

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní

Ústav letadlové techniky



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh demonstračního modelu iontového motoru

Design of demonstration model of ion thruster

Přemysl Tobola

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Tobola** Jméno: **Přemysl** Osobní číslo: **467348**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav letadlové techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh demonstračního modelu iontového motoru

Název bakalářské práce anglicky:

Design of demonstration model of ion thruster

Pokyny pro vypracování:

Pro vypracování práce proveďte:

- 1) Vytvořte obecnou rešerši se souhrnem existujících konstrukcí iontových motorů s ExB driftem (Hallovský motor).
- 2) Proveďte konstrukční návrh hlavní části malého iontového motoru tohoto typu.

Seznam doporučené literatury:

D.M. Goebel, I. Katz: Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters, JPL/CalTech, 2008
J.-P. Boeuf: Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters, Journal of Applied Physics, 121, 2017, p.011101
+další literatura dle doporučení vedoucího

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

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


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

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019** Termín odevzdání bakalářské práce: **02.08.2019**

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, DrSc.
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.

30.4.2019

Datum převzetí zadání

Tobola

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu. Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne: 02.08. 2019

Přemysl Tobola

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu práce, panu Mgr. Jaroslavu Kousalovi Ph.D, za vedení a pomoc s obtížnějšími pasážemi této práce.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navrhnout demonstrační model iontového motoru. Práce se zaměřuje na oblasti použití a základní podmínky pro fungování iontových motorů. Dále na porovnání různých typů motoru. Hlavní částí je pak konstrukční návrh demonstračního modelu.

Klíčová slova

Iontový motor, Hallovský motor, plazma, iont, ExB drift

Abstrakt

The goal of this Bachelor thesis is to design demonstration model of ion thruster. The thesis focuses on areas of application, basic conditions for the operation of ion thrusters, as well as comparison of different types of thrusters. The main part is the design of the demonstration model.

Keywords

Ion thruster, Hall thruster, plasma, ion, ExB drift

Obsah

Úvod.....	1
1 Teoretická část	2
1.1 Iontové motory	2
1.2 Využití.....	2
1.3 Historie.....	3
1.4 Základy iontových motorů	4
1.4.1 Mřížkové vs bez mřížky	4
1.5 Definice fyzikálních dějů	6
1.6 Fungování Hallovského motoru.....	10
1.7 Iontové motory s ExB driftem.....	12
1.7.1 Uzavřený drift („closed drift“).	13
1.7.2 End-Hall.....	15
2 Praktická část	16
2.1 Volba materiálů.....	18
2.1.1 Elektrické pole	19
2.1.2 Tělo motoru.....	19
2.1.3 Anoda.....	20
2.1.4 Magnetické pole.....	20
2.1.5 Izolanty	20
2.2 Simulace polí.....	21
2.2.1 Elektrické pole	22
2.2.2 Magnetické pole.....	23
2.3 Pohyb elektronů a iontů v magnetickém poli.....	24
2.4 Konstrukční součásti	26
2.4.1 Vnitřní komora.....	28
2.4.2 Anoda.....	29
2.4.3 Čep.....	30
2.4.4 Izolace	31
2.4.5 Pólové nástavce.....	32
2.4.6 Nástavec.....	33
2.5 Elektrická kabeláž	34
2.6 Plynová konzole	35
2.7 Návrh šroubů.....	35

3	Závěr	37
	Seznam použité literatury	38
	Seznam obrázků	40
	Přílohy.....	42

Úvod

V této práci se zabývám iontovými motory a s nimi spojenými fyzikálními vlastnostmi a zákonitostmi. V teoretické části objasním fungování iontových motorů, oblast jejich využití, rozdělení motorů a jejich výhody a nevýhody. Na toto bude navazovat řešerše na speciální typ iontových motorů, a to motorů s ExB driftem. V části praktické se zabývám již existujícím modelem, který se pak snažím zdokonalit a upravit tak, aby jeho fungování bylo účinnější a celkově použitelnější.

Rozeberu konstrukční návrh s vysvětlením jeho hlavních předpokladů a v čem spočívají jeho výhody. V závěru zhodnotím výsledek práce.

1 Teoretická část

1.1 Iontové motory

Jako první si musíme odpovědět na otázku, co jsou to iontové motory. Iontové motory jsou motory, které využívají Newtonův zákon akce a reakce. Tah vzniká reakcí na urychlení a vymrštění svazku iontů. Při srovnání motorů iontových a typických raketových motorů, které využívají chemickou reakci, můžeme říci, že oproti raketovým motorům mají větší specifický impuls, avšak jejich tah je nesrovnatelně menší. Pro lepší představu si uvedeme nejsilnějšího zástupce z obou kategorií.[1] Z raketových motorů je to pomocný motor Merlin 1D, od společnosti SpaceX, který dosahuje tahu okolo 7600 kN[2], zatímco nejsilnější testovaný iontový motor má tah 5,4N [3]. Ačkoliv tah iontových motorů je malý a v gravitačním poli zanedbatelný, tak jejich účinnost nebo výdrž paliva značně zvedá jejich potenciál. Proto jejich využití tkví hlavně ve vesmíru, kde nepotřebujeme rychlé změny pohybu, ale stačí nám pouze lehce upravovat řízení. Proto se například satelity dopraví na oběžnou dráhu raketovým motorem, ale pro další manipulace, například na oběžné dráze, se využívají motory iontové. [1]

1.2 Využití

Tímto jsem se dostal k oblasti využití. Jak již bylo naznačeno, hlavní předpokládaný význam mají v pohybu napříč vesmírem, kdy sice trvá zrychlení déle, ale nároky na objem paliva jsou menší. Jsou využívány jak veřejným, tak vojenským sektorem pro udržování pozic satelitů na oběžné dráze. Avšak jejich využití nalezneme nejenom tam. Proud urychlených iontů se také používá v průmyslu k úpravě materiálů, kde se bavíme například o iontové implantaci, iontovém leptání, iontovém frézování atd. [4]

Iontová implantace

Iontová implantace je technologický proces v oblasti materiálového inženýrství. Jedná se o povrchovou úpravu materiálu, kdy hlavním cílem je zlepšení povrchových vlastností součásti. Proces probíhá ve vakuové komoře, kde jsou urychlovány ionty, které vysokou rychlostí dopadají na povrch součásti. Tyto ionty postupují do povrchu, kde naráží do struktury atomů součásti a předávají svou energii interakcemi s elektrony a atomy. Po předání veškeré energie se iont zabuduje do struktury součásti, tedy implantace.

Hloubka, do které iont pronikne, je závislá na rozložení atomů a vlastnostech iontu. Bavíme se ovšem o vzdálenostech běžně se pohybujících pod mikron. Tato aplikace umožňuje například nitridaci povrchu, která zvyšuje tvrdost, snižuje koeficient tření, a zároveň nedeformuje geometrii součásti.[5]

1.3 Historie

Ačkoliv první zmínka o pohonu pomocí elektrického urychlení iontů (dále jen EP-electric propulsion) padla již v roce 1911, jejich vývoj začal až na konci padesátých let minulého století. O vlastnictví myšlenky lze spekulovat. První zmínka v akademické literatuře je právě z roku 1911 od ruského vědce Konstantina Ciolkovského, který je znám svou raketovou rovnicí. Rovnice popisuje pohyb raket, ačkoli je Ciolkovski považován za průkopníka v oblasti kosmonautiky. O myšlence EP se našel dochovaný záznam z roku 1906 v deníku amerického inženýra Roberta Hutchingse Goddarda, který stejně jako Ciolkovski patří mezi největší průkopníky raketového inženýrství. Goddard se zaměřoval na chování raket a došel ke stejným závěrům jako jeho ruský protějšek. Začal proto pracovat na raketách s kapalnou směsí. Stal se prvním mužem, který takovouto raketu otestoval. [6]

Myšlenka urychlení iontů předběhla svou realizaci o půl století. To bylo způsobeno více věcmi, ať už nedostatečně rozvinutými technologiemi, znalostmi fyziky i omezeností myšlení. Například Ciolkovski ve svých pracích nemluví o iontech, ale o elektronech. Pro ukázkou zde máme jeho citát z roku 1924: [6]

„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.“[6].

Nikdo z vizionářů neuspěl až do roku 1959. První iontový motor byl představen americkým fyzikem Haroldem R. Kaufmanem, který použil mřížkový elektrostatický motor. Jako palivo sloužila rtuť.[6]

Vývoj v sovětském svazu započal myšlenkami Ciolkovského, ale skutečný rozvoj nastal až po vypuštění prvního sputniku v roce 1957. V sovětském svazu oproti USA začali s vývojem bezmřížkových motorů, a to typy SPT (Stationary Plasma Thruster) a TAL (Thruster with Anode Layer). [6]

1.4 Základy iontových motorů

Iontové motory pracují na stejných principech jako chemické raketové motory. Představme si, že máme 2 satelity. Jeden satelit poháněn standardní raketou a druhý poháněn urychlováním iontů. Urychlování hmoty a její vypouštění je u obou stejný. Rozdílem je, že u iontových motorů vystřelují pouze nabitě částice. Což nám umožňuje větší rychlost, kterou hmota opouští satelit. Zatímco vypouštěcí rychlost u raketových motorů je okolo 3-4 km/s, tak rychlost iontů opouštějící motor má až 100 km/s. Jelikož dosahujeme větší rychlosti paliva, tak z Newtonových zákonů, popřípadě ze zákona o hybnosti

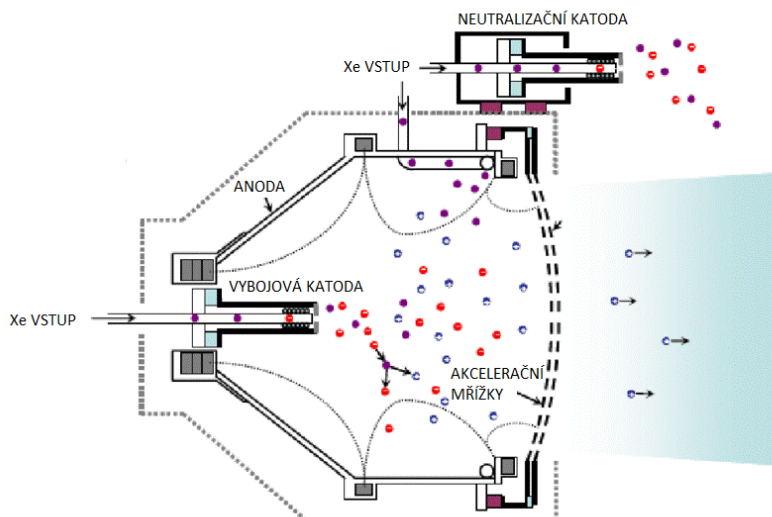
$$p = mv, \quad (1.4.1)$$

víme, že rychlost, kterou můžeme dosáhnout, je vyšší. Taktéž z toho vyplývá, že pokud nepotřebujeme velkou rychlost, můžeme zvýšit náklad satelitu. [1]

1.4.1 Mřížkové vs bez mřížky

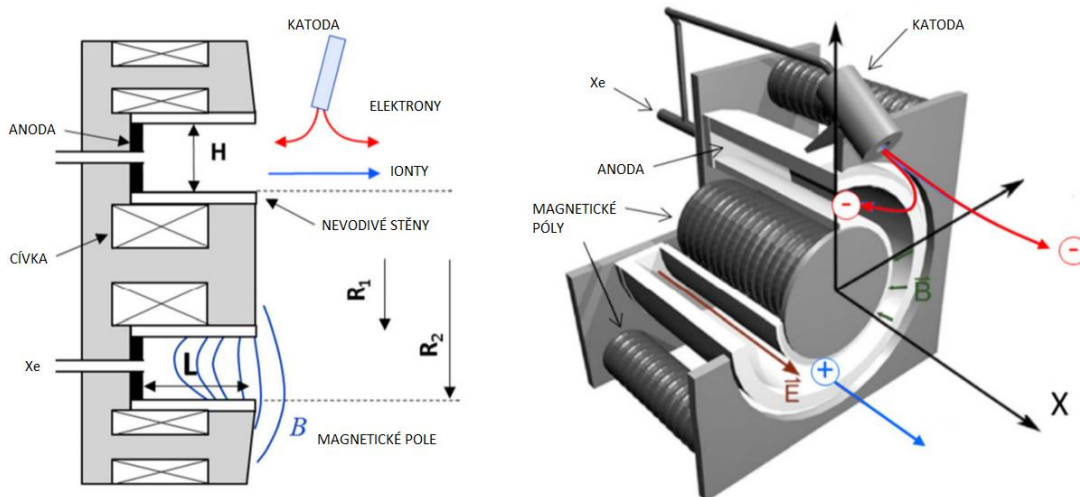
Iontové motory pracují na způsobu urychlení iontů, které vyvíjejí tah. Dělíme je na mřížkové a bezmřížkové. Hallovský motor je představitelem bezmřížkových motorů (nadále jen Hallovské motory). Oba typy mají porovnatelný tah i impuls. To je pochopitelné, protože oba pracují na bázi stejného konečného výstupu, ale výsledku dosahují rozdílně.

Motory mřížkové se skládají ze 3 důležitých součástí. Generátor plazmatu, akcelerační mřížky a katody. Princip představuje obr. 1. Výbojová katoda spolu s anodou reprezentují zdroj plazmatu. Plazma je urychleno skrz akcelerační mřížky, na které je přivedeno vysoké napětí (kV). Ionty jsou urychleny na vysokou rychlost. Vytváří se paprsek toku iontů, který způsobuje tah. Pakliže je výstupem tok iontů, znamená to, že výsledný pohon má vysoce kladný elektrický náboj. Abychom se tohoto vyvarovali, potřebujeme neutralizační katodu, která nám dodává elektrony a tím neutralizuje nechtěný kladný náboj.[1]



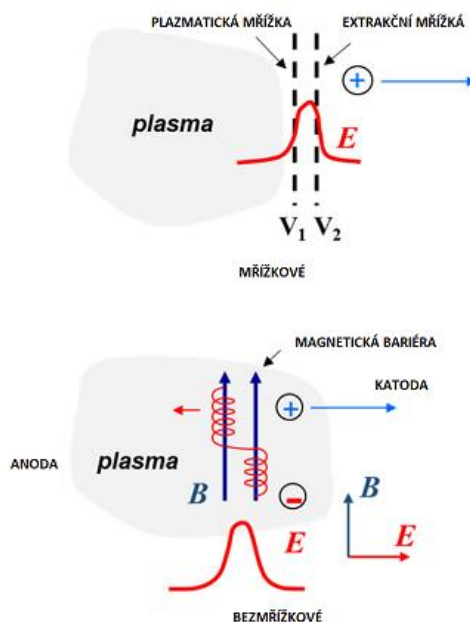
Obr. 1 Schéma mřížkového iontového motoru. Převzato a přeloženo z [21]

Hallovské motory jsou také složeny ze 3 primárních částí. Z katody, generátoru magnetického pole a oblasti výbojové komory. Základní schéma vidíme na obrázku č.2. Oproti mřížkovým motorům nám katoda dodává elektrony, které jsou vtaženy do komory k anodě. Díky působení elektromagnetického pole začnou kroužit okolo osy komory. Anoda slouží jako zdroj plynu, do kterého naráží volné elektrony. Při těchto srážkách vznikají ionty, které jsou elektromagnetickými silami urychleny ve směru osy komory. [1]



Obr. 2 Schéma Hallovského motoru. Převzato a přeloženo z [7]

Další schéma, které může pomoci pochopit popsané principy, lze vidět na obr. 3. Princip Hallovských motorů je oddělení a udržení elektronů ve výbojovém kanále a zároveň urychlení iontů z komory ven.



Obr. 3 Porovnání principů, na kterém pracují iontové motory. Převzato a přeloženo z [7].

1.5 Definice fyzikálních dějů

V této kapitole se budu zabývat fyzikálními ději a fakty, které jsou potřebné k pochopení fungování Hallovského motoru.

