

# **STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST**

**Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a komunikace**

## **Iontové motory**

**Jan Skácel**  
**Hlavní město Praha**

**Praha 2024**

# STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor č. 10: Elektrotechnika, elektronika a komunikace

## Iontové motory

## Ion engines

**Autoři:** Jan Skácel

**Škola:** Vyšší odborná škola a Střední průmyslová škola dopravní,  
Praha 1, Masná 18

**Kraj:** Praha

**Konzultant:** Ing. Petr Ryba, Mgr. Jarmila Kulíšková

Praha 2024

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou práci SOČ vypracoval/a samostatně a použil/a jsem pouze prameny a literaturu uvedené v seznamu bibliografických záznamů.

Prohlašuji, že tištěná verze a elektronická verze soutěžní práce SOČ jsou shodné.

Nemám závažný důvod proti zpřístupňování této práce v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších předpisů.

V Praze dne 24.3.2024 .....

Jan Skácel

## **Anotace**

Tato práce se věnuje zkoumání iontových motorů, který je inovativní pohonný systém. Tento motor nabízí výhody pro dlouhodobé vesmírné mise, kde je klíčová efektivní spotřeba paliva. Práce je rozdělena do několika kapitol. První, teoretická část, popisuje historii vývoje a principy fungování několika druhů iontových motorů. V další části jsou porovnány iontové motory s konvenčními chemickými motory. V praktické části se tato práce zabývá vytvořením vlastního iontového motoru v domácím prostředí, včetně modelů a použitých materiálů

## **.Klíčová slova**

Iontové motory, vesmírný pohon, plazmová fyzika, xenon

## **Annotation**

This thesis explores the ion engine, which is an innovative propulsion system. This engine offers advantages for long-duration space missions where fuel efficiency is crucial. The thesis is divided into several chapters. The first, the theoretical section, describes the history of the development and principles of operation of several types of ion engines. The second compares ion engines with conventional chemical engines. In the practical part, this thesis deals with the creation of a custom ion engine in a domestic environment, including models and materials used.

## **Keywords**

Ion engines, space propulsion, plasma physics, xenon

# OBSAH

1	Úvod.....	1
2	Teoretická část .....	1
2.1	Historie .....	2
2.1.1	SART I.....	3
2.1.2	SART II.....	4
2.2	Využití.....	4
2.3	Specifický impuls (Isp) .....	5
2.4	Základy iontových motorů .....	6
2.5	Fyzikální děje v iontových motorech .....	6
2.5.1	Ionizace.....	7
2.5.2	Elektrostatické pole.....	7
2.6	Porovnání iontových motorů na orbitě proti vesmíru .....	8
2.6.1	Družice na EO (Earth orbit).....	9
2.6.2	Družice v hlubokém vesmíru .....	9
2.7	Iontové motory .....	9
2.7.1	Hallův iontový motor.....	10
2.7.2	Mřížkový iontový motor .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.7.3	Polem urychlovaný iontový motor .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
2.8	Porovnání s chemickými motory.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3	Praktická část .....	13
3.1	Použité materiály.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.1	PETG .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.2	PLA.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.3	Měď .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.4	Hliník.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.5	Grafit.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.1.6	Skalice modrá (pentahydrát síranu měďnatého) ....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2	Modely .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.1	Tělo .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.2	Zachytávač.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.3	Vymetávač celek.....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.2.4	Úchyt vymetávače .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>

3.3	Elektrické součástky .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.3.1	Modul měniče 3 - 6V na 400kV .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
4	Závěr .....	22
	Seznam zdrojů .....	1

## SEZNAM OBRÁZKŮ

# 1 ÚVOD

Výběr tohoto tématu nebyl zcela náhodný. Už od základní školy mě fascinovala vesmírná technika a průzkum hlubokého vesmíru. Iontové motory představují revoluční pohon pro vesmírné mise přesahující hranice naší sluneční soustavy.

Tento projekt jsem začal tvořit, ve chvíli, kdy mě začalo zajímat, jak takový iontový motor funguje, jaký je jeho skutečný výkon a jak těžké je ho vytvořit. Zaujala mě myšlenka a způsob fungování iontových motorů, které využívají Newtonův zákon akce a reakce. Jejich výrobu jsem se rozhodl je vyzkoušet v domácích podmínkách.

Tím, že demonstřuji konstrukci iontového motoru v domácích podmínkách, se otevírá cesta k přiblížení principů fungování iontových motorů studentům. Tato demonstrace nejen ukazuje základní principy fyziky, jako je přenos elektrické energie přes vzduch, ale také další fyzikální zákony o hybnosti. Tímto přístupem chci posílit zájem o pokročilé vesmírné technologie mezi studenty.

Cílem této práce je přiblížit jednoduchost a praktické využití iontových motorů.



## 2 TEORETICKÁ ČÁST

Iontový motor pracuje na principu akce a reakce. To ve své podstatě znamená že jakákoliv akce v jednom směru vyvolá reakci ve směru opačném. Pro naše využití je vymršťování iontů v jednom směru akce a síla opačná, kterou ionty působí na plavidlo, je reakce. Ionty v motoru jsou urychleny na rychlosti v řádech desítek km/s. Vymršťování těchto iontů následně umožní vytvořit tah motoru.

### 2.1 Historie

S první myšlenkou iontových motorů přišel americký inženýr Robert Hutchings Goddard v roce 1906, jehož myšlenka byla zapsána pouze v jeho deníku. Tato myšlenka o zrychlení iontů v elektrickém poli se však začala zkoumat až po roce 1950, kdy začínal vesmírný závod mezi Amerikou a Sovětským svazem.

