



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav letadlové techniky

Návrh validace demonstrátoru iontového motoru

Design of validation procedure of ion thruster demonstrator

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2020

Lukáš BOHATA

Studijní program: B2342 TEORETICKÝ ZÁKLAD STROJNÍHO
INŽENÝRSTVÍ

Studijní obor: 2301R000 Studijní program je bezoborový

Vedoucí práce: Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Bohata** Jméno: **Lukáš** Osobní číslo: **473697**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh validace demonstrátoru iontového motoru

Název bakalářské práce anglicky:

Design of validation procedure of ion thruster demonstrator

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování proveďte:

- 1) U stávajícího návrhu demonstrátoru iontového motoru stanovte zhruba jeho očekávané parametry.
- 2) Navrhněte pro tento demonstrátor vhodný testovací přípravek pro detekci/měření tahu/tlaku iontů.
- 3) Navrhněte měřící uspořádání ve stávající vakuové komoře a určete jeho očekávanou citlivost.

Seznam doporučené literatury:

Dan M. Goebel, Ira Katz: Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, NASA/JPL+CalTech, 2008
S. Mazouffre, Electric propulsion for satellites and spacecraft: established technologies and novel approaches, Plasma Sources Sci. Technol. 25 (2016) 033002
+ další literatura dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D., ústav letadlové techniky FS


Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

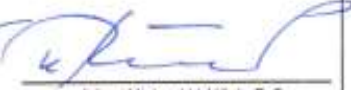
Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **07.08.2020**

Platnost zadání bakalářské práce:


Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


Ing. Robert Theiner, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, Dr.Sc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana Mgr. Jaroslava Kousala, Ph.D. a použil jsem pouze literaturu uvedenou v seznamu použité literatury.

V Praze dne

.....

Lukáš Bohata

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Mgr. Jaroslavu Kousalovi, Ph.D. za trpělivost, vedení a odbornou pomoc při tvorbě této bakalářské práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je zhruba určit očekávané parametry iontového pohonu. Dále navrhnout a určit citlivost testovacího přípravku. A v neposlední řadě navrhnout uspořádání testovacího přípravku ve vakuové komoře.

Klíčová slova

Iontový pohon, Hallovský pohon, Elektrický pohon, Vakuum, Plazma, Fyzika plazmatu

Abstrakt

The objective of this thesis is roughly determine parameters of ion thruster. The next part of thesis is design the test station and calculate its sensitivity to measure the thrust. In the last part I am going to design placement of parts in the test station.

Keywords

Ion thruster, Hall thruster, Electric engine, Vacuum, Plasma, Physics of plasma

OBSAH

| | |
|--|----|
| Úvod | 1 |
| Teoretická část | 2 |
| 1 Historie | 2 |
| 2 Základy fyziky plazmatu | 3 |
| 2.1 Definice plazmatu | 3 |
| 2.2 Vznik plazmatu | 4 |
| 2.3 Debyeovo stínění | 4 |
| 2.4 Plazmová frekvence | 5 |
| 2.5 Hallův jev | 5 |
| 2.6 Pohyby částic v plazmatu | 6 |
| 2.6.1 Homogenní magnetické pole ($E = 0$) | 6 |
| 2.6.2 Homogenní magnetické a elektrické pole | 7 |
| 3 Rozdělení pohonů | 9 |
| 3.1 Elektrotermální pohony | 10 |
| 3.1.1 Resistojet | 10 |
| 3.1.2 Arcjet | 11 |
| 3.2 Elektrostatické pohony | 11 |
| 4 Iontový mřížkový pohon | 12 |
| 4.1 Mřížky | 13 |
| 5 Hallův iontový motor | 14 |
| 5.1 Stationary Plasma Thuster | 15 |
| 5.2 Thruster with Anode layer | 16 |
| 5.3 Specifikace Hallova iontového pohonu | 16 |
| 5.3.1 Síla působící na ionty | 17 |
| 5.3.2 Výkon Hallova iontového pohonu | 18 |
| 5.3.3 Rychlost iontů vystupujících z pohonu | 18 |

| | | |
|---------|--|----|
| 5.3.4 | Specifický impuls | 19 |
| 5.3.5 | Účinnost Hallova iontového pohonu | 19 |
| | Praktická část | 20 |
| 6 | Porovnání elektrických pohonů | 20 |
| 6.1 | ALIS | 20 |
| 6.2 | EXOMG-nano | 21 |
| 6.3 | IFM nano | 21 |
| 6.4 | RFT-2 | 22 |
| 6.5 | Plasma jet pack 30W | 24 |
| 6.6 | MIT 50W | 24 |
| 6.7 | MHT-9 | 25 |
| 6.8 | Shrnutí | 26 |
| 7 | Návrh testovacího přípravku | 28 |
| 7.1 | Návrh a teoretický výpočet testovacího terčiku | 28 |
| 7.1.1 | Varianta I | 29 |
| 7.1.2 | Varianta II | 30 |
| 7.2 | Konstrukční provedení držáku terčiku | 33 |
| 7.3 | Držák pohonu | 34 |
| 7.3.1 | Spojení nalisováním | 39 |
| 7.3.1.1 | Nalisování za studena | 40 |
| 7.3.1.2 | Nalisování za tepla | 43 |
| 7.4 | Konzola | 44 |
| 7.5 | Měření výchylky terčiku | 44 |
| | Závěr | 48 |
| | Přílohy | 53 |

Seznam použitých obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1 - Princip Hallova jevu. Převzato z [25]..... | 6 |
| Obrázek 2 - Rotace částic v magnetickém poli. Převzato z [10]..... | 7 |
| Obrázek 3 - Pohyb částic ve zkříženém elektrickém a magnetickém poli. Převzato z [10].. | 8 |
| Obrázek 4 - Základní rozdělení elektrických pohonů | 9 |
| Obrázek 5 - Schéma resistojetu. Převzato z [13]..... | 10 |
| Obrázek 6 - Schéma arcjetu. Převzato z [13] | 11 |
| Obrázek 7 - Schéma iontového pohonu. Převzato z [13] | 12 |
| Obrázek 8 - Schéma systému mřížek iontového pohonu. Převzato z [31] | 13 |
| Obrázek 9 - Schéma Hallova iontového pohonu. Převzato z [24]..... | 14 |
| Obrázek 10 - Schéma SPT. Převzato a přeloženo z [12]..... | 15 |
| Obrázek 11 - Schéma TAL pohonu. Převzato z [12] | 16 |
| Obrázek 12 - ALIS iontový pohon, převzato z [30]..... | 20 |
| Obrázek 13 - Taylorův kužel, převzato z [18]..... | 21 |
| Obrázek 14 - Diagram parametrů IFM nano, převzato z [17] | 22 |
| Obrázek 15 - Schéma RFT-2, převzato z [26]..... | 23 |
| Obrázek 16 - Parametry RFT-2, převzato z [27] | 23 |
| Obrázek 17 - Plasma Jet Pack 30W, převzato z [29]..... | 24 |
| Obrázek 18 - Hodnoty tahu a výkonu MHT-9, převzato z [22] | 26 |
| Obrázek 19 - Skica terčíku (varianta I) | 29 |
| Obrázek 20 - Skica terčíku (varianta II) | 31 |
| Obrázek 21 - Konstrukční provedení držáku terčíku..... | 33 |
| Obrázek 22 - Výrobní výkres příruby DN 100 ISO-K | 34 |
| Obrázek 23 - Držák pohonu (1.návrh)..... | 35 |
| Obrázek 24 - Držák pohonu (2. návrh)..... | 36 |
| Obrázek 25 - Detailní řez držáku pohonu..... | 36 |
| Obrázek 26 - Upevnění přírub na přírubu DN 100 ISO-K | 37 |
| Obrázek 27 - Elektrická průchodka PF 272 013-X [33]..... | 37 |
| Obrázek 28 - Uspořádání testovacího přípravku ve vakuové komoře..... | 38 |
| Obrázek 29 - Skica nalisování | 39 |
| Obrázek 30 - Konzola..... | 44 |
| Obrázek 31 - Laserový snímač vzdálenosti ILD1420 [32]..... | 44 |
| Obrázek 32 - Připevnění měřícího přípravku k přírubě..... | 45 |

| | |
|--|----|
| Obrázek 33 – Schéma měření výchylky terčíku..... | 46 |
|--|----|

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tabulka 1 - Specifikace ALIS, převzato z [30] | 20 |
| Tabulka 2 - Předpokládané parametry ExoMG-nano, převzato z [28]..... | 21 |
| Tabulka 3 - Získané parametry při testování ExoMG-nano, převzato z [28]..... | 21 |
| Tabulka 4 - Parametry IFM nano, převzato z [17] | 22 |
| Tabulka 5 - Parametry RFT-2, převzato z [27] | 23 |
| Tabulka 6 - Parametry Plasma Jet Pack 30W, převzato z [29]..... | 24 |
| Tabulka 7 - Měřítkem zredukované parametry MIT-50W, převzato z [21]..... | 25 |
| Tabulka 8 - Naměřené hodnoty MIT-50W, převzato z [21]..... | 25 |
| Tabulka 9 - Měřítkem zredukované parametry MHT-9, převzato z [22] | 25 |
| Tabulka 10 - Srovnání nízko výkonových iontových pohonů..... | 26 |
| Tabulka 11 - Odhadované parametry školního pohonu..... | 27 |
| Tabulka 12 - Odhadované parametry školního pohonu se zbytkovým palivem | 28 |
| Tabulka 13 - Porovnání citlivostí variant držáku terčíku | 32 |

ÚVOD

V bakalářské práci se budu zabývat způsobem otestování parametrů Hallova iontového pohonu, který upravil Bc. Přemysl Tobola. Toto téma jsem si vybral z důvodu zvýšeného zájmu o vesmírné cestování, které by se bez iontového pohonu v současnosti neobešlo. Dalším důvodem je snaha společnosti SpaceX poskytnout širokopásmové připojení k internetu po celém světě pomocí satelitů Starlink. Počet satelitů má dosahovat neuvěřitelných 12 000, které budou rozmístěny ve třech výškových hladinách. Právě tyto satelity budou používat pro udržení ve svých výškových hladinách Hallovské iontové pohony. Ačkoli existuje mnoho iontových pohonů, z nichž nejrozšířenější jsou Iontový mřížkový pohon a Hallův iontový pohon. Tato práce však pracuje především s Hallovým iontovým pohonem.

Tato bakalářská práce je rozdělena do dvou částí, teoretické a praktické. V části teoretické nejdříve zmíním historii, neboť je důležité znát osobnosti díky kterým se můžeme zabývat takto zajímavým tématem. Dále zmíním základní teorii fyziky plazmatu, která je důležitá pro další pochopení principů iontových pohonů. Následně vysvětlím základní fungování iontových pohonů.

Po části teoretické následuje praktická část, která je rozdělena do dvou úseků, a to Porovnání elektrických pohonů a Návrh testovacího přípravku. V prvním úseku porovnam několik již sestavených a otestovaných iontových pohonů. Pomocí tohoto srovnání zjistím zhruba očekávané parametry námi testovaného pohonu. Ve druhém úseku této části navrhnu testovací přípravek, kterým bude měřen iontový pohon.

Ve své bakalářské práci bych rád určil očekávané parametry iontového pohonu, dále navrhnul a určil citlivost testovacího přípravku, a nakonec navrhnul uspořádání testovacího přípravku ve vakuové komoře.

TEORETICKÁ ČÁST

1 HISTORIE

Začátkem elektrických pohonů bývá označován rok 1911, kdy ruský vědec Konstantin Eduardovič Ciolkovskij popsal myšlenku fungování těchto elektrických pohonů a jejich použití v kosmickém prostředí. Avšak jak sám zmínil, jeho vize neřeší praktické problémy. Nezávisle na sobě dříve v roce 1906 ve svých soukromých poznámkách americký fyzik Robert Hutchings Goddard zmínil problémy s tvorbou elektronů a jejich urychlování.[1]

O dalším vývoji elektrických pohonů má zásluhu německý fyzik Hermann Oberth, jenž vycházel z prací Ciolkovského a Goddarda. Oberth ve své knize *Wege zur Raumschiffahrt* (1929; *Ways to Spaceflight*) navrhl několik konceptů elektrických pohonů pro využití ve vesmírném prostoru.[2] Tato kniha sloužila pro vzdělání dalších průkopníků v oblasti vesmírného cestování. První funkční prototyp iontového motoru na elektrotermálním principu, sestavil mezi lety 1929-1933 v laboratoři plynové dynamiky v tehdejšímu Leningradu Valentin Petrovich Glushko s jeho kolegy.[1]

Po konci 2. světové války Hermann Oberth pokračoval ve svém výzkumu ve Spojených státech amerických spolu se svými německými kolegy Ernstem Stuhlingerem a Wernher von Braunem. V roce 1964 Stuhlinger vydal knihu *Ion Propulsion for Space Flight*, kde popsal svou analýzu elektrických pohonných systémů.[1] Ve stejném roce došlo také k prvnímu testu iontového pohonu SERT-1 ve vesmíru.[3] Iontový pohon pracoval celkově 31 minut a 16 sekund. V tomto testu měly být vyzkoušeny dva typy iontového motoru. Avšak fungoval pouze Kaufmanův iontový motor s tahem 28 [mN].[4] Jako palivo posloužila rtuť. Rusko nechtělo zůstat pozadu, a proto v roce 1971 použila po několika desetiletí výzkumu Hallovské motory pro udržování komunikačních satelitů ve vesmíru. A šlo tehdy o největší aplikaci iontových motorů. Prvním iontovým motorem, díky němuž NASA pořídila první fotky jádra komety Borrelly, byl NSTAR s xenonovým palivem.[5]

Po novém tisíciletí došlo k rozmachu iontových motorů v soukromém průmyslu díky jejich velkým výhodám. Mezi tyto výhody například patří vysoká účinnost a nízká spotřeba paliva. Tudíž je potřeba menší palivová nádrž, což vede k velkému snížení hmotnosti. Iontové motory mají velmi malý tah ale vyšší specificky impuls. Proto jsou výhodná pro dlouhodobé mise ve vakuovém prostředí.

2 ZÁKLADY FYZIKY PLAZMATU

Plazma se vyskytuje v přírodě v mnoha formách a je také označováno jako čtvrté skupenství hmoty. Jednodušeji lze říct, že plazma je ionizovaný plyn, který se skládá z pozitivně nabitých iontů (avšak se může skládat i ze záporných iontů), elektronů a neutrálních částic. [6]

2.1 DEFINICE PLAZMATU

„Plazma je kvazineutrální systém částic s volnými nosiči nábojů, který vykazuje kolektivní chování.“ [7]

Z definice lze popsat tři základní vlastnosti plazmatu:

- První vlastností je, že v plazmatu se vyskytují volné nosiče elektrického náboje. Tomuto můžeme rozumět, že plazma je vodivé a dále dochází k reakci s elektrickým a magnetickým polem.
- Druhou vlastností je, že se plazma chová kolektivně, avšak toto chování nemusí nutně převládat.
- Třetí vlastností je kvazineutralita. To znamená, musí být přibližně stejná hustota kladných i záporných nábojů v makroskopickém objemu. [8]

Plazma můžeme rozdělit podle:

- plazma částečně ionizované nebo plazma úplně ionizované
- plazma nerelativistické nebo plazma relativistické [8]

Výše zmíněné rozdělení je pouze základní, plazma je možné dále rozdělit mnoha způsoby. Nerelativistické plazma je plazma, jehož nabité částice mají rychlost zanedbatelnou vzhledem k rychlosti světla.

Stupeň ionizace při termodynamické rovnováze lze získat ze Sahovy rovnice:

$$\frac{n_i}{n_n} \approx 2,4 \cdot 10^{21} \cdot \frac{T^{3/2}}{n_i} \cdot e^{-U_i/KT}, \quad (2.1-1)$$

kde n_i a n_n jsou hustoty ionizovaných a neutrálních atomů, T je teplota plynu v Kelvinech, K je Boltzmannova konstanta a U_i je ionizační energie plynu, tzn. potřebná energie pro odtržení vnějšího elektronu od atomu.

2.2 VZNIK PLAZMATU

Vytvořit plazma lze několika způsoby, v našem případě se jedná o ionizaci v elektrickém poli, nebo také se užívá termín srážková ionizace. Dalšími způsoby, kterými dosáhneme ionizace je zahřátím a fotoionizace.

V prvním zmíněném způsobu je k plynu přiloženo elektrické pole, které urychluje volné elektrony až do doby, kdy dosáhnou potřebnou energii ke kolizi s elektrony neutrálního plynu a dochází k ionizaci. Zajímavostí je, že teplota elektronů bývá často vyšší než teplota iontů, což může být zapříčiněno pomalým přenosem tepelné energie mezi lehčími elektrony a těžšími ionty.[9]

K fotoionizaci dochází, když atom, molekula nebo ion absorbuje dopadající foton, jehož energie je stejná nebo větší než energie pro uvolnění elektronu z vazby. Tento typ ionizace se liší od srážkové odlišným druhem využití energie pro uvolnění elektronu, kterým je elektromagnetické záření. [9]

2.3 DEBYEOVO STÍNĚNÍ

Tento jev je způsoben kolektivním chováním. Shluk nabitých částic je přitahován zdrojem opačné polaritity a stíní tento zdroj na vzdálenost Debyeovy délky.