Iont

Ionty jsou atomy nebo molekuly, jejichž celkový počet elektronů v elektronovém obalu není roven celkovému počtu protonů v jádře. Jestliže v iontu je menší počet elektronů, mluvíme o kationtu, zatímco při počtu vyšším, mluvíme o aniontu. Kationt tedy nese kladný náboj, zatímco aniont nese záporný náboj. Ionty vznikají ionizací. [11]

Elektron

Elektrony jsou stabilní subatomární částice nesoucí záporný náboj o velikosti $1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$. Proton má náboj stejný jen s opačnou polaritou. Elektron je mnohem lehčí než iont, jež se skládá z protonů, neutronů a elektronů samotných. Hmotnost elektronu je $9,10938 \times 10^{-31} \text{ kg}$, zatímco protonu je $1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}$, což je o čtyři řády vyšší hmotnost, a to v porovnání pouze s jedním protonem. V důsledku mnohem masivnější váhy jsou ionty tou složkou plazmatu, která zprostředkovává pohon. [8] [9]

Ionizace

V této práci mluvím o ionizaci plynu, kdy letící částice způsobí rozštěpení molekul na ionty. Existuje ale i ionizace v kapalinách nebo ionizace třením. Jelikož různé prvky mají různé vazební energie, mění se i energie potřebná k odtržení elektronu. Tuto energii, nutnou pro odtržení jednoho elektronu, nazýváme ionizační energie. [10]

Plazma

Iontové motory pracují na základě urychlení částic s nábojem. Tyto nabité částice vznikají ionizací plynu, který slouží jako palivo. Plazma je skupina nabitých částic, jak iontů, tak elektronů, které se volně pohybují. Kdybychom se podívali na poměr těchto částic, zjistíme, že výsledný náboj je takřka neutrální. Tedy platí, že hustota elektronů a iontů v plazmatu je téměř stejná

$$n_e \approx n_i, \quad (1.5.1)$$

kde n_e je počet elektronů a n_i je počet iontů. Tento jev se označuje jako kvazineutralita. Označuje se také jako čtvrté skupenství hmoty, neboť vlastnosti plazmatu jsou jiné než u ostatních skupenství.

Ve vesmíru se takřka 99 % věcí nachází ve formě plazmatu. Dalo by se říct, že naše planeta je výjimečná, neboť v přírodě plazmat vidíme jen velmi omezeně, například ve formě blesku nebo polární záře. Naproti tomu jeho využití můžeme nalézt velice často v průmyslovém odvětví, kde jej používáme k řezání, svařování atp. [12]

Plazmat definujeme souhrnem tří vlastností:

1. Má volné nosiče elektrického náboje.
2. Vykazování kolektivního chování, tzn. vytváří magnetická a elektrická pole a reaguje na ně jako celek.
3. Je kvazineutrální, tzn. v makroskopickém objemu je stejné množství záporných i kladných iontů.[12]

Pro základní kontrolu návrhu motoru budeme dále pracovat s modelem pohybu osamocené nabitě částice. Bližší informace k danému tématu najdeme na [12].

Lorentzova síla

Síla, která působí na částici s nábojem v elektromagnetickém poli, se nazývá Lorentzova. Lze předpokládat, že zde budou zapojeny obě složky. Jak z pole elektrického, tak z pole

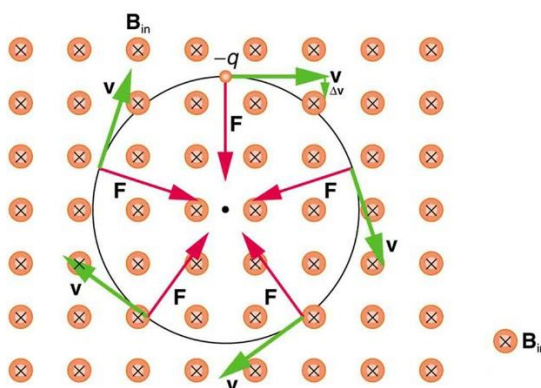
magnetického. Směr působící síly je kolmý k rychlosti částice a také na magnetické pole. Matematicky je síla definována vektorovým součinem

$$F = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1.5.2)$$

kde q je náboj částice. [14][18]

Pohyb částice s nábojem v magnetickém poli

Magnetické pole a elektrické pole jsou spolu svázány. Pohybující se částice s nábojem vyvolává magnetickou sílu a naopak. Tento jev se využívá v elektrických motorech.



Obr. 4 Pohyb nabité částice v magnetickém poli. Převzato z [19]

Pro představu pohybu nám pomůže obr. 4. Víme, že magnetická síla je popsána jako

$$F_m = Bqv, \quad (1.5.3)$$

kde B je magnetická indukce, q je náboj částice, popsáný na začátku kapitoly, a v je rychlost, kterou se náboj pohybuje. Použijeme Flemingovo pravidlo pravé ruky. Síla je kolmá na pohyb náboje. Za předpokladu, že se magnetická síla rovná síle odstředivé, se vytváří cyklotronní pohyb, což je pohyb po kružnici nebo šroubovici, specifický pro nabitě částice v homogenním magnetickém poli. Jak ze samotné teorie, tak z obrázku vyplývá, že se jedná o vektorový součin. Výsledný vzorec pro magnetickou sílu tedy je

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (1.5.4)$$

Z toho také vyplývá, že změním-li polaritu náboje, změní se nám směr pohybu na opačný.[13]

Výpočet poloměru kružnice, na které cirkuluje částice, je patrný z rovnosti odstředivé síly a síly magnetické:

$$qv \times B = \frac{mv^2}{r}, \quad (1.5.5)$$

kde m je hmotnost částice a r je poloměr kružnice, na které se částice pohybuje. Z tohoto vztahu dostáváme vzorec pro výpočet poloměru

$$r = \frac{mv}{qB}. \quad (1.5.6)$$

Hallův jev

Hallův jev můžeme popsat jako vytvoření elektrického pole v polovodiči, působí-li na něj magnetické pole. Pokud je magnetické pole kolmé na rychlost částice s nábojem, pak na něj působí Lorentzova síla, která zapříčiňuje vznik Hallova jevu. Představme si tenkou polovodičovou desku, jíž prochází proud. Elektrony jsou ovlivněny magnetickým polem a shromažďují se na jedné straně desky. Tím se vytváří záporný náboj na jedné straně, zatímco na straně druhé vzniká náboj kladný z důvodu akumulace náboje. Na obou stranách desky se vytváří rozdílný potenciál a vzniká elektrické pole, respektive Hallovo napětí. [14]

Hustota proudu, která je vytvářena tímto jevem, se vypočte jako

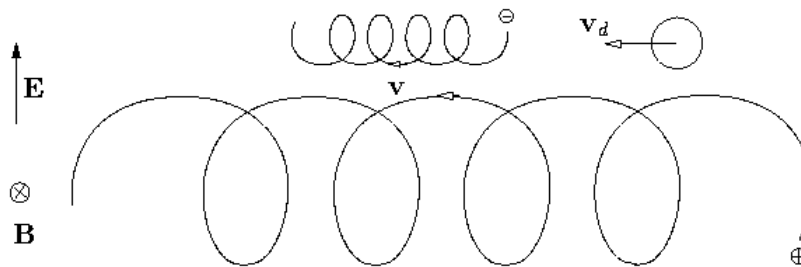
$$J_{hall} = -en_e v_e, \quad (1.5.7)$$

kde e je náboj jednoho elektronu, n_e je počet elektronů a v_e je rychlost elektronu.

V Hallovských motorech existuje podobný efekt ve zkříženém elektrickém a magnetickém poli, ale v tomto případě daný zejména ExB driftem.

ExB drift

Tato část platí jen pro Hallovské motory, a ne pro iontové motory obecně. Rozdíl oproti Hallovu jevu, který byl výše popsán, je u ExB driftu v přidání elektrického pole. ExB drift je jev probíhající v elektromagnetickém poli, kde jsou na sebe tato 2 pole (tzn. elektrické a magnetické) kolmé. Pro popsání elektrického pole používáme intenzitu elektrického pole E . Pro pole magnetické magnetickou indukci B .



Obr. 5 Porovnání chování kladně a záporně nabitě částice v ExB driftu. Převzato z [20]

Z obr. 5 je patrné, že se iont (elektron) pohybuje ve směru vektorového součinu ExB . Obtáčí se okolo pole B , ale je poháněn elektrickým polem, které jej posouvá vpřed. Tím vzniká cyklotronní pohyb. Rychlost pohybu iontů je ovlivněna poměrem E/B a cyklotronní frekvencí, která je dána vztahem

$$\Omega_{ce} = \frac{qB}{m}, \quad (1.5.8)$$

kde m je hmotnost iontu (elektronu). Elektron je značně lehčí, proto i jeho frekvence bude větší.

Z důvodu Hallova jevu, mají Hallovské motory válcovou geometrii. Kdyby tok ExB driftu narážel, například do stěn, vznikalo by elektrické pole rovnoběžné, které by šlo proti poli motoru a tím by jej vyrušilo.

1.6 Fungování Hallovského motoru

Rovnice v této části jsou již upraveny. Podrobnější vyjádření nalezneme v [1].

Raketová rovnice

Pro usnadnění se nyní budeme bavit o raketě jako takové, a nejen o motoru, který jí pohání. Hmota, která opouští raketu a způsobuje tah, je palivo, které je uskladněno v raketě a je urychleno zážehem nebo v případě iontových motorů, elektrickým polem.

Výsledná změna rychlosti má rovnici

$$\Delta v = v_{ex} \ln \frac{m_d}{m_d + m_p}. \quad (1.6.1)$$

kde m_d je výsledná hmotnost rakety bez paliva a m_p je hmotnost paliva, která je nesená raketou a v_{ex} je rychlost paliva na ústí motoru.

Specifický impuls

Specifický impuls je veličina používaná v kosmonautice. Udává nám, jak vysoce využíváme palivo vůči tahu, který z něho získáváme

$$Isp = \frac{T}{\dot{m}_p g}, \quad (1.6.2)$$

kde $g = 9,8067 \text{ m/s}^2$ je gravitační zrychlení, T je tah a \dot{m}_p je hmotnostní tok paliva..

Rovnici můžeme po dosazení upravit na formu

$$Isp = \frac{v_{ex}}{g} \quad (1.6.3)$$

Tah Hallovského motoru

Výkon Hallovského motoru je určen z kinematické energie, kterou dáváme palivu

$$P_m = \frac{1}{2} \dot{m}_p v_{ex}^2.$$

Spojením rovnic (1.6.2) a (1.6.3) a následným dosazením do (1.6.4) dostáváme vzorec

$$P_m = \frac{T^2}{2\dot{m}_p}, \quad (1.6.5)$$

který nám ukazuje, že můžeme zvýšit výkon, pokud zvýšíme tah a neovlivníme tok paliva. Tímto můžeme zvýšit rychlost.

Ionty jsou vytvářeny v plazmatu a jsou urychlovány elektrickým polem, které je v něm umístěno. Musíme ovšem počítat také s magnetickým polem, které vytváří Hallův proud. Magnetické pole ovlivňuje pohyb částic, a tudíž i tah

$$F_i = J_{hall} \times B = T. \quad (1.6.6)$$

Tudíž síla působící na ionty v Hallovských motorech je rovna tahu. Odvození této rovnice a bližší popsání dějů nalezneme v [1].

Tah pro Hallovské motory, můžeme popsat také jako

$$T = \frac{dm_p}{dt} v_{ex} \approx \dot{m}_i v_i, \quad (1.6.7)$$

kde \dot{m}_i je hmotnostní tok iontů a v_i je jejich rychlost. Ze zákonů zachování energie získáme rychlost v_i jako

$$v_i = \sqrt{\frac{2qV_b}{M}}, \quad (1.6.8)$$

kde V_b je napětí přes které byl iont zrychlen a M je hmotnost iontu.

Hmotnostní tok iontů je popsán rovnicí:

$$\dot{m}_i = \frac{I_b M}{q}, \quad (1.6.9)$$

kde I_b je proud paprsku iontů. Dosazením obou rovnic dostáváme:

$$T = \sqrt{\frac{2M}{q}} I_b \sqrt{V_b}. \quad (1.6.10)$$

Z čehož nám vychází rovnost vztahů (1.6.6) a (1.6.10).

1.7 Iontové motory s ExB driftem

V této části se zaměřím na iontové motory s ExB driftem (Hallovské motory), rozdělení na základě designu a rozdílů, dle kterých operují. Rozeberu vývoj a použití.

Hallovské motory se začaly vyvíjet po experimentech v 50. letech minulého století, kdy bylo zjištěno, že lze vytvořit magnetické pole uvnitř plazmatu. Což mělo za následky zvětšení elektrického pole a vytvoření Hallova efektu ve zkříženém magnetickém a elektrickém poli přímo v plazmatu. Hallův efekt vedl k tomu, že se elektron nepohybuje přímo k anodě, ale obtáčí se okolo osy výbojové komory. To je zapříčiněno chováním elektronu v ExB poli a působícím Hallovým efektem, který působí proti síle, jež přitahuje elektrony k anodě. Tímto se značně zvýšila životnost elektronu, který byl schopen delší interakce s neutrálním palivem, což vede k jeho ionizaci. Toto vedlo k začlenění

Hallovských motorů do elektrických pohonů a následné implementaci do pohonu ve vesmíru.[22]

Před rozdělením různých typů Hallovských motorů si znovu objasníme jejich fungování. Hallovské motory fungují na principu, kdy se elektron rotující kolem osy výbojové komory střetává s molekulami paliva, ionty, stěnami komory a ostatními elektrony. Tímto vzniká plazma, ve kterém ionty takřka nereagují díky své hmotnosti na magnetické pole a jsou urychlovány elektrickým polem. Při tomto pohybu iontů je zachyceno určité množství elektronů, které neutralizují náboj. Tento tok vytváří iontový paprsek. Paprsek je neutralizovaný elektrony, a tak nevzniká limitace proudu iontového paprsku jako u mřížkových motorů, neboť nevzniká přemíra náboje na ústí motoru.[22]

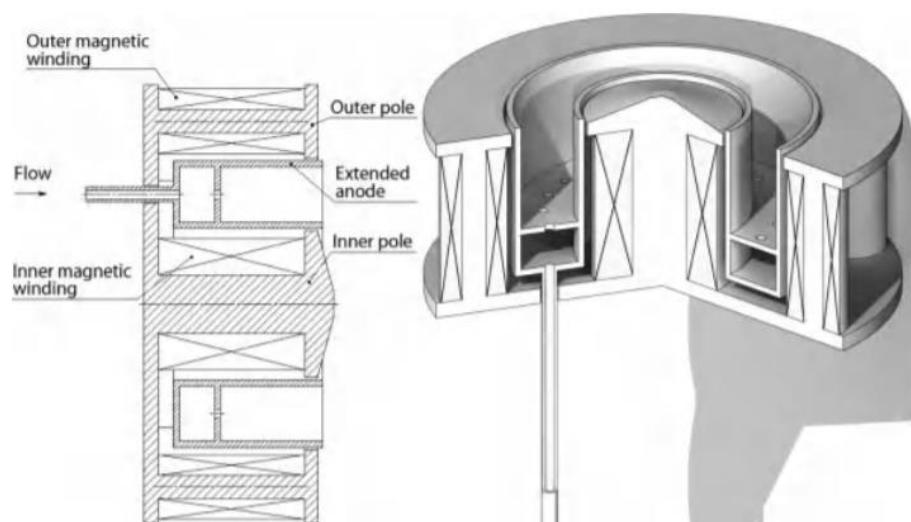
Motory s ExB driftem jsou rozděleny do 2 skupin. Tyto skupiny mají mnoho modifikací, které se liší jen v detailech, při kterých se zásadně nemění princip fungování.

1.7.1 Uzavřený drift („closed drift“)

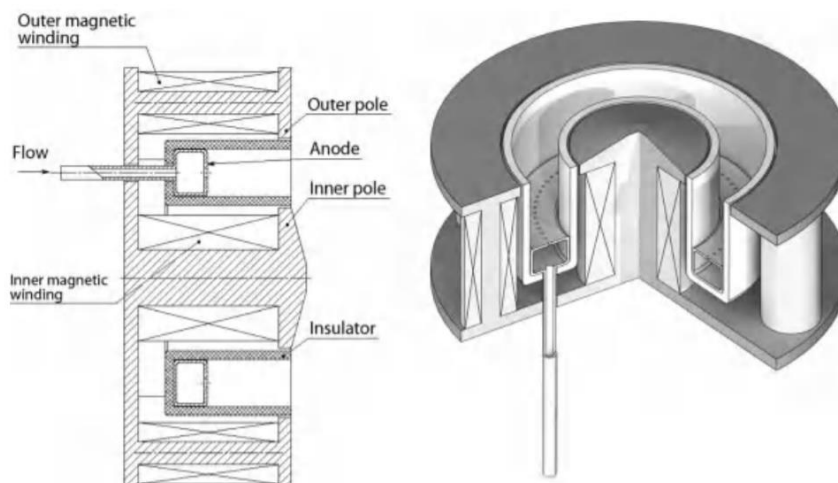
Motory s uzavřeným driftem jsou podskupinou Hallovských motorů s velkou účinností. Jejich vývoj započal v 60. letech minulého století. První satelit využívající uzavřený drift byl vypuštěn Rusy v roce 1972. Nyní se na oběžné dráze pohybuje více než 200 satelitů využívající tento princip.