Za otce Iontových motorů se však považuje vesmírný průkopník Konstantin Ciolkovskij, sovětský vědec a pedagog, známý pro svou raketovou rovnici, která platí do dnes. Jeho zmínka ve veřejné odborné literatuře, že by mohlo být teoreticky možné využít elektřinu k urychlení raket, se objevila v roce 1911, tedy až 5 let po Robertu H. Goddardovi. Důvod proč se Konstantin Ciolkovskij považuje za teoretického vynálezce iontových motorů je ten, že poskytl hlubší, avšak ne úplně správný, základ pro jejich vytvoření. Ciolkovskij nesprávně identifikoval částici která by měla být základem pro iontový pohon. Předpokládal, že by mělo jít o urychlení elektronů, pozdější výzkum však zjistil, že ionty jsou vhodnější. O elektronech dokonce psal ve svém deníku:

*It is quite probable that electrons and ions can be used, i.e. cathode and especially anode rays. The force of electricity is unlimited and can, therefore, produce a powerful flux of ionized helium to serve a spaceship. However, we shall leave these dreams for a while and return to our prosaic explosives (Je docela pravděpodobné, že elektrony a ionty, tj. katodové a zejména anodové záření. Síla elektřiny je neomezená, a proto může vytvářet silné proudy ionizovaného helia, který poslouží kosmické lodi. Tyto sny si však necháme na jindy. A vrátíme se k našim prozaickým výbušninám)*

Elektrony by se teoreticky daly také použít pro iontové motory, avšak v praxi se prokázalo, že jejich správné usměrnění a efektivita je horší, v porovnání s ionty. Rozdíl mezi urychlováním iontů a elektronů je takový, že ionty mají náboj kladný a elektrony záporný.

První funkční elektrostatický iontový motor se objevil až v roce 1959 v americkém vesmírném programu NASA. Vědec za jeho stvořením byl Dr. Harold R. Kaufman. Všechny nynější iontové motory se odvíjejí od jeho prvního funkčního modelu.

V prvních testech se využívala rtuť jako palivo, a to hned z několika důvodů. Prvním, asi nejdůležitějším, důvodem je vysoká atomová hmotnost 200,59, z čehož vyplývá, že čím těžší jsou ionty paliva, tím větší tah dokážeme vygenerovat. To nám dokazuje i rovnice  $F = m \cdot a$ . V dobách testování byla také rtuť poměrně levná a široce dostupná surovina. Z tohoto důvodu se rtuť běžně používala v různých měřících přístrojích (například teploměry, barometry, tonometry). Tyto vlastnosti ze rtuti udělaly výhodné palivo i z ekonomického pohledu.

### 2.1.1 SART I

V roce 1960 začalo jednání o prvním testování iontových motorů ve vesmírném prostoru. Mise SART I (Space Electric Rocket Test), která měla za úkol vynést testovací sondu na orbitu, startovala v roce 1964. Po dosažení orbity 4 000 km nad mořskou hladinou byl zahájen test. Kaufmanův motor fungoval po dobu 31 minut a 16 sekund a dokázal, že použití iontových motorů ve vakuu vesmíru je možné.

Výsledky testu SART I otevřely cestu dalším misím, jako je SART II, a nakonec i použití iontových motorů na sondách určených do hlubokého vesmíru. Tento průlom v pohonu také ukázal ekologický způsob, jak cestovat vesmírem.

### 2.1.2 SART II

Následující mise SART II testovala jak dlouho iontové motory, které využívají rtuť jako palivo, mohou fungovat. Po výstupu rakety na polární orbitu ve výšce 1 000 km nad mořem dva iontové motory identického typu fungovaly dohromady 5792 hodin po dobu 11 let od 1970 do 1981. Během letu proběhlo přes 300 zážehů. Limitací tohoto druhu motoru byl maximální výkon 850 W při 28mN tahu. I přes velmi malý tah byl specifický impulz motoru 4200Isp. Pokud chceme srovnání s moderními chemickými spalovacími motory na kapalné palivo, tak motor Merlin 1D Vakuum, vyvíjený vesmírnou agenturou SpaceX, má specifický impulz pouhých 340Isp.

Dlouhý test, který měla mise SART II za úkol, dokázal, že je možné využít elektrické motory i pro velmi dlouhé a opakované zážehy.

## 2.2 Využití

Iontové motory nemají velké využití mimo vesmírný průmysl, kvůli svému nízkému výkonu. Přestože je jejich využití omezené, v tom, na co je lidstvo používá, jsou nejlepší.

Jak již bylo zmíněno, iontové motory mají největší využití v raketové technice. Zejména na geostacionárních družicích. Tyto družice krouží na orbitě ve výšce přesně 35 786 km a obíhají zemi rychlostí zhruba 3 km/s. Ve chvíli, kdy je družice na této orbitě, oběhnout planetu ji trvá stejnou dobu jako jedno otočení planety kolem své osy, v případě země je to zhruba 23 hodin a 56 minut. To zajišťuje že družice je vůči planetě stále na stejném místě. Pro to, aby tato orbita fungovala jako geostacionární, je potřeba aby její sklon oproti rovníku byl také 0 stupňů. Tuto orbitu většinou využívají špionážní satelity pro možnost nepřetržitého fotografování jednoho místa. Iontové motory využívají pro úpravy orbity ve chvíli, kdy se družice odchýlí ze své trajektorie.

