



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**ÚPRAVA SIMULÁTORU PRO TESTOVÁNÍ
LOŽISEK PRO VESMÍRNÉ APLIKACE**

MODIFICATION OF THE TEST RIG FOR THE TESTING THE BEARINGS FOR THE SPACE
APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Michal Okál

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2018

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukční úpravou zařízení, které umožňuje zkoumání vlastností valivých ložisek při kosmických podmínkách. Úprava je nutná pro otestování nového valivého ložiska s jinými rozměry. Předepnutí ložiska musí být centrováno a uzpůsobeno pro rychlou výměnu tepla s okolím. Důraz je kladen na maximální využití stávajících komponent a torzní tuhost zařízení. Výstupem práce je průvodní zpráva a výkresy umožňující výrobu nových komponent.

KLÍČOVÁ SLOVA

kuličkové axiální ložisko, vesmírná tribologie, EHD kontakt, vesmírné mazání

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of a device, which allows exploration of rolling bearings properties in space conditions. The adjustment is necessary for testing of a new rolling bearing with different dimensions. Preload of the bearing must be centered and adapted for rapid heat exchange with the surroundings. The effort is made to use maximum number of existing components and torsion stiffness of the device. The thesis outputs are the accompanying report and the technical documentation allowing the production of new components.

KEYWORDS

thrust ball bearing, space tribology, EHL contact, space lubrication,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OKÁL, M. *Úprava simulátoru pro testování ložisek pro vesmírné aplikace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018.
59. Vedoucí bakalářské práce Ing. David Košťál, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci *Úprava simulátoru pro testování ložisek pro vesmírné aplikace*, vykonal samostatně pod vedením Ing. Davida Košťála, Ph.D. a v seznamu uvedl všechny použité literární zdroje.

V Brně 5. května 2018

Michal Okál

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Davidu Košťálovi, Ph.D. za vedení práce, cenné rady a odbornou pomoc s jejím vypracováním. Dále bych poděkoval své rodině za podporu během celého svého studia.

OBSAH

Obsah	11
Úvod	13
1 Přehled současného stavu poznání	14
1.1 Testování ložisek	14
1.1.1 Poškození ložisek	14
1.2 Specifika vesmírného prostředí	15
1.2.1 Stav beztlíže	15
1.2.2 Odpařování	15
1.2.3 Kondenzace	15
1.2.4 Nedostatek reaktantů	15
1.2.5 Radiace	16
1.2.6 Viskozita	16
1.3 Chování plynů v prostředí nízkého tlaku	17
1.4 Materiály používané pro vesmírné aplikace	19
1.5 Simulátor pro testování ložisek pro vesmírné aplikace	19
1.5.1 Upevnění ložiska	21
1.5.2 Upevnění vnějšího kroužku ložiska	21
1.5.3 Upevnění vnitřního kroužku ložiska	22
1.5.4 Labyrint	23
1.5.5 Tepelné mosty	24
1.5.6 Klec na upevnění snímače kroučícího momentu	24
1.5.7 Hřídel	25
1.5.8 Příruba	25
1.5.9 Vakuová průchodka	26
1.5.10 Vlnovcové spojky	26
1.5.11 Pohon zařízení	27
1.5.12 Přichycení motoru s převodovkou	27
1.5.13 Temperace zařízení	27
1.5.14 Potrubí na tvorbu vakua	27
2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	29
2.1 Analýza problému	29
2.2 Cíl práce	29
3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	30
3.1 Analýza možnosti úpravy zařízení	30
3.1.1 Úprava zařízení pro ložisko s vnitřním rozděleným kroužkem	30
3.1.2 Úprava zařízení pro ložisko s vnějším rozděleným kroužkem	31
3.1.3 Možnosti úpravy pro nové ložisko	31
3.2 První možnost úpravy zařízení	32
3.2.1 Upevnění vnitřního kroužku ložiska	32
3.2.2 Upevnění vnějšího kroužku ložiska	35
3.2.3 Labyrint	36
3.2.4 Vycentrování	36
3.2.5 Tepelné mosty	37
3.3 Druhá možnost úpravy zařízení	38
3.3.1 Upevnění vnitřního kroužku ložiska	38
3.3.2 Upevnění vnějšího kroužku ložiska	39

3.3.3 Labyrint	40
3.3.4 Vycentrování	41
3.3.5 Tepelné mosty	41
4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	43
4.1 Volba pružin	43
4.2 Torzní tuhost zařízení	44
4.3 Upevnění vnitřního kroužku ložiska	47
4.4 Tepelná výměna	48
4.4.1 Tepelná výměna zářením	49
4.4.2 Tepelná výměna vedením	50
5 DISKUZE	52
6 ZÁVĚR	53
7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	54
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	56
9 SEZNAM OBRÁZKŮ	57
10 SEZNAM TABULEK	58
11 SEZNAM PŘÍLOH	59

ÚVOD

Ložiska nacházejí uplatnění v širokém spektru technických zařízení, kde je realizován některý druh pohybu, ať už rotačního nebo translačního. Jakákoliv vada ložiska způsobí nefunkčnost zařízení, ve kterém je použito. Proto je snaha predikovat možnou poruchu. Odstraněním kritických faktorů prodlužujeme životnost ložiska a tím i správný chod a životnost celého zařízení.

Ložiska jsou testována v testerech (viz obr. 2), které simulují podmínky, ve kterých budou daná ložiska operovat. Při testování je snaha určit životnost a spolehlivost, pomocí zaznamenávání měřitelných údajů, jako je teplota vnějšího a vnitřního kroužku, vibrace nebo valivý odpor ložiska. Otestováním patřičného vzorku ložisek se stanovuje spolehlivost ložiska pro provozní podmínky.

Správná volba ložiska vede ke snížení poruchovosti zařízení a tím k redukci možných investic do opravy. U aplikací v leteckém či vesmírném průmyslu je testování nedílnou a někdy i povinnou součástí, protože selhání zařízení má fatální důsledky, jako jsou ohrožení lidských životů, nemožnost opravy nebo velice náročná oprava a obrovské riziko ztráty reputace, a tak ztráty spolupráce se společností.

Tato práce se bude zabývat úpravou testeru pro testování valivých ložisek. Jedná se o superduplexní kuličková ložiska s kosoúhlým stykem (viz obr. 1).



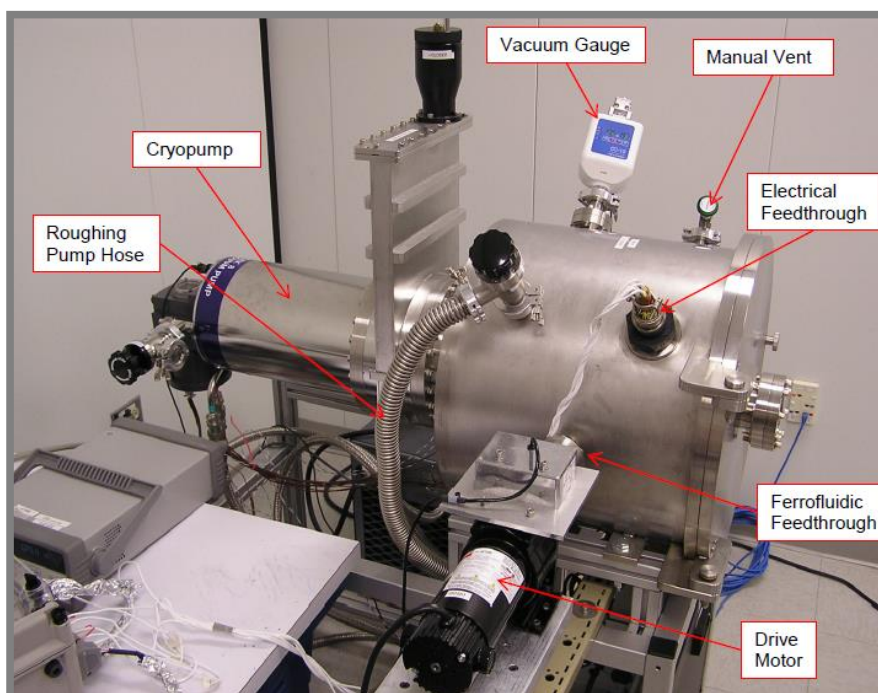
Obr. 1 Testované ložisko

Smyslem testování je odzkoušet, zda ložisko zvládne pracovat v rozmezí teplot od -40 °C až do $+90\text{ °C}$ a při velice nízkém tlaku okolní atmosféry. Tyto podmínky s sebou nesou velikou zátěž na ložiska. Nízký tlak způsobí rychlejší vypařování maziva. Rychlé vypařování maziva mezi valivými elementy ložiska způsobí vyšší riziko poškození povrchů, které povede k selhání ložiska. Výkyvy provozních teplot ovlivní chování maziva, které je zásadní pro správnou činnost ložiska.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1.1 Testování ložisek

Ložiska, stejně jako ostatní strojní součásti, jsou poškozována dlouhodobým používáním, kdy dochází k trvalým změnám materiálů, které mohou vést až k selhání. Riziko selhání ložiska je o to větší, čím jsou náročnější provozní podmínky. Selhání ložiska u umělé družice na oběžné dráze má fatální následky na funkčnost celého zařízení. Dalším důvodem testování ložisek jsou vysoké požadavky na dlouhotrvající provoz. V šedesátých letech 19. století se operační čas vesmírných zařízení pohyboval mezi 3 až 5 lety. Na konci 90. let 19. století se ale požadavky zvýšily a operační čas byl standardně požadován v rozmezí 10 až 20 let. [1]



Obr. 2 Tester živostnosti ložisek [2]

1.1.1 Poškození ložisek

K poškození ložiska může dojít ještě před použitím. Nejčastěji se jedná o metalurgické defekty materiálů nebo poruchy vzniklé při obráběcích a dokončovacích operacích, jako jsou vrypy a tepelné poškození materiálů. Při používání ložiska pak dochází k poškození vlivem ztráty mazacího filmu, kdy dojde ke kontaktu kovu na kov, vibracemi, špatnou instalací a nedostatečným předepnutím ložiska. Defekty způsobené používáním ložiska mají charakter únavového opotřebení, jako je pitting, kdy dochází k vytváření dírek v materiálu. [3] [4]

1.2 Specifika vesmírného prostředí

1.2

1.2.1 Stav beztlíže

1.2.1

Je to stav, kdy na předmět nepůsobí gravitační zrychlení. Eliminace váhy zařízení umožní použití materiálu bez ohledu na jejich hmotnost. Absence gravitace neumožňuje použití zásobníků pro mazání, které závisí na gravitační síle.

1.2.2 Odpařování

1.2.2

Jedná se o děj, při kterém se kapalně a tuhé látky dostávají do plynného stavu. Kapalně látky se vypařují a pevně sublimují. Množství molekul, které se uvolní z daného materiálu, závisí na okolním tlaku, teplotě, velikosti povrchu a proudění. Vypařování probíhá při všech teplotách, ale při zvyšující se teplotě roste i množství vypařeného materiálu. Vypařování a sublimace jsou urychlovány se snižujícím se okolním tlakem. Během provozu zařízení ve vesmírném prostředí působí tepelné výkyvy a vakuum simultánně. Během provozu zařízení v časovém horizontu 30 let jsou součástky vystaveny až 175 000 termo cyklů [5]. Vypařování činí problém především mazivům v ložiscích. Řešením je použití maziva odolného vůči výparu, nebo použití jednoduchých těsnících metod jako je labyrintové těsnění, uložení s malou vůlí nebo přidání bezkontaktního těsnění na ložiska.