Když pomínu princip fungování samotných Hallovských motorů, tak největší rozdíl u této skupiny je ten, že magnetické pole se skládá ze 2 částí (vnitřní a vnější), kdy magnetické pole sílí směrem k ústí výbojové komory.

Běžně je rozdělujeme na 2 typy: motory s magnetickou vrstvou (MCIS-magnetic layer ion source) a 2 modifikace motorů s anodovou vrstvou (ALIS-anode layer ion source, nebo také TAL-thruster with anode layer). Tyto modifikace se liší v umístění anody, kdy u první modifikace je umístěna uvnitř výbojové komory, zatímco u druhé anoda přečnává přes magnetické pole.[22]



Obr. 6 Model ALIS s modifikací, s kdy je vyvedena anoda mimo magnetické pole, což snižuje poškození magnetů. Převzato z [22].



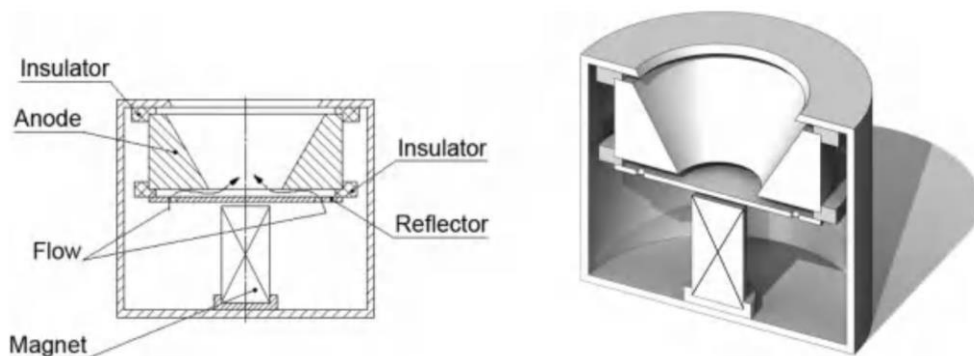
Obr. 7 Schema pro motor s uzavřeným driftem s magnetickou vrstvou (MCIS). Převzato z [22].

U MCIS je anoda izolována vůči výbojové komoře. Tvůrcem magnetického pole ve většině případů jsou cívky, u kterých lze měnit sílu magnetického pole oproti permanentním magnetům, u nichž je síla stálá. Může se také použít kombinace, kdy vnitřní magnetické pole je tvořeno permanentním magnetem a vnější cívkou.

1.7.2 End-Hall

Jedná se o druhou podskupinu, která má více typů než motory s uzavřeným driftem. Jako u předchozí verze se bavím o válcové výbojové komoře, odlišnost spočívá ve velikosti anody konického tvaru. Katoda dodávající elektrony je většinou ve formě žhavého drátu, například z wolframu, emitujícího elektrony. Používají se většinou permanentní magnety, které jsou umístěny uvnitř výbojové komory pod anodou. Síla magnetického pole je nejvyšší u magnetu a se vzrůstající vzdáleností slábne. Další rozdíl oproti motorům s uzavřeným driftem je v tom, že pole slábne směrem k ústí výbojové komory. Magnetický okruh se uzavírá přes schránku motoru, kde také dochází k magnetizaci elektronů. Vstup paliva do motoru je umístěn nad magnety. Jak ionizace, tak zachycení elektronů, probíhá nad úrovní magnetů. Poslední součást, kterou je katoda, je většinou vyvedena mimo tělo motoru.[22]

Design, který se stále používá pro End-Hall motory můžeme vidět na obr. 8.



Obr. 8 Běžný design end-Hall typů. Převzato z [22].

V tomto ani v dalších schématech neuvidíme ani katodu elektrické zapojení. Na obr. 8 vidíme anodu kónického tvaru. Anoda musí být odizolována od těla motoru, aby mohlo vzniknout elektrické pole. Tělo je vyrobeno z magneticky měkkého materiálu (tzn. materiál, který po vyjmutí z magnetického pole nezůstává zmagnetizován). Reflektor slouží jako distributor paliva a zároveň plní funkci ochrany magnetu před ionty. Magnet umístěn v ose symetrie motoru musí odolat vysokým teplotám, proto se nejčastěji používají magnety AlNiCo. Tyto magnety jsou slitinou hliníku, niklu a kobaltu. Mezi jejich přednosti patří možnost použití až do teploty 525 °C, tudíž jsou ideální pro použití uvnitř motoru. Také lze použít SmCo magnety.[22]

2 Praktická část

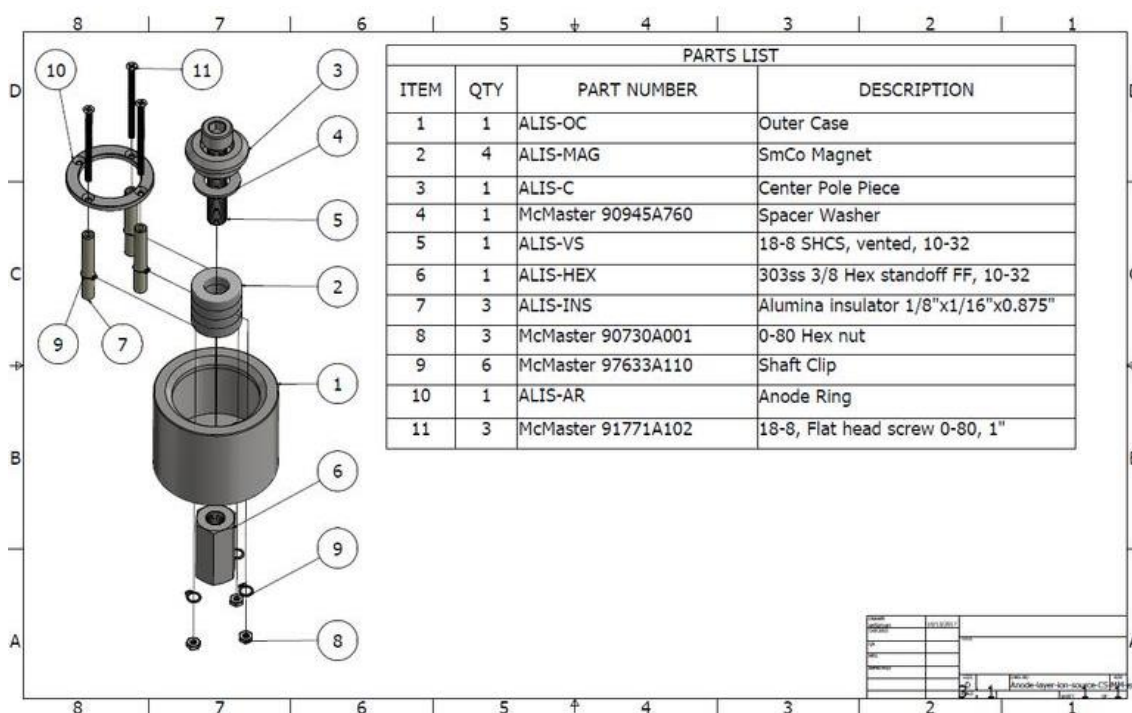
V této části se budu zabývat návrhem motoru. Konkrétně modelem typu s uzavřeným driftem ALIS. Design modelu je inspirován americkým patentem [16], který je určen pro vstřikování fokusovaného iontového svazku do tzv. fuzoru (jednoduchého zařízení pro jadernou fúzi s energetickým výtěžkem $\ll 1$). Patentový model pracuje se zbytkovým plynem ve vakuové komoře, takže nevyžaduje vlastní přívod pracovního plynu, byť je k tomuto přívodu přizpůsoben. [17]

Ačkoliv patentovaný model je funkční a používaný, je zde několik detailů, které konstruktérsky nejsou „dotaženy“ do konce.

Mezi hlavní nevýhody patří:

1. Problematická montáž, která vyplývá z velikosti modelu.
2. Problémové uchycení a usazení anody a přebytek vyčnívajících kontaktních ploch anody z těla motoru, na které je přivedeno vysoké napětí.
3. Problematické zapojení plynu a elektřiny.
4. Zbytečný počet otvorů v těle motoru.

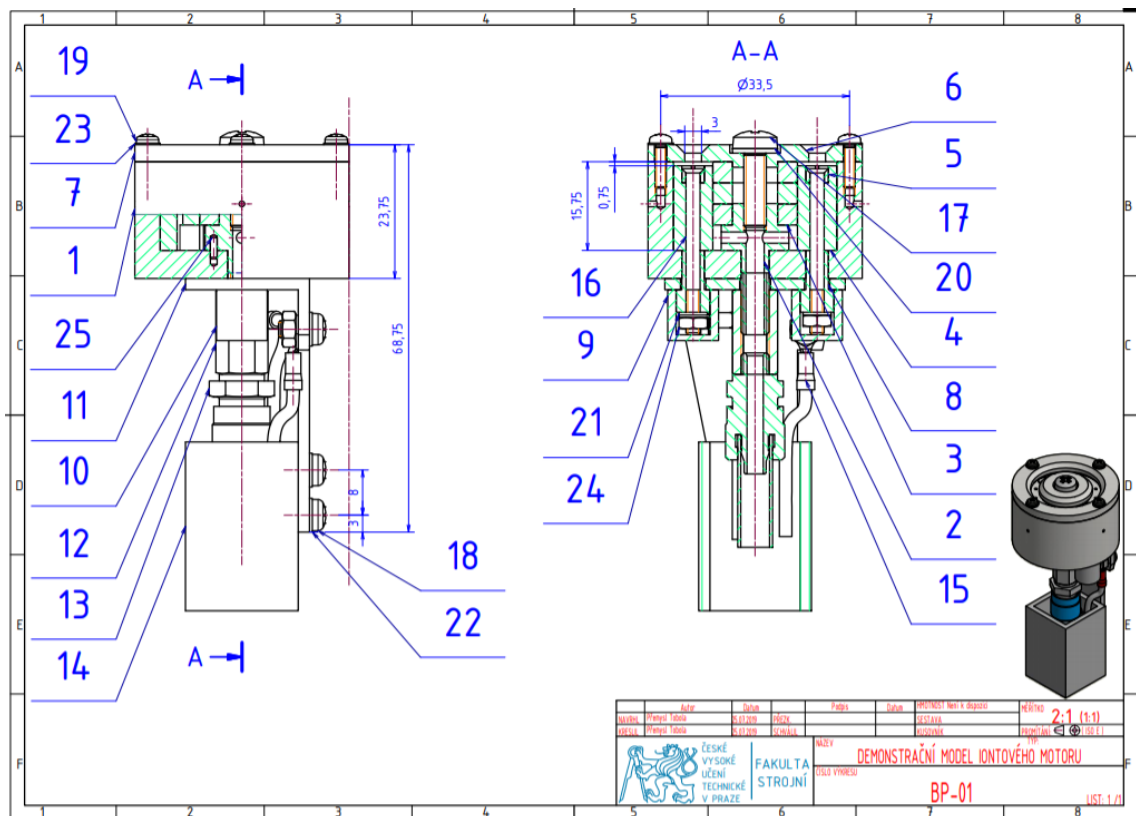
Z těchto důvodů se v této části budu zabývat zdokonalením modelu. Hlavním cílem této části je navržení vylepšeného modelu, ať ze stránky designu nebo fyzikálních vlastností.



Obr. 9 Sestavový výkres amerického patentu US 10,170,270.[17]

Na obr. 9 vidíme sestavový výkres modelu, od kterého se bude odvíjet tato praktická část.

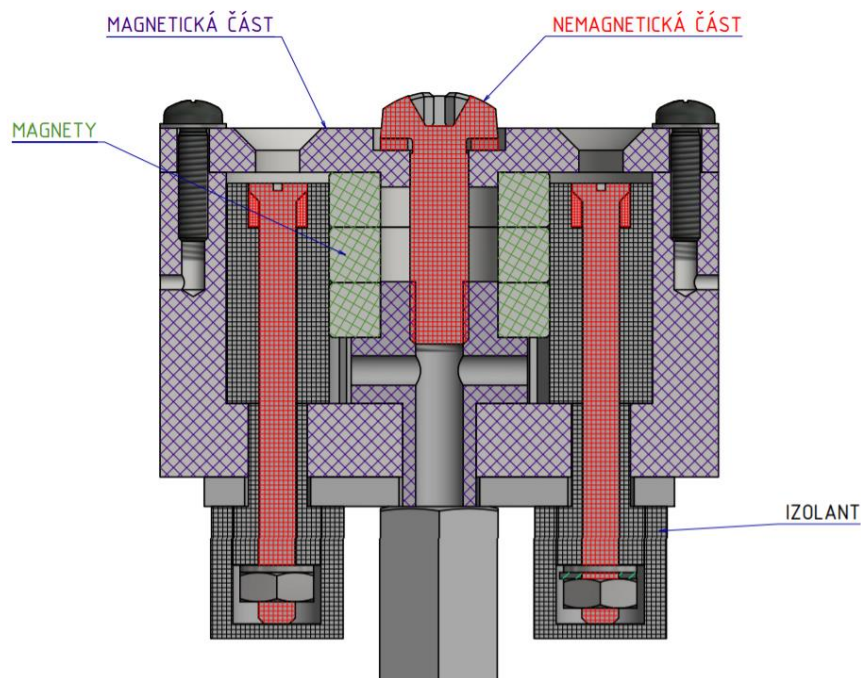
Model, jež jsem vypracoval, navazuje na tento patent a snaží se o zlepšení aplikace. Jedná se o konstrukční návrh, proto se v této části neobjeví moc výpočtů, až na základní předpoklady nutné pro fungování motoru. Jako první si však musím definovat priority této části. Budu se zabývat výpočtem sil působící na elektron a ionty, neboť potřebuji dosáhnout magnetického pole, které udrží elektrony. Naopak pole musí být natolik slabé, aby neovlivnilo průchod iontů. Dále předložím změny v geometrii oproti patentovému modelu a jejich možných důsledků na fungování. U každé součásti se zaměřím na přinášející zlepšení, možnou problematiku a způsob výroby. Veškerá výkresová dokumentace i s kusovníkem, je přiložená separátně k této práci. V práci bude jen základní sestavový výkres. Jelikož je model pouze demonstrační, tak neberu v ohledu masovou výrobu a dlouhé fungování. Hlavně ze stran materiálu by mohl být problém v dlouhodobém chodu motoru. Pokud by se uvažovalo o možnosti zavedení do provozu, měly by se udělat patřičné změny ve výběru materiálu.



Obr. 10 Sestavový výkres namodelovaného modelu.

2.1 Volba materiálů

Tato volba je důležitá z hlediska chování magnetického a elektrického pole. Jelikož mám model bez katody, potřebuji elektricky vodivé součásti. Zároveň je nutné mít izolanty pro umístění anody v těle vybíjecí komory, aniž by hrozil vznik výboje jinde, než by měl probíhat. Zvětšení rozměrů je z důvodů pasování demonstračního modelu na přírubu ISO KF40. Volbu materiálu pro šrouby nebudu rozebírat v této kapitole, ale v kapitole zaměřené na volbu šroubů.



Obr. 11 Rozdělení odlišných materiálů motorů, které jsou nutné pro funkčnost modelu.

Na obr. 11 vidíme výsledné rozdělení materiálů, tak aby byla zajištěna funkčnost demonstračního modelu.

2.1.1 Elektrické pole

Hlavními složkami pro elektrické pole jsou 2 části o různých potenciálech. To je anoda a tělo motoru (zbylá vodivá část motoru).

2.1.2 Tělo motoru

Zvolený materiál, z něhož se skládá tělo musí být pro správnou funkčnost z vodivého a magneticky měkkého materiálu. Vodivost vyplývá z možnosti nastavit anodu na jeden potenciál a zbytek těla na potenciál druhý. Tímto můžeme zvýšit efektivitu elektrického pole. Proto je vhodné mít součásti z vodivého materiálu, aby přes množství spojů a kontaktů byly stále na stejném potenciálu. Tento celek potom funguje jako katoda. Magnetická měkkost vyplývá z funkčnosti magnetického pole, kde chceme dosáhnout jeho uzavřené smyčky. Jelikož většina kovů je elektricky vodivých, tak vybírám na základě feromagnetismu. Volím ocel 17 042, též AISI 440B, což je nerezová ocel, ale magnetická, tudíž dostávám korozivzdorné a odolnostní vlastnosti nerez oceli bez ztráty schopnosti magnetizace.