Další užití iontového motoru může být na cestách k dalším vesmírným objektům.

## 2.3 Specifický impuls ( $I_{sp}$ )

Dříve jsem se zmiňoval o specifickém impulzu, ale ne každý ví, co udává.

Specifický impuls měří efektivitu motoru v sekundách. Výpočet pro  $I_{sp}$  je následující:

$$I_{sp} = \frac{F}{\dot{m} \cdot g_0}$$

V rovnici znamená:

- $F$  je tah motoru v newtonech, občas mylně zaměňován za tah
- $\dot{m}$  je hmotnostní tok paliva v kg/s, neboli kolik kilogramů paliva se dostane do motoru za jednu sekundu
- $g_0$  je standardní gravitační zrychlení Země neboli  $\approx 9,81 \text{ m/s}^2$

Kdybychom si to chtěli ukázat na příkladu, tak řekněme že máme ideální motor o  $I_{sp}$  400 sekund. Pro zjednodušení nebudeme počítat s  $g_0 \approx 9,81 \text{ m/s}^2$  ale s  $g_0 = 10 \text{ m/s}^2$

To znamená že náš motor by dokázal při ideálních podmínkách spotřebovat 100 kilogramů paliva za 400 sekund, to by znamenalo že hmotnostní tok paliva je 0,25kg/s, a po celou dobu fungování by konstantně generoval tah 1 000 newtonů. Abychom se přivedli do děje, tak chemický motor Merlin Vacuum (1C), který je upraven pro pracování ve vakuu, má specifický impuls 342s. Specifický impuls iontových motorů se pohybuje v rozmezí 2000s – 5000s. Tento údaj se bude lišit podle typu motoru.

## 2.4 DeltaV ( $\Delta v$ )

$\Delta v$  nám udává možnou změnu rychlosti. Parametr se počítá v m/s. V praxi to vypadá tak, že kdybychom měli  $\Delta v$  o 150 m/s a využili bychom je všechny z nulové rychlosti, teoreticky bychom měli dosáhnout rychlosti 150m/s a 0m/s  $\Delta v$ .

## 2.5 Základy iontových motorů

Iontové motory fungují na bázi urychlení iontů v daném směru. Představme si dvě plavidla ve vesmíru. Jedno z plavidel bude využívat tradiční spalovací chemický motor a druhé bude využívat iontový motor. V principu fungují stejně, urychlení hmoty v jednom směru, ale rozdílný je způsob a rychlost vypouštění hmoty. U chemických motorů opouští spaliny plavidlo rychlostí zhruba 3-4 km/s. U iontových motorů mohou urychlené ionty opouštět urychlovací komoru rychlostí až 100 km/s.

Je důležité pochopit, že i když iontové motory dosahují vypouštěcích rychlostí až 100 km/s, neznamená to, že jejich tah je větší než u chemických motorů. Tah, který motor produkuje, je také ovlivněn množstvím hmoty, kterou motor dokáže za určitý čas urychlit a vypustit. Chemické motory mohou v krátkém časovém období vypustit velké množství hmoty, což vede k výrazně vyššímu okamžitému tahu, který je nezbytný pro překonání zemské gravitace a dosažení orbity. Například SRB (Solid Rocket Booster, neboli urychlovač na pevné palivo), který doprovázel raketoplány na orbitu, spálil 501,9 tun paliva za 126 sekund. Na druhé straně, iontové motory vypouštějí diametrálně menší množství hmoty nižší hustoty velkou rychlostí, což vede k menšímu tahu, který je využitelný ve vakuu.

Newtonovy zákony nám udávají, že čím rychleji opouští hmota komoru, tím vyšší je účinnost vytváření tahu. Tím se opět vracíme k excelentní efektivitě iontových motorů a jejich možné srovnání s chemickými motory, díky extrémním rychlostem vypouštění iontů. Tento princip nám dokazuje i třetí Newtonův zákon o akci a reakci, který říká že každá akce vyvolaná jedním směrem vytváří stejnou, ale opačnou reakci.

## 2.6 Fyzikální děje v iontových motorech

Fyzikálních dějů v iontových motorech se děje mnoho. My si zde rozebereme ty nejdůležitější.

Ten ke svému provozu nepotřebuje žádné pohonné látky z palubních nádrží – jako pracovní médium, které je následně ionizováno a urychlováno, mu slouží molekuly řídkých vrstev atmosféry na velmi nízkých oběžných drahách.

### 2.6.1 Ionizace

V iontových motorech se užívá ionizace k urychlení elektronů a jejich následnému vymrštění z motoru. Při fungování iontového motoru se uvnitř urychlovací komory používá elektroda, která emituje elektrony do svého okolí a ionizuje tím plyn, který se používá za palivo. Tento plyn je obvykle xenon. Xenon se používá hned z několika důvodů, hlavním je že je to inertní plyn. Inertní plyny jsou plyny, které nemají tendenci reagovat se svým okolím, což je důležité při využití drahých a technicky náročných zařízení, jako jsou družice. Xenon je také velmi lehký plyn, takže celá družice je následně lehčí, což opět sníží náklady na start rakety. K ionizaci xenonu je také potřeba malá energie, díky jeho nízké atomové hmotnosti.

Při ionizaci dochází k odtrhnutí valenčních elektronů. Jako důkaz, že se v drtivé většině případů užívá xenon, se můžeme podívat na obrázek níže.