1.2.3 Kondenzace

1.2.3

Opačným procesem odpařování je kondenzace. Kondenzace probíhá nejčastěji na chladném povrchu některé části satelitu. Při dlouhotrvající misi, může kondenzace maziva kontaminovat celé zařízení a negativně ovlivnit citlivé měřicí snímače. Řešením je pečlivě utěsnit problémové části, nebo nepoužívat látky, které se vypařují.

1.2.4 Nedostatek reaktantů

1.2.4

Absence reakčních plynů ve vesmírném prostředí (převážně kyslíku) má za důsledek zamezení tvorby oxidačních vrstev na kovových površích. Absence oxidačního filmu na kovovém povrchu způsobí extrémní nárůst koeficientu tření mezi povrchy bez lubrikantu [6]. Zvýšení koeficientu tření může mít zničující účinky na dlouhodobý provoz zařízení. Řešením problému je správná volba materiálu a lubrikantu.

1.2.5 Radiace

Radiace ve vesmíru se dělí na elektromagnetické záření a záření elementárních částic. Elektromagnetické záření zahrnuje infračervené, ultrafialové, rentgenové, gama záření a viditelné světlo. Do záření elementárních částic zahrnujeme proudy elektronů a protonů. Záření má především dopad na organické materiály, ale také na neorganické. Infračervené záření nám může termálně degradovat mazivo v ložisku, nebo záření protonů a elektronů ionizovat materiál a lubrikant. [7] Naštěstí ložiska bývají ukryta a utěsněna, tudíž vesmírné záření nezpůsobuje závažné problémy.

1.2.6 Viskozita

Viskozita má výrazný vliv na životnost ložiska. Pro vesmírné aplikace je snaha používat lubrikanty odolné vůči vypařování. Čím klesá rychlost vypařování, tím roste viskozita použitého lubrikantu. (viz Obr.3)

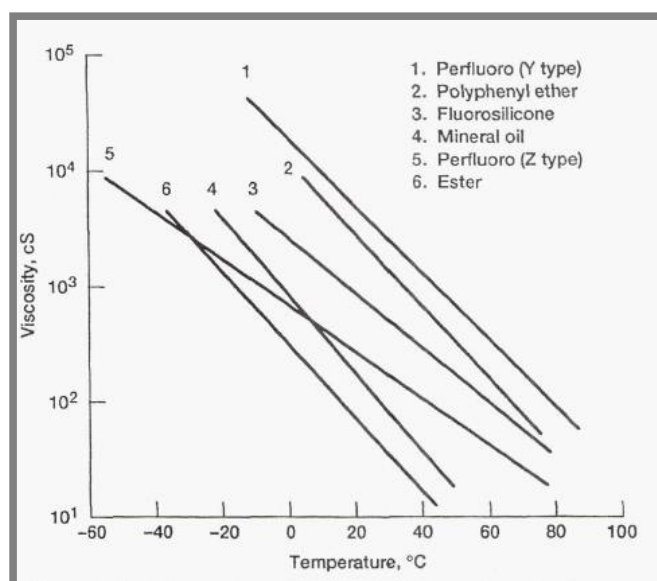
TABLE 3.—EFFECT OF VISCOSITY ON EVAPORATION
RATE OF LUBRICANTS IN VACUUM (10^{-6} torr)
(from Ref. 37)

Lubricant	Viscosity at 40°C, 10^{-6} m ² /sec	Weight loss rate at 40°C, mg/cm ² ·hr
Super-refined paraffinic mineral oil:	14	18
SRG 30	27	13
SRG 40		
Perfluoro ether	8	2.2
	28	0.19
	357	0.0002

Obr. 3 Závislost viskozity a rychlosti vypařování [7]

Zvýšená viskozita lubrikantu se odrazí na operačních vlastnostech ložiska. Zvýšením viskozity například docílíme zvýšení tření v ložisku. Výhodou zvýšení viskozity je generování elastohydrodynamického mazání i při nižších rychlostech otáčení ložiska [7]. Tato vlastnost je chtěná především v aplikacích ložisek na satelitech, kde ložiska provádí pomalé a relativně malé pohyby při korekci směru antén.

Zřetelný vliv na viskozitu lubrikantu má teplota. S klesající teplotou viskozita roste a se zvyšující se teplotou klesá (viz obr. 4). Závislost teploty a viskozity maziva vyjadřuje viskozitní index. Čím má mazivo vyšší viskozitní index, tím méně je viskozita maziva ovlivňována teplotou [8]. Teplotní výkyvy panující u satelitů mohou mít za následek narušení optimálního mazacího režimu a zkrácení tak životnosti ložisek. Proto je snaha o použití co nejstabilnějšího maziva s vysokým viskozitním indexem, které udrží optimální mazací režim v ložisku i při cyklických tepelných změnách.

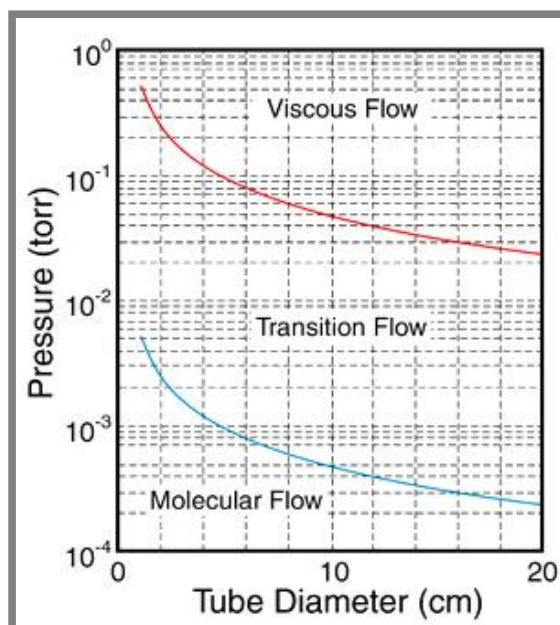


Obr. 4 Závislost viskozity a teploty [7]

1.3 Chování plynů v prostředí nízkého tlaku

1.3

Vlastnosti proudění plynu závisí na okolním tlaku. Proudění lze rozdělit na viskózní přechodové a molekulární (viz obr. 5). Viskózní proudění se dělí na laminární a turbulentní. Turbulentní proudění je takové, kdy se proudnice plynu míchají a u laminárního proudění zůstávají rovnoběžné. Molekulární proudění nastává za nízkého tlaku, kdy počet molekul se zmenší natolik, že střední volná dráha částic je



Obr. 5 Režimy proudění plynů [10]

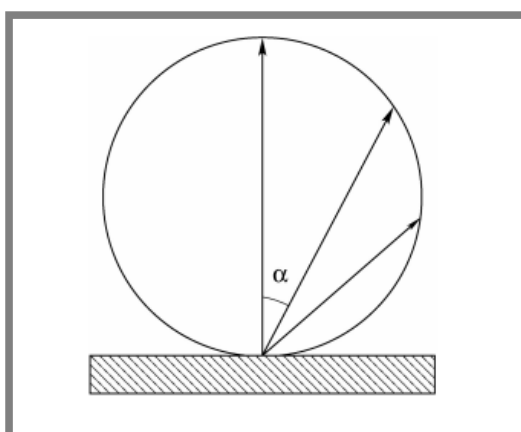
větší než rozměry komory. Dominující srážky jsou mezi částicemi a stěnou komory [9]

Ložisko bude testováno v prostředí, kde se tlak bude pohybovat 10^{-3} Pa. Při tak nízkém tlaku nastává molekulární proudění a střední dráha částic vzduchu se pohybuje v řádu metrů (viz obr. 6).

Pressure (Pa)	10^{-6}	10^{-3}	1	10^3	10^5
Mean free path	km	m	mm	μm	nm
Air	6.8	6.8	6.8	6.8	68
Argon	7.2	7.2	7.2	7.2	72
CO ₂	4.5	4.5	4.5	4.5	45
Hydrogen	12.5	12.5	12.5	12.5	125
Water vapor	4.2	4.2	4.2	4.2	42
Helium	19.6	19.6	19.6	19.6	196
Nytrogen	6.7	6.7	6.7	6.7	67
Neon	14.0	14.0	14.0	14.0	140
Oxygen	7.2	7.2	7.2	7.2	72
Pressure (mbar)	10^{-8}	10^{-5}	10^{-2}	10	1000

Obr. 6 Střední volná dráha různých plynů [11]

V prostředí, kde je velice nízký tlak, se úhel odrazu molekuly nerovná úhlu dopadu. Důvodem je doba trvání odrazu a nerovnost povrchu. Rozdělení pravděpodobnosti směrů rychlostí se řídí kosinovým (Knudsonovým) zákonem: $P(\alpha) = P_0 \cdot \cos(\alpha)$, kde $P(\alpha)$ je pravděpodobnost směru rychlosti, P_0 je pravděpodobnost odrazu ve směru kolmém k povrchu a α je úhel od kolmice [12].



Obr. 7 Rozdělení pravděpodobnosti směrů molekul po odrazu [12]

Z Knudsonova zákona lze usuzovat, že nejpravděpodobnější odraz molekuly je kolmo na povrch a nejméně pravděpodobný je rovnoběžný směr odrazu (viz obr. 7). Díky těmto vlastnostem lze využít labyrintové těsnění v prostředí, kde je velice nízký okolní tlak.

Jedná se o úzkou spáru, ve které molekuly plynu zůstanou téměř uvězněny díky převládajícím nárazům o stěnu a zanedbatelným nárazům mezi sebou. Hlavními parametry labyrintu jsou jeho celková délka a šířka spáry. Tvar labyrintu má zanedbatelný vliv na schopnost těsnění. Obecně platí, že čím delší a užší je, tím je tok molekul tímto labyrintem menší. Labyrint se navrhuje podle provozních podmínek, protože zvyšování teploty a snižování okolního tlaku způsobí zrychlování vypařování. [13]

1.4 Materiály používané pro vesmírné aplikace

1.4

Materiály použité ve vesmíru musí splňovat řadu parametrů. Základní z parametrů jsou dobré mechanické vlastnosti. Materiály musí být patřičně pevné, a to i za rozdílných teplot a zároveň nesmějí být křehké při nízkých teplotách. Další parametry jsou dobré tepelné vlastnosti. Velice důležitou vlastností materiálů je vysoká odolnost proti sublimaci i za vysokých teplot a malá tepelná roztažnost. Výhodou je vysoká tepelná odolnost a dobrá emisivita, která umožňuje rychlejší výměnu tepla ve vakuu. Materiály navíc nesmí být porézní, a měly by být odolné proti desorpci [14]

Mezi běžné materiály, které lze použít ve vakuu patří Ni, Cu a Al. Nikl se široce používá pro své dobré vlastnosti. Má relativně vysokou teplotu tavení, obtížně sublimuje, je levný a má dobrou odolnost vůči korozi. Měď má velice dobrou tepelnou a elektrickou vodivost, dobrou kujnost a neporéznost. Hliník je lehký, poměrně tvárný a snadno deformovatelný.