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 K T}{n_e e^2} \right)^{1/2}, \quad (2.3-1)$$

kde T je teplota elektronů, K Boltzmannova konstanta, ϵ_0 permitivita vakua, n_e hustota (koncentrace) elektronů.

V Debyeově oblasti jsou jednotlivé částice schopny „cítit“ ostatní jednotlivé částice. Počet elektronů, nebo také lze označit plazmatický parametr, uvnitř Debyeovy oblasti je dán vztahem

$$N_D = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 n_e \quad (2.3-2)$$

Plazma je ideální tehdy, když je $N_D \gg 1$

2.4 PLAZMOVÁ FREKVENCE

Plazmová frekvence je důležitá pro stabilitu plazmatu, neboť pokud v ní jsou elektrony vychýleny z rovnovážného stavu, vytvoří se takové elektrické pole, které se snaží zachovat neutralitu systému vrácením elektronů do původní polohy. Elektron není schopen zastavit se ve své původní poloze, tudíž osciluje okolo ní.[10] Ionty, jež jsou součástí plazmatu lze považovat ve srovnání s elektrony za nehybné. Z důvodu své vyšší hmotnosti nejsou schopny reagovat na vysokofrekvenční oscilaci elektronů. Proto elektrony oscilují kolektivně okolo těžších iontů.[9] Tento jev je nazýván plazmová frekvence a je dán vztahem

$$\omega_p = \left(\frac{n_o e^2}{\epsilon_o m} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (2.4-1)$$

kde n_o je hustota (koncentrace) nosičů náboje.

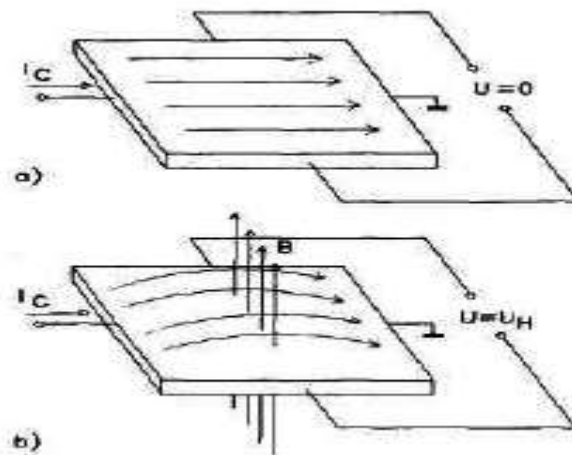
Pokud chceme, abychom uvažovali o plynu jako o plazmatu musí platit

$$\tau > \omega_p^{-1}, \quad (2.4-2)$$

kde τ je střední doba mezi srážkami s neutrálními atomy.

2.5 HALLŮV JEV

Vezmeme-li kovovou destičku a necháme jí protékat elektrický proud. Elektrony vytvářejí proudová vlákna, která rovnoměrně procházejí destičkou. V případě, kdy tuto destičku vložíme do homogenního magnetického pole, které bude kolmé na elektrické pole. Proudové vlákna budou vychylovány tímto magnetickým polem a dochází k nerovnoměrnému rozdělení elektronů napříč destičkou. Z důvodu malé tloušťky destičky jsou elektrony nuceny vychýlit se pouze do stran. Vlivem tohoto jevu vzniká na jedné straně destičky shluk záporně nabitých částic a na straně druhé shluk kladně nabitých částic. Mezi těmito stranami vzniká napětí, které je měřitelné, jež se nazývá Hallovo napětí. Při konstantním elektrickém proudu procházející destičkou je Hallovo napětí přímo úměrné magnetické indukci. Síla působící na proudové vlákna, jež je vychyluje se nazývá Lorentzova síla. [11]



Obrázek 1 - Princip Hallova jevu. Převzato z [25]

Na obrázku 1 a) můžeme vidět destičku, která není v magnetickém poli. Na obrázku je destička umístěna v homogenním magnetickém poli.

2.6 POHYBY ČÁSTIC V PLAZMATU

V této kapitole budeme uvažovat o magnetickém a elektrickém poli, která jsou homogenní. Dále abychom pochopili pohyby částic v plazmatu, budeme nejprve uvažovat pouze o homogenním magnetickém poli, tzn. elektrické pole neuvažujeme ($E = 0$).

2.6.1 HOMOGENNÍ MAGNETICKÉ POLE ($E = 0$)

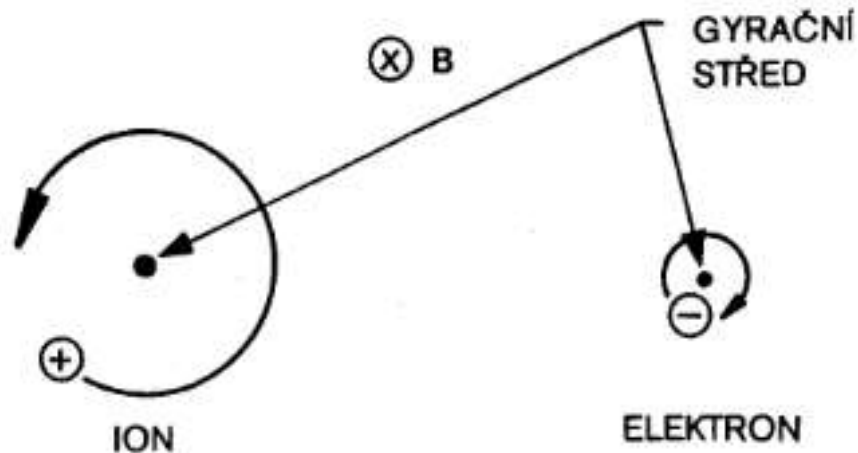
Z důvodu, že není přítomno elektrické pole, lze rovnici Lorentzovy síly napsat takto

$$F = m \frac{dv}{dt} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad (2.6.1-1)$$

Jak lze z rovnice vidět, složka elektrického pole na pravé straně je vynechána. Právě proto částice krouží pouze okolo gyračního středu s cyklotronní frekvencí

$$\omega_c = \frac{|q|B}{m}, \quad (2.6.1-2)$$

kde B označuje magnetickou indukci, m hmotnost částice, q náboj částice. Ze vztahu si můžeme všimnout, že cyklotronní frekvence nezávisí na rychlosti částice. [10]



Obrázek 2 - Rotace částic v magnetickém poli. Převzato z [10]

Dále můžeme definovat vzdálenost částice od gyračního středu (obr. 2). Tato vzdálenost se nazývá Larmorův poloměr

$$r_L = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}, \quad (2.6.1-3)$$

kde v_{\perp} je složka rychlosti kolmá na magnetické pole.[10]

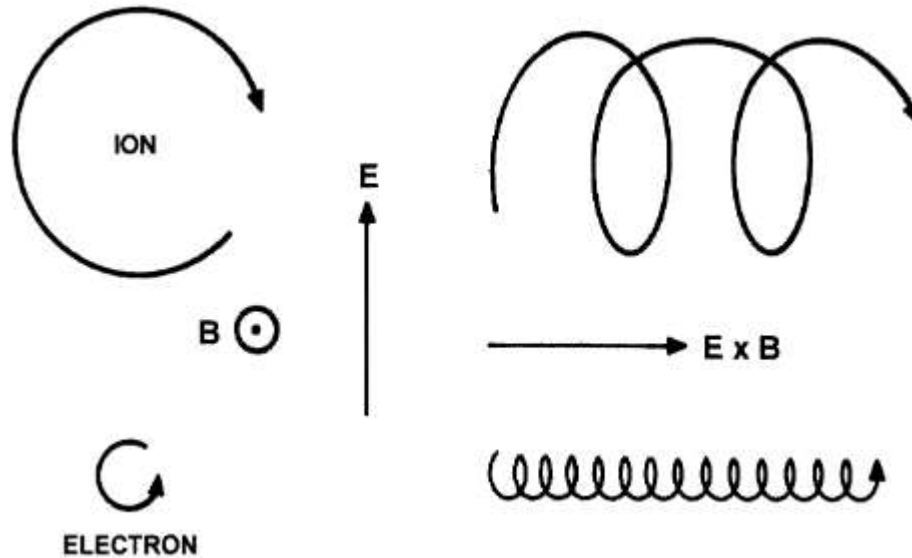
2.6.2 HOMOGENNÍ MAGNETICKÉ A ELEKTRICKÉ POLE

Pokud je součástí děje i elektrické pole, v rovnici pro Lorentzovu sílu přibude složka elektrického pole.

$$F = m \frac{dv}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (2.6.2-1)$$

V minulém případě jsme popsali, jak se částice pohybují v magnetickém poli, aniž by bylo přítomno elektrické pole. Částice pouze kroužila okolo gyračního středu vlivem magnetického pole. Pokud je součástí děje i elektrické pole, tak částice stále krouží, avšak její gyrační střed je nově unášen. Tento pohyb, jenž se skládá ze dvou pohybů se nazývá $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift. [10]

Na *obrázku 3* můžeme vidět drift částic ve zkrříženém elektrickém a magnetickém poli. Elektrické pole má směr znázorněnou šipkou a magnetické pole má směr do papíru.



Obrázek 3 - Pohyb částic ve zkrříženém elektrickém a magnetickém poli. Převzato z [10]

Z rovnice Lorentzovy síly můžeme definovat vztah pro drift ve zkrříženém elektrickém a magnetickém poli. Pravá strana rovnice (2.6.2-1) nám popisuje pohyb $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ driftu, kdežto levá strana nám popisuje kruhovou rotaci. Pro nás je potřebná jen pravá strana této rovnice.[10]

$$q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) = 0 \quad (2.6.2-2)$$

Po matematických úpravách, které jsou uvedeny v [10], získáme výsledný vztah pro driftovou rychlost.

$$\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2} \quad (2.6.2-3)$$

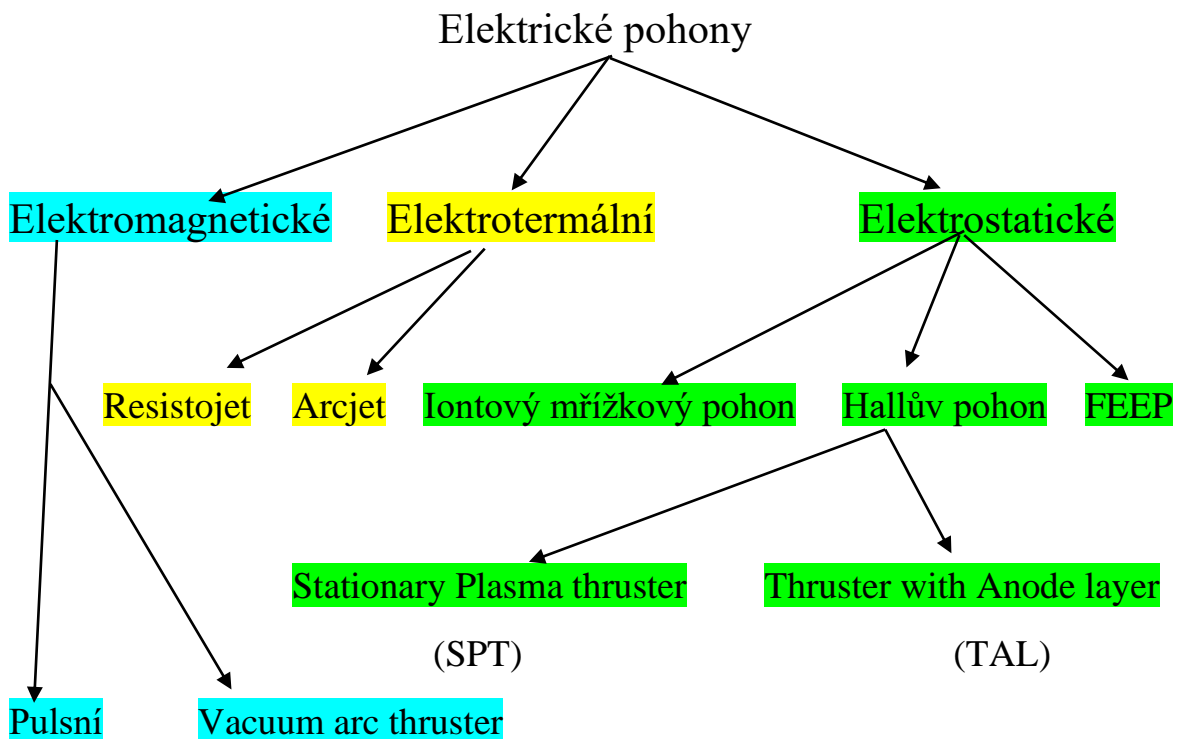
V našem případě vztah můžeme přepsat do jednodušší formy, neboť elektrické a magnetické pole jsou navzájem kolmá [10]

$$\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E}}{B'} \quad (2.6.2-4)$$

kde E je intenzita elektrického pole.

3 ROZDĚLENÍ POHONŮ

Elektrické pohony se rozdělují podle toho, jakým způsobem dochází ke vzniku tahu, respektive k urychlení částic paliva. Hlavním principem je urychlením proudu částic paliva pomocí elektrické energie. Nejjednodušším způsobem je použití cívky, kterou prochází elektrický proud. Palivo je cívkou zahříváno na vysokou teplotu a vstupuje do výstupní trysky. Dalším způsobem je ionizace paliva pomocí elektrického pole, nebo kombinací elektrického a magnetického pole.[12] Základní rozdělení pohonů lze vidět na obr. 4.



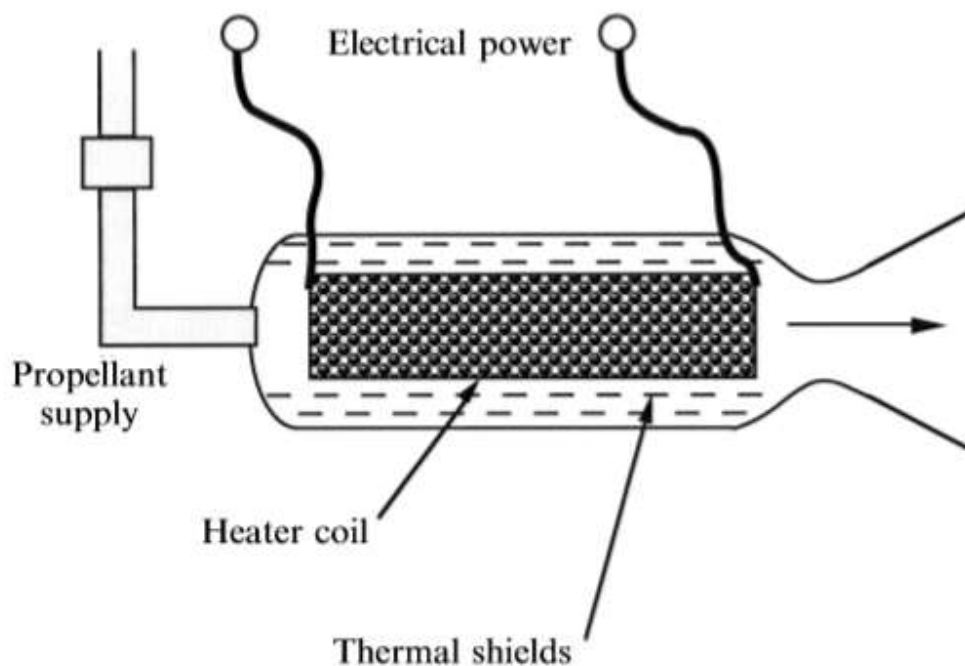
Obrázek 4 - Základní rozdělení elektrických pohonů

3.1 ELEKTROTERMÁLNÍ POHONY

Mezi tyto pohony patří resistojet a arcjet. Používají elektrickou energii k zahřívání proudícího paliva, které dále proudí do trysky.