2.1.3 Anoda

Anoda z podstaty věci musí být vodivá. Naproti tomu by neměla ovlivňovat magnetické pole. Kdybych docílil magnetického toku mezi tělem motoru a anodou, nedostal bych ExB drift. Také musím brát v potaz tepelnou odolnost a stálost. Jako varianty se jeví nerez oceli a dural. Oba materiály jsou elektricky vodivé a až na výjimky nereagují na magnetické pole. Z těchto součástí volím nerez ocel s označením AISI 304, která se dobře obrábí a často se používá. Nutno podotknout, že u zapojení anody šrouby, bych měl použít nezmagnetizovatelné šrouby, abych se vyhnul nestálému magnetickému poli.

2.1.4 Magnetické pole

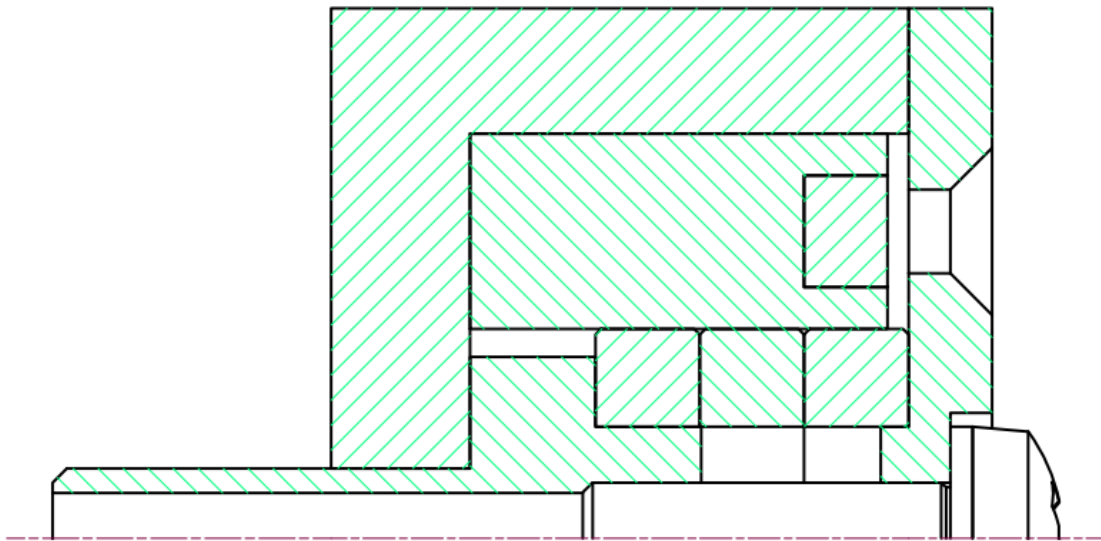
Jako zdroj magnetického pole mohou posloužit buďto SmCo nebo AlNiCo magnety. Oba dva typy magnetů jsou tepelně odolnější. Volím samarium-kobaltové (SmCo) z důvodu lepší dostupnosti v daných rozměrech.

2.1.5 Izolanty

Z důvodu problematictější výroby než u ostatních součástí potřebuji materiál dobře obrobitelný, tepelně odolný, který bude mít dobré elektroizolační vlastnosti nezávislé na teplotě. Byť stojí za zmínění PEEK (polyetereterkon), tak z důvodu opracovatelnosti, ceny, dostupnosti a srovnatelnými vlastnostmi volím PTFE (polytetrafluorethylen), také známý, jako teflon, který splňuje veškeré podmínky za nižší náklady.

2.2 Simulace polí

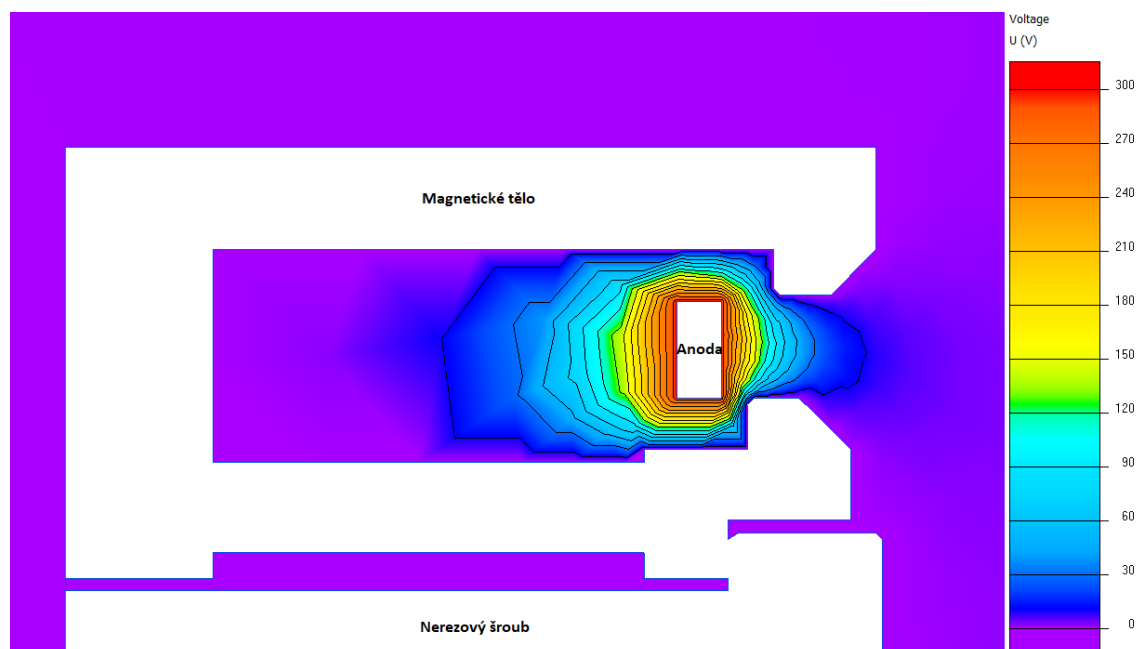
Je potřebné zjistit zda pole mají základní předpoklady k tomu, aby motor fungoval. Tímto se dostávám k simulacím elektrického pole a pole magnetického. Simulace jsem provedl i u patentového modelu, abych mohl porovnat rozdílnost polí. Tato rozdílnost polí může způsobovat případné odlišnosti ve fungování. Obě pole u obou motorů jsou nasimulovány za stejných podmínek, a to ve vakuu a ne v přítomnosti plazmatu. Pole bude rozdílné v reakci na plazmat díky jeho specifickým vlastnostem.



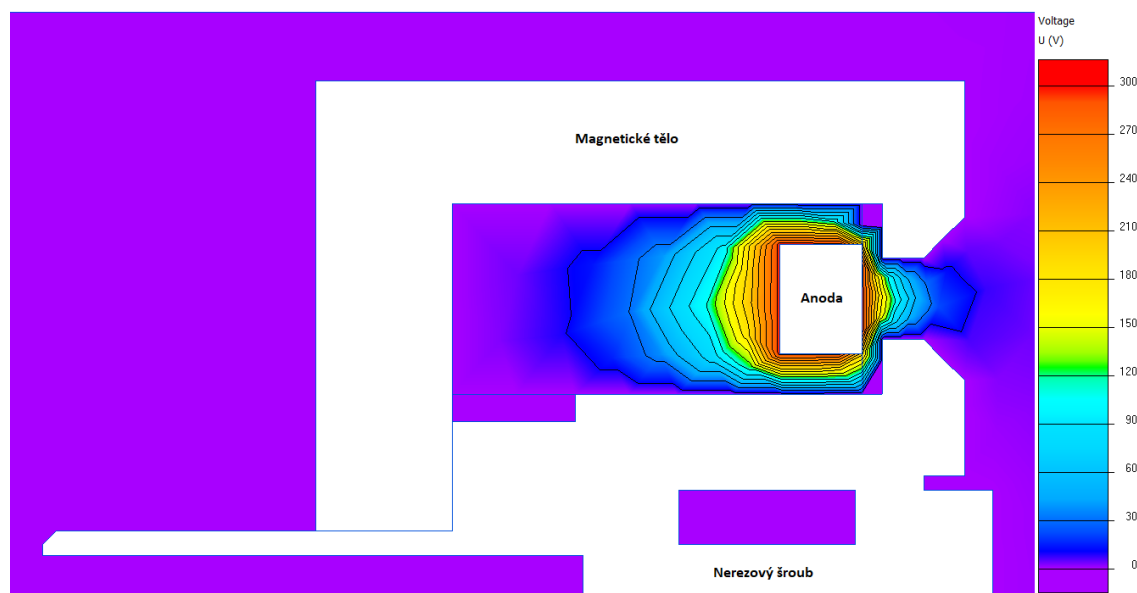
Obr. 12 Součásti, které budou simulovány.

2.2.1 Elektrické pole

Hlavní účel elektrického pole je urychlování iontů. Proto nás zajímá hlavně jeho směr, který by měl být přibližně kolmý na magnetický tok, a zároveň rovnoběžný s osou motoru.



Obr. 13 Simulace elektrického pole patentového modelu bez přítomnosti plazmatu



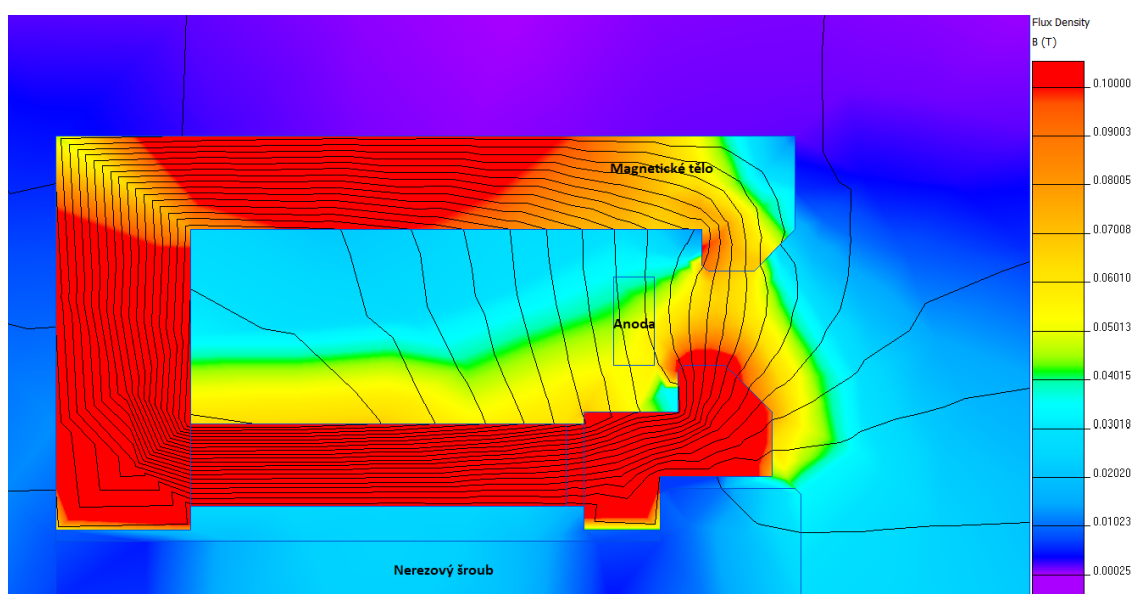
Obr. 14 Simulace elektrického pole navrženého modelu bez přítomnosti plazmatu

Na obr. 13 a obr.14 je vidět porovnání elektrického pole obou modelů. Vidíme obdobné chování pole, ačkoli u navrženého modelu je rovnoběžnější tvar potenciálních hranic

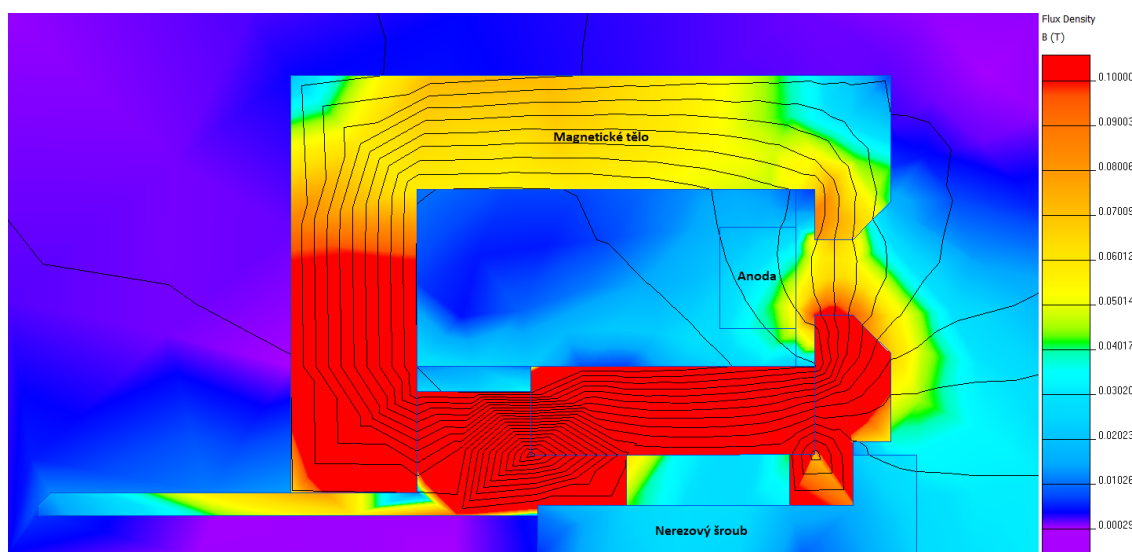
pole. To může být způsobeno rozšířením anody na šířku 4 mm a rozšířením mezery mezi pólovými nástavci. Na simulaci také lze vidět vliv rozdílného postavení pólů proti sobě. U navrženého modelu jsou pólové nástavce v jedné rovině, za to u patentového modelu jsou roviny pólových nástavců oproti sobě posunuty. To je zapříčiněno průmyslovým zaměřením a snahou docílit koncentrovaného paprsku iontů.

2.2.2 Magnetické pole

U magnetického pole mě bude zajímat směr a hodnota magnetické indukce. Tato hodnota je potřebná k výpočtu pohybu částic v magnetickém poli, potažmo v motoru.



Obr. 15 Simulace magnetického pole patentového modelu bez přítomnosti plazmatu



Obr. 16 Simulace magnetického pole navrženého modelu bez přítomnosti plazmatu

Na obr. 15 a obr.16 lze vidět simulaci magnetického pole obou srovnávaných modelů. Oba modely mají obdobné hodnoty u pólových nástavců, kdy hodnoty nejsou menší než 0,04 T. Z porovnání vidím, že magnetické pole patentového modelu má lepší tvar siločár, které se víceméně nikde nevracejí a vracejí se přes pólové nástavce. Naproti tomu u navrženého modelu značná část siločár se v čepu a vnitřním pólovém nástavci obtáčí a vrací zpět k magnetu. To značně oslabuje pole. Avšak toto zkratování je dáno na úkor lepšího průchodu plynu přímo k anodě. Při demonstračním užití tento zkrat nevadí, neboť magnety vytváří dostatečně silné pole, tak aby tyto zkraty kompenzovalo. Tento zkrat by se dal odstranit lepším uchycením nerezového šroubu nebo vložením mezikusu z paramagnetického materiálu mezi pólový nástavec a čep. To by však mohlo vést k příliš silnému magnetickému poli, které by ovlivnilo i ionty. Proto by byla asi nutná modifikace magnetů, například výměna jednoho z magnetů za prstenec z magneticky měkkého materiálu.

2.3 Pohyb elektronů a iontů v magnetickém poli

Magnetické pole by mělo být silné natolik, aby se elektrony pohybovaly v mnohem menších (o jeden řád) kružnicích než je rozměr mezi pólovými nástavci, řádově tedy desetiny milimetru. To zaručí schopnost elektronů obtáčet se kolem osy dostatečnou dobu, aby plyn ionizovaly. U iontů by naproti tomu neměl být pohyb příliš ovlivněn, tak aby se zaručila přibližná kolmost paprsku na magnetickou indukci.