Mezi vzácné materiály, které lze použít, patří zirkon a titan. Více používaný je titan kvůli dobrým mechanickým vlastnostem, jako je nízká hustota a vysoká pevnost. Nevýhodou vzácných materiálů je jejich cena, které mnohonásobně převyšuje cenu běžných materiálů. [15]

Mezi nepoužívanější materiály patří nerezové austenitické oceli, speciálně se používá typ 304. Jedná se o chrom-niklovou ocel s nízkým obsahem uhlíku (18Cr8Ni). Tento typ oceli má dobrou pevnost a porovnáním s běžnou ocelí, vysokou odolnost vůči korozi, vysokou tepelnou odolnost a dobrou stabilitu v prostředí nízkého tlaku. [16]

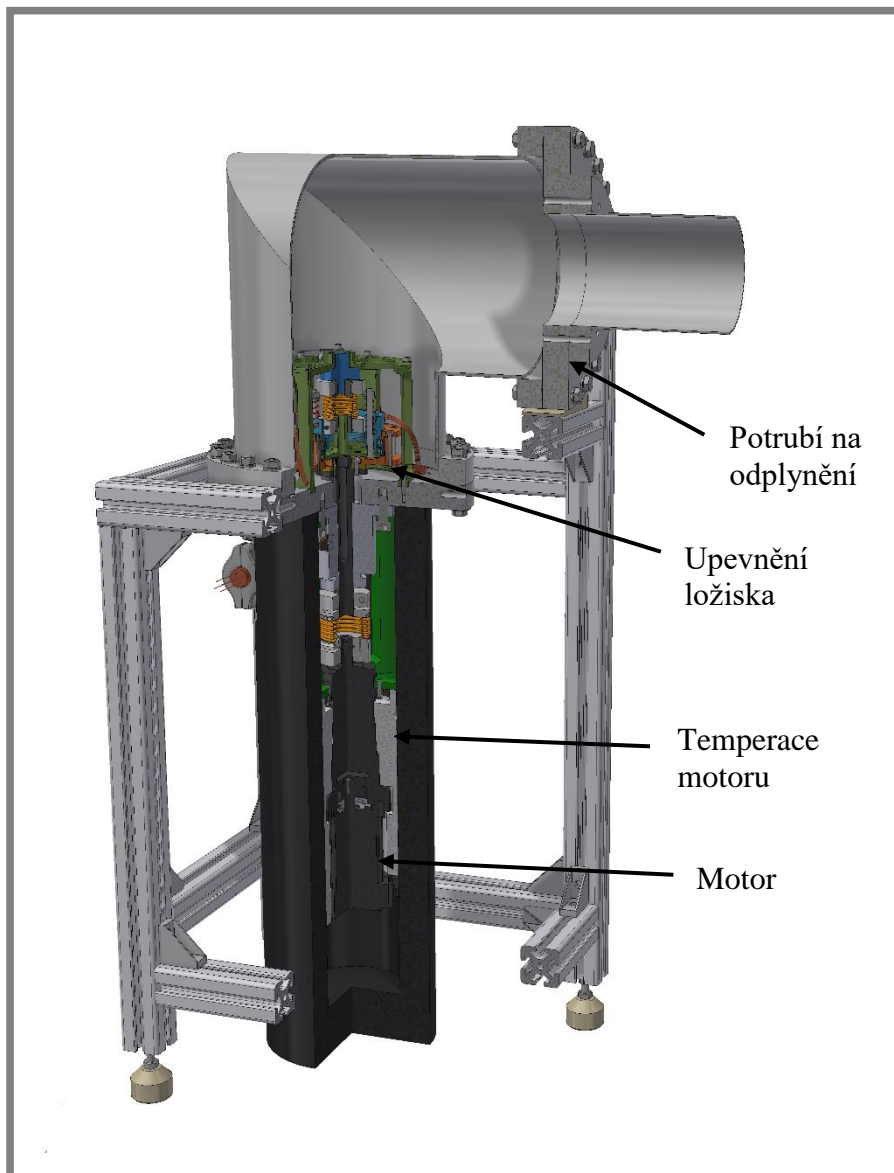
1.5 Simulátor pro testování ložisek pro vesmírné aplikace

1.5

Jedná se o zařízení, které umožňuje otestovat zvolená ložiska pro provozní podmínky, které odpovídají podmínkám na nízké oběžné dráze (viz obr. 8). Ložisko bude testováno pro drobné korekce natočení, potřebné pro správný směr antény satelitu. Otáčení bude o velikosti pár stupňů, kdy nedojde přejetí kuličky do dráhy sousední kuličky. Jedná se o specifický druh pohybu, který není vhodný pro ložiska. Roste rychlost a velikost opotřebení v bodě kontaktu kuličky s kroužky ložiska.

Testovaná ložiska jsou během testování vystavena střídavě nízkým a vysokým teplotám. Teplotní zatížení je zprostředkováno termální komorou Angelantoni, do které je testovací zařízení umístěno. Před začátkem testování je prostor kolem ložiska

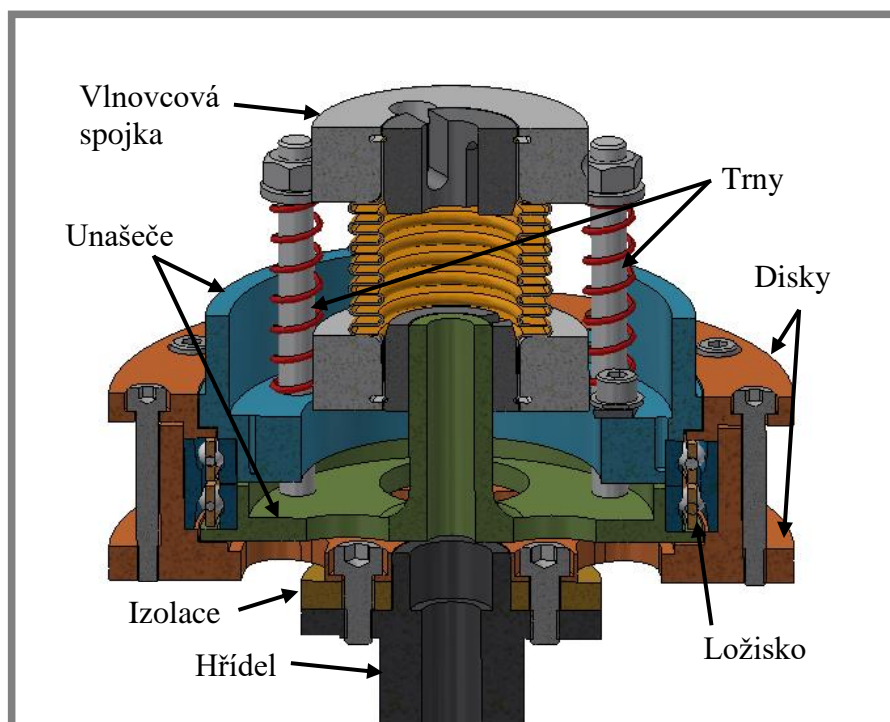
odplyněn pomocí vakuové vývěvy, která bude umístěna na konci odsávacího potrubí. Výstupem měření jsou záznamy naměřených teplot během testu a velikost valivého odporu ložiska. Hodnoty budou analyzovány, zda ložisko pracovalo optimálně po dobu testu. Mezi hlavní části simulátoru patří pohonné zařízení. Pohon je zajištěn synchronním elektromotorem s enkodérem pro sledování polohy, ke kterému je připojena planetární převodovka. Kroutilý moment motoru se přenáší přes vlnovcovou spojku a hřídel do dvou disků, mezi kterými je testované ložisko upevněno. Ložisko je předepnuto pomocí dvou přitlačných unašečů. Unašeče jsou spojeny přes další vlnovcovou spojku do snímače momentu, který je upevněn do rotačního pouzdra připevněného přes vnější klec k přírubě. Na přírubě je našroubované odsávací koleno s potrubím vedoucí do vakuové vývěvy. Celý simulátor je zasazený do přenosné konstrukce pro stabilitu a lepší manipulaci. Ložisko je kontrolováno pomocí termočlánků umístěných v blízkosti vnějšího i vnitřního kroužku. Dráty z termočlánku a snímače momentu jsou vedeny přes přírubu a těsnící potrubí ven ze zařízení.



Obr. 8 Model současného zařízení

1.5.1 Upevnění ložiska

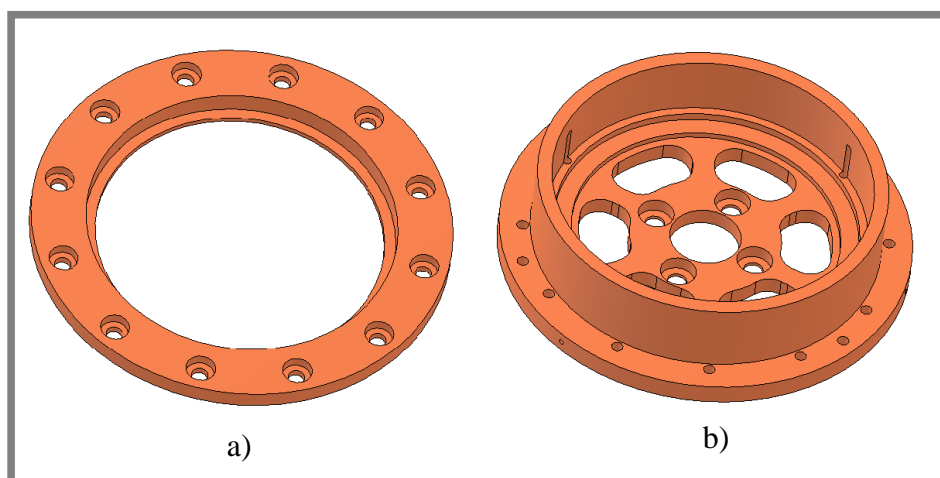
Ložisko je upevněno pomocí 4 součástí (viz obr. 9). Vnější kroužek ložiska je sevřen mezi dva disky a vnitřní kroužek je předeprnut pomocí dvou unašečů.



Obr. 9 Upevnění ložiska

1.5.2 Upevnění vnějšího kroužku ložiska

Vnější kroužek je přichycen mezi dva přítlačné disky (viz obr. 10) pomocí 12 šroubů M4, které jsou rovnoměrně rozmístěny po obvodu obou součástí.