3.1.1 RESISTOJET

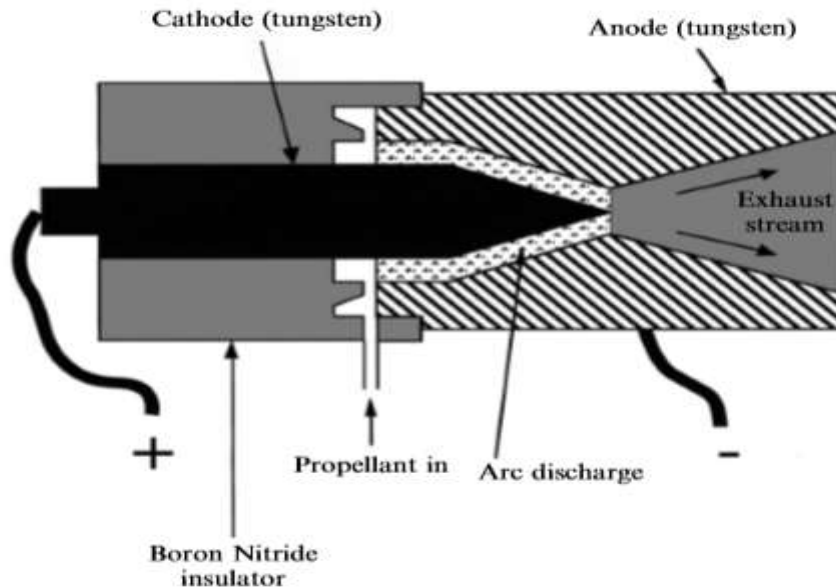
Tento typ pohonu se skládá z komory, ve které je umístěna odporová cívka (obr. 5), kterou prochází elektrický proud. Z tohoto důvodu dochází k zahřívání cívky, která poté ohřívá proudící palivo na vysokou teplotu. Toto vede ke zvýšení tlaku paliva před vstupem do trysky. Pro vysoké urychlení proudu paliva je potřebný tlak a teplota. Tohle omezuje teplota tání materiálu komory a cívky. V prvním případě je možné ochlazování komory z vnějšku. V druhém případě už to tak jednoduché není. Proto resistojety dosahují specifického impulsu menšího než 500 [s]. [12]



Obrázek 5 - Schéma resistojetu. Převzato z [12]

3.1.2 ARCJET

Arcjet (obr. 6) patří mezi elektrotermální pohony. K ohřevu paliva slouží elektrický oblouk, který prochází mezi anodou a katodou. Palivo prochází elektrickým polem, tudíž



Obrázek 6 - Schéma arcjetu. Převzato z [12]

dochází k částečné ionizaci. Jelikož elektrická energie přechází mezi katodou a anodou ve formě elektrického oblouku, lze dosahovat vyšších teplot než u resistojetu. Proto katoda a anoda jsou nejčastěji vyráběna z wolframu, jenž má vysoký bod tání. Při vysokých rychlostech dochází k odpařování materiálu katody. Pro uložení anody a katody se používá borové tělo.[12] Díky vyšší teplotě, lze dosahovat specifického impulsu < 700 [s]. [13]

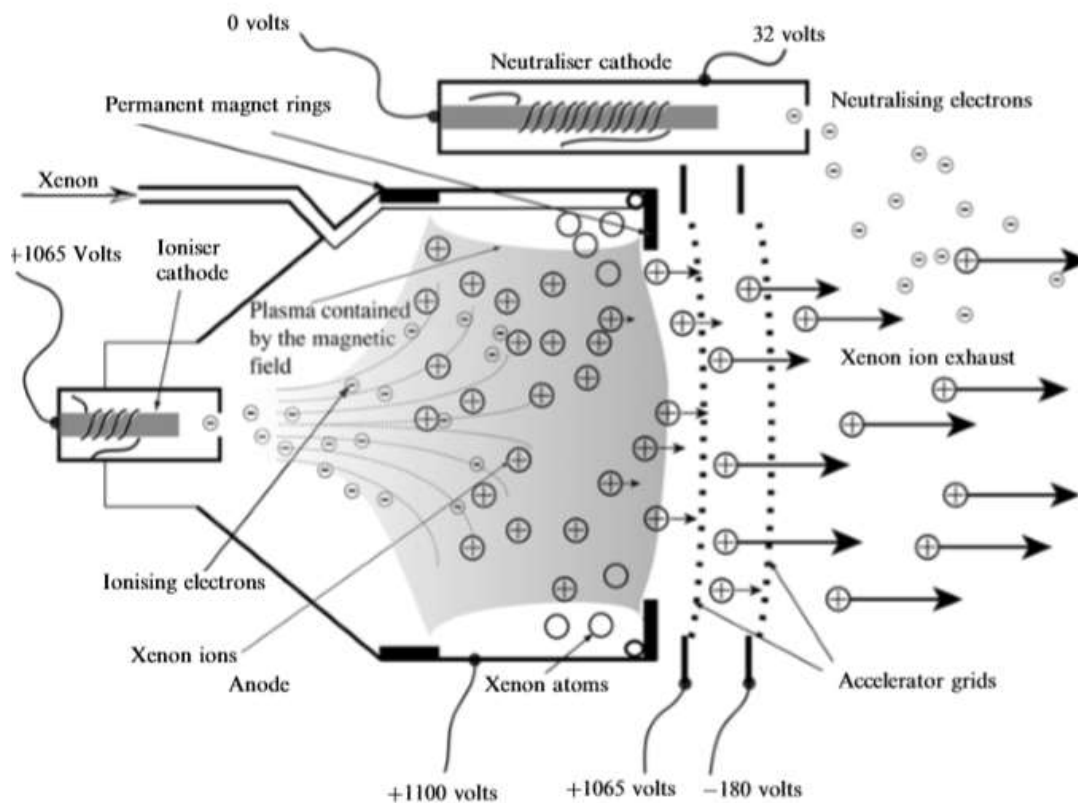
3.2 ELEKTROSTATICKÉ POHONY

Do této kategorie patří Iontový mřížkový pohon a Hallův iontový pohon. V těchto typech pohonů se používá ionizace paliva. Ionty jsou urychlovány na vysokou rychlost elektrickým polem.[14] Výhodou tahu vytvořeném elektrostatickým pohonem oproti chemickým motorům je stejný směr urychlovaných částic paliva. Nevýhoda je, že hustota urychlovaného tahového paprsku musí být dostatečně nízká, aby nedocházelo ke zpomalování urychlených iontů rekombinací nebo srážkami s elektrony. Z tohoto důvodu je tok paliva nízký. [12]

4 IONTOVÝ MŘÍŽKOVÝ POHON

Pohon, který lze vidět na obr. 7, se skládá ze tří základních částí: zdroje plazmatu, systému mřížek a vnější katody.

Dutá katoda uvnitř zdroje plazmatu je zdrojem elektronů, které vstupují do výbojové komory sloužící jako anoda. Palivo vstupuje do komory vlastním přívodem, ale malé množství protéká také dutou katodou. Elektrony se střetávají s atomy paliva a dochází k ionizaci. Aby se prodloužila délka dráhy elektronů, používá se magnetické pole, které brání přístup k anodě. Tímto se také zvyšuje účinnost vytváření iontů. [13] Když dojde k ionizaci, kladně nabitě ionty paliva vstupují do prostoru mřížek, ovšem elektrony nejsou vtahovány do soustavy mřížek. Mezi těmito mřížkami vzniká silné elektrické pole s vysokým rozdílem potenciálů, které bez proudících iontů je konstantní. Jakmile kladné ionty vstoupí mezi mřížky, mění se elektrické pole a jsou přitahovány druhou záporně nabitou mřížkou. Ionty dosahují vysoké rychlosti a vylétají přes mřížku z motoru a shlukují se do paprsku tahu. [12] Z důvodu kladně nabitých částic vystupující z motoru je připevněna na motor katoda, která má za úkol zneutralizovat paprsek tahu. [15]



Obrázek 7 - Schéma iontového pohonu. Převzato z [12]

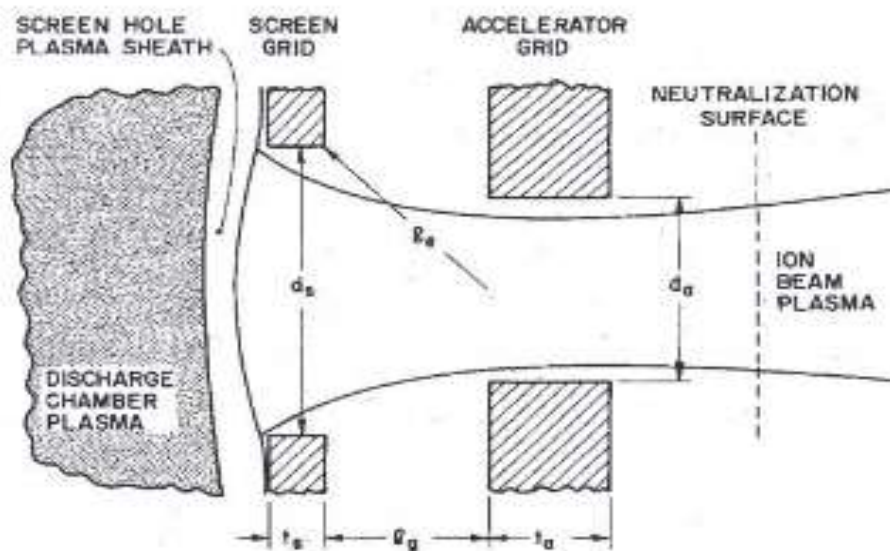
4.1 MŘÍŽKY

Tato část patří mezi nejdůležitější v celém pohonu z hlediska životnosti, velikosti a výkonu. Jelikož pohon je konstruován pro víceleté mise, při kterých nelze doplnit palivo či vyměnit prvky pohonu, můžeme z tohoto důvodu vyzdvihnout důležitost životnost mřížek. Pokud jsou špatně navrhnuté mřížky, dochází k rychlejšímu opotřebování mřížek a to vede ke snižování výkonu až dojde k úplnému selhání činnosti pohonu.

Mřížky musejí splňovat 3 základní vlastnosti:

- 1) Získat ionty z komory
- 2) Urychlit tyto ionty na vysokou rychlost
- 3) Zamezit zpětnému pohybu iontů do pohonu.[15]

Základní systém mřížek (obr. 8) se skládá ze dvou mřížek, z nichž první clonící má za úkol získat, co nejvíce iontů z plazmatu a dále je nasměrovat do druhé mřížky tzv. urychlovací.



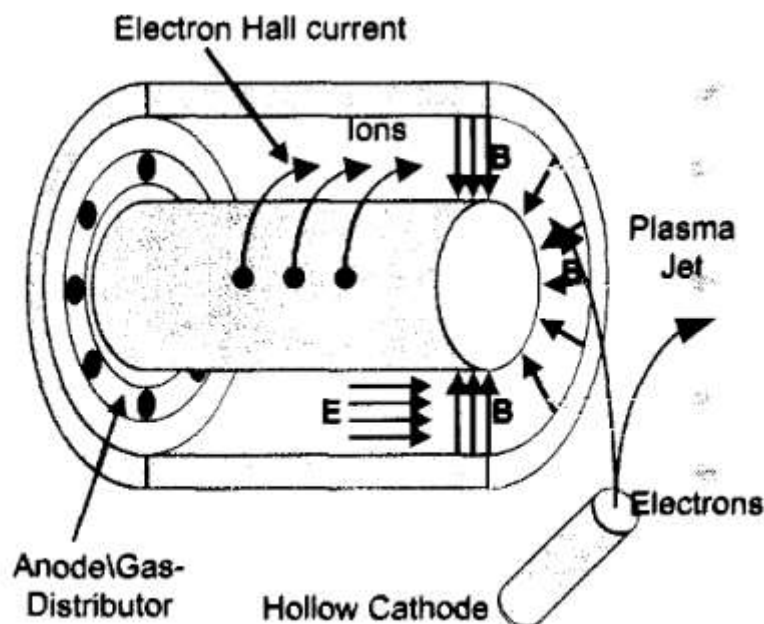
Obrázek 8 - Schéma systému mřížek iontového pohonu. Převzato z [31]

5 HALLŮV IONTOVÝ MOTOR

V tomto případě by někdo mohl namítnout, že Hallův iontový motor nepatří do skupiny elektrostatických pohonů, ale do elektromagnetických pohonů. Avšak ionty jsou urychlovány primárně elektrickým polem, tudíž budeme uvažovat o Hallovém pohonu jako o elektrostatickém pohonu.

Urychlování částic paliva, jak bylo výše zmíněno, je v tomto případě provedeno pomocí axiálního elektrického pole (obr. 9) tvořené mezi anodou, stěnami pohonu a katodou, dále pomocí magnetického pole kolmém na elektrické. Kolmé magnetické pole má za úkol tzv. zpomalovat elektrony vylétající z duté katody, které jsou přitahovány anodou uvnitř komory. Tímto způsobem dochází k prodloužení dráhy elektronu k anodě. Elektrony vstupující do prostoru komory se pohybují spirálovitě okolo magnetického pole s Larmorovým rádiusem a v $E \times B$ směru. Palivo přichází do výbojové komory skrze anodu. Při kolizích atomů paliva s elektrony dochází k ionizaci. Vzniklé ionty jsou urychlovány na vysokou rychlost elektrickým polem mezi anodou a záporně nabitým plazmatem vytvořeném na vstupu do výbojové komory. Následně ionty opouštějí výbojovou komoru a vytvářejí paprsek tahu.

[13]



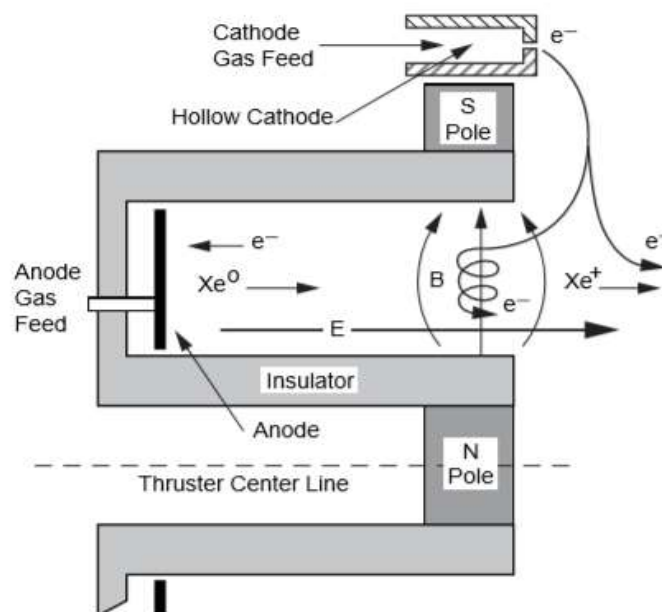
Obrázek 9 - Schéma Hallova iontového pohonu. Převzato z [24]

Hallův iontový pohon se rozděluje podle konstrukce na dva typy (podle ruské literatury):

- a) Stationary Plasma Thuster (SPT)
- b) Thuster with Anode Layer (TAL)

5.1 STATIONARY PLASMA THUSTER

Tento typ patří mezi nejpoužívanější iontové pohony. Výbojová komora (obr. 10) má tvar mezikruhového profilu. Anoda je umístěna na „dně“ výbojové komory. Elektrické pole je tvořeno mezi anodou a vnější dutou katodou, ale také se stěnami výbojové komory. Princip vzniku tahu je popsán v páté kapitole. Uvolněné elektrony z duté katody jsou rozdělené do dvou paprsků, jeden cestuje s vystupujícím tahem a neutralizuje ho. Druhý paprsek je přitahován do výbojové komory. Elektrony se vlivem magnetického pole pohybují ve spirále okolo magnetických indukčních čar a s $E \times B$ driftem. Elektrony jsou zmagnetizovány. Palivo se do komory dostává přes otvory v anodě. Při srážkách elektronů s atomy paliva dochází k ionizaci. Elektrony se pohybují s malým Larmorovým rádiusem, oproti tomu ionty musejí mít velký Larmorový rádius. Magnetické pole je dostatečně slabé, aby neovlivnilo pohyb iontů. Proto samostatné ionty jsou urychlované elektrickým polem a plazma je urychlované elektromagneticky. Výbojová komora je konstruována tak, aby magnetické pole bylo nejsilnější u výstupu z komory a nejslabší v místech umístění anody. [12]



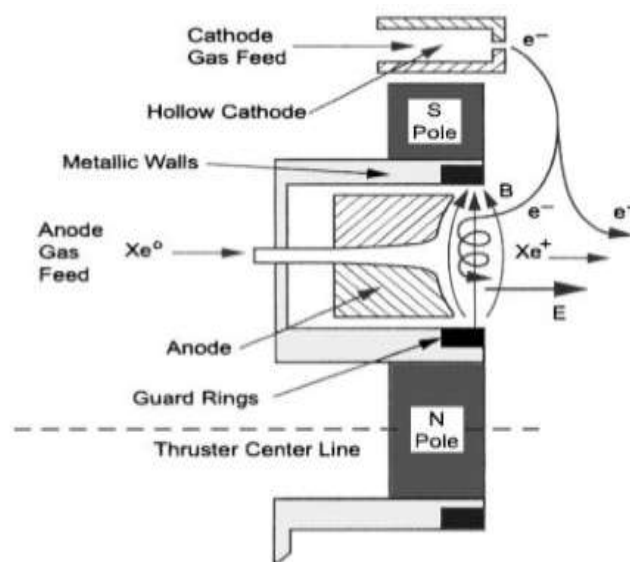
Obrázek 10 - Schéma SPT. Převzato z [13]

5.2 THRUSTER WITH ANODE LAYER

Thruster with anode layer (TAL) na *obrázku 11* se liší pouze konstrukčními úpravami oproti typu SPT. Tyto úpravy nemění princip tvorby iontů a jejich urychlování, které je stejné jako u SPT pohonu.