Na něm vidíme že vnitřek motoru lehce svítí modrou barvou. To je způsobeno ionizací xenonu, kde u některých jeho atomů dojde k přesunutí elektronu do vyšší valenční vrstvy. Při vracení se elektronu zpět do vrstvy, odkud byl excitován, musí uvolnit svoji energii. Tato energie je ve většině případů světlo neboli fotony modré barvy. To je i důvod proč se xenon používá v zářivkách nebo výbojkách.

### 2.6.2 Elektrostatické pole

Elektrostatické pole je nejdůležitější částí iontového motoru. Je to pole, které může za urychlení a následné vymetení iontů směrem ven. Po ionizaci xenonu se vytvoří kladně nabitě a záporně nabitě ionty paliva. Tyto ionty jsou následně urychleny elektrostatickým polem, které působí na ionty podle jejich polarit.

Ionty nabitě kladně jsou urychlovány směrem k záporně nabitě elektrodě a ionty nabitě záporně jsou přitahovány směrem ke kladné elektrodě. Tento proces je klíčový pro generování tahu iontových motorů. Elektrostatické pole urychlí ionty na rychlosti mnohonásobně přesahující rychlost spalín chemických motorů.

Při správném specifickém vybalancování elektrostatického pole a ionizaci xenonu lze dosáhnout vysokého specifického impulzu a vysoké efektivity paliva.

Vzhledem k tomu, že tah motoru je přímo úměrný intenzitě elektrostatického pole, je možné tah motoru precizně korigovat pomocí vpouštěného napětí do motoru.

## **2.7 Porovnání iontových motorů na orbitě proti vesmíru**

Ačkoliv by se mohlo zdát, že vesmír je všude stejný, není tomu tak. Díky tomu některé iontové motory ani nepotřebují s sebou vozit palivo v nádržích.

### **2.7.1 Družice na EO (Earth orbit)**

Iontové motory, které jsou používány pro korekci dráhy družice na orbitě země mají výhodu, že nemusí mít s sebou žádné palivo. Jejich motory používají částice ze zbytků atmosféry, které jsou ve stovkách kilometrech nad zemí. Kermanova hranice, za kterou se udává konec atmosféry, je ve výšce 100 kilometrů nad mořem. Toto není tak úplně pravda. Kermanova hranice se nachází v termosféře, čtvrté z pěti vrstev atmosféry Země. Termosféra sahá do výšky 690 kilometrů a po ní se nachází exosféra. Exosféra sahá do výšky 10 000 kilometrů. Tato vrstva atmosféry se většinou přehlíží pro svůj minimální, ale existující, vzdušný odpor. Družice na LEO (Low Earth Orbit, nízké zemské orbitě) a část družic na MEO (Medium Earth Orbit, střední zemské orbitě) mohou využít zbytky atmosféry jako palivo. Částí družic na MEO se mysl družice ve výškách od 2 000 kilometrů do zmíněných 10 000 kilometrů. V těchto výškách se však mnoho satelitů, krom speciálních vědeckých nebo edukačních, nenachází, protože rychlost a tvar orbity nevyhovuje žádnému účelu.

### **2.7.2 Družice v hlubokém vesmíru**

Jak jsem již bylo zmíněno výše, družice v hlubokém vesmíru si musí s sebou nést i své palivo. Výhodou těchto družic je že nejsou vázaný prostor s atmosférou, ale mohou letět teoreticky kamkoliv. Nevýhodou však na druhou stranu je to, že je družice o několik set kilogramů těžší, tím pádem se spotřebuje více paliva při startu rakety takové.

## **2.8 Iontové motory**

Iontových motorů existuje spousta. Každý má své výhody a nevýhody, které popíšu v dalších kapitolách.



### 2.8.1 Hallův iontový motor

Iontové motory využívající Hallův jev jsou primárně používány na satelitech orbitující zemi. Nic však nezabraňuje jejich použití i na vesmírných plavidlech v hlubokém vesmíru.

Čas, který může Hallův motor operovat není ani tak moc závislý na palivu, ale spíše na operačním čase. Při prvním používání Hallovo motorů se keramické magnetické jádro poškodilo už po roce používání.

V Glennovo výzkumném středisku pro NASA vyvinuli dvě technologie, které dokážou prodloužit životnost motorů.

První je inovativní konfigurované magnetické pole, které poskytuje magnetické stínění k minimalizaci interakce mezi vysoce energetickou ionizovanou plazmou xenonu, kterou Hallův motor potřebuje k fungování, a keramickou komorou, která ho obsahuje.

Druhou technologií je výměna poškozeného materiálu stěn. Tato technologie sice přináší další možný bod selhání v mechanismu zodpovědný za výměny, ale při konstrukci a testování se klade silný důraz na správné fungování.

K fungování Hallův motor využívá radiální magnetické pole. To je druh magnetického kruhového pole, kde póly jsou umístěny na vnitřní a vnější straně kruhu. Toto magnetické pole se uzavírá kolem keramického ochranného válce. V magnetickém poli se vyskytuje Hallův proud, který zadržuje elektrony v kruhovém pohybu. Ty jsou pak použity k ionizaci inertního xenonu.

Po ionizaci xenonu jsou molekuly paliva urychleny elektrostatickým polem, které se nachází po celé délce komory. Jako anoda funguje distributor, který vypouští xenon do ionizační komory. Roli katody pak plní takzvaný neutralizér, který zabraňuje kumulaci prostorového náboje kolem družice. Bez neutralizéru by mohl prostorový náboj přeskočit na interní elektroniku družice a vyzkratovat ji.