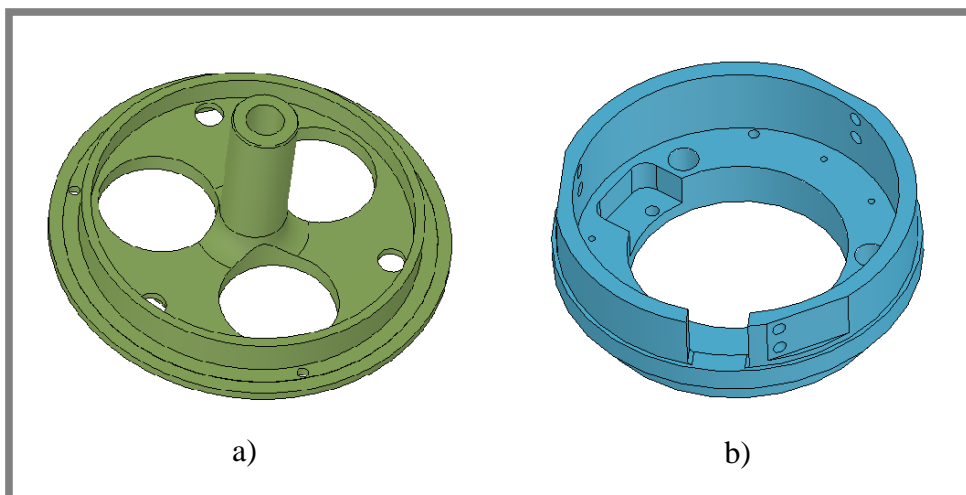


Obr. 10 Upevnění vnějšího kroužku ložiska a) horní disk b) spodní disk

Ve spodním disku je otvor pro nasazení na hřídel s uložením, nepatrnou vůlí a čtyři díry po 90° pro šrouby M5 sloužící k přichycení k hřídeli. Hřídel je odizolována od spodního disku pomocí keramické izolace ve tvaru kroužku. Izolace je zakoupená od firmy Misumi. Součást je odlehčena pomocí šesti vyfrézovaných otvorů. Při rozdělování součástí nesmí dojít k poškození ložiska, proto jsou v součásti vyvrtané 3 díry se závity pro šetrné vyjmutí ložiska ze spodního unašeče. Horní disk je doplňkem ke spodnímu tak, aby šel přišroubovat a rovnoměrně přitlačoval vnější kroužek ložiska odpovídající silou.

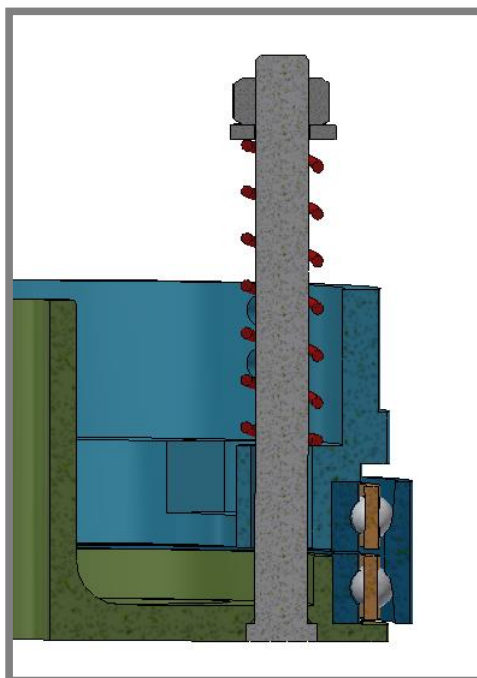
1.5.3 Upevnění vnitřního kroužku ložiska

Vnitřní kroužek ložiska je předepnut dvěma unašeči (viz obr. 11). Spodní unašeč (zelený) obsahuje ze spodní části 3 vyfrézované drážky s dírami, pro lepší upevnění čepů a 3 díry se závity M3 pro šetrnější vyndání ložiska. Uprostřed je vysunutí pro upevnění do vlnovcové spojky. Horní unašeč (modrý) navíc obsahuje tři roviny pro připevnění tepelných mostů a otvor pro dotažení spojky.



Obr. 11 Upevnění vnitřního kroužku ložiska a) spodní unašeč b) horní unašeč

Předepnutí unašečů je zprostředkováno pomocí tří pružin nasazených na trnech (viz obr. 12). Trny jsou rozmístěné po 120° tak, aby bylo předepnutí ložiska rovnoměrné. Z vrchní části trnu je vytvořený závit, který umožní stlačení pružiny pomocí podložky a matice na potřebnou sílu předpětí. Trn tlačí zespodu spodní přitlačný kroužek a horní přitlačný kroužek je tlačěn shora pružinami. Pružiny byly použity tlačné s nerezové oceli zakoupené od firmy Alcomex spring.

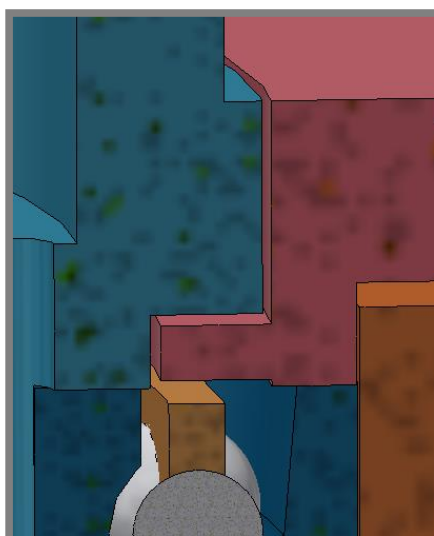


Obr. 12 Předepnutí vnitřního kroužku

1.5.4 Labyrint

1.5.4

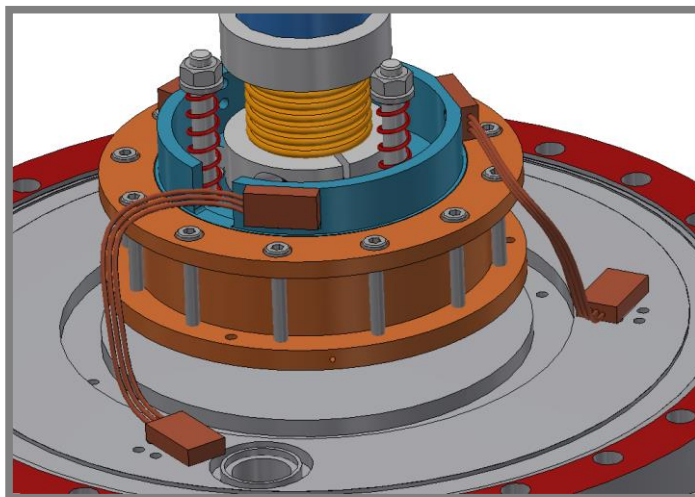
Rychlejší vypařování maziva vlivem vakua způsobí rychlou ztrátu správného mazacího režimu, který je pro chod ložiska zásadní. Vypařování je zbrzděno pomocí labyrintu vytvořeného kolem ložiska (viz obr. 13). Jedná se o úzkou spáru záměrně vytvořenou kolem ložiska, která neumožní vytvoření vakua v jeho blízkosti. První labyrint je vytvořen mezi horním unašečem a horním přítlačným diskem. Druhý labyrint je mezi spodním unašečem a spodním přítlačným diskem.



Obr. 13 Labyrint

1.5.5 Tepelné mosty

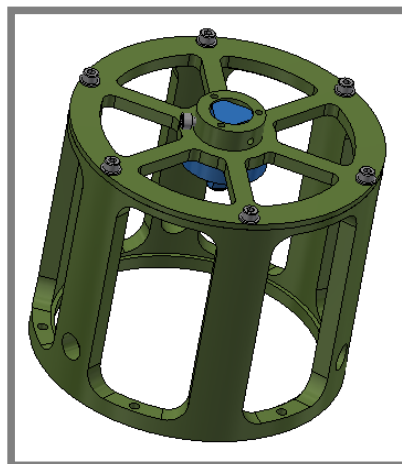
Pro rychlejší výměnu tepla unašečů s ložiskem a okolními součástkami je návrh koncipován k přidělení měděných tepelných mostů (viz obr. 14). Mosty musí být upevněny na statické součástce, a to na horním přítlačném kroužku, aby nedošlo k ovlivnění měření. Horní přítlačný kroužek se dotýká ložiska velmi malou plochou a od ostatních součástí je izolovaný labyrintovým těsněním, tudíž doba předání tepla je relativně dlouhá.



Obr. 14 Tepelné mosty

1.5.6 Klec na upevnění snímače kroučícího momentu

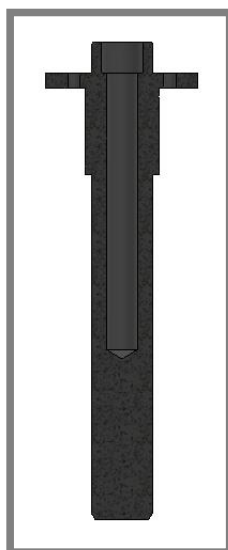
Klec se skládá ze dvou částí (viz obr. 15), které jsou k sobě přišroubované. Vnější rám klece je přišroubován k přírubě. Snímač je upevněný uprostřed vnějšího pouzdra klece šroubem M4. Obě součásti jsou vytvořené tak, aby zajišťovaly dostatečnou torzní tuhost pro měření momentu a zároveň obsahovaly prostor pro odvod kabelů od měřících zařízení a prostor pro utažení spojky. Čidlo na snímání momentu označení TQM201 je od firmy Omega.



Obr. 15 Klec

1.5.7 Hřídel

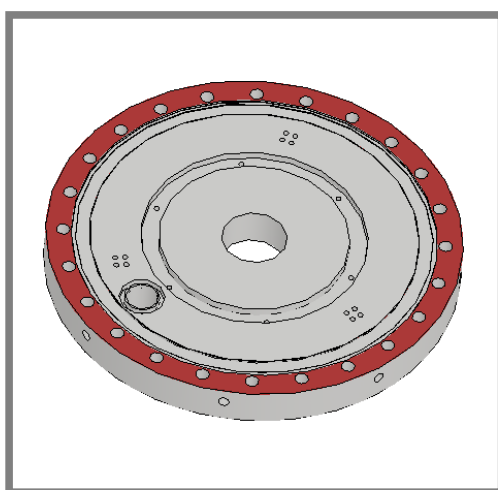
Hřídel (viz obr. 16) je spojená přes spodní spojku s převodovkou a přenáší pohyb do spodního unašeče přes izolační kroužek. Aby se minimalizoval přenos tepla, je hřídel oddělena izolačním kroužkem a je vrtaná v horní části. Přenos tepla je nutné zamezit, aby nedošlo k poškození vakuové průchodky.



Obr. 16 Hřídel

1.5.8 Příruba

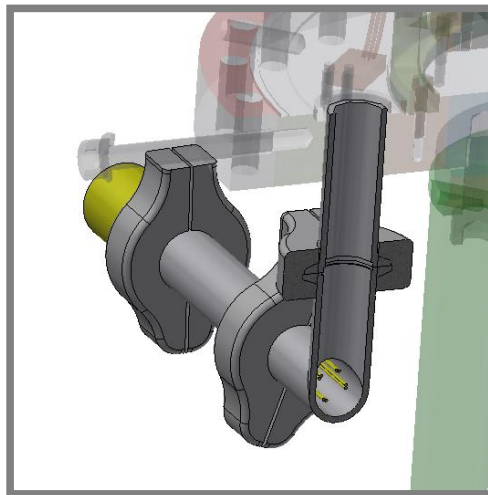
Příruba (viz obr. 17) v tomto zařízení spojuje téměř všechny celky dohromady. Zespodu jsou čtyři otvory se závitem M10 pro upevnění vakuové průchodky a příruby, na které je upevněn samotný motor a převodovka. Seshora příruby bude



Obr. 17 Příruba

upevněna klec, která uchycuje snímač momentu upevněný k vlnovcové spojce. Vzhledem k pomalé výměně tepla je možnost přichytit k přírubě měděné vodiče, které se uchytí na horní unašeč. Příruba slouží také k upevnění celého zařízení ke stolku pro bezpečnou manipulaci a stabilizaci zařízení. Po obvodu příruby jsou díry pro upevnění kolene pomocí šroubů M8 k vytvoření vakua. Pro utěsnění spoje bude mezi kolennem a přírubou vložen měděný kroužek, který vlivem přítlačné síly šroubů vyplní drobné mezery a utěsní tak spoj.