K těmto výpočtům budu potřebovat následující parametry. Kinetickou energii a hmotnost elektronu a iontu xenonů, který je referenčním prvkem. Hodnotu magnetické indukce převezmu ze simulace (obr. 16).

$$B = 0,04 T, E_e \approx 1 - 10 eV, E_i \approx 300 eV, m_e = 9,109 \times 10^{-31} kg, \\ m_i = 2,180 \times 10^{-25} kg$$

Uvedené hodnoty jsou zde zaokrouhleny, ale výpočet byl proveden s přesnými čísly.

Budu vycházet ze základní rovnice pro pohyb nabitě částice v magnetickém poli

$$qvB = \frac{mv^2}{r}, \quad (2.3.1)$$

k té potřebuji znát rychlost elektronů, která vychází z kinetické energie.

$$E = \frac{1}{2}mv^2, \quad (2.3.2)$$

po úpravě dostáváme vzorec na výpočet poloměru kruhového pohybu částic

$$r = \frac{\sqrt{mE}}{\sqrt{2}qB}, \quad (2.3.3)$$

Dosazením hodnot se dostáváme na rozměry poloměru:

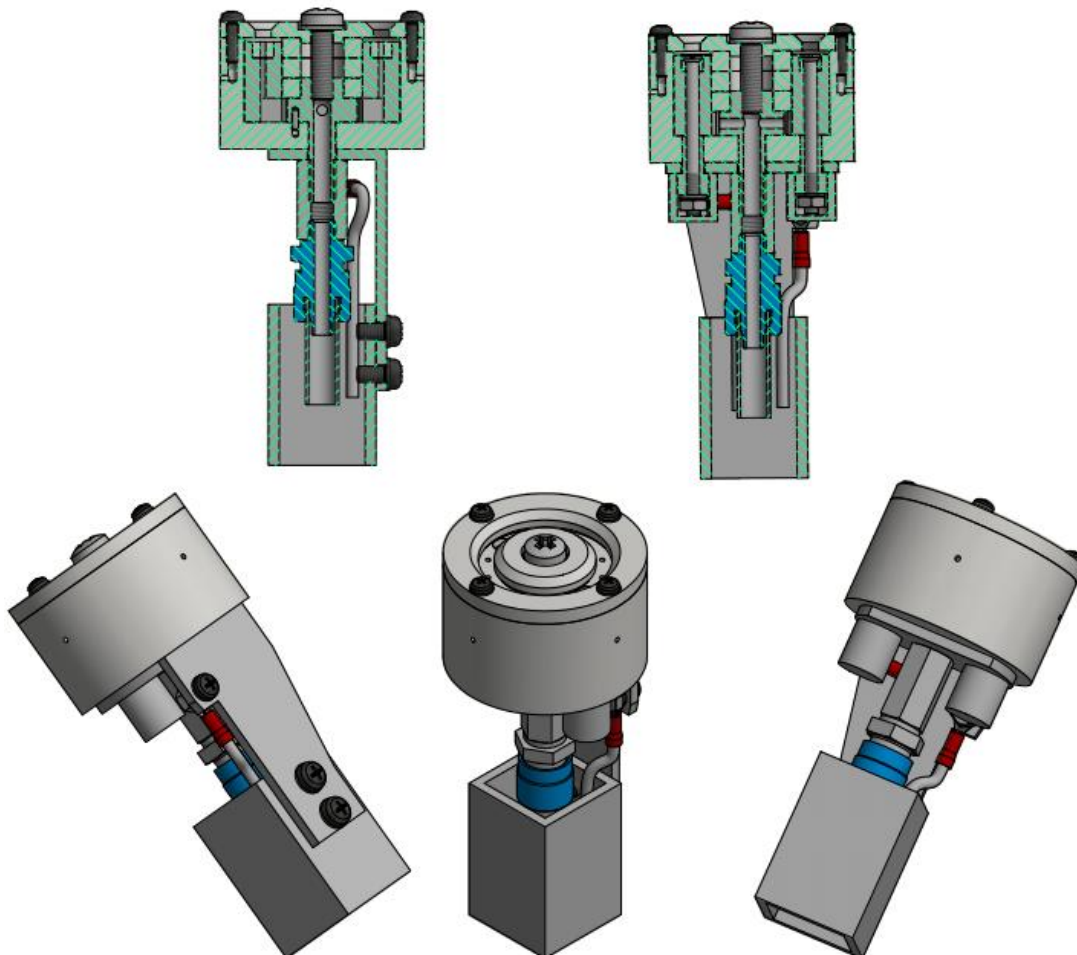
$$r_e \approx (13,333 \div 4,215) \times 10^{-5} m,$$

$$r_i \approx 35,717 \times 10^{-2} m.$$

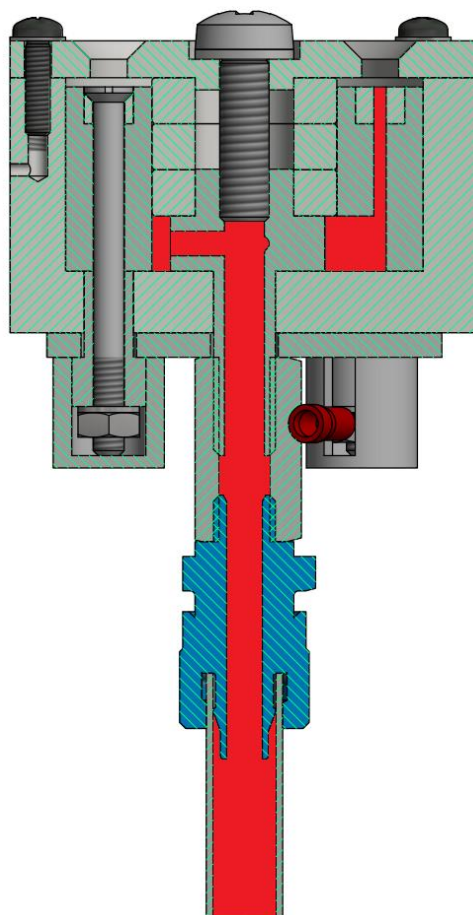
Z výpočtu vyplývá přibližná velikost kružnice, na které by se elektrony a ionty pohybovaly, kdyby byly jen v magnetickém poli. Jelikož jsou ionty i elektrony ovlivněny elektrickým polem, jsou jejich dráhy cyklotronní. Výsledky pro pohyb elektronu odpovídají podmínkám, neboť jejich poloměr rotace je až o dva řády menší než vzdálenost mezi pólovými nástavci, která je 3 mm. Naproti tomu ionty mají o dva řády vyšší poloměr rotace než mezera mezi póly. Toto splňuje základní předpoklady pro funkčnost motoru.

2.4 Konstrukční součásti

Předpokladem návrhu bylo zlepšení funkčnosti a stabilního zapojení. Tyto předpoklady by měly cílit hlavně na zlepšení proudění paliva a bezpečného a jednoduchého zapojení.



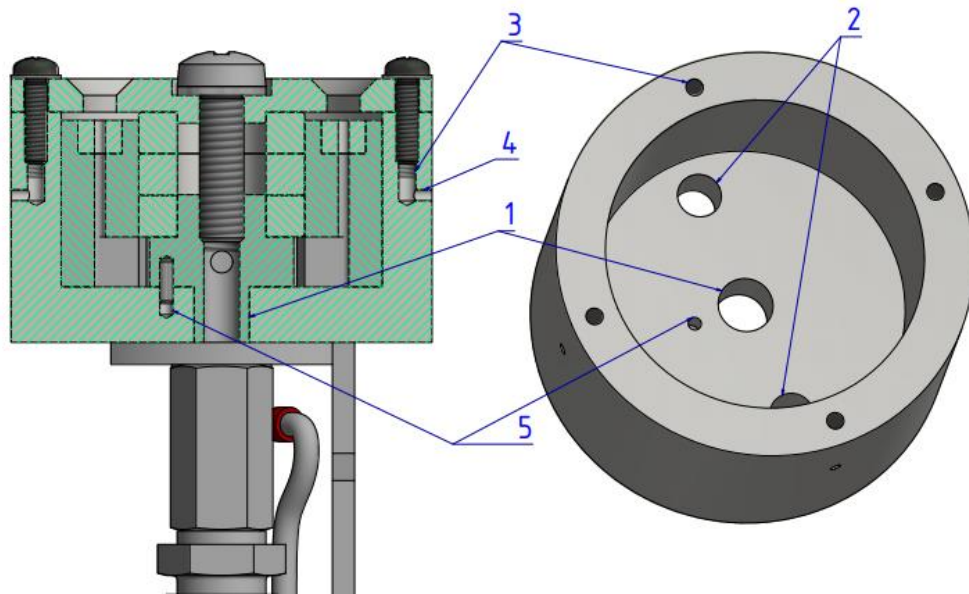
Obr. 17 Navržený model Hallovského motoru.



Obr. 18 Průchod plynu skrz motor k anodě.

2.4.1 Vnitřní komora

Tato součást je namodelována tak, aby se skrz ní daly provést kontakty z anody, které jsou zaizolovány teflonem. Komora tvoří největší část těla motoru, proto musí být magnetická a vodivá. Změna oproti patentu nastává v rozdělení stávající komory na 2 části k zajištění smontovatelnosti.

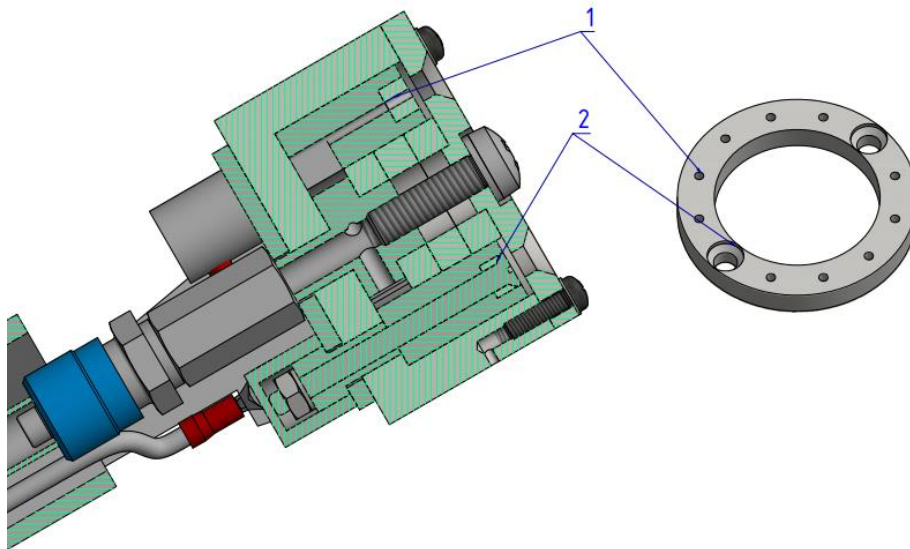


Obr. 19 Vnitřní komora. 1- otvor pro průchod čepu, 2- otvory pro provlečení šroubů anody, 3- otvory pro přichycení víka, 4- odvětrávací díry, 5- otvor pro zajišťovací kolík.

Byť se řídím stávajícím designem patentu, tak jsem navrhl pouze 2 průvlečné šrouby, které slouží pro uchycení a možnost propojení elektrického zdroje s anodou. Ke komoře je přiděláno víko, které je uchyceno pomocí 4 šroubů. Otvory pro šrouby jsou problematické, neboť v nich zůstává vzduchová kapsa. Ta se v prostředí okolo plazmatu a elektromagnetického pole může chovat nepředvídatelně. Proto je každá z děr z vnějšku odvrtná, aby se zajistil stejný tlak na celém motoru.

2.4.2 Anoda

Anoda je vyrobená z nerez oceli, která zaručuje dostatečné podmínky pro demonstrační model. Z důvodu malých rozměrů jsem zvětšil šířku a výšku anody pro lepší zacházení.

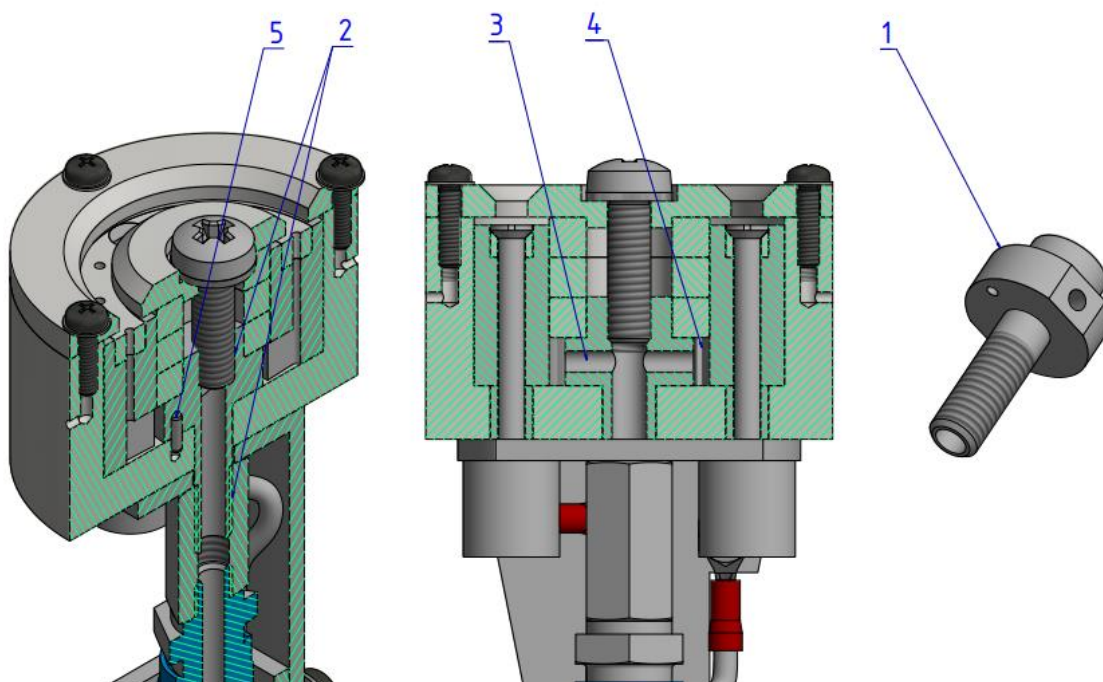


Obr. 20 Detail anody. 1- otvory pro průchod plynu, 2- otvor pro uchycení šrouby.

Otvory vycentrované do středu mezikruží dosedají na vnitřní izolaci motoru (obr.20). Otvory jsou umístěny kolineárně na díry v izolaci, tak aby plyn mohl volně proudit přímo k anodě, čímž by se měla zvýšit efektivita a usměrnit oblast, kde dochází k ionizaci a urychlení. Toto by také mělo vést k redukci tepelného namáhání celého motoru. Anoda je vložena do prstencového vybrání ve vnitřní izolaci a je dotažena dvěma nerezovými šrouby, které prochází skrz vnitřní izolaci a vnější izolaci v díře na dně komory, aby se zamezilo kontaktu mezi anodou a tělem. Na jeden z těchto šroubů je přivedeno elektrickou koncovkou napětí. Šroub poté dotáhneme maticí a ta skrze vnější izolaci dotlačí anodu a zamezí jejímu pohybu.

2.4.3 Čep

Vnitřní čep zasazený uvnitř komory má 2 hlavní funkce. Distribuovat plyn a uchytit celý motor ke komponentě (v mém návrhu k nástavci), která zajistí dobré manipulování s celou sestavou motoru. Touto součástí se dosti odlišuje způsob distribuce plynu, která v případě patentu byla myšlena pro naplnění celé komory plynem. Distribuci plynu v demonstračním modelu lze vidět na obr. 18.



Obr. 21 Detail čepu a jeho zapojení. 1- čep, 2- závity pro uchycení, 3- průchozí otvor pro vedení plynu, 4- komora pro průchod plynu k izolaci, 5- uchycení kolíku.