### 2.8.2 Elektrosprejový iontový motor

Elektrosprejový iontový motor, na rozdíl od jiných iontových motorů, využívá k chodu jako palivo kapalinu, nikoliv plyn. Druh kapaliny, který se používá závisí na požadovaných vlastnostech, tahu a specifickém impulzu.

Elektrosprejový motor funguje na principu ionizace mikroskopických kapek paliva a následném urychlení přes elektrostatické pole.

Existují dva druhy paliva pro tento druh motoru, organické kapaliny a tekuté kovy.

Jako organické palivo se používá dusičnan ethylamonný nebo 1-ethyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborát. Tato organická paliva se používají pro svoji vysokou tepelnou stabilitu. Druhý druh paliv jsou tekuté kovy, jako je gallium nebo indium, které mají velmi nízkou teplotu tání, kolem 30 °C, a také velmi dobré ionizační schopnosti. Nevýhodou india je že zanechává v motoru zbytky látky v pevném skupenství a po delší době používání se může motor ucpat.

### 2.8.3 Pulzní plazmový iontový motor

Pulzní plazmový iontový motor, občas nazývaný plasmový tryskový motor, je druh iontového motoru užívající pevné palivo. Jedná se o nejjednodušší druh iontového motoru.

V komoře se nachází blok paliva, nejčastěji polytetrafluorethylen neboli teflon, skrz který prochází elektrický oblouk a ten mění kousky teflonu v plyn. Teplo generované obloukem okamžitě přeměňuje plyn z teflonu na plazmu. Nabitá plazma se poté přesune mezi anodu a katodu, kde plyn dokončí obvod a proud procházející obvodem vymrští plyn vysokou rychlostí z motoru.

## 2.9 Porovnání s chemickými motory

Iontové motory a chemické motory představují dva přístupy k vesmírnému pohonu, kde každý má své výhody a nevýhody. Chemické motory využívají enormní exotermické reakce, díky které jsou schopné dosáhnout vysokého momentového tahu (v případě rakety Falcon Heavy, od vesmírné společnosti SpaceX, až 616,113kN) k překonání zemské gravitace. Na rozdíl od běžných raketových motorů, iontové motory nabízí vyšší specifický impulz, což jim dovoluje fungovat delší dobu se stejným množstvím paliva. To z nich dělá ideální pohon pro dlouhé

vesmírné mise, kde je klíčové efektivní zacházení s palivem. Tyto motory nejsou vhodné pro první dvě fáze mise, které zahrnují překonání gravitace Země a dosažení orbity, kvůli svému nízkému momentovému tahu.

V praxi dochází ke kombinování nejlepšího s obou druhů motorů. Chemické motory se použijí k prvotnímu urychlení a startu ze země a iontové motory se využívají k přesnému manévrování v dalších fázích mise, kdy se rakety pohybují v poslední vrstvě atmosféry Země, kde je minimální odpor vzduchu.

## 3 PRAKTICKÁ ČÁST

V této části se zbývám zpracováním iontového motoru v domácích podmínkách, kdy jsem iontový motor viděl poprvé na YouTube. Veškeré plány jsem si vyrobil sám. Vývoj vlastního funkčního motoru nebyla jednoduchá a při výrobě jsem narazil na spoustu slepých uliček (např. pokus o galvanizaci modelu emitoru iontů). Většina částí modelu je vytisknuta na 3D tiskárně Prusa MK4.

### 3.1 Použité materiály

#### 3.1.1 PETG

PETG neboli polyethylene terephthalate glycol, je druh plastu, běžně používaný při tisku. Je známý svou vysokou mechanickou odolností a pevností. Při tisku jsem si ho zvolil hlavně kvůli vyšší tepelné vodivosti, která je dvakrát větší než u plastu PLA, který jsem také zkoušel použít při konstrukci modelu. Tento materiál jsem opustil, když jsem začal mít problémy s přehříváním měniče a jeho následnému spálení. Další výhodou PETG je, že měkne až při teplotě 70°C, což z něj vytváří lepší volbu pokusech s vyššími teplotami.

#### 3.1.2 PLA

PLA, neboli polylactic acid, je tvrdší, ale křehčí, druh plastu, oproti PETG. Využil jsem jej při tisku držáků vodivých částí modelu, kde je vyžadovaná pevnost a daná část není teplotně namáhána.

#### 3.1.3 Měď

Měď je lesklý kovový prvek s červeným nádechem, který vlivem oxidace tmavne a přechází do rezavohnědé barvy. V modelu využita hlavně v měděných vodičích díky tomu, že se jedná o druhý nejvodivější prvek v čisté formě, ze všech kovových prvků a zároveň je výborným vodičem tepla. ale také ve vymetávací iontů, kde je potřeba aby měl co nejmenší odpor, kvůli minimální napěťové ztrátě.

### 3.1.4 Uhlík

Uhlík neboli grafit, je prvek známý hlavně ve formě diamantu nebo uhlí. Ve své čisté formě se jedná o polovodič, jeho využití v elektronice najdeme například u DC motorů. Grafit ve formě grafitového spreje jsem využil při pokusu o galvanizaci neboli nanesení kovové vrstvy na jiný materiál, abych nemusel obrábět měď nebo jiné materiály.

Při galvanizaci je podmínka, aby byl materiál, který chceme galvanizovat, vodivý. Zde nastává problém plastu, který vodivý není. Proto jsem chtěl použít grafitový sprej, který by mohl vytvořit vodivý povlak na modelu, který by se dal následně pokrýt mědí. Tato cesta však nebyla úspěšná kvůli vysokému odporu grafitu. Mým názorem je že nanesená vrstva grafitu byla příliš tenká a nedovolila prostoupit dostatečnému proudu.