Odvod drátů od měřících zařízení je zprostředkován pomocí těsnícího potrubí od firmy Pfeiffer vakuum (viz obr. 18), které je upevněné k přírubě pomocí svaření, proto je v přírubě díra o průměru 20 mm. Vodiče vedou do zařízení na zaznamenávání průběhů výsledků.



Obr. 18 Odvod drátů

1.5.9 Vakuová průchodka

Vakuum pro testování ložiska bude vytvořeno jen v horní části simulátoru. Zbytek zařízení musí být utěsněn. K utěsnění hřídele byla zvolena ferrofluidní vakuová průchodka, která bude nasazená na hřídeli. Průchodka obsahuje ferrofluidní kapalinu, dva O-kroužky a permanentní magnet, který kapalinu drží na požadovaném místě, aby byla hřídel utěsněna. Síla magnetu je natolik velká, aby udržela kapalinu na svém místě, i když na ni bude působit okolní tlak vyrovnávající vakuum. Typ vakuové průchodky KJLC byla zakoupena od firmy Kurt J. Lesker.

1.5.10 Vlnovcové spojky

V zařízení jsou použity dvě vlnovcové spojky. První spojuje planetovou převodovku s hřídelí, druhá spodní přítlačný kroužek se zařízením na měření momentu. Hlavním důvodem použití spojek je vyrovnání vyosení jednotlivých komponent. Nevýhodou spojek je její relativně malá torzní tuhost, která může způsobit nepřesnosti při měření momentu. Horní vlnovcová spojka má výrazně nižší tuhost než spodní. Důvodem je, že tepelná roztažnost klece by mohla ovlivnit zatížení ložiska. Použitím spojky s nižší tuhostí dojde ke snížení vlivu na ložisko.

1.5.11 Pohon zařízení

1.5.11

Pohonem zařízení je motor od firmy B&R, typová řada 8LVA23 s enkodérem pro sledování polohy. Na motor je připojena převodovka od stejné firmy. Jedná se o planetovou převodovku 8GP60. Pohon zajišťuje potřebný otáčivý pohyb k otestování ložiska.

1.5.12 Přichycení motoru s převodovkou

1.5.12

Motor s převodovkou jsou uchyceny na přírubu motoru, která je přichycená zespodu přes ferrofluidní průchodku k přírubě. Středem příruby motoru je spojena převodovka s hřídelí přes spojku. Příruba motoru musí zajišťovat stabilní uložení pohonu zařízení a přitom musí umožňovat utáhnutí spojky, která spojuje výstup převodovky a hřídele.

1.5.13 Temperace zařízení

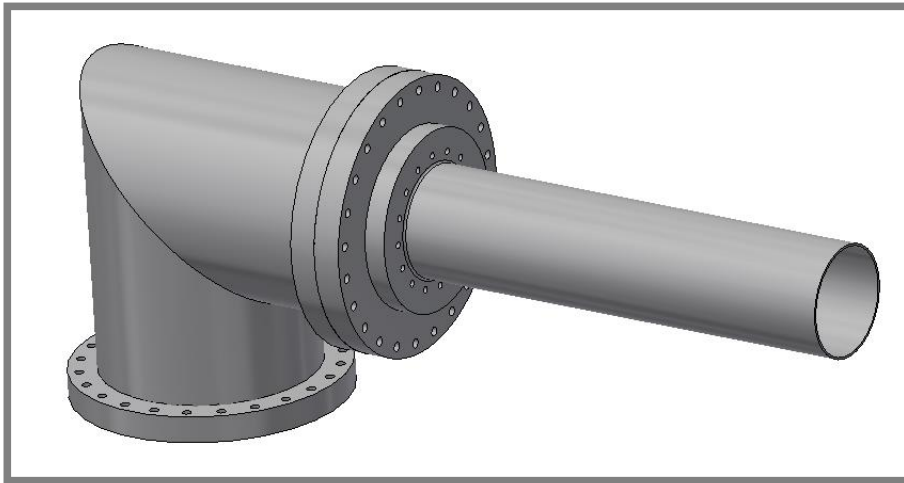
1.5.13

Pro vysoké a nízké teploty, ve kterých bude tester pracovat, je nutné některé součásti temperovat. Jedná se o motor, převodovku a ferrofluidní průchodku. Temperace je zajištěna uložení kolem motoru a převodovky. Jedná se o dva hliníkové bloky s vnitřním tvarem pasující na tvar motoru a převodovky, které se k sobě přišroubují. Oba bloky jsou přichyceny zespodu k přírubě motoru. Bloky mají uvnitř systém kanálků, kterými bude proudit temperační kapalina udržující teplotu. Temperační kapalina také proudí do ferrofluidní průchodky, která je od výrobce na chlazení zařízení.

1.5.14 Potrubí na tvorbu vakua

1.5.14

Potrubí (viz obr. 19) se skládá z kolene a odsávacího potrubí. Koleno je připevněné k přírubě a k odsávacímu potrubí přes průchodky pomocí šroubových spojů se šrouby velikostí M8. Odsávací potrubí dále vede do zařízení, které vytvoří požadované snížení atmosférického tlaku. Jednotlivá spojení jsou utěsněna pomocí vloženého měděného kroužku. Celé sešroubované potrubí se opírá o stůl přes podložky ve tvaru klínu. Koleno se skládá ze dvou kusů potrubí, které mají úkos 45° a jsou navzájem svařené. Důvodem vytvoření pravého úhlu jsou testovací podmínky, ve kterých bude zařízení fungovat.



Obr. 19 Potrubí na tvorbu vakua

2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

2

2.1 Analýza problému

2.1

Z provedené rešerše již vytvořeného testeru ložisek vyplývá, že zařízení je vytvořeno pouze pro testování ložiska o specifickém rozměru. Tester má za úkol ověřit životnost daného ložiska po určenou dobu zátěže v podmínkách, které odpovídají pracovním podmínkám provozu satelitů na nízké oběžné dráze. K otestování jiného ložiska je nutné provést změny, které umožní správné uchycení, předeptnutí a utěsnění nového ložiska. Vzhledem k finanční nákladnosti výroby původního testeru, jsou změny zařízení omezeny na co nejméně komponent. Nejvýznamnější faktory ovlivňující návrh úpravy zařízení jsou rozměry a druh ložiska. Pro návrh úpravy byl poskytnut model nového superduplexního kuličkového ložiska s kosoúhlým stykem. Nové ložisko se odlišuje od původního rozdílným děleným kroužkem, který bude předeptnut. U starého to byl vnitřní kroužek, u nového to bude vnější kroužek. Nové ložisko je i menší. Kvůli menšímu rozměru ložiska a jinému rozdělenému kroužku je nutné vytvořit nové uchycení a předeptnutí ložiska tak, aby bylo rovnoměrně předeptnuto. Nutné je, aby uložení a předeptnutí umožňovalo vyndání ložiska po testování bez poškození, protože ložisko bude následně analyzováno.

2.2 Cíl práce

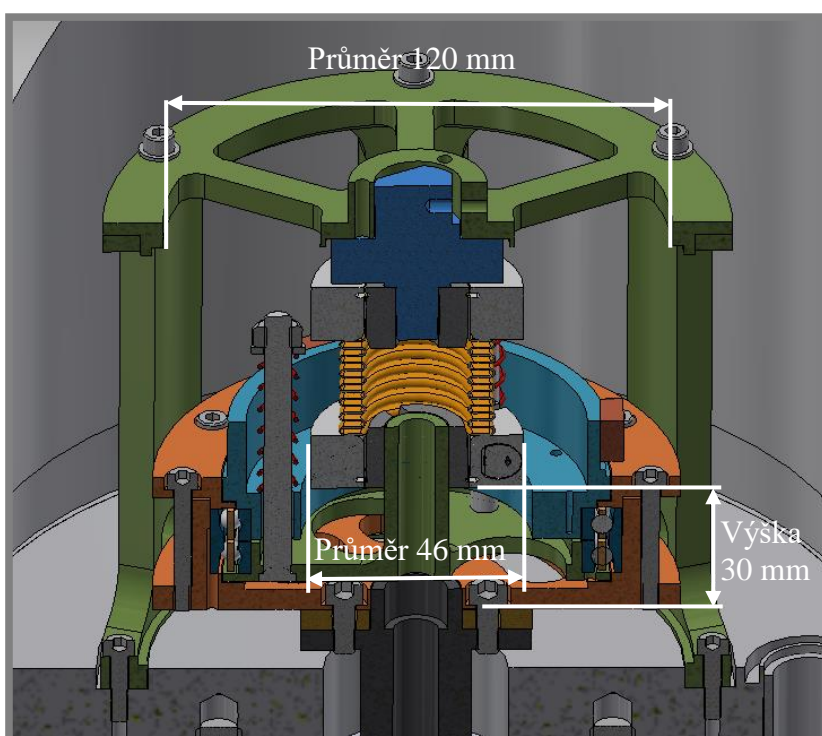
2.2

Hlavním cílem této práce je konstrukční úprava již existujícího testeru ložisek pro vesmírné aplikace s maximálním využitím stávajících komponent na jiný rozměr ložiska. Dílčím cílem práce je vytvoření 3D modelu a 2D dokumentace pro výrobu nových dílů tak, aby bylo možné nové ložisko otestovat.

3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

3.1 Analýza možnosti úpravy zařízení

Současné zařízení je vytvořené pro testování ložiska o konkrétním rozměru, proto je nutné pro otestování nového ložiska zahrnout výměnu přitlačných disků a unašečů. Při úpravě zařízení pro testování jiného ložiska je nutné vycházet z rozměrů současného zařízení, a to v prostoru, kde se tvoří vakuum. Tento prostor je dále limitován velikostí klece. Malý prostor neumožňuje testování ložisek větších rozměrů, nebo testování vyššího počtu ložisek zároveň.



Obr. 20 Prostor pro úpravu

3.1.1 Úprava zařízení pro ložisko s vnitřním rozděleným kroužkem

Hlavními faktorem úpravy je průměr ložiska. Průměr ložiska nesmí překračovat průměr klece (viz obr. 20) Při malém zvětšení průměru (5 mm) je nutné zahrnout výměnu unašečů a přitlačných disků. Pro ložisko většího průměru je nutné zahrnout výměnu klece. Širší klec by znamenala komplikace při návrhu nového řešení, protože příruba, na kterou bude klec připevněna, je uzpůsobena na určitý rozměr. Pro ložisko menšího průměru je nutné posunout trny na předepnutí blíž k ose. Posunutí trnů však vyžaduje zdvižení spojky, protože neumožňuje dostatek prostoru. Zdvižení spojky lze docílit vytvořením nové vyšší klece.