Charakteristickým prvkem této varianty Hallovského iontového pohonu je dutá anoda kónického tvaru umístěna ve výbojové komoře. Toto má za následek, že se zkrátila délka oblasti působení elektrického a magnetického pole. Avšak šířka této oblasti se zvýšila. [13]

Dalším prvkem, kterým se vyznačují jsou ochranné kroužky, které jsou umístěny na výstupu z výbojové komory. Na tento prvek se kladou vysoké nároky z důvodu životnosti pohonu. Jejich primárním úkolem je snížit elektronové ztráty na výstupu z komory. A dále také slouží k ochraně magnetů proti styku s urychlenými ionty. [16]



Obrázek 11 - Schéma TAL pohonu. Převzato z [13]

5.3 SPECIFIKACE HALLOVA IONTOVÉHO POHONU

Hallův iontový pohon popisujeme třemi nejdůležitějšími parametry, tj. tah, specifický impuls a účinnost. V této kapitole si odvodíme, z čeho vychází tah Hallova pohonu a jaký je vztah mezi specifickým impulsem a tahem.

Tahová složka Hallova iontového pohonu vychází ze stejných fyzikálních principů jako pohonu chemické, např. raketový nebo letecký motor.

Vztah, který popisuje závislost mezi rychlostí a hmotností rakety se nazývá Ciolkovského rovnice, nebo také „raketová rovnice“. Tato rovnice vychází z druhého Newtonova zákona.

$$F = Ma, \quad (5.3-1)$$

F charakterizuje sílu působící na objekt, M označuje hmotnost rakety, a je zrychlení.

Zrychlení je derivací rychlosti, tedy vztah (5.3-1) lze zapsat takto

$$T = M \frac{dv}{dt}, \quad (5.3-2)$$

kde v je rychlost.

Pokud budeme uvažovat o konstantní rychlosti. Hmotnost paliva m_p se bude s časem snižovat z důvodu „spalování“ v motoru. Proto bude na čase závislé. Můžeme vztah (5.3-2) upravit do následujícího tvaru

$$T = -v_{ex} \frac{dm_p}{dt}, \quad (5.3-3)$$

kde T charakterizuje tah pohonu, v_{ex} rychlost výfukových plynů, m_p hmotnost paliva. [13]

Řešením rovnic (5.3-2), (5.3-3) získáme Ciolkovského rovnici

$$\Delta v = v_{ex} \ln \frac{m_d}{m_d + m_p}, \quad (5.3-4)$$

kde m_d charakterizuje hmotnost rakety bez paliva. [13]

5.3.1 SÍLA PŮSOBÍCÍ NA IONTY

Na ionty v plazmatu působí elektrické pole, které je urychluje. Avšak v případě Hallovského iontového pohonu musíme brát v potaz také magnetické pole, které na tyto ionty působí. Tudíž na ionty působí síla

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{J}_{\text{Hall}} \times \mathbf{B}, \quad (5.3.1-1)$$

kde \mathbf{J}_{Hall} je hustota proudu.

Dále můžeme vyprodukovaný tah zapsat také vztahem

$$\mathbf{T} = \mathbf{J}_{\text{Hall}} \times \mathbf{B} = -\mathbf{F}_i \quad (5.3.1-2)$$

5.3.2 VÝKON HALLOVA IONTOVÉHO POHONU

Výkon lze definovat jako kinetickou energii urychlovaného paliva

$$P_{jet} = \frac{1}{2} \dot{m}_p v_{ex}^2, \quad (5.3.2-1)$$

kde \dot{m}_p je hmotnostní tok paliva. [13]

Pokud upravíme dříve definovaný vztah pro velikost tahu (5.3-3)

$$T = v_{ex} \frac{dm_p}{dt} = v_{ex} \dot{m}_p. [13] \quad (5.3.2-2)$$

Lze poté zapsat výkon Hallova iontového pohonu tímto způsobem

$$P_{jet} = \frac{1}{2} \frac{T^2}{\dot{m}_p}. [13] \quad (5.3.2-3)$$

5.3.3 RYCHLOST IONTŮ VYSTUPUJÍCÍ Z POHONU

Vztah pro rychlost iontů, které jsou urychlovány, lze získat upravením ze vztahu pro tah (5.3.2-2). Protože rychlost iontů je mnohonásobně vyšší než jakékoliv neizionizované částice, můžeme jej upravit na tvar

$$T = v_{ex} \frac{dm_p}{dt} \approx \dot{m}_i v_i, \quad (5.3.3-1)$$

kde \dot{m}_i je hmotnostní tok iontů, v_i je rychlost iontů. [13]

Ze zákona zachování energie lze získat vztah pro výslednou rychlost iontů vystupujících z Hallova iontového pohonu

$$v_i = \sqrt{\frac{2qV_b}{M}}, \quad (5.3.3-2)$$

kde V_b charakterizuje napětí, kterým je iont urychlován. q charakterizuje náboj a M je hmotnost iontu. [13]

Ze vztahu (5.3.3-1) nám už chybí pouze určit hmotnostní tok iontů, který je definován

$$\dot{m}_i = \frac{I_b M}{q}, \quad (5.3.3-3)$$

kde I_b označuje proud iontového paprsku. [13]

Dosazením vztahů (5.3.3-2), (5.3.3-3) do rovnice (5.3.3-1) získáme vztah pro tah

$$T = I_b \sqrt{\frac{2MV_b}{q}}. [13] \quad (5.3.3-4)$$

5.3.4 SPECIFICKÝ IMPULS

Specifický impuls je velmi důležitým parametrem pohonů. Definice zní, jakou změnu hybnosti získáme za jednotku spotřebovaného paliva. Avšak specifický impuls (v soustavě SI) lze také definovat poměrem tahu k hmotnostnímu toku paliva, tedy

$$I_{spSI} = \frac{T}{\dot{m}_p} \left[\frac{Ns}{kg} \right]. \quad (5.3.4-1)$$

Dále lze specifický impuls, definovat rychlostí urychleného paliva, které opouští pohon.

$$I_{spA} = \frac{v_{ex}}{g} [s] \quad (5.3.4-2)$$

Specifický impuls definovaný vztahem (5.3.4-2) je používán v anglosaské literatuře. Z důvodu, že jsem primárně čerpal informace z anglosaské literatury, budu v dalších částech bakalářské práce užívat specifický impuls definovaný vztahem (5.3.4-2).

Jak již bylo dříve zmíněno, tento parametr je velice důležitý. Specifický impuls můžeme chápat jako účinnost pohonu. Pokud budu porovnávat dva typy pohonů. Pohon s vyšším specifickým impulsem bude mít vyšší účinnost, neboť vytvoří ze stejného množství paliva vyšší tah.

Dále můžeme ze specifického impulsu zjistit podle vztahu (5.3.4-1), jaký tah dokáže vyvodit pohon po dobu jedné sekundy z jednoho kilogramu paliva.

5.3.5 ÚČINNOST HALLOVA IONTOVÉHO POHONU

Účinnost můžeme definovat pomocí vztahu (5.3.2-3)

$$\eta_T = \frac{T^2}{2\dot{m}_p P_m} = \frac{T I_{spSI}}{2P_m}. \quad (5.3.5-1)$$

Při procesu tvorby tahu v pohonu musíme brát v potaz ztráty. V pohonu jsou výkonové ztráty způsobené zářením z iontů a neutrálních částic paliva. Dále částice paliva jsou často jen vychýleny srážkou s elektronem a nedojde k ionizaci. [12]

PRAKTICKÁ ČÁST

6 POROVNÁNÍ ELEKTRICKÝCH POHONŮ

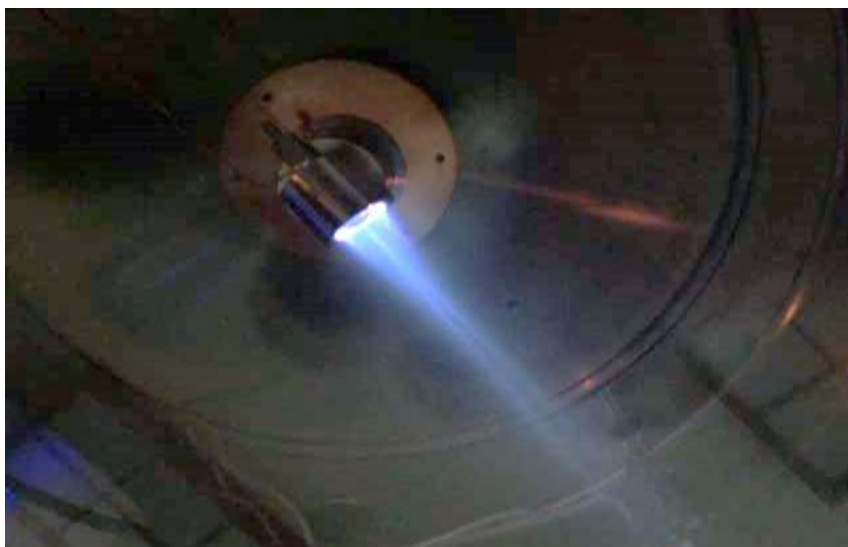
V této kapitole porovnám několik typů elektrických pohonů, abych dokázal zhruba určit očekávané parametry námi testovaného pohonu. Tuto metodu jsem vybral, neboť závislost tahu na výkonu pohonu je zhruba lineární u většiny iontových pohonů.

6.1 ALIS

Tato bakalářská práce využívá pohon, jehož předlohovým pohonem je právě ALIS [30], který lze vidět na *obrázku 12*. Výrobce využívá dusík jako palivo, tudíž hodnoty v tabulce jsou nižší než dále srovnávané pohony. Parametry v tabulce 1 jsou pouze orientační, neboť výrobce neudává účinnost a hodnoty tahu, proto je tah vypočten ze vztahu (5.3.3-4). Ze srovnání pohonů z tabulky 10 můžeme usoudit, že účinnost mohla dosahovat maximálně do hodnoty 0,2.

| | |
|---------------|------------------|
| Výkon | - |
| Napětí | 600 [V] |
| Tah | 34,58 [μ N] |
| Pracovní tlak | 6 [mTorr] |

Tabulka 1- Specifikace ALIS, převzato z [30]



Obrázek 12 - ALIS iontový pohon, převzato z [30]

6.2 EXOMG-NANO

Jedná se o Hallovský pohon od firmy Exotrail, který používá palivo Xenon. Předpokládané parametry při návrhu pohonu pro výkon 50 [W] jsou v tabulce 2.

| | |
|-------------------|----------|
| Specifický impuls | 800 [s] |
| Tah | 1,5 [mN] |

Tabulka 2 - Předpokládané parametry ExoMG-nano, převzato z [28]

Při testování v roce 2019 byly získány hodnoty uvedené v tabulce 3.

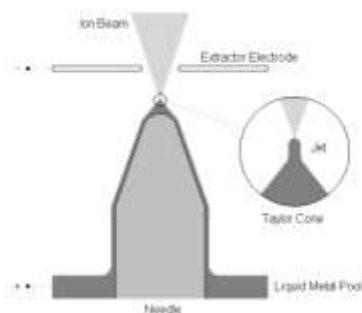
| | |
|-------------------|-----------|
| Specifický impuls | 800 [s] |
| Tah | 2,05 [mN] |
| Účinnost | 0,15 |

Tabulka 3 - Získané parametry při testování ExoMG-nano, převzato z [28]

Předpokládané hodnoty byly ověřeny s tím, že tah dosahoval hodnoty 2,05 [mN].

6.3 IFM NANO

Tento pohon vyrábí firma Enpulsion sídlící v Rakousku. IFM Nano patří do kategorie FEEP pohonů, kdy tah je vytvářen pomocí tzv. Taylorova kužele (obr. 13). Indium slouží jako palivo, které je během pokojové teploty v tuhém stavu.[17]



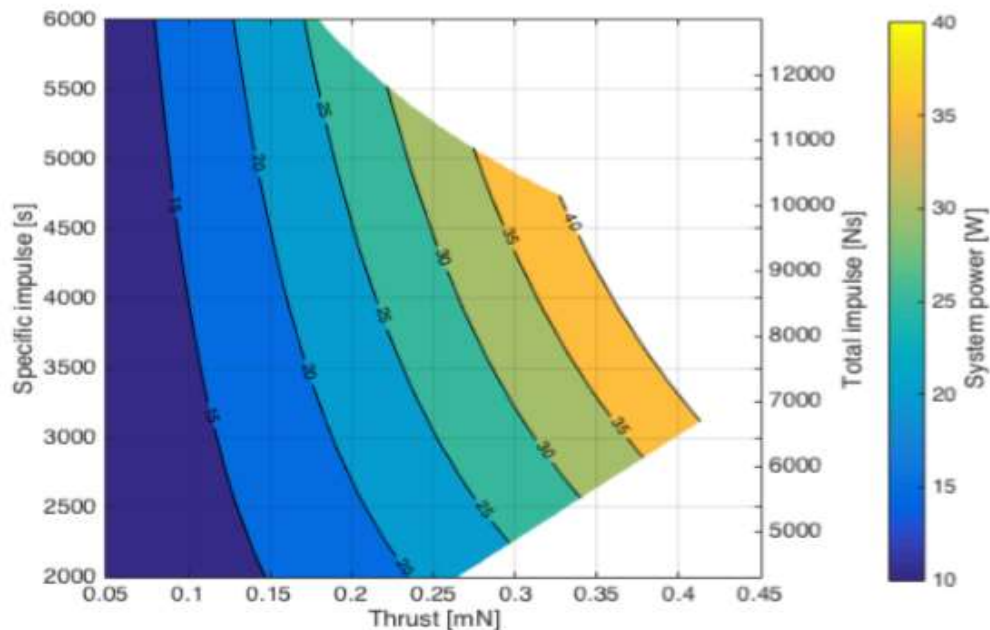
Obrázek 13 - Taylorův kužel, převzato z [18]

Mezi extraktorovou elektrodou a ostrou jehlou pokrytou tekutým kovem se vytváří vysoko napěťový potenciál. Na špičce této jehly se vytvoří tzv. Taylorův kužel, který je způsobený povrchovým napětím tekutého kovu a působícího elektrického pole. Když je odpařovací pole natolik silné, dochází k odpařování Taylorova kužele a ionizaci tekutého kovu. Vzniklé ionty jsou urychlovány směrem k extraktorové elektrodě a opouštějí pohon s rychlostí až 100 [km/s].[18]

Z katalogu společnosti [17] jsem zjistil parametry pohonu, které jsou v tabulce 4.

| | |
|-------------------|----------------|
| Výkon | 40 [W] |
| Tah | 350 [μ N] |
| Specifický impuls | 3300-4300 [s] |

Tabulka 4 - Parametry IFM nano, převzato z [17]



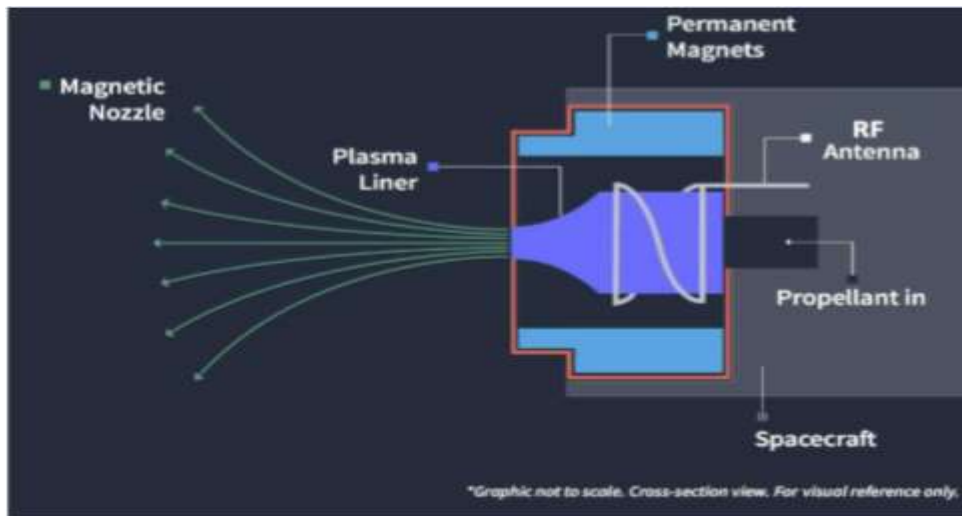
Obrázek 14 - Diagram parametrů IFM nano, převzato z [17]

6.4 RFT-2

Vývoj na tomto radio-frekvenčním pohonu provádí americká společnost Phase Four. Princip činnosti pohonu spočívá v urychlení iontů v keramické komoře (plasma liner), která je omotána induktivní radio-frekvenční cívkou (dále anténa) a umístěna v magnetickém poli vytvořeném permanentními magnety. Zjednodušené schéma pohonu je zobrazeno na obr. 15.