### 3.1.5 Skalice modrá (pentahydrát síranu měďnatého)

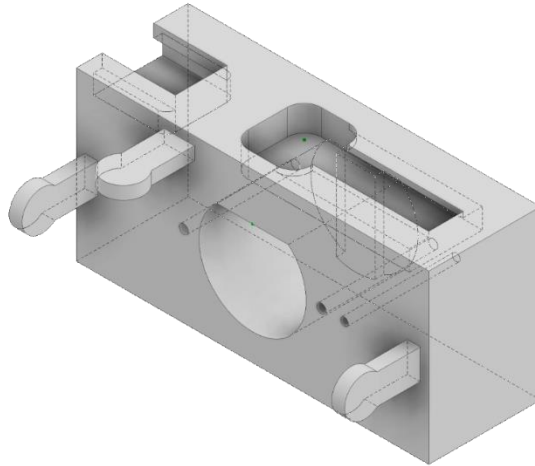
Modrou skalici ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) jsem využil při pokusu o galvanizaci, protože molekula modré skalice obsahuje i ionty mědi ( $\text{Cu}^{2+}$ ). Při chemické reakci se přenáší měď elektrolytu z anody na katodu, takže když připevníme náš model na katodu, modrá skalice se začne rozpadat na síranové ionty ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) a ionty mědi ( $\text{Cu}^{2+}$ ), přičemž ionty mědi se budou usazovat na modelu.

## 3.2 Modely

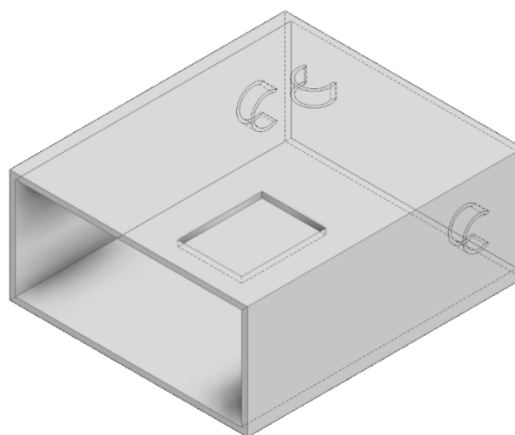
V poslední sekci této práce představuji své modely, které jsem vytvořil a použil při konstrukci vlastního iontového motoru.

### 3.2.1 Tělo

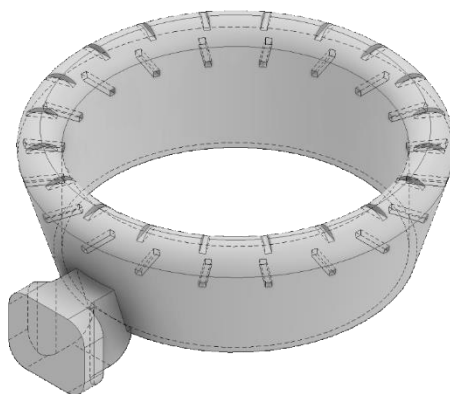
Tělo neboli držák iontového motoru, je rozdělený na 2 části pro ulehčení montáže. První část má za úkol udržet napěťový měnič, emitor iontů a jejich zachytávač.



Při první verzi těla bylo v plánu ho mít v jednom kuse, avšak z pohledu následné montáže se to ukázalo jako nepraktické. Spojení napěťového měniče, spínače, emitoru a zachytávače by se dělalo v úzkém prostoru velmi těžce. Pro umožnění následného spojení obou částí jsem přidal úchyty na oba modely.

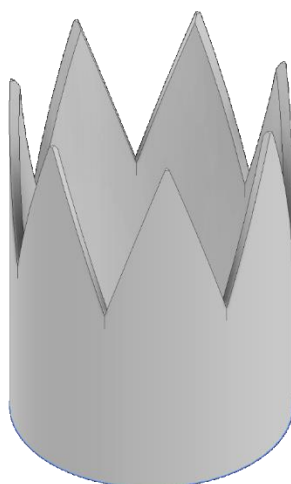


### 3.2.2 Zachytávač

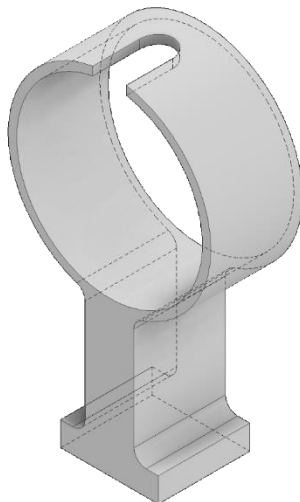


Tento model funguje jako zachytávač iontů. Obsahuje hvězdicové vypletení drátem jako vodivou část a jeho směrem se také generuje následný tah. Tento model v průběhu tvorby neprošel moc velkou změnou, avšak bylo potřeba vytvořit díry pro vodič ve správné velikosti.

### 3.2.3 Úchyt vymetávače



Toto je pouze model, který jsem vytvořil pro otestování správné velikosti vymetávače. Skutečný vymetávač je vytvořený z měděné trubice, která je vystříhaná do tvaru modelu.



Úchyt vymetávače je zasazený do těla iontového motoru a drží vymetávač ve výšce, aby střed kruhu zachytávače a vymetávače byl ve stejné rovině.