Můj návrh předpokládá vedení plynu přímo maticí, která spojuje konzoli pro přívod plynu přímo s čepem. Čep má vyvrtanou díru po celé délce osy, přičemž na jedné straně je závit vnitřní pro šroub uchycující pólový nástavec a na druhé závit vnější pro matici. Průchozí otvor je zvolen ze stejného důvodu jako u vnitřní komory, tímto nemusím řešit problematiku uzavřené vzduchové kapsy. Mohlo by se namítnout, že nyní může plyn volně unikat přes závity. To se stát může, ale v důsledku přitažlivosti to bude jen velmi malé množství. Kolmě k ose je vyvrtán průchozí otvor, který rozvádí plyn pod izolaci. Návrh tohoto prvku je náročnější pro obrobitelnost, proto jsem zvýšil minimum materiálu v okolí otvorů alespoň nad 1 mm. Pro lepší vystředění kolmé díry jsem navrhl vyfrezovanou plošku kolmou na otvor, která by měla zamezit vyosení při vrtání. Kvůli možné rotaci čepu uvnitř komory, a s tím spojeným komplikovaným přišroubováním

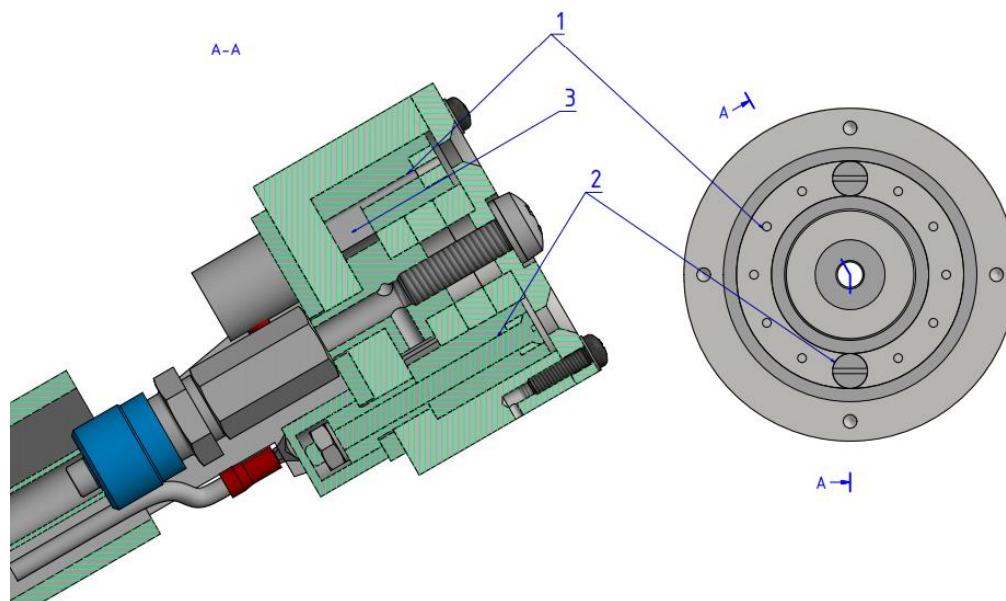
pólového nástavce, je čep vůči axiálnímu otáčení v komoře zajištěn kolíkem. Ten vymezí průchod plynu v místě, kde jsou v izolaci umístěny šrouby, což pomůže vyrovnat nerovnoměrnost průtoku plynu, kterou tyto šrouby způsobují.

2.4.4 Izolace

Izolaci v motoru máme rozdělenou na vnitřní a vnější část kvůli jednoduššímu vyrobení součástí. Tento prvek motoru je řešen jinou formou než u patentového modelu, kde anoda jakoby stojí na trubkovité izolaci. Tento díl je vytvořen hlavně kvůli jednoduchosti a zároveň přesnosti s jakou je vše smontováno. Obě části jsou vyrobeny ze stejného materiálu, tím je teflon. Teplotní možnosti teflonu nejsou překážkou, neboť magnety samotné nevydrží o moc vyšší teplotu.

Vnitřní izolace

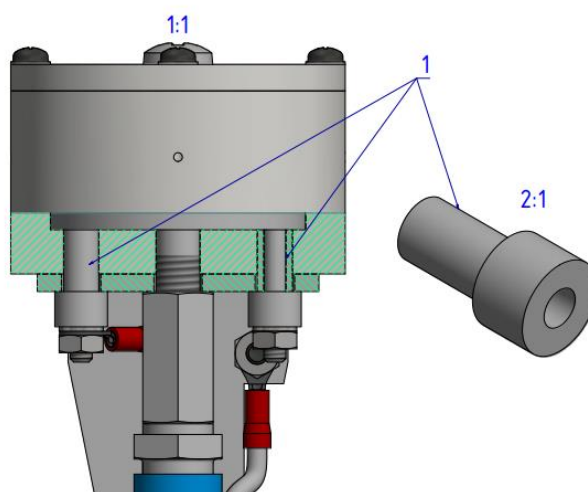
Vnitřní izolace má za úkol uchycení anody, dodání plynu a vycentrování magnetů.



Obr. 22 Detail vnitřní izolace vložené uvnitř komory, 1- otvory pro průchod plynu k anodě, 2- otvor pro přichycení anody, 3- kanálek pro přívod plynu k otvorům.

Model je zvláště náročný na obrobení z důvodu složité geometrie. Obrobek se musí soustružit, frézovat a vrtat. Komplikovanost vychází z dodávání plynu. Plyn je dodáván přes kanálky k otvorům v izolaci, které vedou přímo pod anodu (obr. 18). Pro anodu je vybráno mezikruží, do kterého anoda dosedne.

Vnější izolace

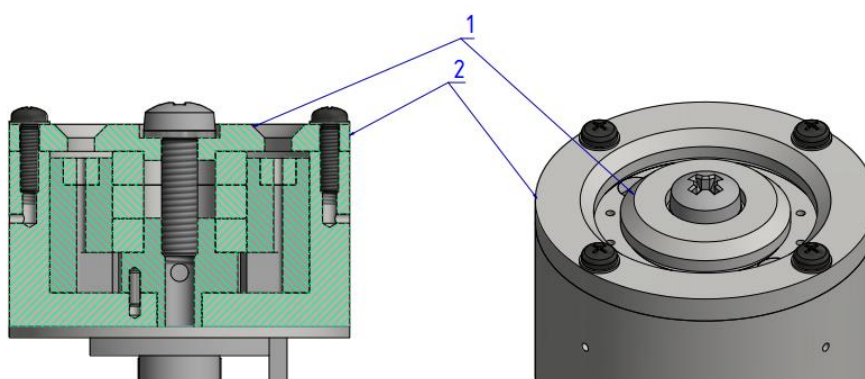


Obr. 23 1- vnější izolace a její poloha v modelu.

Z důvodu přitlačení anody a zamezení jejího pohybu jsem udělal prostou trubkovitou izolaci s osazením, která je provlečena skrze dno komory, o které se poté vzepře osazení.

2.4.5 Pólové nástavce

Tyto nástavce slouží k vytvoření magnetického pole kolmého vůči poli elektrickému. Skládá se z víka a ze středového pólového nástavce. U této skupiny si změnou geometrie a postavení vůči sobě můžeme manipulovat se směrem iontového paprsku. Tudíž můžeme nasměrovat paprsek tak, aby se střetával v bodě ležícího na ose motoru právě dle nastavení geometrie.



Obr. 24 Detail pólových nástavců, 1- vnitřní pólový nástavec, 2- víko.

Středový(vnitřní) pólový nástavec

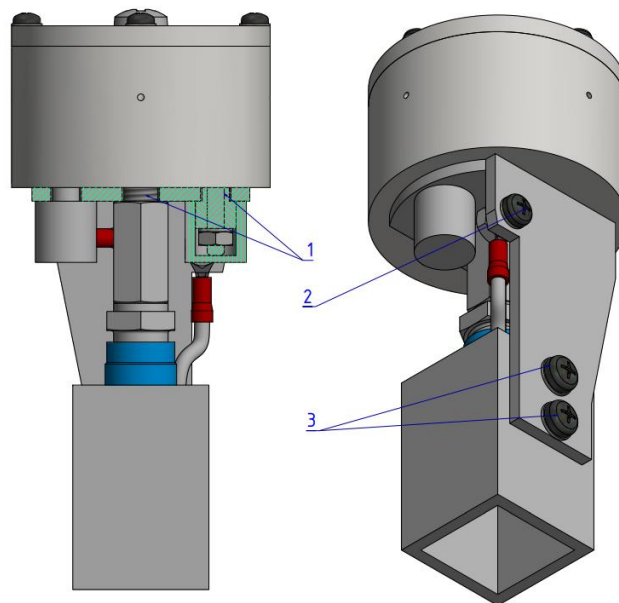
Vnitřní nástavec (obr. 24), který se sešroubuje s čepem, je vycentrován magnetem a jeho hlavní funkce je propojení magnetické smyčky mezi víkem a sebou. Tím se vytváří magnetické pole, které zachytává elektrony. To je zřejmé z obr. 16.

Víko

Víko (obr. 24) přibylo od patentového modelu z důvodu smontovatelnosti a možnosti modifikace. Je druhý z pólových nástavců. Díky jeho lehkému nahrazení, oproti patentovému modelu, jde modifikovat směr paprsku iontů.

2.4.6 Nástavec

Celkový motor se musí nějak uchytit. Pro zajištění pevnosti a chlazení motoru jsem použil plech tl. 2 mm.



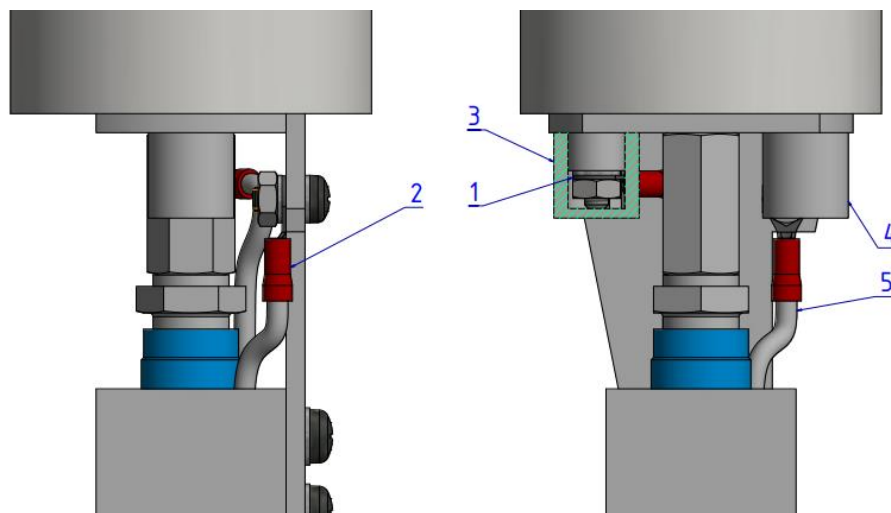
Obr. 25 Detail nástavce a jeho uchycení, 1- otvory určující polohu nástavce, 2- uchycení uzemňovacího kabelu, 3- uchycení k externí konstrukci.

Styčná plocha je velká natolik, aby pomáhala odvádět teplo a přitom nikde nepřekážela. Plechový nástavec je vycentrováný otvory ve dně komory. Je uchycen maticí a zajištěn proti rotaci vnější izolací, která je skrze otvory pro anodu provlečená (obr. 25). Všechny součásti jsou vodivé a v přímém styku, kromě anody, která má separátní kabel. Proto je k násadě přišroubován (obr. 25) uzemňovací kabel nebo kabel s jiným potenciálem

v závislosti na poli, které chceme vytvořit. Tímto zajistíme stejný potenciál na celém těle motoru. Nástavec se dá připevnit na jekl, trubku nebo jakoukoliv konstrukci k tomu upravenou. K tomuto slouží dvě díry pro šrouby M3 na konci nástavce (viz. Obr). Ve výkresové dokumentaci je označen jekl 20x2 mm, na který je i nástavec vycentrován tak, aby osa motoru ležela v podélné ose jeklu. Tento jekl jsem zvolil z důvodu normalizovaného konstrukčního prvku, jehož rozměry nejsou příliš velké a zároveň jehož tloušťka je dostatečná pro závit M3.

2.5 Elektrická kabeláž

Elektrické pole je tvořeno dvěma potenciály. Jak již bylo zmíněno, je zde okruh těla, na které je přiveden potenciál země a anoda, na kterou se přivádí druhý potenciál.



Obr. 26 Detail zapojení elektrických rozvodů, 1- přichycení kontaktu pro 300 V, 2- kontakt pro uzemnění, 3- ochrana kontaktu s 300 V, 4- ochrana vyčnívajícího kusu šroubu s potenciálem 300 V, 5- kabel o ploše $S=4 \text{ mm}^2$.

Jak lze vidět na obr. 26, kontakty jsou přichyceny přišroubováním. Dráty (obr. 26-5) jsou navrženy s průřezem $S = 4 \text{ mm}^2$. Mé simulace počítají s hodnotami 0 V na těle motoru a 300 V na anodě. Jelikož jsou vzdálenosti mezi kontakty malé, rozhodl jsem se pro jejich zakrytí zaslepovacími hlavami (obr. 26-4), které je možno vyrobit na 3D tiskárně. Pro kontakt uzemnění (obr. 26-2) považuji zakrytování za zbytečné, neboť celý motor, kromě anody, je na jednom potenciálu. Nastavení potenciálů lze měnit zdrojem napětí. Tento zdroj zde nebude rozebrán.

2.6 Plynová konzole

Pro zavedení plynu do motoru jsem zvolil rychlospojku pro šroubení s převlečnou maticí CK-M5-PK-4. Ta navazuje na matici, která přitahuje čep k motoru. Na tuto rychlospojku se poté přirazí plynová hadice o průměru 4 mm přímo ze zdroje plynu. Zdroj plynu zde není obsažen.

Šroubení s převlečnou maticí CK
technické údaje

Šroubení s převlečnou maticí CK
vnější závit s těsnícím kroužkem

materiál:
závit M: ocel, hliník
závit G: hliník, modře eloxovaný
prostě mědi a PTFE

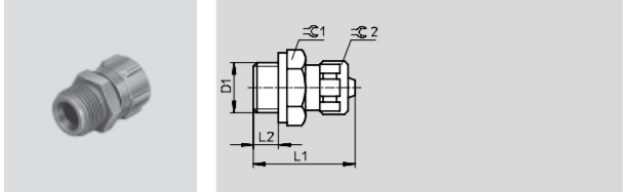
certifikát: Germanischer Lloyd

Šroubení s převlečnou maticí CK...-KU
vnější závit s vyhlisovanou těsnící hranou

materiál:
polyacetal
prostě mědi a PTFE
odpovídá RoHS

rozsah tlaku: 0 ... 10 barů
rozsah pracovních teplot:
-10 ... +60 °C

certifikát: Germanischer Lloyd



Rozměry a údaje pro objednávky									
připojení	jmenovitá světlost [mm]	hadice s vnitřním Ø	L1	L2	±G	±G1	č. dílu	typ	PE*
z hliníku									
M5	2,0	3	19,3	3,8	7	8	3561	CK-M5-PK-3	10
	2,9	4	21,5	3,8	10	-	3562	CK-M5-PK-4	10

Obr. 27 CK rychlospojka od společnosti Festo. [15]

2.7 Návrh šroubů

Šrouby pro uchycení anody jsem navrhl nerezové, tak aby byly konzistentní s materiálem anody, o velikosti M2,5x30. Tento rozměr v nerez oceli je zcela atypický, proto jej bude nutné vyrobit. To nám umožní i úpravu šroubu, tak aby nezasahoval hlavičkou šroubu do izolace. Výkres šroubu nalezneme v příloze.

Na připevnění vnitřního pólového nástavce jsem použil nerezový šroub M4x14 normy DIN 7985 obr. 28. Nerezový šroub je zapotřebí k zamezení zkratování magnetického pole skrz šroub (obr. 16). Zbylé šrouby jsem navrhl v různých velikostech, ale ve stejné normě DIN 7985 obr. 28.

4.8 / 5.8

**Cross recessed pan head
machine screws, steel
type H (Phillips)**



ISO 7045 / DIN 7985

Zinc plated

d	M 2		M 2,5		M 3		M 4	
D	4		5		6 ISO 5.8		8	
k	1,6		2 ISO 2.1		2,4		3,1	
m	2,5		2,7		3,1		4,6	
driver size	1		1		1		2	
L quantity	100	1000+	100	1000+	100	1000+	100	1000+
4	4.-	2.30	4.-	2.-	4.-	2.20	8.90	6.50
5	4.-	2.30	4.-	2.10	4.-	2.20	5.-	3.80
6	4.-	2.90	4.-	2.10	4.-	2.20	4.50	2.90
8	4.-	2.90	4.-	2.20	4.-	2.20	4.50	2.90
10	4.-	3.-	4.-	2.30	4.-	2.30	4.50	2.90
12	4.50	3.10	4.-	2.50	4.-	2.40	4.70	3.10
14			5.-	3.-	4.50	2.50	6.-	4.10

Obr. 28 Navržené šrouby normy DIN 7985. Převzato z [23].

Pro uchycení víka jsem navrhl šrouby M2x8. Jelikož na ně nepůsobí velká síla, velikost M2 není problematická, i když představuje vyšší náročnost na smontovatelnost. Volba materiálu pro tyto prvky není až tak důležitá, jelikož jejich rozměr je natolik malý, že neovlivňuje funkčnost magnetického pole.