3.1.2 Úprava zařízení pro ložisko s vnějším rozděleným kroužkem

Pro předepnutí ložiska s vnějším rozděleným kroužkem je nutné, aby unašeče byly umístěny zvenčí ložiska a přitlačné disky uvnitř ložiska. Prohození unašečů s disky umožňuje otestovat ložiska menšího průměru, protože trny na předepnutí nebudou zavazet spojce. Průměr ložiska ale nesmí být menší jak 40 mm, protože by neumožňoval přichycení disku k hřídeli. Průměr ložiska nesmí být ani větší jak 100 mm, protože trny na předepnutí by si zavazely s vnějším rámem klece. Dalším faktorem je i výška ložiska. Mezi izolačním kroužkem a spodní částí spojky je mezera 30 mm. V tomhle prostoru musí být ložisko upevněno a musí zde být umístěn i horní unašeč (viz obr. 22), proto nesmí být nové ložisko vyšší jak 20 mm. Pokud by ložisko bylo vyšší, je nutné vytvořit novou vyšší klec.

3.1.3 Možnosti úpravy pro nové ložisko

Nové ložisko oproti původnímu má rozdělený vnější kroužek (viz obr. 21), proto je pro úpravu nutné umístit unašeče zvenku ložiska a disky zevnitř. Nové ložisko má průměr 57 mm a výšku 13 mm. Pro nové ložisko jsou vytvořeny dva koncepty úpravy. První koncept zahrnuje výměnu pouze unašečů s disky, zato druhý zahrnuje výměnu hřídele s izolačním kroužkem. Výhoda prvního konceptu je dostatek prostoru mezi spojkou a unašečem (viz obr. 22). Výhoda druhého konceptu je snazší rozebrání, ale nevýhodou je menší prostor mezi spojkou a unašečem (viz obr. 31). Další nový koncept úpravy nelze z důvodů malého prostoru vytvořit.

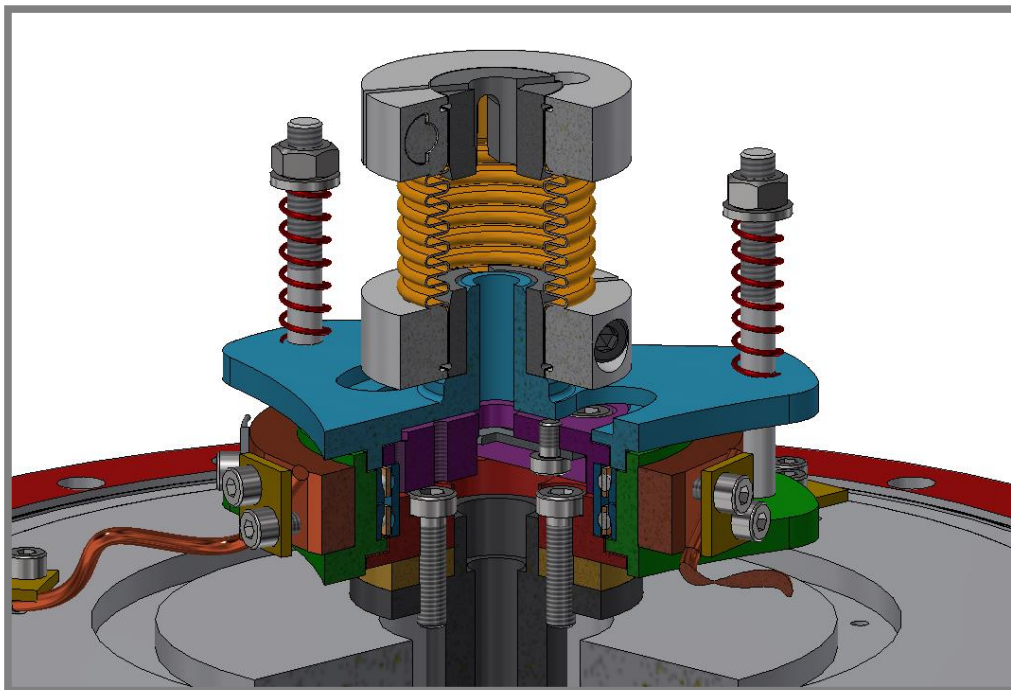


Obr. 21 Srovnání ložisek: nahoře staré, dole nové

3.2 První možnost úpravy zařízení

Při tvorbě prvního koncepčního návrhu bylo kladeno maximální úsilí na využití stávajících komponent. Manipulační prostor pro změnu byl zvolen mezi horním povrchem izolačního kroužku, který je nasazen na hřídeli a spodní částí pružné spojky. Dalším cílem bylo vymyslet předepnutí tak, aby bylo možné využít trny na předepnutí ložiska z původního zařízení. Při tvorbě muselo být zohledněno to, aby upevnění ložiska bylo dobře smontovatelné a rozebíratelné, upevnění bylo co nejpevnější ale zároveň, aby bylo použito nejmenší možné množství materiálu kvůli rychlé temperaci ložiska a minimálnímu ovlivnění předepnutí ložiska vlivem gravitační síly unašečů. Oproti původnímu zařízení bylo nutné unašeče umístit zvenku ložiska a disky zevnitř (viz obr. 22).

Hlavním konstrukčním problémem bylo vytvořit labyrint. Labyrint neumožňuje vytvoření vakua v blízkosti ložiska a neovlivní měření valivého momentu. Dílčími problémy bylo vytvořit předepnutí tak, aby při odplynění během testování mohl vzduch bez problému uniknout z duté pružné spojky a z prostoru mezi jednotlivými součástkami. Důležité je i umístění termočlánků pro měření teploty.



Obr. 22 Koncepční řešení 1

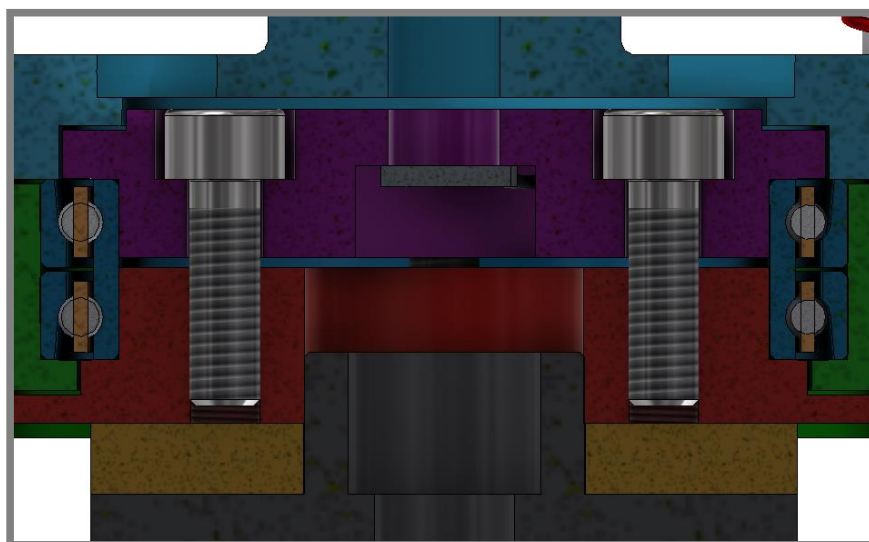
3.2.1 Upevnění vnitřního kroužku ložiska

Upevnění ložiska zkomplikovala řada faktorů. Ložisko musí být upnuto silou 2000 N a zároveň pevně připevněno na hřídel. Upevnění k hřídeli je závislé na rozteči a velikosti děr se závity, které jsou už na hřídeli vytvořené.

První možností, která se nabízí, je upevnění ložiska přes izolační prvek, kdy dojde ke sevření ložiska mezi dva disky (fialový a červený) a zároveň k upevnění ke hřídeli při využití již vytvořených děr v hřídeli a izolačním kotouči. Toto upevnění by vyžadovalo pouze čtyři díry v horním i spodním přítlačném disku. Čtyři šroubové

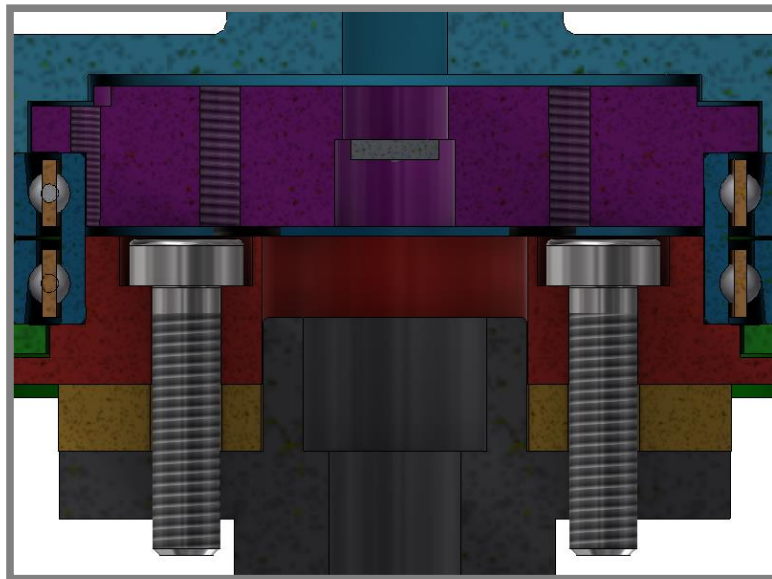
spoje poskytují dostatek prostoru pro umístění termočlánku. Nevýhodou tohoto upevnění je nedostatečná tloušťka části hřídele na připevnění. Disk hřídele má tloušťku pouze 5 mm

Optimálnější upevnění je rozdělit upevnění ložiska a upevnění k hřídeli zvlášť. Ložisko je sevřeno pomocí čtyř šroubů mezi dva disky (viz obr. 23) a upevněno pomocí dalších čtyř šroubů k hřídeli (viz obr. 24). Tato varianta je komplikovanější a složitější na sestavení.



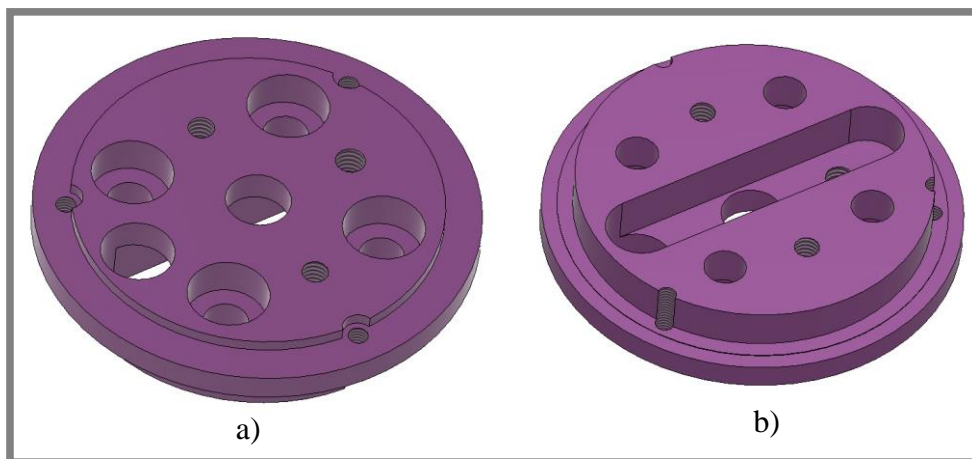
Obr. 23 Upevnění vnitřního kroužku

Spodní červený disk leží na izolačním kroužku a je připevněn k hřídeli čtyřmi šrouby, se sníženou hlavou pro větší šetření místa. Správnou pozici zajistí uložení s malou vůlí na hřídeli. Disk má čtyři díry se závitem M5 na stejné rozteči jako díry pro upevnění na hřídel, ale pootočené o 45° pro přišroubování horního disku. Kvůli riziku zadření musí být uložení ložiska snadno rozebíratelné, aby nedošlo k poškození při rozdělování, proto jsou ve spodním disku díry se závitem M3 na průměru, kde bude přiléhat vnitřní kroužek ložiska (viz obr. 26). Při rozdělování se vyjme disk i s ložiskem, které se vysune pomocí zašroubování šroubů.