Anténou prochází střídavý proud, tudíž cívka vyzařuje elektromagnetické vlny ve vysokofrekvenčním pásmu. Magnetické pole uvnitř keramické komory lehce magnetizuje vzniklé ionty. Indukované kmitající magnetické pole produkované proudem procházejícím anténou ionizuje xenon při vstupu a zároveň zahřívá plazma. V komoře dochází k elastickým srážkám mezi elektrony a částicemi paliva Xenonu, a tím dochází k ionizaci. Rychlý nárůst

rychlosti elektronů vytváří nerovnováhu náboje v komoře, tudíž pomalejší ionty jsou vytlačovány z komory a urychlovány na vysokou rychlost. [19]

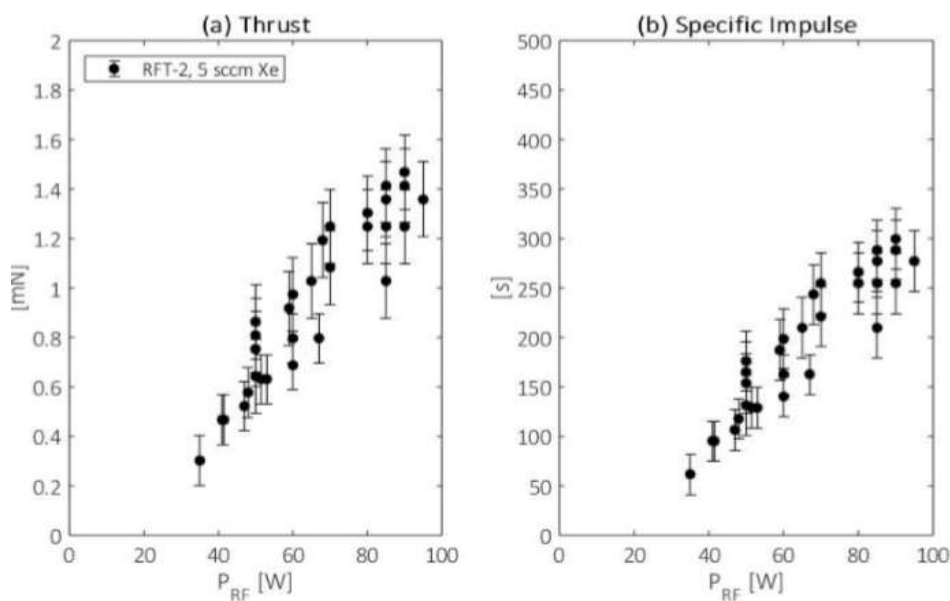


Obrázek 15 - Schéma RFT-2, převzato z [26]

Z obr. 16 a) a b) lze vyčíst parametry pohonu, které jsou uvedeny v tabulce 5.

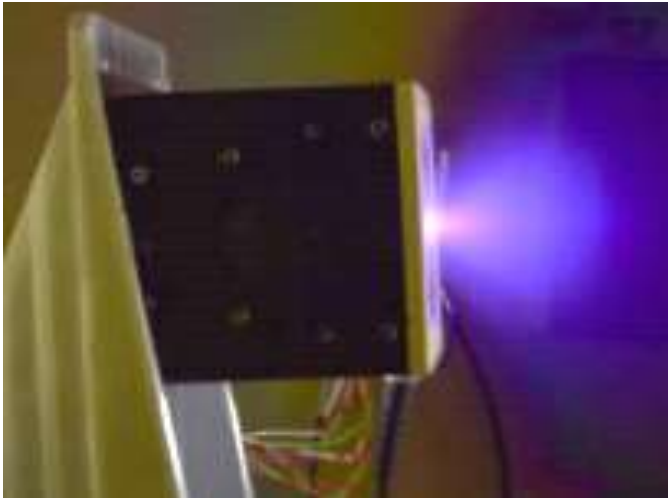
| | |
|-------------------|-----------------------|
| Výkon | 50 [W] |
| Tah | 900 [μN] |
| Specifický impuls | 180 [s] |
| Účinnost | 0,09 |

Tabulka 5 - Parametry RFT-2, převzato z [27]



Obrázek 16 - Parametry RFT-2, převzato z [27]

6.5 PLASMA JET PACK 30W



Obrázek 17 - Plasma Jet Pack 30W, převzato z [29]

Plasma Jet Pack (obr. 17) patří do kategorie vacuum arc thruster (VAT) od společnosti COMAT. Mezi hlavní výhody VAT pohonů patří vysoký stupeň ionizace plazmatu a vysoký specifický impuls při relativně malém výkonu.[20] Avšak z důvodu vysoké teploty dosahované při ionizaci, dochází k tvorbě mikrokapiček odpařováním materiálu katody, které zhoršují účinnost pohonu.

Parametry udávané výrobcem jsou uvedené v tabulce 6.

| | |
|-------------------|----------------|
| Tah | 450 [μ N] |
| Specifický impuls | >5000 [s] |
| Výkon | 30 [W] |
| Účinnost | >0,2 |

Tabulka 6 - Parametry Plasma Jet Pack 30W, převzato z [29]

6.6 MIT 50W

Pohon byl sestaven a otestován v rámci doktorské práce Vadima Khaymse [21] na Massachusettském technologickém institutu. Jedním z cílů doktorské práce bylo ověření zredukovaných parametrů v určitém měřítku již vyráběného a otestovaného vysoko výkonového Hallového pohonu. Pro tento účel byl vybrán pohon 1,35 [kW] SPT-100. Parametry pohonu byly zredukovány měřítkem 1:27. Parametry SPT-100 a předběžně měřítkem upravený MIT-50W jsou v tabulce 7.

| Parametry | SPT-100 | MIT-50W |
|----------------------------|---------|---------|
| Výkon [W] | 1350 | 50 |
| Tah [mN] | 83 | 3 |
| Specifický impuls [s] | 1600 | 1600 |
| Účinnost [1] | 0,5 | 0,5 |
| Střední průměr kanálu [mm] | 100 | 3,7 |

Tabulka 7 - Měřítkem zredukované parametry MIT-50W, převzato z [21]

Avšak po otestování pohonu dosahovala účinnost maximálně 6,27%, což byla až neočekávaně nízká hodnota. Část změřených parametrů můžeme vidět v tabulce 8.

| Hmotnostní průtok [kg/s] | Napětí [V] | Výkon [W] | Tah [μ N] | Specifický impuls [s] | Účinnost [-] |
|--------------------------|------------|-----------|----------------|-----------------------|--------------|
| $1,005 \cdot 10^{-7}$ | 250 | 30 | 502,9 | 510,6 | 0,0419 |
| $1,005 \cdot 10^{-7}$ | 300 | 40,2 | 577,8 | 586,7 | 0,0413 |
| $1,005 \cdot 10^{-7}$ | 250 | 30 | 524,3 | 532,3 | 0,0456 |
| $1,005 \cdot 10^{-7}$ | 300 | 41,7 | 631,3 | 641 | 0,0475 |
| $1,005 \cdot 10^{-7}$ | 200 | 19,8 | 395,9 | 402 | 0,0394 |

Tabulka 8 - Naměřené hodnoty MIT-50W, převzato z [21]

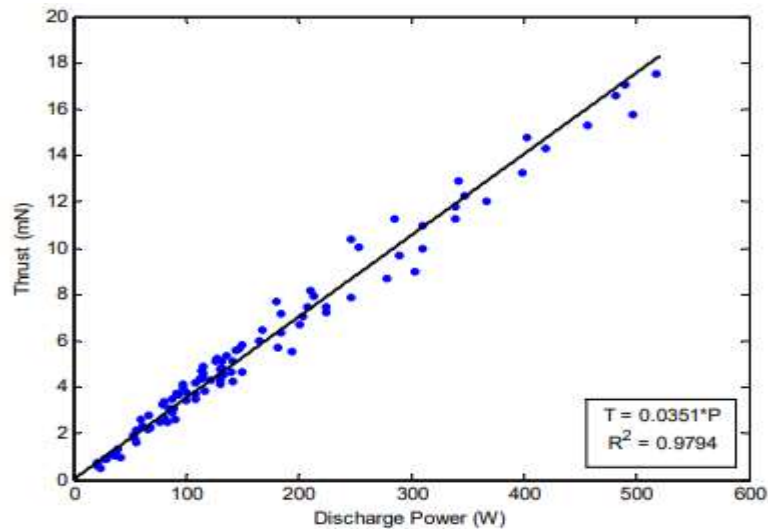
6.7 MHT-9

Jedná se o doktorskou práci Noah Zachary Warnera z Massachusettského technologického institutu[22]. Předlohový iontový pohon byl vybrán TsNIIMASH D-55. Měřítkem pro zredukování parametrů je 1:6,2. Předběžné zredukované parametry MHT-9 a D-55 jsou v tabulce 9.

| Parametry | D-55 | MHT-9 |
|----------------------------|------|-------|
| Výkon [W] | 1239 | 200 |
| Tah [mN] | 79,2 | 12,8 |
| Specifický impuls [s] | 1786 | 1378 |
| Účinnost [1] | 0,56 | 0,56 |
| Střední průměr kanálu [mm] | 55 | 8,9 |

Tabulka 9 - Měřítkem zredukované parametry MHT-9, převzato z [22]

Po otestování MHT-9 dosahovala účinnost maximálně hodnoty 0,29. Na obr. 17 lze vidět všechny změřené hodnoty tahu pro daný výkon pohonu MHT-9.



Obrázek 18 - Hodnoty tahu a výkonu MHT-9, převzato z [22]

6.8 SHRNU TÍ

Do tabulky 10 jsem shrnul zjištěné parametry uváděných pohonů.

| | Výkon [W] | Napětí [V] | Tah [μ N] | Specifický impuls [s] | Účinnost [1] | Typ pohonu |
|-----------------|-----------|------------|--------------------|-----------------------|--------------|------------|
| ALIS | 3 | 600 | 34,58 ¹ | - | - | Hall |
| ExoMG-nano | 50 | - | 2 050 | 800 | 0,15 | Hall |
| IFM Nano | 40 | - | 350 | 2000 - 6000 | - | FEEP |
| RFT-2 | 50 | - | 900 | 180 | 0,09 | RFT |
| Plasma Jet Pack | 30 | - | 450 | >5000 | >0,2 | VAT |
| MIT-50W | 40,2 | 300 | 577,8 | 586,7 | 0,041 | Hall |
| MHT-9 | 51,9 | 151 | 1900 | 665 | 0,121 | Hall |
| * KM-20 | 210 | 350 | 8800 | 1850 | 0,39 | Hall |
| *BHT-200 | 200 | 250 | 12800 | 1390 | 0,44 | Hall |
| *SPT-25 | 193 | 224 | 10200 | 1300 | 0,32 | Hall |
| *HTX | 200 | 270 | 9300 | 1350 | 0,31 | Hall |
| *T-27 | 201 | 251 | 9500 | 1430 | 0,33 | Hall |
| *HT-100 | 210 | - | 7400 | 1850 | 0,32 | Hall |

Tabulka 10 - Srovnání nízko výkonových iontových pohonů

¹ Tah dodatečně dopočítán ze vztahu (5.3.3-4)

Pohony označené symbolem * jsou získány z doktorské práce [22]. Jedná se o Hallovské iontové pohony, které výkonově překračují hodnotu 100 [W]. Zmínil jsem je pro představu hodnot účinností. Z tabulky 10 můžeme zjistit, že do hodnoty výkonu 100 [W] účinnost nepřesáhla 0,2. Výjimkou je pohon Plasma Jet Pack, u kterého výrobce udává účinnost větší než 0,2. Dále si jde všimnout, že Hallovské pohony do 100 [W] mají vyšší tah než ostatní typy pohonů, kromě RFT-2.

Pro zjištění očekávaných parametrů pohonu, který bude testován použiji nejdříve empirický vztah pro zjištění předběžného výkonu na základě velikosti pohonu z [23].

$$P = C_p * h * d, \quad (6.8-1)$$

kde $C_p = 1,1 * 10^6$, h je šířka kanálu pohonu, d je střední průměr kanálu. V našem případě je $h = 3$ [mm] a $d = 22$ [mm].

$$P = 1,1 * 10^6 * 3 * 10^{-3} * 22 * 10^{-3} = 72,6$$
 [W]

Podle empirického vztahu (6.8-1) má mít navržený pohon výkon 72,6 [W]. Pro předběžný tah využiji lineární regresi z obr. 17.

$$T = 0,0351 * P \quad (6.8-2)$$

$$T = 0,0351 * 72,6 = 2\,550$$
 [μN]

Výše zjištěný tah je pouze orientační, neboť výše zmíněné pohony pracují s Xenonem, s výjimkou ALIS a IFM Nano, a s kontinuálním přívodem paliva. V našem případě budeme pracovat s Argonem, který je levnější a pro nás dostupnější. Argon je lehčí plyn, tudíž tah bude také nižší. Dále pohon bude pracovat se zbytkovým plynem ve vakuové komoře.

Pro kontinuálním přívod paliva odhaduji na základě hodnot z tabulky 10 a výše vypočtených hodnot následující hodnoty pro výkon 70 [W].

| | |
|-----------------------|-------------|
| Účinnost [1] | 0,05 – 0,15 |
| Tah [μN] | 100 – 500 |
| Specifický impuls [s] | < 500 |

Tabulka 11 - Odhadované parametry školního pohonu

Pro činnost pohonu se zbytkovým plynem ve vakuové komoře odhaduji parametry v tabulce 12.

| | |
|-----------------------|--------|
| Účinnost [1] | < 0,05 |
| Tah [μN] | < 40 |
| Specifický impuls [s] | < 100 |

Tabulka 12 - Odhadované parametry školního pohonu se zbytkovým palivem

7 NÁVRH TESTOVACÍHO PŘÍPRAVKU

Testování bude probíhat ve vakuové komoře, kdy pohon bude pracovat se zbytkovým plynem. Tudíž nebude kontinuálně přiváděno palivo, přičemž pohon je uzpůsoben pro kontinuální přívod. Proto testovací přípravek je také uzpůsoben pro dodatečné namontování palivového přívodu.

Testovací přípravek se skládá ze 3 hlavních částí, z terčíku držáku pohonu a laserového snímače. Terčík slouží k měření tahu (resp. iontového tlaku). Terčík je vychýlen ze své stabilní polohy vyletujícím svazkem iontů tvořící tah. Tato výchylka je měřena laserovým snímačem vzdálenosti, pomocí výchylky vypočítám měřený tah pohonu.

7.1 NÁVRH A TEORETICKÝ VÝPOČET TESTOVACÍHO TERČÍKU

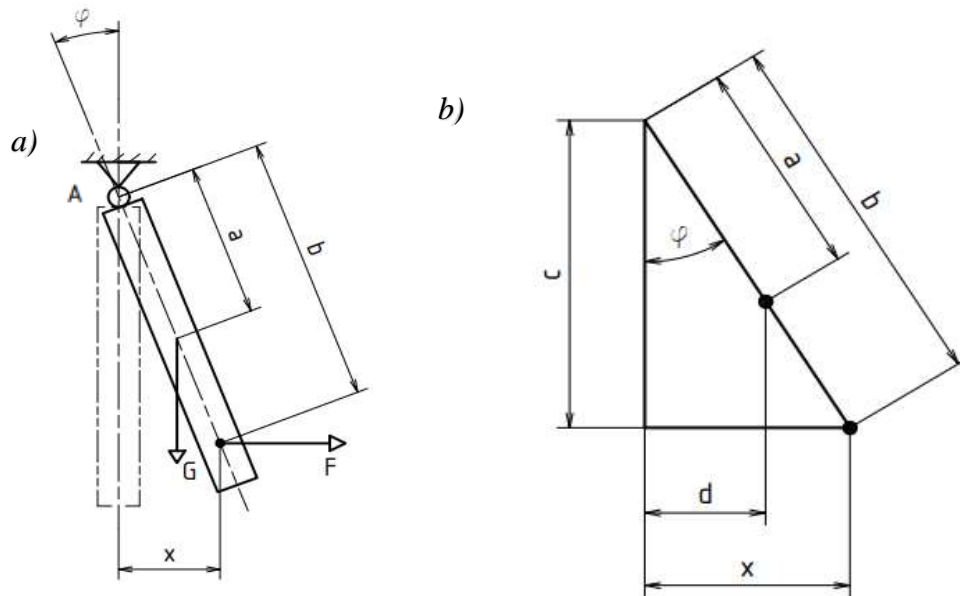
V této kapitole navrhu dvě varianty testovacího přípravku a zjistím, která z těchto variant je citlivější pro měření tahu. Abych zjistil teoretickou citlivost těchto dvou variant, tak budu počítat se zadanou výchylkou terčíku 100 [μm].

Ovšem teoreticky vypočítaný tah a naměřený tah (resp. iontový tlak) se budou velice lišit, jelikož měření bude velmi nepřesné. Mezi ovlivňující faktory budou patřit např. vibrace od vakuové pumpy, pohyb okolo vakuové komory, nepřesnost ustavení testovacího zařízení a testovaného pohonu. Dále vyletující ionty neletí přímo do terčíku, ale vyletují pod určitým úhlem a nezasáhnou zcela terčík. Přenos hybnosti od iontů může být čistě elastický po čistě neelastický. Dále uvažuji o čistě neelastickém přenosu hybnosti od iontů.