## 4 ZÁVĚR

V této práci jsem se podrobně zabýval principy, historií, vývojem a současným stavem iontových motorů s možností jejich využití. V historii jsem se zabýval prvním průkopníkem raketových motorů Konstantinem Ciolkovskim, jehož raketová rovnice platí dodnes. Dále jsem popsal mise SART I, která měla za úkol vynést a otestovat první sondu používající první vakuový iontový motor a misí SART II, která testovala, jak dlouho mohou fungovat iontové motory na rtuťové palivo. Popsal jsem, že iontové motory nemají mimo vesmírný průmysl velké využití, kvůli svému nízkému tahu, ale na lety za Kermanovu hranici nachází vysoké uplatnění jako pohon družic, satelitů a dalších plavidel. Snažil jsem se vysvětlit základní raketové pojmy a veličiny jako specifický impulz nebo  $\Delta v$ . Popsal jsem, jak fungují iontové motory na bázi urychlení iontů v daném směru a že jejich fungování je založeno na Newtonovo zákonech hybnosti. Iontové motory fungují na základě ionizace, což je urychlení iontů a jejich následné vymrštění z motoru. Dále se v iontových motorech využívá elektrostatické pole, které je nejdůležitější částí motoru, který může za ionizaci a urychlení iontů směrem ven, což generuje tah. a Bylo popsáno více druhů iontových motorů, jako je třeba Hallův nebo elektrosprejový iontový motor. V práci jsme si představili jejich výhody, nevýhody a principy.

Důležitý bod mé práce byla praktická ukázka funkčního iontového motoru, sestavený z běžně dostupných materiálů. V této části jsem popsal domácí výrobu iontového motoru, který mě zaujal na YouTube. Tento pokus potvrdil principy, na kterých jsou založeny iontové motory. Skutečnost že se mi podařilo „na koleně“ sestavit funkční iontový motor dává prostor k dalším pokusům k jeho širšímu využití. Myslím si, že výzkum a vývoj pokročilých technologií iontových motorů odhaluje nové výzvy v této oblasti, hlavně ve výzkumu prozkoumávání vzdáleného vesmíru. Mým názorem je že budoucnost vesmírné inovace bude do budoucna záviset na pokrocích v technologiích iontových motorů.

Tento domácí pokus představuje praktickou proveditelnost konstrukce iontového motoru, jeho testování a ověřování funkčnosti. V laboratorních podmínkách a za použití moderních technologií by se daly zkonstruovat jiné a výkonnější varianty iontového motoru. Myslím si, že iontové motory mají nezměrný potenciál v budoucích vesmírných misích do vzdálených oblastí vesmíru.

## 5 POUŽITÁ LITERATURA

- *3Dtisk pro.* (20. 9 2023). Načteno z Porovnání materiálu PLA a PETG:  
<https://3dtisk.pro/pro-zakazniky/porovnaní-materialu-pla-a-petg/>
- *ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.* (2019). Načteno z Návrh demonstračního modelu iontového motoru:  
[https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84899/F2-BP-2019-Tobola-Premysl-NAVRH\\_DEMONSTRACNIHO\\_MODELU\\_IONTOVEHO\\_MOTORU.pdf?sequence=-1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84899/F2-BP-2019-Tobola-Premysl-NAVRH_DEMONSTRACNIHO_MODELU_IONTOVEHO_MOTORU.pdf?sequence=-1&isAllowed=y)
- *e-manuel.* (2024). Načteno z Elektrický náboj: <https://e-manuel.cz/kapitoly/elektricke-veliciny/vyklad/elektricky-naboj/>
- *Glenn research center.* (6 2001). Načteno z SERT II:  
<https://web.archive.org/web/20030111131129/http://www.grc.nasa.gov/WWW/ion/past/70s/sert2.htm>
- *Glenn research center.* (30. 7 2021). Načteno z Dr. Harold R. Kaufman:  
<https://www1.grc.nasa.gov/glenn-history/hall-of-fame/biographies/harold-kaufman/>
- *Glosář aldebran.* (2022). Načteno z Specifický impuls:  
<https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1696>
- Majer, D. (8. 4 2020). *KosmonautiX.* Načteno z Druhy oběžných drah:  
<https://kosmonautix.cz/2020/04/druhy-obeznych-drah/>
- *NASA Technical Memorandum.* (8. 7 1992). Načteno z Development and Flight History of SERT II Spacecraft:  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19920019740/downloads/19920019740.pdf>
- *NASA TECHNICAL NOTE.* (3 1965). Načteno z RESULTS FROM SERT I ION ROCKET FLIGHT TEST:  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19650009681/downloads/19650009681.pdf>
- *NASA technology transfer program.* (2021). Načteno z Hall Effect Thruster Technologies: <https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-34>
- *National Aeronautics and Space Administration.* (21. 9 1995). Načteno z Pulsed Plasma Thruster Technology for Small SAtelite Missions:  
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19960011377/downloads/19960011377.pdf>