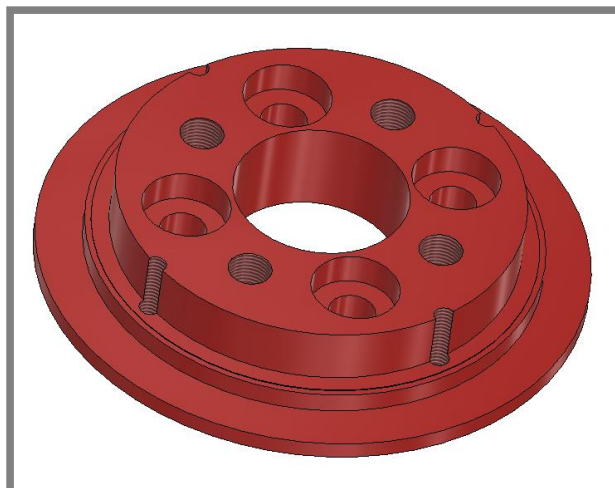


Obr. 24 Upevnění k hřídeli

Horní disk je přišroubován ke spodnímu čtyřmi šrouby M5. Pro lepší rozebírání má disk navíc dvě díry se závity M4 (viz obr. 25). Kvůli měření teploty je potřeba umístit termočlánek do blízkosti vnitřního kroužku, proto je zesponu horního disku vytvořen výřez pro termočlánek se dvěma otvory. První otvor je se závitem na přišroubování a druhý na odvod kabelu.



Obr. 25 Horní přítlačný disk a) pohled shora b) pohled zesponu

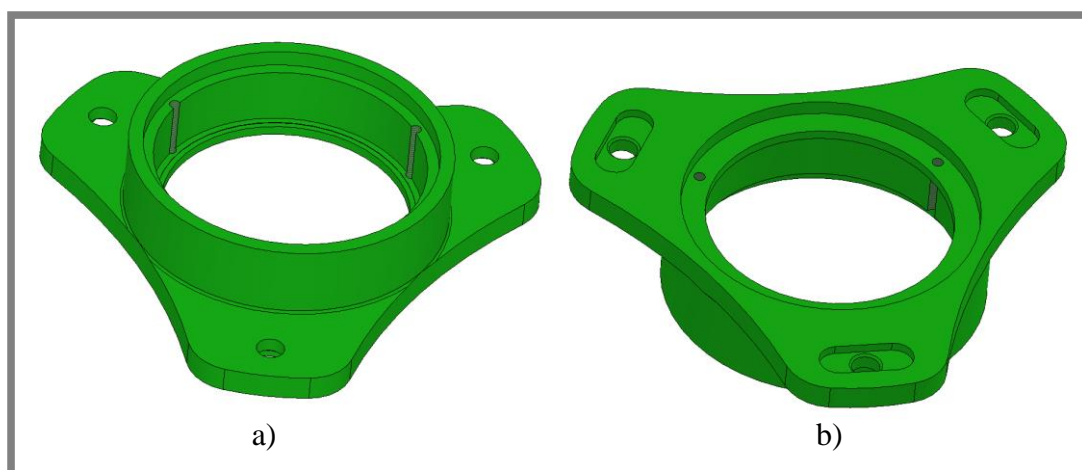


Obr. 26 Spodní přítlačný disk

3.2.2 Upevnění vnějšího kroužku ložiska

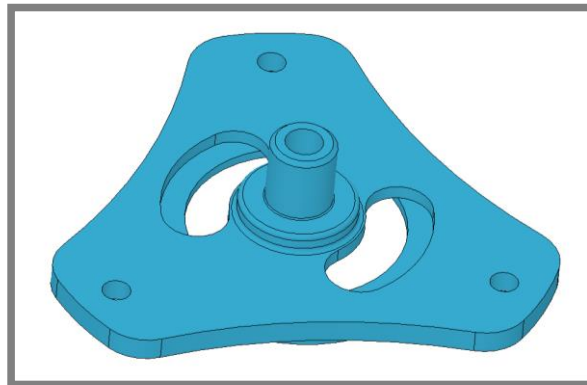
3.2.2

Vnější kroužek ložiska je předeprnut dvěma unašeči, kde je přítlačná síla vytvořena třemi pružinami na trnech. Unašeče byly se záměrem vytvořeny tak, aby bylo možné využít trny z původního zařízení, vzhledem k podobné požadované síle předeprnutí ložiska není nutné použít jiné pružiny. Do spodního zeleného unašeče jsou vytvořeny díry se závitem M3 pro vyšroubování ložiska (viz obr. 27). Spodní unašeč musí být uzpůsobený pro nasazení tepelného kroužku pro rychlejší výměnu tepla.



Obr. 27 Spodní unašeč a) pohled shora b) pohled zespodu

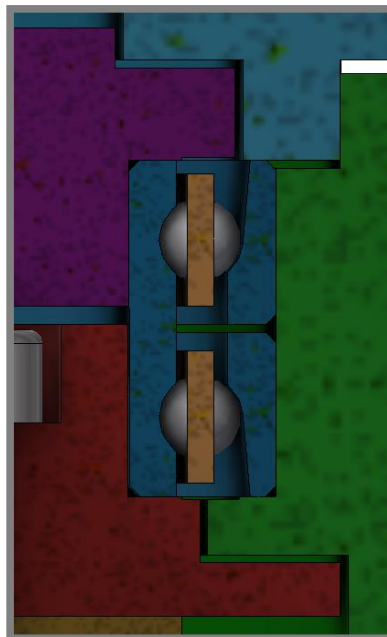
Horní modrý unašeč je vytvořen tak, aby pasoval ke spodnímu unašeči. V horním unašeči jsou vytvořené dva otvory pro odvod vzduchu z pružné spojky a zároveň drátu od termočláčku (viz obr. 28), který je upevněn na disku. Horní unašeč má vytvořený doraz pro nasazení spojky. Vzhledem k malému prostoru bylo nutné vše vytvořit tak, aby zde vyšlo místo pro odvod drátu od termočláčku.



Obr. 28 Horní unašeč

3.2.3 Labyrint

Kolem ložiska je vytvořený labyrint tvarem unašečů s disky (viz obr. 29). První labyrint je vytvořený mezi horním fialovým přítlačným diskem a horním modrým unašečem. Druhý je vytvořen mezi spodním červeným diskem a spodním zeleným unašečem. Rozměry labyrintu byly navrženy podle standardně používaných rozměrů. Minimální délka labyrintu byla zvolena 10 mm a tloušťka spáry 0,3 mm.

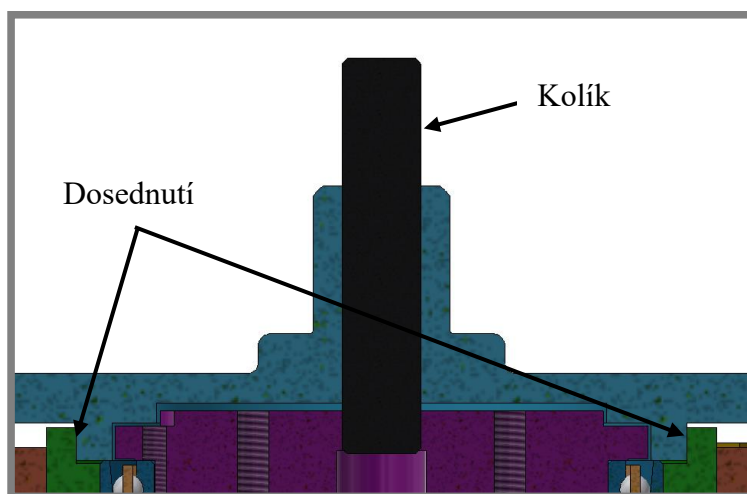


Obr. 29 Labyrint

3.2.4 Vycentrování

Pro správné vytvoření labyrintu a zamezení kontaktu unašečů s disky bylo nutné vymyslet sestavení tak, aby se dala zajistit správná poloha součástí. Přítlačné disky jsou dány do optimální polohy vnitřním kroužkem ložiska, ale vnější unašeče proti diskům jsou polohovány celým ložiskem. Ložisko bez předpětí bude měnit pozici unašečů. Řešením je vytvoření dvou stejných otvorů, které jsou naproti sobě. Jeden je v horním červeném disku a druhý v modrém horním unašeči. Před předepnutím ložiska se vycentruje horní unašeč s horním diskem pomocí vloženého kolíku (viz obr. 30).

Spodní unašeč je vůči hornímu vycentrován svým tvarem tak, aby vytvořily uložení s malou vůlí. Po předepnutí je nutné kolík vyndat.