Jak jsem už zmínil, hlavním ovlivňujícím faktorem budou vibrace od vakuové pumpy. Tudíž se nejdříve provede měření bez přítomnosti paliva, kdy se změří pouze vliv těchto vibrací na testovací přípravek. A poté měření se zbytkovým palivem.

7.1.1 VARIANTA I

Terčík je připevněn přímo do rotační podpory, a tudíž při vychýlení nezachovává rovnoběžnou polohu s vertikální rovinou. Další nevýhodou je vliv tření v podpoře, ovšem tento vliv při výpočtu zanedbám. Rozměry terčíku volím 66 x 156 x 0,5 [mm].



Obrázek 19 - Skica terčíku (varianta I)

Z momentové rovnice k bodu A vyjádřím sílu F .

$$F = G * \frac{d}{c} \quad (7.1.1-1)$$

Neznámé c a d v rovnici (7.1.-1), zjistím z obr. 19 b)

$$c = b * \cos\varphi \quad (7.1.1-2)$$

$$d = a * \sin\varphi \quad (7.1.1-3)$$

Úhel φ získám ze vztahu

$$\sin\varphi = \frac{x}{b} \quad (7.1.1-4)$$

Dosazením rovnic (7.1.1-2) a (7.1.-3) do rovnice (7.1.1-1), získám rovnici pro měřený tah

$$F = T = G * \frac{a}{b} * \operatorname{tg}\varphi \quad (7.1.1-5)$$

Pro zjištění odhadovaného tahu dosadím do rovnice (7.1.-5) následující hodnoty:

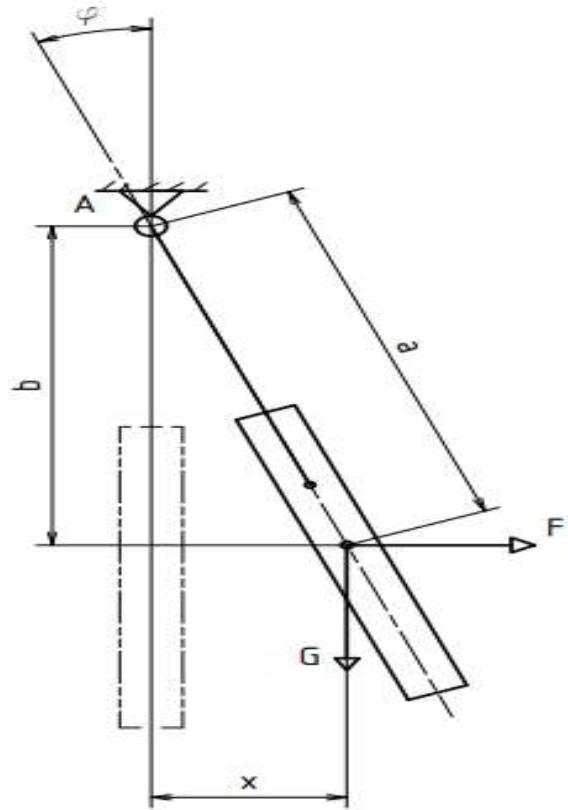
| | |
|-------------------------------------|---|
| Hustota uhlíkových vláken | $\rho \cong 1800 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ |
| Rozměry terčíku | 66 x 156 x 0,5 [mm] |
| Hmotnost terčíku | $m = 9,27 [g] = 0,00927 [kg]$ |
| Vzdálenost měřeného místa od bodu A | $b = 123 [mm] = 0,123 [m]$ |
| Střed terčíku: | $a = 78 [mm] = 0,078 [m]$ |
| Tíhové zrychlení | $g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ |
| Nominální výchylka x | $x = 100 [\mu m]$ |

$$T = 0,00927 * 9,81 * \frac{0,078}{0,123} * tg \left(\arcsin \left(\frac{100 * 10^{-6}}{0,123} \right) \right) = 4,689 * 10^{-5} [N] =$$

$$= \underline{46,89 [\mu N]}$$

7.1.2 VARIANTA II

U této varianty (obr. 20) je terčík připevněn na dvou bodech pomocí lanek. Tato varianta snižuje hmotnost použitého materiálu terčíku. Díky použití lanek, dojde ke zjednodušení konstrukce podpory a zmenšení vlivu tření v podpoře. Dále může dojít k naklonění samotného terčíku od osy lanek. Z důvodu měření maximálně desítek mikrometrů, toto naklonění zanedbám. Rozměry terčíku volím 66 x 66 x 0,5 [mm].



Obrázek 68 - Skica terčíku (varianta II)

Analogicky tah vyjádřím z momentové rovnice k bodu A

$$F = G * \frac{x}{b} \quad (7.1.2-1)$$

Dále úhel φ zjistím z rovnice

$$\sin \varphi = \frac{x}{a} \quad (7.1.2-2)$$

Proměnnou b zjistím z rovnice

$$b = a * \cos \varphi \quad (7.1.2-3)$$

Výsledný vztah pro měřený tah

$$F = T = G * \frac{x}{a * \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2}} \quad (7.1.2-6)$$

Pro zjištění odhadovaného tahu dosadím následující hodnoty:

| | |
|---------------------------|---|
| Hustota uhlíkových vláken | $\rho \cong 1800 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$ |
| Rozměry terčíku | 66 x 66 x 0,5 [mm] |
| Hmotnost terčíku | $m = 3,92 [g] = 0,00392 [kg]$ |
| Vzdálenost a | $a = 123 [mm] = 0,123 [m]$ |
| Tíhové zrychlení | $g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ |
| Nominální výchylka x | $x = 100 [\mu m]$ |

$$T = 0,00392 * 9,81 * \frac{100 * 10^{-6}}{0,123 * \sqrt{1 - \left(\frac{100 * 10^{-6}}{0,123} \right)^2}}$$

$$T = 3,126 * 10^{-5} [N] = \underline{\underline{31,26 [\mu N]}}$$

Výše zmíněné výpočty jsou zcela teoretické.

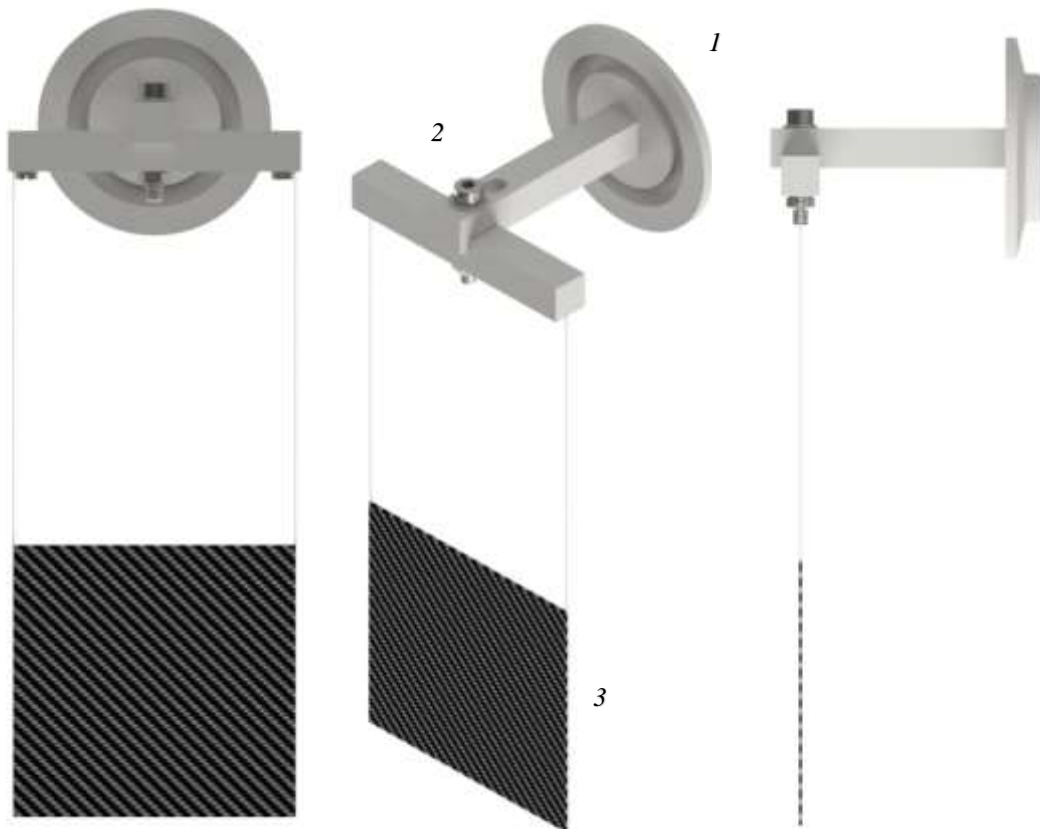
Z tabulky 13 můžeme zjistit, že citlivější pro měření tahu je varianta II, neboť pro vychýlení terčíku o 100 [μm] potřebuje menší sílu.

| | |
|-------------|------------|
| Varianta I | 46,89 [μN] |
| Varianta II | 31,26 [μN] |

Tabulka 13-Porovnání citlivosti variant držáku terčíku

7.2 KONSTRUKČNÍ PROVEDENÍ DRŽÁKU TERČÍKU

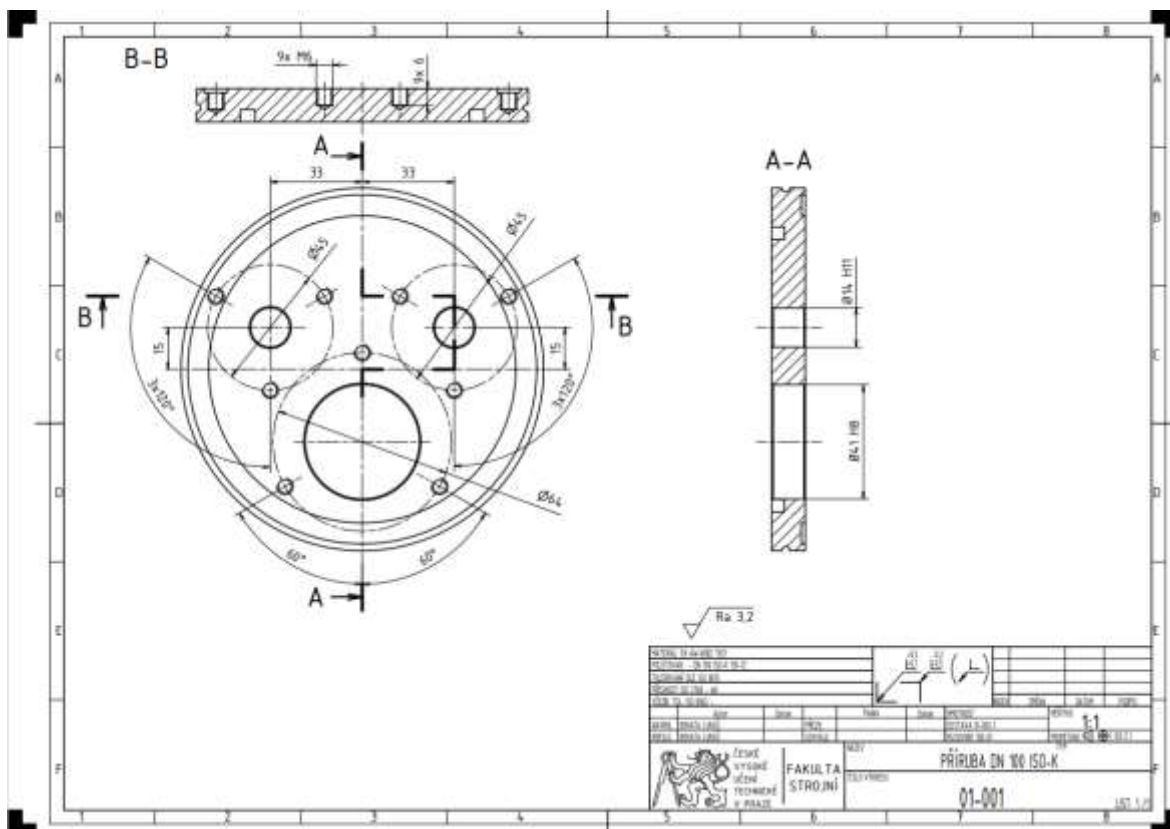
Terčík, který je na obr. 21 označen číslem (3), je vyroben z kompozitního materiálu, respektive z uhlíkových vláken. Zavěšen je na čtyřech bodech na krajích pomocí lanek. Z důvodu měření malého tahu, maximálně stovky [μN], použiji jako materiál lanek lidský vlas, který je dostatečně pevný a lehký pro naši aplikaci. Lanka se připevní k rámu (2) pomocí dvou šroubů. Rám je složen ze dvou čtyřhranů, které jsou spojeny pomocí šroubu a matice. Díky tomu je možné nastavit potřebnou vzdálenost terčíku od testovaného pohonu. Rám je poté pomocí závitu vytvořeném v podélném čtyřhranu našroubován do příruby DN 40 ISO-KF. Materiál příruby volím hliníkovou slitinu EN AW 6082 T651. Materiál rámu volím EN AW 6060 T66.



Obrázek 21 - Konstrukční provedení držáku terčíku

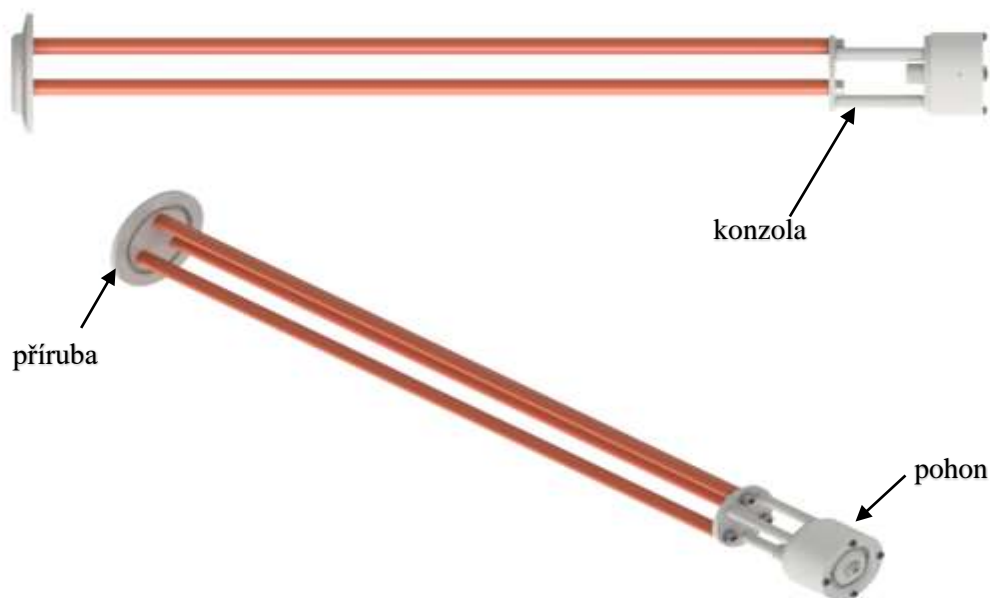
7.3 DRŽÁK POHONU

Držák pohonu bylo důležité navrhnout s ohledem na rozměry vstupních otvorů do vakuové komory. Pohon byl rozměrově navržen tak, aby jeho největší průměr byl menší než 40 [mm], proto ho lze namontovat na přírubu DN 40 ISO-KF. Pohon s přírubou DN 40 ISO-KF se připevní na přírubu DN 100 ISO-K (obr.22). Touto přírubou bude také procházet 9 pinová elektrická průchodka PF 272 013-X od společnosti Pfeiffer Vacuum (obr. 27). Pro víceúčelové použití příruby DN 100 ISO-K se vytvoří další otvor pro přírubu DN 16 ISO-KF. Celkově v přírubě DN 100 ISO-K budou tři otvory, respektive 2 pro přírubu DN 16 ISO-KF a 1 pro přírubu DN 40 ISO-KF. Při rozvržení otvorů bylo důležité brát v úvahu vnitřní drážku, do které se vkládá těsnění.



Obrázek 22 - Výrobní výkres příruby DN 100 ISO-K

Připevnění testovaného pohonu k přírubě DN ISO 40-KF jsem v prvním návrhu (obr.23) volil pomocí tří kruhových tyčí, které jsou posunuty vůči sobě o 120°. Tyč je na čele opatřena vnějším závitem M6, který se zašroubuje do příruby DN 40 ISO-KF. Druhé čelo je opatřeno vnitřním závitem M4, kterým je k tyčím pomocí šroubů připevněna konzola. Ke konzole je připevněn testovaný pohon pomocí dvou matic.

