,049	1,962	58,151
4,575	21,098	997,323	1,967	58,279
4,600	22,210	1002,876	1,973	58,406
4,625	23,486	1008,748	1,979	58,532
4,650	24,691	1014,920	1,985	58,658
4,675	25,915	1021,399	1,991	58,784
4,700	26,820	1028,104	1,997	58,909
4,725	28,021	1035,109	2,004	59,034
4,750	28,840	1042,319	2,011	59,159
4,775	29,707	1049,746	2,018	59,283
4,800	30,306	1057,323	2,026	59,407
4,825	31,090	1065,095	2,033	59,530
4,850	31,513	1072,973	2,041	59,652
4,875	31,585	1080,870	2,048	59,775
4,900	31,205	1088,671	2,055	59,897
4,925	31,144	1096,457	2,063	60,018
4,950	30,508	1104,084	2,070	60,139
4,975	30,316	1111,663	2,077	60,260
5,000	29,556	1119,052	2,084	60,380
5,025	29,086	1126,323	2,091	60,500
5,050	28,079	1133,343	2,097	60,619
5,075	27,567	1140,234	2,104	60,738
5,100	26,672	1146,902	2,110	60,857
5,125	25,676	1153,321	2,116	60,975
5,150	24,923	1159,552	2,121	61,093
5,175	24,095	1165,576	2,127	61,211
5,200	23,156	1171,365	2,132	61,328
5,225	21,943	1176,851	2,137	61,445
5,250	21,152	1182,139	2,142	61,562
5,275	20,323	1187,219	2,146	61,679
5,300	19,504	1192,095	2,151	61,795
5,325	18,330	1196,678	2,155	61,911
5,350	17,488	1201,050	2,159	62,027
5,375	16,308	1205,127	2,163	62,143
5,400	15,301	1208,952	2,166	62,258
5,425	14,569	1212,595	2,169	62,374
5,450	13,531	1215,977	2,172	62,489
5,475	12,789	1219,175	2,175	62,604
5,500	11,348	1222,012	2,178	62,719
5,525	10,577	1224,656	2,180	62,833
5,550	9,636	1227,065	2,182	62,948
5,575	8,917	1229,294	2,184	63,062

Dráha [cm]	Force [mN]	Energie [ $\mu$ ]	Rychlost [m/s]	Čas [ms]
5,600	7,693	1231,217	2,186	63,177
5,625	7,021	1232,973	2,187	63,291
5,650	5,770	1234,415	2,189	63,405
5,675	5,216	1235,719	2,190	63,520
5,700	3,952	1236,707	2,191	63,634
5,725	3,509	1237,584	2,192	63,748
5,750	1,977	1238,079	2,192	63,862
5,775	1,049	1238,341	2,192	63,976