- Poole, C. F. (2019). *Liquid-Phase Extraction*. Elsevier. Načteno z <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128169117000177>
- Powaser, A. M. (1 2019). Načteno z COLLOID THRUSTER TO TEACH ADVANCED ELECTRIC PROPULSION: <https://digitalcommons.calpoly.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=3432&context=theses>
- SpaceX. (8. 9 2017). Načteno z SpaceX Falcon 9 v1.1 Data Sheet: <https://sma.nasa.gov/LaunchVehicle/assets/space-launch-report-falcon-9-data-sheet.pdf>
- SpaceX. (2024). Načteno z FALCON HEAVY: <https://www.spacex.com/vehicles/falcon-heavy/>
- Turchi, R. L. (23. 5 2012). *Aerospace Research Center*. Načteno z Pulsed Plasma Thruster: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/2.5334>
- Wikipedia. (12. 10 2022). Načteno z Gallium: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Gallium>
- Wikipedia. (17. 12 2023). Načteno z Colloid thruster: [https://en.wikipedia.org/wiki/Colloid\\_thruster](https://en.wikipedia.org/wiki/Colloid_thruster)
- Wikipedia. (3. 3 2023). Načteno z Ionic liquid: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ionic\\_liquid](https://en.wikipedia.org/wiki/Ionic_liquid)
- Wikipedia. (31. 10 2023). Načteno z Iontový motor: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Iontov%C3%BD\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Iontov%C3%BD_motor)
- Wikipedia. (8. 11 2023). Načteno z Konstantin Eduardovič Ciolkovskij: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Konstantin\\_Eduardovi%C4%8D\\_Ciolkovskij](https://cs.wikipedia.org/wiki/Konstantin_Eduardovi%C4%8D_Ciolkovskij)
- Wikipedia. (29. 7 2023). Načteno z SERT-1: <https://en.wikipedia.org/wiki/SERT-1>
- Wikipedia. (26. 1 2024). Načteno z LISA Pathfinder: [https://en.wikipedia.org/wiki/LISA\\_Pathfinder](https://en.wikipedia.org/wiki/LISA_Pathfinder)
- Wikipedia. (11. 3 2024). Načteno z Colloid thruster: [https://en.wikipedia.org/wiki/Colloid\\_thruster](https://en.wikipedia.org/wiki/Colloid_thruster)
- Wikipedia. (4. 1 2024). Načteno z Polytetrafluorethylen: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Polytetrafluorethylen>
- Wikipedia. (3. 10 2024). Načteno z Kármánova hranice: [https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1nova\\_hranice](https://cs.wikipedia.org/wiki/K%C3%A1rm%C3%A1nova_hranice)

- *Wikipedie*. (10. 3 2024). Načteno z Dusičnan ethylamonný:  
[https://cs.wikipedia.org/wiki/Dusi%C4%8Dnan\\_ethylamonn%C3%BD](https://cs.wikipedia.org/wiki/Dusi%C4%8Dnan_ethylamonn%C3%BD)

## 6 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo více přiblížit digitální osciloskopy používané v průmyslových aplikacích. V teoretické části bylo mým cílem podrobněji popsat základní rozdělení CRT, DSO, MSO a SPO osciloskopů. Charakterizovat napěťové a proudové sondy a jejich kompenzaci. U napěťové sondy se mi nakonec povedla za pomoci snímků znázornit i její samotná kompenzace. Teoreticky se mi podařilo popsat vybrané parametry vertikálního zesilovače a časové základny, taktéž popsat způsoby vzorkování u digitálních osciloskopů. V praktické části jsem uvedla ukázky měření parametrů impulzních průběhů a měření frekvenční charakteristiky RC obvodu pomocí funkce Bode Plot II. Toto měření jsem také simulovala v software Multisim. Zpracování této maturitní práce pro mě nebylo úplně snadnou záležitostí, ale splnilo svůj účel, kdy jsem se při hledání informací do této práce, ať už na internetu nebo v knihách, dověděla spoustu nových informací. a nejen to, i spoustu informací, které mi třeba v hodinách nebyly tak úplně jasné, jsem díky této práci musela prozkoumat pečlivěji, což vedlo k tomu, že chápu věci, ve kterých jsem si před zpracováním této práce nebyla tak úplně jistá.

# SEZNAM ZDROJŮ

- :root {--medik: #ffbe00;}. Online. 2022. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Osciloskop>. [cit. 2024-02-16].
- Distribuce měřicí techniky. Online. Dostupné z: <https://www.htest.cz>. [cit. 2024-02-16].
- Havlík, L., Osciloskopy a jejich použití. Praha, Sdělovací technika, 2002.
- Lissa.pdf. Online. 2011. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2011-2012/Zima11/proc/lissa.pdf>. [cit. 2024-02-16].
- Lissajousovy obrazce. Online. 2008. Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2008-2009/Zima08/proc/lissa.pdf>. [cit. 2024-02-16].
- Marshall M. Lee., Winning with people: *the first 40 years of Tektronix*. 1986, USA
- Microsoft Word - clený RC\_popis osciloskopu.doc. Online. Dostupné z: <https://www.med.muni.cz/biofyz/files/optometrieBC/XI.pdf>. [cit. 2024-02-16].
- Microsoft Word - DSO\_SPSD.doc. Online. 2015. Dostupné z: [https://www.spsdmasna.cz/dokumenty/publikace/DSO\\_SPSD.pdf](https://www.spsdmasna.cz/dokumenty/publikace/DSO_SPSD.pdf). [cit. 2024-02-16].
- Seibt, A.: Osciloskopy od a do Z. Ostrava: HEL, 2000.
- SIGLENT Technologies - Electronic Test and Measurement [online]. [cit. 2024-02-16]. Dostupné z: <https://www.siglenteu.com/>
- Tauš, G., Osciloskop, Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1974.
- Test and Measurement Equipment | Tektronix. Online. Dostupné z: <https://www.tek.com/en>. [cit. 2024-02-16].
- Vedral, J.: Číslicové měřicí přístroje, ČVUT, 2020.