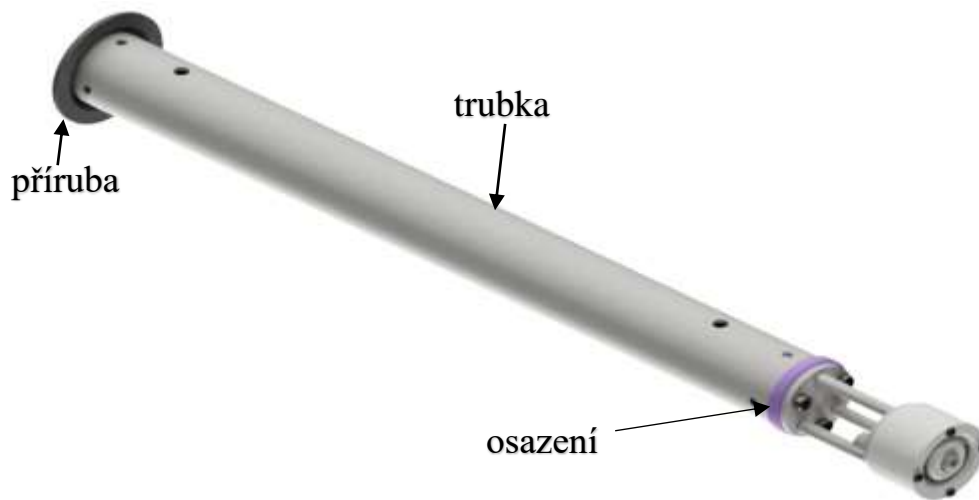


Obrázek 23 - Držák pohonu (1.návrh)

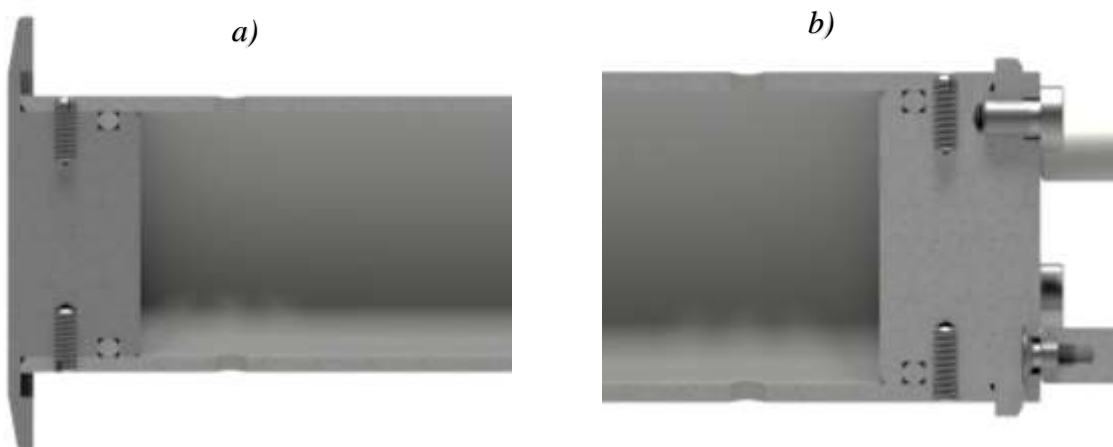
Po konzultaci s panem Ing. Jaromírem Kučerou mi bylo doporučeno nahradit tyče trubkou z důvodu vyšší tuhosti. Při použití tyčí by docházelo během manipulace k rotaci pohonu.

Upravený model držáku testovaného pohonu lze vidět na obr. 24. Pro použití trubky se však musela upravit příruba DN 40 ISO-KF, kterou lze vidět v detailním řezu na obr.25 a). Na druhém konci trubky je osazení, které je vidět na obr. 25 b). Osazení slouží pro upevnění konzole s testovaným pohonem. Trubka je opatřena čtyřmi průchozími otvory, aby nedošlo k zdeformování trubky během odsávání vzduchu z vakuové komory. Spojení příruby, osazení a trubky se dosáhne pomocí lisování. Potřebná síla pro nalisování je vypočítaná v kapitole 8.1. Zajištění trubky je provedeno po obvodě pomocí 4 šroubů bez hlavy s drážkou.

V případě, že trubka bude sloužit jako přívod paliva, nebude opatřena čtyřmi průchozími otvory. Dále se musí nadimenzovat tloušťka stěny trubky ze znalosti pevnosti a pružnosti. V detailním řezu na obr. 25 jsou vidět O-kroužky, které by sloužili k utěsnění vnitřní části trubky od vnějšího okolí.



Obrázek 24 - Držák pohonu (2. návrh)



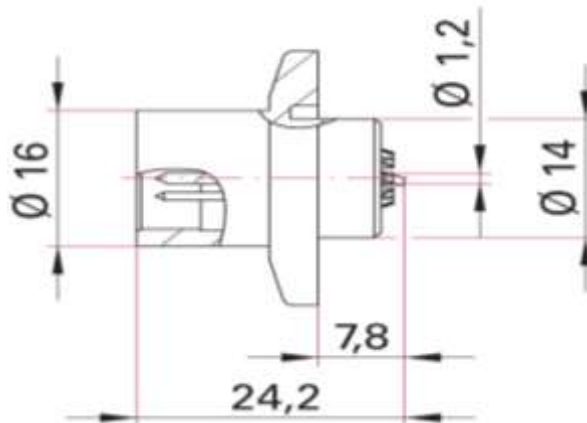
Obrázek 25 - Detailní řez držáku pohonu



Obrázek 26 - Upevnění přírub na přírubu DN 100 ISO-K

Na obr.26 je vidět upevnění držáku pohonu a elektrické průchodky na přírubu DN 100 ISO-K. Upevnění je provedeno pomocí upínek ISO-KF.

Na obr. 27 je elektrická průchodka PF 272 013-X DN 16 ISO-KF od Pfeiffer Vacuum.



Obrázek 27 - Elektrická průchodka PF 272 013-X. [33]

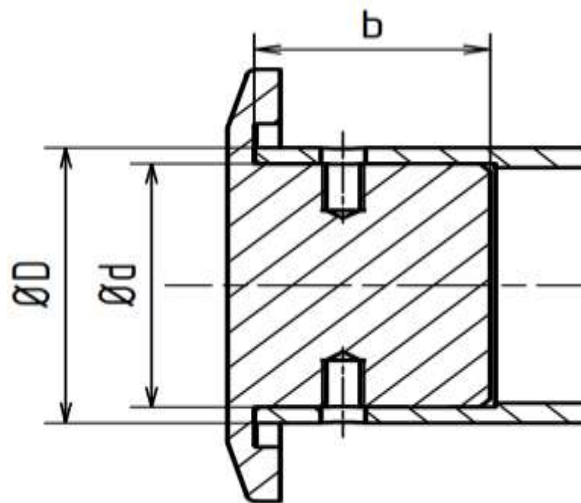
Na obr. 28 je ukázáno uspořádání testovacího přípravku pro měření tahu ve vakuové komoře. Vakuovou komoru jsem nenavrhl, byla mi poskytnuta od pana Ing. Jaromíra Kučery.



Obrázek 28 - Uspořádání testovacího přípravku ve vakuové komoře

7.3.1 SPOJENÍ NALISOVÁNÍM

Rozměry trubky volím $\varnothing 35 \times 2,5$ z důvodu, že trubka má výrobní tolerance. Proto se po délce b obrobí vnitřní průměr na $\varnothing 31$ s požadovanou tolerancí pro nalisování. Materiál příruby a osazení volím hliníkovou slitinu EN AW 6082 T651, který používá výrobce vakuové technologie Pfeiffer vacuum. Materiál trubky EN AW 6060 T6 je dán dodavatelem. Mez kluzu $\sigma_{k0,2}$ materiálu trubky je nižší než materiálu příruby, respektive osazení, proto budu také s touto $\sigma_{k0,2}$ počítat ve výpočtech.



Obrázek 29 - Skica nalisování

| | |
|----------------------------------|-----------------------------|
| Vnější průměr trubky: | $\varnothing D = 35$ [mm] |
| Vnitřní průměr trubky: | $\varnothing d = 31$ [mm] |
| Délka lisovaného spoje: | $b = 22,5$ [mm] |
| Součinitel tření: | $f = 0,06$ |
| Mez kluzu (materiál EN AW 6060): | $\sigma_{k0,2} = 140$ [MPa] |
| Koeficient bezpečnosti: | $k_{\sigma min} = 1,1$ |
| Modul pružnosti v tahu: | $E = 69 * 10^3$ [MPa] |

7.3.1.1 Nalisování za studena

V této části stanovím maximální tlak ve spoji, a poté potřebnou lisovací sílu. Dále navrhnu uložení spoje.

Stanovení maximálního tlaku ve spoji

Pro stanovení maximálního tlaku použiji hypotézu τ_{max}

$$\sigma_{red}^{\tau_{max}} = \sigma_{max} - \sigma_{min} = \sigma_t^N(r_2) - \sigma_r^N(r_2) \leq \sigma_D \quad (7.3.1.1-1)$$

Po úpravě rovnice (7.3.1.1.-1) získám

$$2 * (K^N + p_{max}) \leq \sigma_D = \frac{\sigma_{k0,2}}{k_{\sigma min}} \quad (7.3.1.1-2)$$

$$K^N = \frac{p_{max} * r_2^2 - p_{okolni} * r_3^2}{r_3^2 - r_2^2}, \quad (7.3.1.1-3)$$

kde p_{okolni} je tlak okolí, proto $p_{okolni} = 0$

$$K^N = \frac{p_{max} * r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} \quad (7.3.1.1-4)$$

Po dosazení vztahu (7.3.1.1-4) do rovnice (7.3.1.1-2), získám vztah pro maximální tlak ve spoji p_{max}

$$p_{max} \leq \frac{\sigma_D}{2 * \left(\frac{r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + 1 \right)} \quad (7.3.1.1-5)$$

$$p_{max} \leq \frac{\frac{140}{1,1}}{2 * \left(\frac{15,5^2}{17,5^2 - 15,5^2} + 1 \right)} = 13,7 \text{ [MPa]}$$

Velikost lisovací síly

$$F_{lis} = p_{max} * \pi * d * b * f \quad (7.3.1.1-6)$$

$$F_{lis} = 13,7 * \pi * 31 * 22,5 * 0,06 \cong \underline{\underline{1800 \text{ [N]}}}$$

Stanovení maximálního přesahu

$$\Delta r_{max} = \frac{2 * r_2}{E} * \left(\frac{p_{max} * r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + p_{max} \right) \quad (7.3.1.1-7)$$

$$\Delta r_{max} = \frac{2 * 15,5}{69 * 10^3} * \left(\frac{13,7 * 15,5^2}{17,5^2 - 15,5^2} + 13,7 \right) = 0,0286 [mm]$$

$$\Delta d_{max} = 2 * \Delta r_{max} \quad (7.3.1.1-8)$$

$$\Delta d_{max} = 2 * \Delta r_{max} = 2 * 0,0286 = 0,0571 [mm] = \underline{\underline{57,1 [\mu m]}}$$

Maximální přesah je 57,1 [μm].

Stanovení minimálního přesahu

Pro zjištění minimálního přesahu budu uvažovat, aby spoj vydržel minimální osovou sílu 200 [N].

Abych zjistil p_{min} musím upravit rovnici (7.3.1.1-6) do tvaru

$$p_{min} = \frac{F_{min}}{\pi * d * b * f} \quad (7.3.1.1-9)$$

$$p_{min} = \frac{200}{\pi * 31 * 22,5 * 0,06} = 1,5 [MPa]$$

Minimální přesah zjistím analogicky jako v rovnici (7.3.1.1-7) a poté vztahem (7.3.1.1-8)

$$\Delta r_{min} = \frac{2 * r_2}{E} * \left(\frac{p_{min} * r_2^2}{r_3^2 - r_2^2} + p_{min} \right) \quad (7.3.1.1-10)$$

$$\Delta r_{min} = \frac{2 * 15,5}{69 * 10^3} * \left(\frac{1,5 * 15,5^2}{17,5^2 - 15,5^2} + 1,5 \right) = 0,00313 [mm]$$

$$\Delta d_{min} = 2 * \Delta r_{min} = 2 * 0,00313 = 0,0063 [mm] = 6,3 [\mu m]$$

K výše vypočítanému minimálnímu přesahu musím ještě zahrnout vliv strženého přesahu při nalisování w .

$$w = 5,5 * (R_a^H + R_a^N) \quad (7.3.1.1-11)$$

Drsnost povrchu hřídele volím $R_a^H = 0,8 [\mu m]$

Drsnost povrchu náboje volím $R_a^N = 1,6 [\mu m]$

$$w = 5,5 * (0,8 * 10^{-3} + 1,6 * 10^{-3}) = 0,0132 [mm]$$

Celkový minimální přesah získám součtem $\Delta d_{min}'$ a w

$$\Delta d_{min} = \Delta d_{min}' + w \quad (7.3.1.1-12)$$

$$\Delta d_{min} = 6,3 + 13,2 = 19,5 [\mu m]$$

Návrh uložení hřídele a náboje

Pro zjištění uložení hřídele a náboje musím nejdříve zjistit toleranční pole uložení

$$T_u = \Delta d_{max} - \Delta d_{min} \quad (7.3.1.1-13)$$

$$T_u = 57,1 - 19,5 = 37,6 [\mu m]$$

Na základě tolerančního pole uložení volím stupně přesnosti H5/IT6 a v soustavě jednotné díry.

Základní úchytky pro $\varnothing 31$ H5: ES = 11[μm] a EI = 0 [μm]

Pro zjištění dolní úchytky hřídele použiji vzorec:

$$\Delta d_{min} = ei - ES \quad (7.3.1.1-14)$$

$$ei = \Delta d_{min} + ES = 19,5 + 11 = 30,5 [\mu m]$$

Pro zjištění horní úchytky hřídele použiji vzorec:

$$\Delta d_{max} = es - EI \quad (7.3.1.1-15)$$

$$es = \Delta d_{max} + EI = 57,1 [\mu m]$$

Podle výše zjištěných hodnot navrhuji stupeň přesnosti hřídele r6. Výsledné uložení hřídele a náboje je H5/r6.

7.3.1.2 Nalisování za tepla

Stanovení minimálního přesahu

Z důvodu, že dochází k ohřevu náboje, nemusím uvažovat vliv strženého přesahu nalisováním. Proto hodnota minimálního přesahu je

$$\Delta d_{min} = \Delta d_{min}' = 6,3 [\mu m]$$

Návrh uložení hřídele a náboje

Toleranční pole uložení

$$T_u = 57,6 - 6,3 = 51,3 [\mu m]$$

Na základě tolerančního pole uložení volím stupně přesnosti H6/IT7 a v soustavě jednotné díry.

Základní úchytky pro $\varnothing 31$ H6: ES = 16 [μm] a EI = 0 [μm]

Pro zjištění úchylek hřídele postupuji analogicky jako v kapitole 8.1.1.

$$ei = \Delta d_{min} + ES = 6,3 + 16 = 22,3 [\mu m]$$

$$es = \Delta d_{max} + EI = 57,1 [\mu m]$$

Podle výše zjištěných hodnot navrhuji stupeň přesnosti hřídele p7. Tudiž výsledné uložení hřídele a náboje je H6/p7.

Stanovení potřebné teploty pro ohřátí náboje

Pro zjištění potřebného ohřátí použiji vzorec

$$\Delta T = \frac{\Delta d_{max} + \Delta d_{min}}{\alpha * d}, \quad (7.3.1.2-1)$$

kde α je součinitel lineární tepelné roztažnosti. Pro hliníkové slitiny $\alpha = 23 * 10^{-6} [\frac{1}{^\circ C}]$

$$\Delta T = \frac{0,051 + 0,01}{23 * 10^{-6} * 31} = 85,6 [^\circ C]$$

Potřebné ohřátí náboje pro nalisování je $85,6 [^{\circ}\text{C}]$. Z ekonomického hlediska volím volbu spojení nalisováním za tepla, neboť nároky na kvalitu uložení jsou nižší než u nalisování za studena.