Pro uchycení uzemňovacího kabelu jsem použil šroub M2,5x6.

3 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zpracování rešerše na typy iontových motorů s ExB driftem, a následný návrh demonstračního modelu iontového motoru. Navrhl jsem model Hallovského motoru typu ALIS. Ten vycházel z již známé konstrukce. Tuto konstrukci jsem se snažil zdokonalit tak, aby měla širší oblast využití, byla jednodušší na sestavení, a zároveň zlepšila proudění plynu. Toho jsem docílil změnou konstrukce. Konstrukce byla zvětšena tak, aby šla použít do standardních vakuových trubic ISO KF40. To zvyšuje jednoduchost použití, protože se nemusí upravovat normalizované prvky, aby se dal model použít. Celkovým zvětšením došlo také k možnosti zvětšení rozměrů vnitřních součástí, což mi dovolilo použít sofistikovanější způsob dopravy plynu, aniž bych zapříčinil obtížnější montáž. Přívod plynu i přívod elektřiny se mi podařilo namodelovat tak, aby šly použít normalizované prvky pro jejich uchycení. Oba z modelů byly nasimulovány pro magnetické a elektrické pole. Ty jsem zhodnotil, a dle výsledků pro magnetické pole jsem vypočítal základní rotační poloměry elektronů a iontů.

Seznam použité literatury

- [1] GOEBEL, Dan M. a Ira KATZ. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. *JPL SPACE SCIENCE AND TECHNOLOGY SERIES*. CalTech, 2008.
- [2] *SpaceX* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://www.spacex.com/falcon-heavy>
- [3] Ion Thruster Prototype Breaks Records in Tests, Could Send Humans to Mars. *Space.com: NASA, Space Exploration and Astronomy News* [online]. [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: <https://www.space.com/38444-mars-thruster-design-breaks-records.html>
- [4] Obrábění iontovým paprskem | Technický týdeník. *TT | Technický týdeník* [online]. [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/obrabeni-iontovym-paprskem_27769.html
- [5] Iontová implantace - nástroj budoucnosti. *ČVUT, FJFI, Katedra fyzikální elektroniky* [online]. [cit. 2019-07-31]. Dostupné z: http://www.troja.fjfi.cvut.cz/~drska/edu/webfyz/ion_implant/
- [6] CHOUËIRI, Edgar. A Critical History of Electric Propulsion: The First 50 Years (1906–1956). *Journal of Propulsion and Power*. 2004, **20**(2), 1-5.
- [7] BOEUF, Jean-Pierre. Tutorial: Physics and modeling of Hall thrusters. *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*. 2017. DOI: 10.1063/1.4972269.
- [8] What is an electron. *Science notes* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://sciencenotes.org/what-is-an-electron/>
- [9] *UNIVERSE TODAY* [online]. FRASER CAIN, 2006 [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://www.universetoday.com/>
- [10] Ionization. *ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/ionization>
- [11] HELMENSTINE, Anne Marie. Chemistry Glossary Definition of Ion. *ThoughtCo.* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: <https://www.thoughtco.com/definition-of-ion-604535>
- [12] KULHÁNEK, Petr. *Úvod do teorie plazmatu*. 1. Praha: AGA, 2011. ISBN 978-80904582-2-2.
- [13] Motion in magnetic and electric fields. *Schoolphysics* [online]. [cit. 2019-07-04]. Dostupné z: http://www.schoolphysics.co.uk/age16-19/Atomic%20physics/Electron%20physics/text/Electron_motion_in_electric_and_magnetic_fields/index.html
- [14] *ALDEBARAN* [online]. PRAHA, 2002 [cit. 2019-07-08]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/>
- [15] *Festo* [online]. [cit. 2019-07-25]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products_CK#

[16] SELTZMAN, Andrew. *ION SOURCE*. 2019. UNITED STATES OF AMERICA. US 10,170,270. Uděleno 4.8.2017. Zapsáno 1.1.2019.

[17] *RTFTechnologies Index* [online]. 2003 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://www.rtftechnologies.org/index.htm>

[18] Částice s nábojem v magnetickém poli :: MEF. *Fyzika :: MEF* [online]. 2006 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/293-castice-s-nabojem-v-magnetickem-poli>

[19] Motion of a Charged Particle in a Magnetic Field | Boundless Physics. *Lumen Learning – Simple Book Production* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/courses-images/wp-content/uploads/sites/1989/2017/06/13230245/figure-23-05-02a.jpeg>

[20] Chap2.html. *Introduction to Plasma Physics* [online]. 2001 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <http://silas.psf.mit.edu/introplasma/chap2.html>

[21] *ResearchGate search* [online]. 2008 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/profile/Taher_Muhammad/publication/259902732/figure/fig12/AS:668630106775559@1536425248103/Diagram-of-an-Ion-engine.png

[22] ZHURIN, Viacheslav V. *Industrial Ion Sources: Broadbeam Gridless Ion Source Technology*. Boschstr. 12, 69469 Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag & Co. KGaA, 2012, 312 s. ISBN 978-3-527-41029-3. Dostupné také z: <http://d-nb.info/1010591754>

[23] 4.8 / 5.8 ISO 7045 / DIN 7985 - Maryland Metrics. *Yumpu - Publishing digital magazines worldwide* [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://img.yumpu.com/17888257/1/500x640/48-58-iso-7045-din-7985-maryland-metrics.jpg>

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma mřížkového iontového motoru. Převzato a přeloženo z [21].....	5
Obr. 2 Schéma Hallovského motoru. Převzato a přeloženo z [7].....	5
Obr. 3 Porovnání principů, na kterém pracují iontové motory. Převzato a přeloženo z [7].	6
Obr. 4 Pohyb nabitě částice v magnetickém poli.Převzato z [19]	8
Obr. 5 Porovnání chování kladně a záporně nabitě částice v ExB driftu. Převzato z [20]	10
Obr. 6 Model ALIS s modifikací, s kdy je vyvedena anoda mimo magnetické pole, což snižuje poškození magnetů. Převzato z [22].....	14
Obr. 7 Schema pro motor s uzavřeným driftem s magnetickou vrstvou (MCIS). Převzato z [22]......	14
Obr. 8 Běžný design end-Hall typů. Převzato z [22]......	15
Obr. 9 Sestavový výkres amerického patentu US 10,170,270.[17].....	17
Obr. 10 Sestavový výkres namodelovaného modelu.....	18
Obr. 11 Rozdělení odlišných materiálu motorů, které jsou nutné pro funkčnost modelu.	19
Obr. 12 Součásti, které budou simulovány.	21
Obr. 13 Simulace elektrického pole patentového modelu bez přítomnosti plazmatu	22
Obr. 14 Simulace elektrického pole navrženého modelu bez přítomnosti plazmatu.....	22
Obr. 15 Simulace magnetického pole patentového modelu bez přítomnosti plazmatu..	23
Obr. 16 Simulace magnetického pole navrženého modelu bez přítomnosti plazmatu...	23
Obr. 17 Navržený model Hallovského motoru.	26
Obr. 18 Průchod plynu skrz motor k anodě.	27
Obr. 19 Vnitřní komora. 1- otvor pro průchod čepu, 2- otvory pro provlečení šroubů anody, 3- otvory pro přichycení víka, 4- odvětrávací díry, 5- otvor pro zajišťovací kolík.	28
Obr. 20 Detail anody. 1- otvory pro průchod plynu, 2- otvor pro uchycení šrouby.	29
Obr. 21 Detail čepu a jeho zapojení. 1- čep, 2- závity pro uchycení, 3- průchozí otvor pro vedení plynu, 4- komora pro průchod plynu k izolaci, 5- uchycení kolíku.	30
Obr. 22 Detail vnitřní izolace vložené uvnitř komory, 1- otvory pro průchod plynu k anodě, 2- otvor pro přichycení anody, 3- kanálek pro přívod plynu k otvorům.	31
Obr. 23 1- vnější izolace a její poloha v modelu.	32
Obr. 24 Detail pólových nástavců, 1- vnitřní pólový nástavec, 2- víko.	32
Obr. 25 Detail nástavce a jeho uchycení, 1- otvory určující polohu nástavce, 2- uchycení uzemňovacího kabelu, 3- uchycení k externí konstrukci.....	33

Obr. 26 Detail zapojení elektrických rozvodů, 1- přichycení kontaktu pro 300 V, 2- kontakt pro uzemnění, 3- ochrana kontaktu s 300 V, 4- ochrana vyčnívajícího kusu šroubu s potenciálem 300 V, 5- kabel o ploše $S=4 \text{ mm}^2$	34
Obr. 27 CK rychlospojka od společnosti Festo. [15].....	35
Obr. 28 Navržené šrouby normy DIN 7985. Převzato z [23].	36

Přílohy

V této příloze nalezneme jen základní části, zbytek je uveden v příloze na CD, popřípadě v elektronické podobě. Z důvodu vážení práce, měřítko na výkrese neodpovídá skutečnosti, ale je zmenšeno na rozměr 150x212,6 mm. Velikosti v plné formě jsou uloženy na CD, přiloženém k bakalářské práci.

Položka	Název	Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množství
	Polotovar	Materiál výchozí	Jednotka	
1	VNITŘNÍ KOMORA	BP-01-01		1
	TYČ KRUHOVÁ 40 – 23 ČSN 42 5510	17 042		
2	ČEP	BP-01-02		1
	TYČ KRUHOVÁ 15 – 20 ČSN 42 5510	17 042		
3	SmCo MAGNET			3
4	VNITŘNÍ IZOLACE	BP-01-04		1
	TYČ KRUHOVÁ 30 – 17 ČSN 42 5510	PTFE		
5	ANODA	BP-01-05		1
	TYČ KRUHOVÁ 30 - 4 ČSN 42 5510	AISI 304		
6	STŘEDOVÝ PÓLOVÝ NÁSTAVEC	BP-01-06		1
	TYČ KRUHOVÁ 20 – 6 ČSN 42 5510	17 042		
7	VÍKO	BP-01-07		1
	TYČ KRUHOVÁ 40 – 4 ČSN 42 5510	17 042		
8	VNĚJŠÍ IZOLACE	BP-01-08		2
	TYČ KRUHOVÁ 8 – 13 ČSN 42 5510	PTFE		
9	ZÁSLEPKA S PŘÍVODEM	BP-01-09		1
10	ZÁSLEPKA	BP-01-10		1
11	NÁSTAVEC	BP-01-11		1
	P 2 70x30 ČSN 42 5301.21	11 500		
12	MATICE M5	BP-01-12		1
	6HR 8 – 18 ČSN 42 6530.12	11 500		
13	ŠROUBENÍ S PŘEVLEČNOU MATICÍ CK-M5-PK-4			2
14				1
	JAKL 20x20x2	S235JR		
15	ELEKTRICKÁ KABELAŽ			2
16	ŠROUB SE ZÁPUSTNOU HLAVOU M2,5x30	BP-01-13		2
		AISI 304		
17	ŠROUB S PŮLKULATOU HLAVOU M4x14			1
		DIN 7985		
18	ŠROUB S PŮLKULATOU HLAVOU M3x6			3
		DIN 7985		
19	ŠROUB S PŮLKULATOU HLAVOU M2x8			4
		DIN 7985		
20	PODLOŽKA M4			1
		AS 1237		

Index	Změna			Datum		Podpisy	
Vypracov.	Podpis PŘEMYSL TOBOLA	Datum 25.07. 2019	Norm. ref.	Podpis	Datum	Č. svitku: Mikrofilm	
Skupinář Technol.			Přezk. Schválil			Sestava Hmotn. [kg]	

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE FAKULTA STROJNÍ	NÁZEV: DEMONSTRAČNÍ NÁVRH IONTOVÉHO MOTORU
	ČÍSLO KUSOVNÍKU: BP-01-K

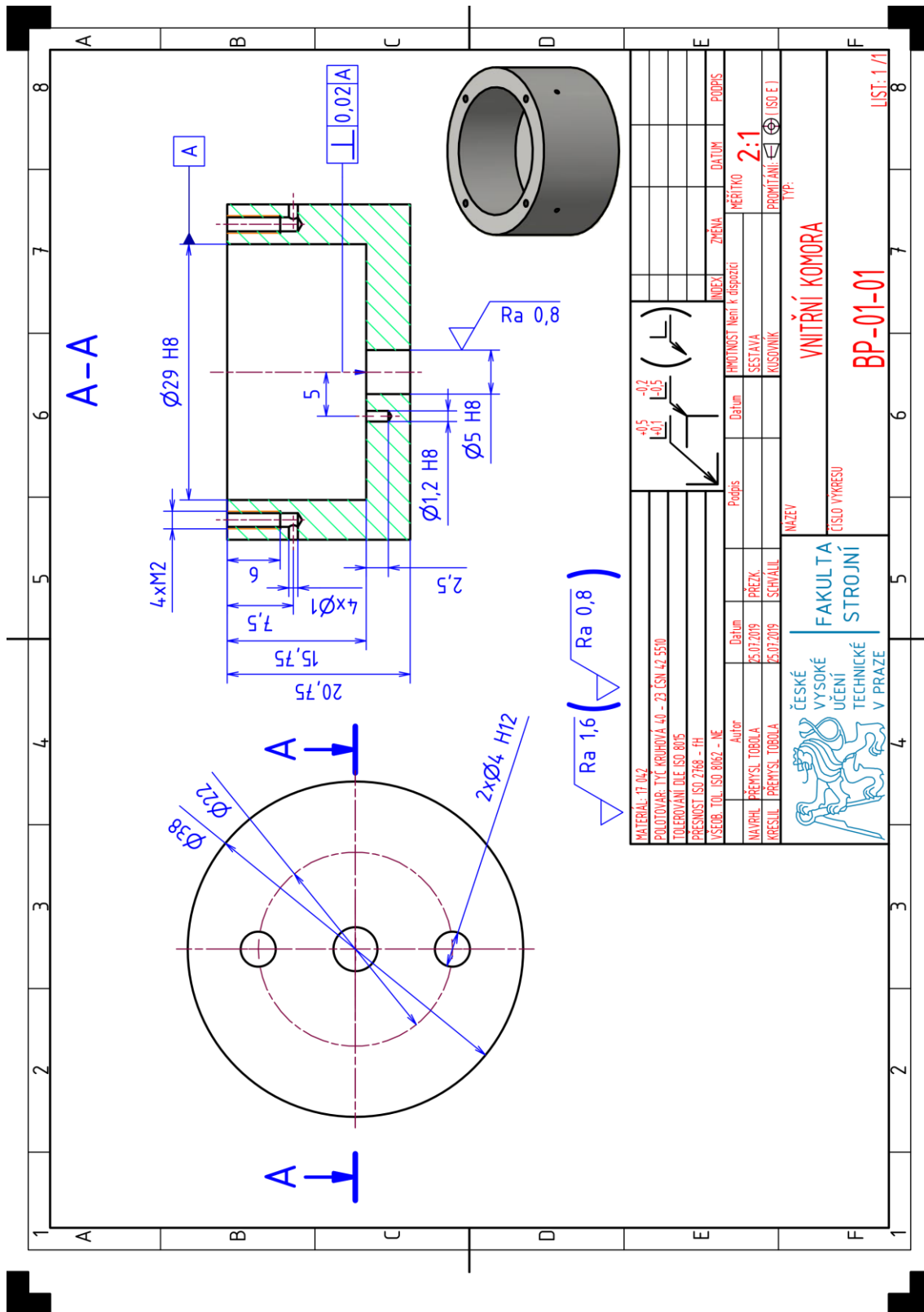
LIST: 1/2

Polo- žka	Název		Č. výkresu - č. normy	Hmotnost [kg]	Množ- ství
	Polotovary				
21	PODLOŽKA M2,5		AS 1237		2
22	PODLOŽKA M3		AS 1237		3
23	PODLOŽKA M2		AS 1237		4
24	ŠESTIHRANNÁ MATICE M2,5		AS 1112		2
25	VÁLCOVÝ KOLÍK ISO 2338 - B – 1,2x30 - St				1
26					
27					
28					
29					
30					
31					
32					
33					
34					
35					
36					
37					
38					
39					
40					