7.4 KONZOLA

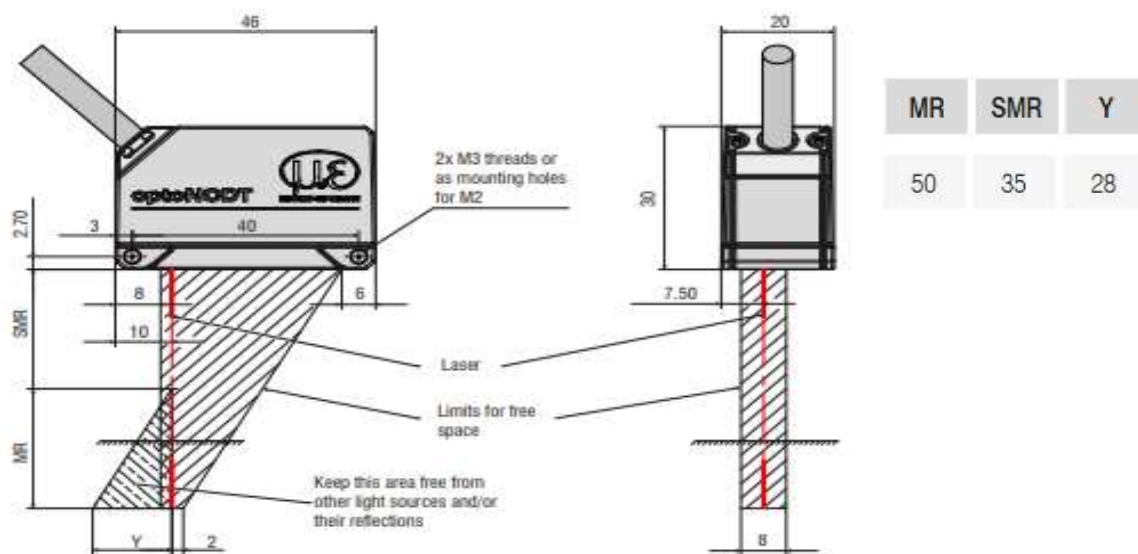
Slouží k připojení iontového pohonu k držáku pohonu. Materiálem konzoly jsem vybral ČSN 17 240, respektive AISI 304. Jedná se o nemagnetický materiál z důvodu zabránění ovlivnění magnetického toku v pohonu. Konzolu lze vidět na obr. 30.



Obrázek 30 - Konzola

7.5 MĚŘENÍ VÝCHYLKY TERČÍKU

Měření bude prováděno pomocí laserového triangulačního snímače vzdálenosti ILD1420-50 od společnosti Micro-Epsilon.



Obrázek 31 - Laserový snímač vzdálenosti ILD1420 [32]

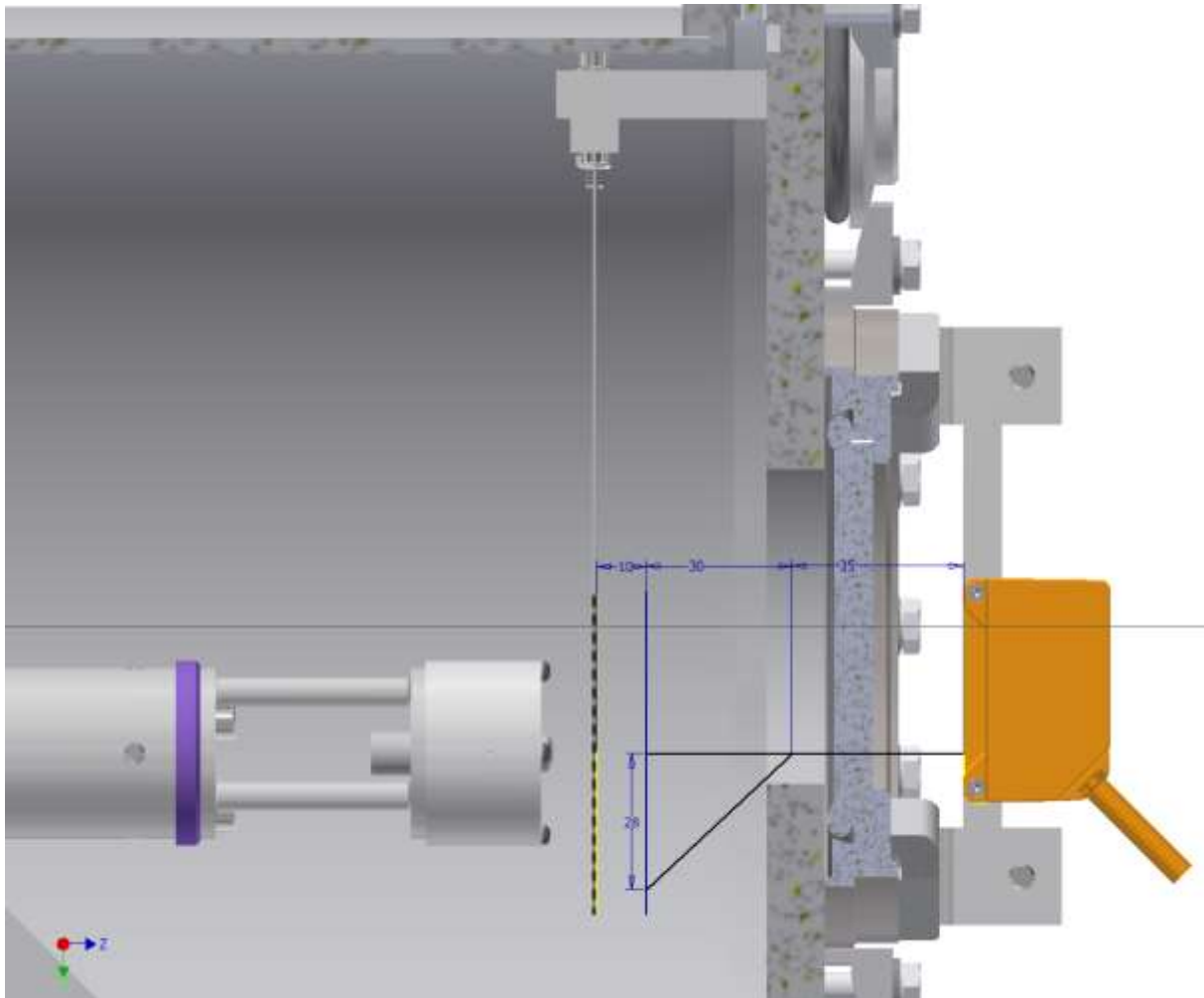
Snímač bude připevněn k přípravku pomocí dvou šroubů M2. Přípravek je připevněn přímo k vakuové komoře. Upevnění přípravku k přírubě DN 250 ISO-K lze vidět na obr. 32.



Obrázek 32- Připevnění měřícího přípravku k přírubě

Z obr. 31 si můžeme všimnout, že pro montáž laserového snímače musím splnit několik podmínek. První podmínkou je, laser měří v určitém pásmu. Začátek měřeného pásma je 35 [mm] od snímače. Konec měřeného pásma je 85 [mm]. Další a důležitější podmínkou pro měření tímto snímačem je rozměr Y (obr. 31). Tento rozměr označuje oblast, kde nesmí být žádné zdroje světla nebo prvky pro jejich odraz. Vzdálenost terčičku od laserového snímače lze nastavit od 65 [mm] až do 75 [mm], což je ukázáno na obr. 33.

Jak je vidět na obr. 33 výše zmíněné podmínky jsou splněny.



Obrázek 33 - Schéma měření výchylky terčičku

Další podmínkou je opakovatelnost měření snímače ILD1420-50, která musí být menší než měřená výchylka x z kapitoly 7.1.2. Abych tuto podmínku splnil, musím zjistit velikost výchylky x pro zhruba očekávaný tah. Opakovatelnost pro snímač ILD1420-50 je 2 [μm], která je udávaná v katalogu výrobce [32].

Nejdříve si vyjádřím výchylku x z rovnice (7.1.2-6)

$$x = \frac{F * a}{\sqrt{F^2 + G^2}} \quad (7.5-1)$$

Dosazením hodnot z kapitoly 7.1.2 do vztahu (7.5-2) získám hodnotu pro x

$$x = 127,94 [\mu m]$$

Podmínka, že opakovatelnost snímače musí být menší než měřená výchylka, je splněna.

ZÁVĚR

V bakalářské práci bylo mým cílem stanovení očekávaných parametrů Hallova iontového pohonu. Na základě zjištěných dat jsem stanovil očekávané parametry pro kontinuální přívod paliva a pro činnost pohonu se zbytkovým palivem. Očekávané hodnoty pro kontinuální přívod paliva jsou pro tah (100 – 500) [μN], účinnost (0,05 – 0,15) a specifický impuls < 500 [s]. Hodnoty parametrů pro činnost pohonu se zbytkovým palivem jsou pro tah < 40 [μN], účinnost $< 0,05$, a specifický impuls < 100 [s].

V druhé praktické části jsem navrhl dvě varianty testovacích terčů. Abych zjistil, jaká varianta je citlivější pro měření tahu (resp. iontového tlaku), tak jsem počítal se zadanou výchylnou 100 [μm]. Na základě výpočtů jsem zjistil, že citlivější pro měření tahu je varianta II. Hodnota tahu pro variantu I dosahovala 46,89 [μN] a pro variantu II dosahovala hodnota tahu 31,26 [μN].

Varianta II je konstrukčně řešena tak, že terč je zavěšen na dvou bodech pomocí lanek, která jsou připevněna k rámu. Materiál lanek bude použit lidský vlas, neboť pro naši aplikaci zajišťuje nízkou hmotnost a zároveň dostatečnou pevnost.

Testovaný pohon je ve vakuové komoře připevněn pomocí držáku, který se skládá z příruby, trubky, osazení a konzoly. Příruba a osazení jsou nalisována do trubky. Nalisování bude provedeno za tepla. Nalisování za tepla je výhodnější než nalisování za studena z hlediska menších nároků na přesnost výroby. Uložení jsem na základě výpočtů zvolil H6/p7. Potřebné ohřátí osazení a příruby je 85,6 [$^{\circ}\text{C}$]. Konzola je vyrobena z nemagnetického materiálu, aby neovlivnila tok magnetického pole uvnitř pohonu. Takovýto celek společně s iontovým pohonem je připevněn pomocí upínek do příruby DN 100 ISO-K. Do této příruby bude také upevněna elektrická průchodka PF 272 013-X.

Výchylna terče bude měřena pomocí triangulačního laserového snímače ILD1420-50. Pro použití tohoto typu snímače je nutné splnit několik podmínek. První podmínkou je, že snímač začíná měřit ve vzdálenosti 35 [mm] od snímače a konec měřicího pásma je 85 [mm] od snímače. Další podmínkou je oblast, ve které nesmí být žádné zdroje světla nebo prvky pro jejich odraz. Tyto dvě podmínky jsem vyřešil konstrukcí držáku terče a laserového snímače. Důležitější podmínkou pro měření je v našem případě opakovatelnost snímače, neboť se budou měřit velmi malé výchylny, maximálně stovky mikrometrů. Opakovatelnost

snímače udávaná výrobcem je 2 [μm]. Očekávaná výchylka terčíku je 127,94 [μm] a je větší než opakovatelnost snímače o dva řády. Tato podmínka je splněna a měření tímto způsobem je proveditelné.

Seznam použité literatury

- [1] CHOUËIRI, Edgar Y. *A Critical History of Electric Propulsion: The First Fifty Years (1906-1956)*. In: *40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit* [online]. Fort Lauderdale, Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004 [vid. 2019-11-01]. ISBN 978-1-62410-037-6. Dostupné z: doi:10.2514/6.2004-3334
- [2] Hermann Oberth | German scientist. *Encyclopedia Britannica* [online]. [vid. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/biography/Hermann-Julius-Oberth>
- [3] WEBB-MACK, Zoë. A Brief History of Ion Propulsion. *NASA Solar System Exploration* [online]. [vid. 2019-11-01]. Dostupné z: <https://solarsystem.nasa.gov/news/723/a-brief-history-of-ion-propulsion>
- [4] *GRC - SPACE ELECTRIC ROCKET TEST I (SERT I)* [online]. [vid. 2019-11-02]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/WWW/ion/past/60s/sert1.htm>
- [5] *MEK - Deep Space I* [online]. [vid. 2020-07-04]. Dostupné z: <https://mek.kosmo.cz/sondy/usa/ds1/index.htm>
- [6] WIESEMANN, K. *A Short Introduction to Plasma Physics*. nedatováno, 38.
- [7] *Co je to plazma?* [online]. [vid. 2020-01-17]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/astrofyzika/plazma/basics.php>
- [8] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80-904582-2-2.
- [9] BITTENCOURT, J. A. *Fundamentals of plasma physics*. 3. ed. New York, NY: Springer, 2004. ISBN 978-1-4419-1930-4.
- [10] CHEN, Francis F. *Úvod do fyziky plazmatu*. 3. vyd. Praha: Academia, 1984.
- [11] *Hallův jev – WikiSkripta* [online]. [vid. 2020-02-24]. Dostupné z: https://www.wikiskripta.eu/w/Hall%C5%AFv_jev
- [12] TURNER, Martin J. L. *Rocket and spacecraft propulsion: principles, practice and new developments*. 2nd ed. Berlin ; New York : Chichester, UK: Springer ; Published in association with Praxis Pub, 2005. Springer-Praxis books in astronautical engineering. ISBN 978-3-540-22190-6.
- [13] GOEBEL, Dan M. a Ira KATZ. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall thrusters*. A JOHN WILEY, 2008. ISBN 978-0-470-42927-3.
- [14] JAHN, Robert G. a Edgar Y. CHOUËIRI. Electric Propulsion. In: *Encyclopedia of Physical Science and Technology* [online]. B.m.: Elsevier, 2003 [vid. 2019-11-17], s. 125–141. ISBN 978-0-12-227410-7. Dostupné z: doi:10.1016/B0-12-227410-5/00201-5

- [15] KHAING, Ei Ei a Kyaw Kyaw SHWE. *Performance Analysis Ionic Thruster and Grid Configuration*. nedatováno, 16.
- [16] *IEPC1995-196.pdf* [online]. [vid. 2020-02-27]. Dostupné z: <http://electricrocket.org/IEPC/IEPC1995-196.pdf>
- [17] *ENP2018-015.B - IFM Nano Thruster SE - Product Overview.pdf* [online]. [vid. 2020-03-04]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKewjerIkzYLrAhVHyqQKHTliAAAYQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.enpulsion.com%2Fwp-content%2Fuploads%2FENP2018-015.B-IFM-Nano-Thruster-SE-Product-Overview.pdf&usg=AOvVaw0IHYFRYZcCEujwNk_O27YE
- [18] BOCK, Daniel, Matthias BETHGE a Martin TAJMAR. *Highly Miniaturized FEEP Thrusters for CubeSat Applications*. In: . 2014.
- [19] SIDDIQUI, Umair M., Chris CRETEL, Joshua SYNOWICE, Andrea G. HSU, Jason A. YOUNG a Rostislav SPEKTOR. *First Performance Measurements of the Phase Four RF Thruster*. In: *35th International Electric Propulsion Conference*. 2017.
- [20] KOLBECK, Jonathan, André ANDERS, Isak I. BEILIS a Michael KEIDAR. Micro-propulsion based on vacuum arcs. *Journal of Applied Physics* [online]. 2019, **125**(22), 220902. ISSN 0021-8979, 1089-7550. Dostupné z: doi:10.1063/1.5081096
- [21] KHAYMS, Vadim. *Advanced propulsion for microsattellites*. 2005.
- [22] WARNER, Noah Z. *Theoretical and experimental investigation of Hall thruster miniaturization*. 2007.
- [23] DANNENMAYER, Käthe a S. MAZOUFFRE. *Sizing of Hall effect thrusters with input power and thrust level: An Empirical Approach*. 2008.
- [24] ASHKENAZY, J, Y RAITSES a G APPELBAUM. *Parametric Studies of the Hall Thruster at Soreq*. 1997, 28.
- [25] *ELUC* [online]. [vid. 2020-02-25]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/617>
- [26] TAJMAR, M., A. GENOVESE a W. STEIGER. Indium Field Emission Electric Propulsion Microthruster Experimental Characterization. *Journal of Propulsion and Power* [online]. 2004, **20**(2), 211–218. ISSN 0748-4658, 1533-3876. Dostupné z: doi:10.2514/1.9247
- [27] SIDDIQUI M. UMAIR. *Updated Performance Measurements of the Phase Four RF Thruster*. In: *34th Space Symposium*. 2018.
- [28] GURCIULLO, Antonio, Julien JARRIGE, Paul LASCOMBES a Denis PACKAN. *Experimental performance and plume characterisation of a miniaturised 50W Hall thruster*. In: *The 36th International Propulsion Conference*. 2019.
- [29] L. HERRERO. *Plasma Jet Pack technolog overview*. In: *EPIC workshop*. 2017.

- [30] *RTFTechnologies Anode Layer Ion Source* [online]. [vid. 2020-06-20]. Dostupné z: <http://www.rtftechnologies.org/physics/anode-layer-ion-source.html>
- [31] EMRE TURKOZ, FIRAT SIK a MURAT CELIK. *Investigation of the Geometry Configuration Variations on the Performance of Ion Thruster Grids with PIC-DSMC Simulations*. In: *34th IEPC, 30th ISTS and 6th NSAT*. 2015.
- [32] *Technické data ILD1420*. [online] Dostupné z: https://www.micro-epsilon.cz/displacement-position-sensors/laser-sensor/optoNCDT_1420_basic/
- [33] *Pfeiffer Vacuum* [online]. [vid. 2020-08-05]. Dostupné z: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/products/chambers-components/feedthroughs/electrical-feedthroughs/1268/feedthrough-9-pole-soldered-connection-dn-16-iso-kf>

PŘÍLOHY

V této příloze jsou pouze sestavné výkresy ve zmenšeném měřítku. Veškerá výkresová dokumentace v plném měřítku je v příloženém CD, které je součástí vázání bakalářské práce.