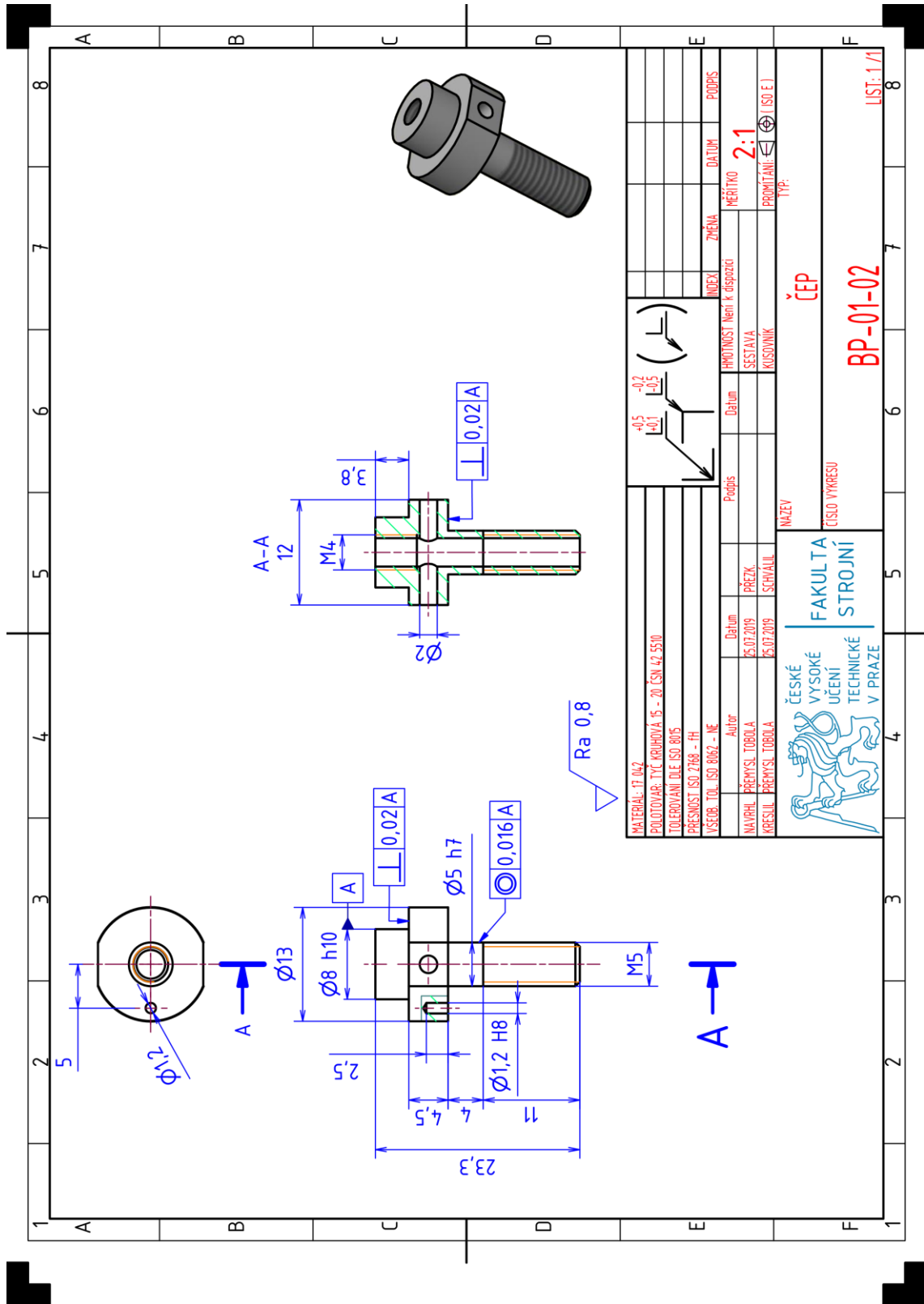
Index	Změna			Datum		Podpisy	
Vypracov.	Podpis	Datum	Norm. ref.	Podpis	Datum	Č. svitku:	
	PREMYSL TOBOLA	25.07. 2019				Mikrofilm	
Skupinař Technol.			Přezk. Schválil			Sestava Hmotn. [kg]	

<p>ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE</p> <p>FAKULTA STROJNÍ</p>	NÁZEV: DEMONSTRAČNÍ NÁVRH IONTOVÉHO MOTORU
	ČÍSLO KUSOVNÍKU: BP-01-K

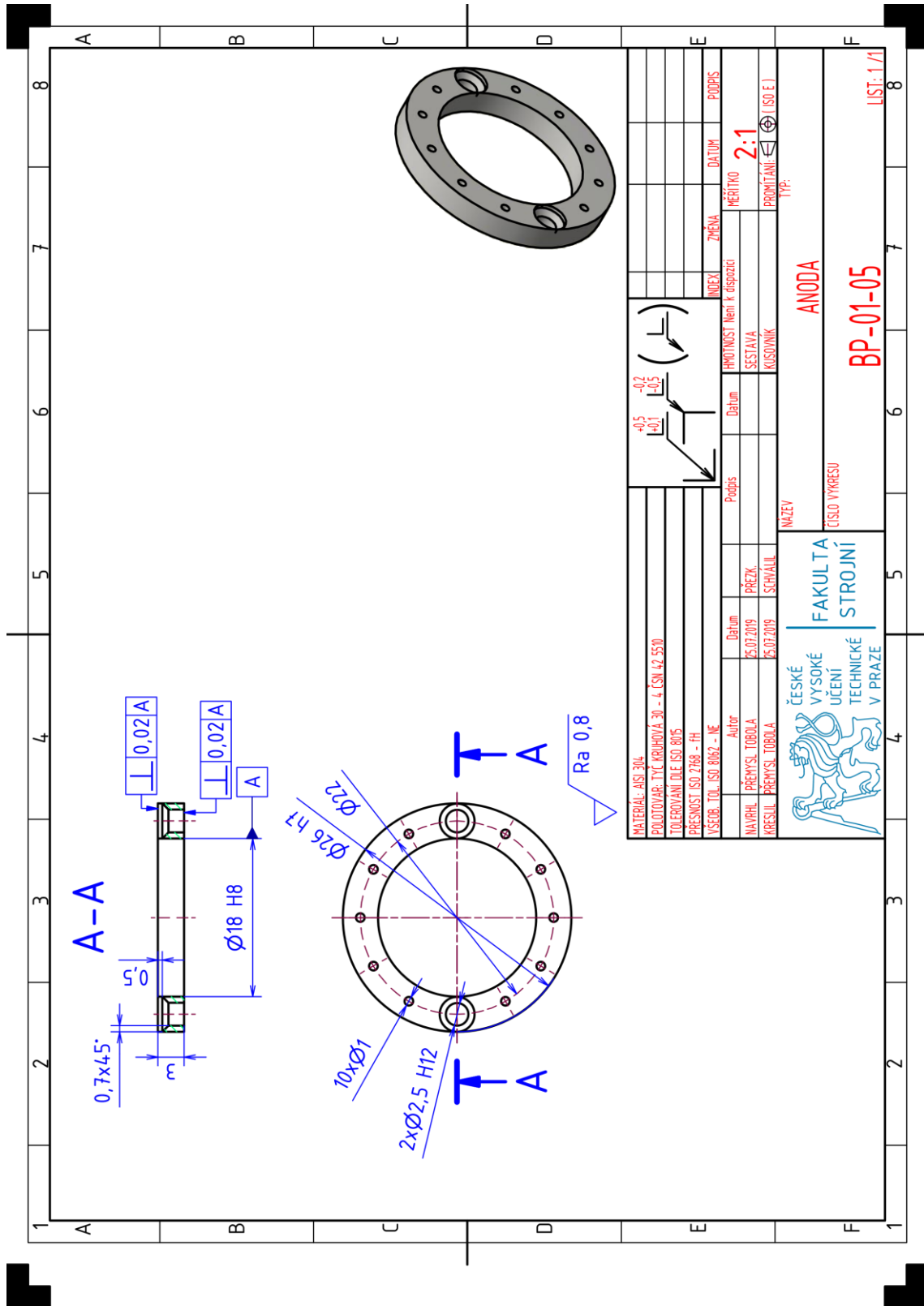
LIST: 2/2



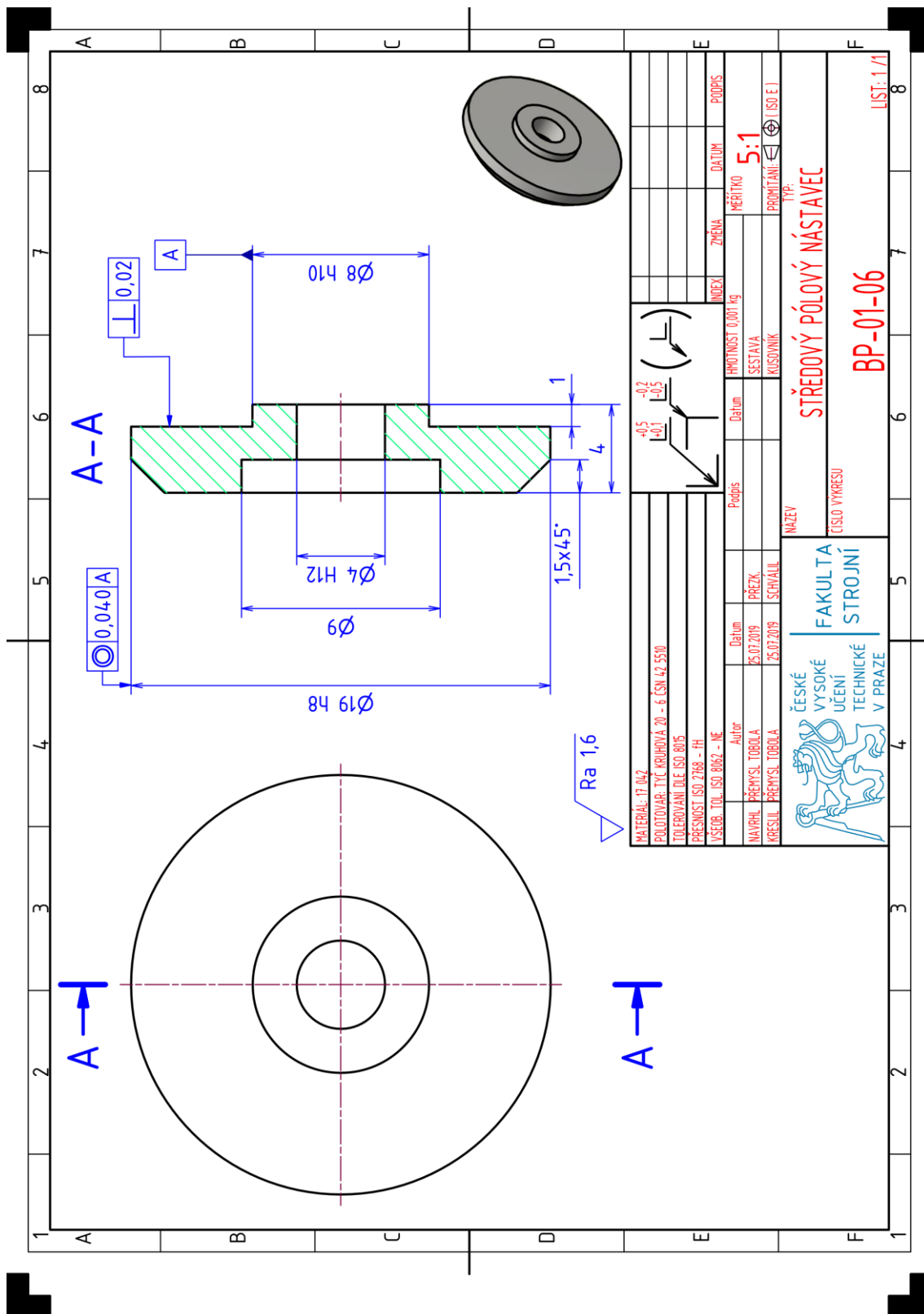
MATERIAL: 17 042		PŘÍMĚRY: 1:1		INDEX		ZMĚNA		DATUM		PODPIS	
MATERIAL: TiC KRMIVÁ 40 - Z3 ČSN 42 5510		PŘÍMĚRY: 1:1		INDEX		ZMĚNA		DATUM		PODPIS	
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015		PŘÍMĚRY: 1:1		INDEX		ZMĚNA		DATUM		PODPIS	
PŘESNOST ISO 2768 - FH		PŘÍMĚRY: 1:1		INDEX		ZMĚNA		DATUM		PODPIS	
VŠEOB. TOL. ISO 8062 - NE		PŘÍMĚRY: 1:1		INDEX		ZMĚNA		DATUM		PODPIS	
Autor		Datum		Předmět		Měřítko		Měřítko		Měřítko	
NAVPHL. PŘEMYSL. TOBOLA		25.07.2019		PŘEZK.		2:1		2:1		2:1	
APRESUL. PŘEMYSL. TOBOLA		05.07.2019		SCHVÁLIL		SESTAVA		SESTAVA		SESTAVA	
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		05.07.2019		SCHVÁLIL		KROSOVNIK		KROSOVNIK		KROSOVNIK	
FAKULTA STROJNÍ		05.07.2019		SCHVÁLIL		KROSOVNIK		KROSOVNIK		KROSOVNIK	
VNITŘNÍ KOMORA		05.07.2019		SCHVÁLIL		KROSOVNIK		KROSOVNIK		KROSOVNIK	
BP-01-01		05.07.2019		SCHVÁLIL		KROSOVNIK		KROSOVNIK		KROSOVNIK	
LIS: 1/11		05.07.2019		SCHVÁLIL		KROSOVNIK		KROSOVNIK		KROSOVNIK	



MATERIAL: 17 042		Datum		Podpis		INDEX		ZMENA		DATUM		PODPIS	
PŮLOTVAR: TČ KRHOVÁ 15 - 20 (SN 42-5510)		25.07.2019		[Signature]		HMOTNOST		Měřítko		2:1		MĚŘITKO	
TOLEROVANÍ DLE ISO 8015		PŘEZK.		SESTAVA		KISOVANÍ		PRŮMĚR		TYP		[Symbol]	
PŘESNOST ISO 2768 - m		SCHÁLL		NAZEV		ČÍSLO VÝKRESU		BP-01-02		LST: 1/11			
VŠEOB. TOL. ISO 8062 - m		Autor		ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		FAKULTA STROJNÍ		ČEP					
NAVPHL. PŘEMYSL. TOBOULA		PŘEZK.		SCHÁLL		ČÍSLO VÝKRESU		BP-01-02					
APRESUL. PŘEMYSL. TOBOULA		Datum		Podpis		INDEX		ZMENA		DATUM		PODPIS	
[Signature]		25.07.2019		[Signature]		HMOTNOST		Měřítko		2:1		MĚŘITKO	
[Signature]		PŘEZK.		SESTAVA		KISOVANÍ		PRŮMĚR		TYP		[Symbol]	
[Signature]		SCHÁLL		NAZEV		ČÍSLO VÝKRESU		BP-01-02		LST: 1/11			



MATERIAL: AISI 304		PŘÍMĚRY: TČ KRMIVNÁ 30 - I (ČSN 42 550)		INDEX		ZMĚNA		DATUM		PODPIS	
TOLEROVANÍ DLE ISO 8015		PŘESNOST ISO 2768 - M		VÝSEBOV. TOL. ISO 8062 - NE		Datum		HMOTNOST		MĚŘÍTKO	
Autor		Datum		Přezk.		Sestava		Křivka		2:1	
NAVRHL: PŘEMYSL TOBOLA		05.07.2019		SCHVÁLIL: PŘEMYSL TOBOLA		05.07.2019		KROKOVANÍ		PRŮMĚTLANÍ: (ISO E)	
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		FAKULTA STROJNÍ		NAZEV		ANODA		ČÍSLO VÝKRESU		BP-01-05	
LIS: 1/11		8		6		7		8			



MATERIAL: 17 042		HMOTNOST: 0,001 kg		INDEX		ZMENA		DATUM		PODPIS	
PŮLOTVAR: TĚ KRUMHOVÁ 20 - 6 (SN 42 550)		Datum		SESTAVA		MĚŘITKO		5:1		PRŮMĚR:	
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015		25.07.2019		KISOVANIK		PRŮMĚR:		5:1		TYP:	
PŘESNOST ISO 2768 - M		25.07.2019		SCHVALIL		PRŮMĚR:		5:1		TYP:	
VŠEOB. TOL. ISO 8062 - NE		Autor		NAZEV		STŘEDOVÝ PÓLOVÝ NÁSTAVEC		BP-01-06		LIST: 1/11	
FAKULTA STROJNÍ		ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE		ČÍSLO VÝKRESU		STŘEDOVÝ PÓLOVÝ NÁSTAVEC		BP-01-06		LIST: 1/11	