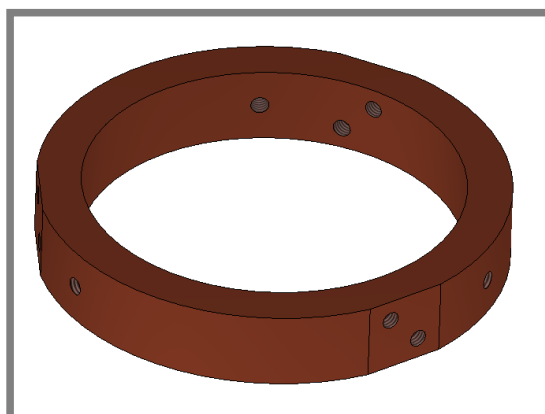


Obr. 30 Centrování

3.2.5 Tepelné mosty

3.5.2

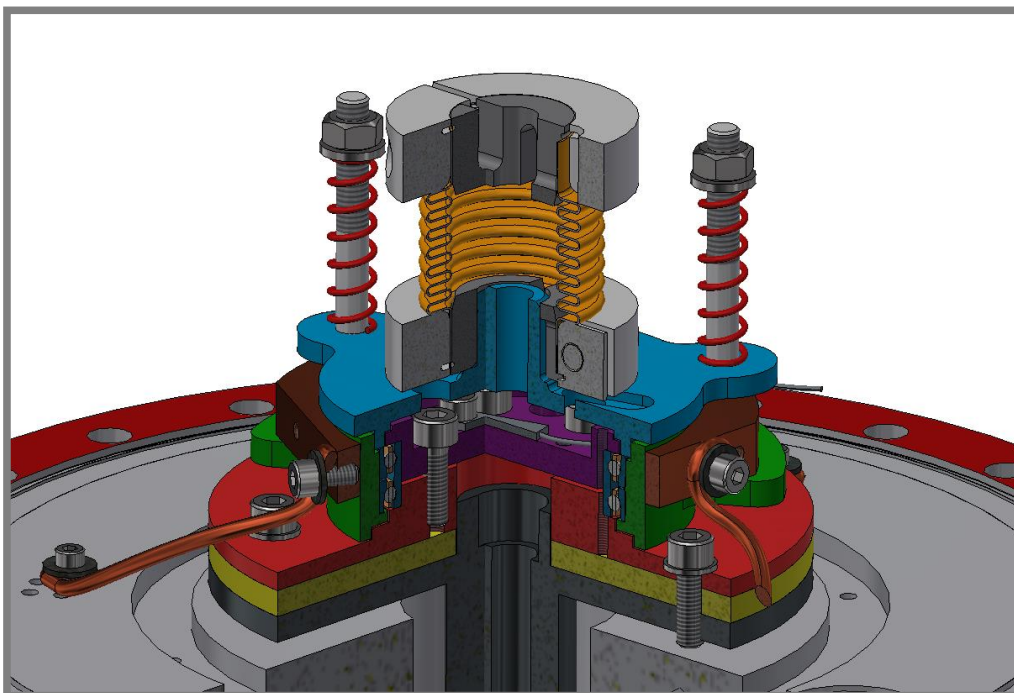
Z testování původního zařízení popsaného v první kapitole vyplynulo, že přidání tepelných mostů je velice důležité pro rychlejší testování ložiska. Nabízela se varianta upevnění tepelných mostů na horní unašeč, jak tomu bylo v původním zařízení. Tato varianta by byla ale málo efektivní kvůli malé stykové ploše horního unašeče a ložiska. Proto má nové řešení umístění tepelných mostů na spodním unašeči (viz obr. 31), ve kterém je umístěn celý vnější kroužek ložiska. Spodní unašeč je vytvořen tak, aby se na něj mohl nalisovat měděný kroužek, ke kterému budou připevněny vodiče pro přenos tepla. Dráty budou připevněny pomocí měděného plíšku a dvou šroubů. Měděný kroužek způsobí, že přenos tepla bude rovnoměrnější a rychlejší díky větší ploše kontaktu, než přenos tepla v původním zařízení. Tuto variantu lze použít především díky velice podobné tepelné roztažnosti mědi ($16,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) a nerezové oceli $17\ 240$ ($17,3 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$).



Obr. 31 Měděný kroužek

3.3 Druhá možnost úpravy zařízení

Při návrhu druhého konceptu byl záměr optimalizovat první koncepční řešení. Vzhledem k malé rozteči děr v hřídeli a malému průměru vnitřního kroužku ložiska nezbývalo moc prostoru pro další varianty upevnění vnitřního kroužku ložiska, proto bylo do návrhu nového řešení potřeba zahrnout výměnu hřídele a izolačního kroužku. Tato změna umožní upevnění spodního červeného přitlačného disku vně ložiska (viz obr. 32). Přesunutí upevnění poskytuje větší prostor pro upevnění ložiska mezi disky. Další výhodou je snadnější demontáž. Upevnění přitlačného kroužku vně ložiska umožňuje vyšroubování šroubů a vysunutí ložiska jako celku s unašeči i přitlačnými kotouči. Návrh nového řešení byl koncipován pro využití trnů z původního testeru. Pro optimální předepnutí je důležité rozmístění trnů po 120° , proto bylo navrženo, aby připevnění spodního přitlačného kroužku bylo pomocí tří šroubů rovnoměrně rozmístěných po 120° . Trny na předepnutí jsou opřeny zespodu spodního unašeče a pružina opírající se o matici s podložkou přitlačuje horní unašeč. Ložisko je osazeno dvěma termočláanky. První termočlánek měří teplotu v místě vnitřního kroužku ložiska a je upevněn na horním disku (viz obr. 32). Druhý termočlánek bude umístěn na tepelném kroužku. Nevýhodou tohoto konceptu je zvětšení výšky upínacích disků ložiska. Zvýšení výšky znamená zmenšení prostoru pro horní unašeč a pro drát od termočláanky.

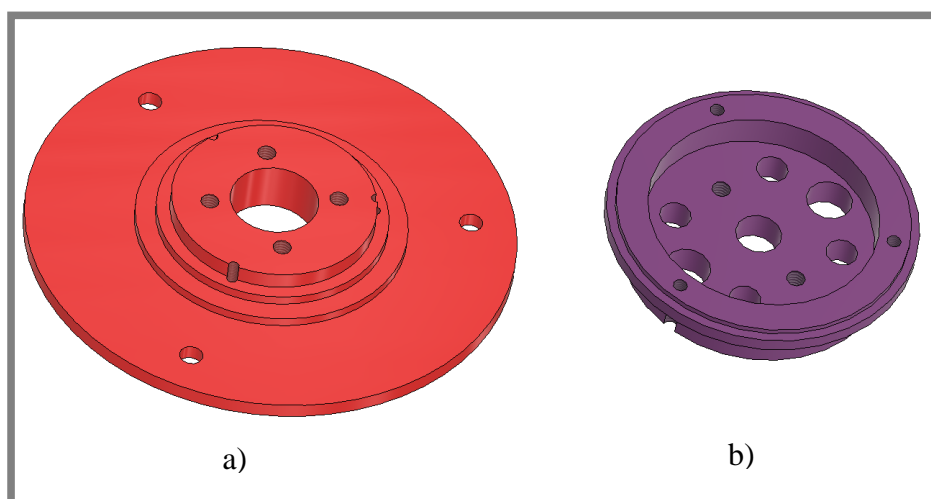


Obr. 32 Koncepční řešení 2

3.3.1 Upevnění vnitřního kroužku ložiska

Vnitřní kroužek ložiska je upevněn mezi dva disky. Spodní červený disk je připevněn k hřídeli přes žlutý izolační kroužek pomocí tří šroubů vně ložiska. Počet a rozmístění

šroubu je takové, aby se nepřekrývaly s trny na předepnutí. Rozmístění umožní uvolnit spodní disk bez rozmontování předepnutí a vyndání ložiska s disky a unašeči jako sestavu. Horní fialový přítlačný disk je přichycen ke spodnímu disku pomocí čtyř šroubů. Oba disky jsou opatřeny dírami se závity, které umožňují bezpečné rozebírání i po zadření ložiska (viz obr. 33). V horním fialovém disku je vytvořeno zahlbounění pro větší prostor pro šrouby a pro přiblížení termočláneku k vnitřnímu kroužku ložiska. Termočlánek je přichycený pomocí šroubu na horním disku.

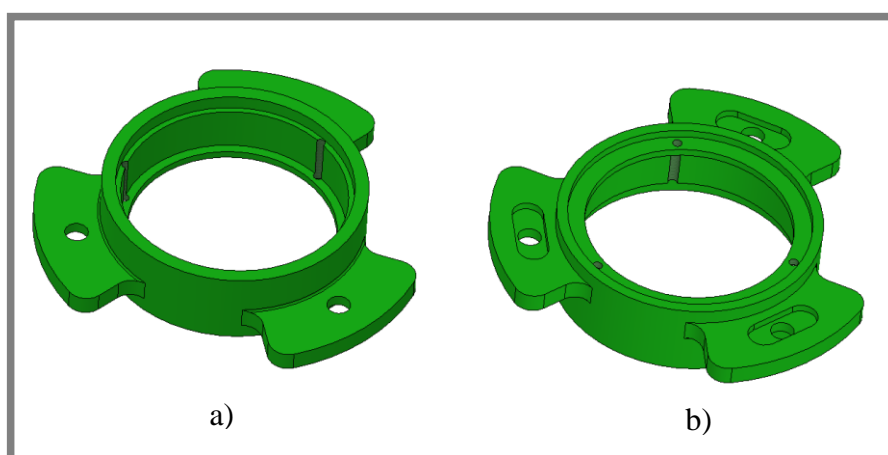


Obr. 33 Uchycení vnitřního kroužku ložiska a) spodní disk, b) horní disk

3.3.2 Upevnění vnějšího kroužku ložiska

3.3.2

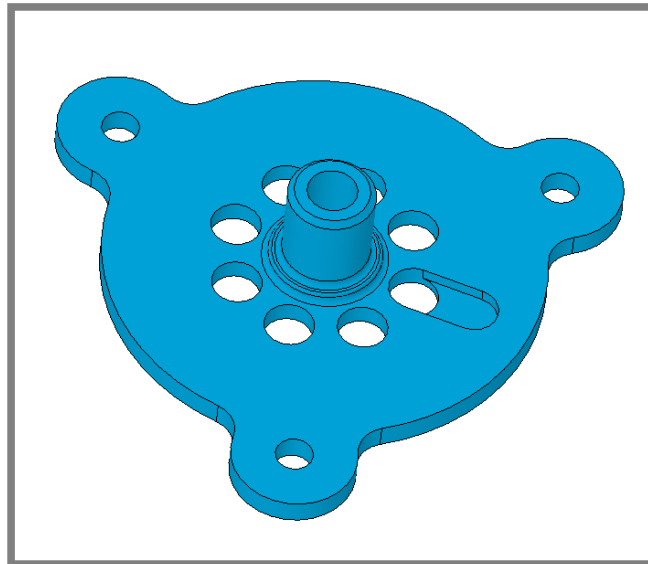
Vnější kroužek ložiska je upevněn mezi dva unašeče, které jsou k sobě přitlačovány pružinami na trnech. Úprava se snaží využívat trny z původního zařízení, aby se minimalizovaly náklady. Unašeče jsou velmi podobné první úpravě. Ve spodním unašeči jsou díry se závity pro bezpečné rozebrání (viz obr. 34). Vzhledem ke zvýšení



Obr. 34 Spodní unašeč a) pohled shora b) pohled zespodu

uložení je velice malá mezera mezi vlnovcovou spojkou a horním unašečem, proto je v horním unašeči vytvořena drážka pro drát z termočláneku (viz obr. 35). Druhý

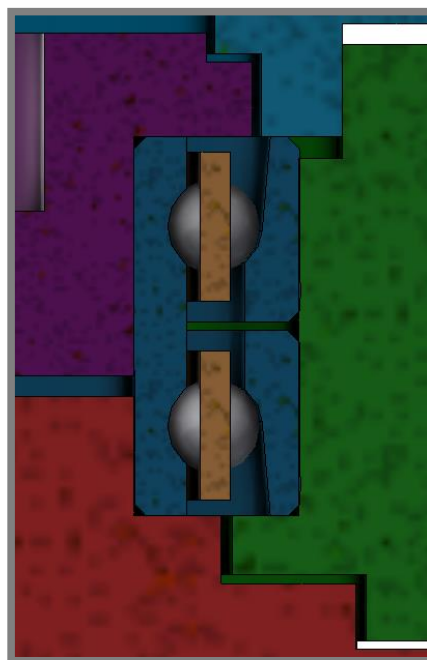
termočlánek je připevněn z boku tepelného kroužku nasazeného na spodním unašeči. V horním modrém unašeči jsou díry pro odchod vzduchu ze spojky. Jedna díra je využita pro provlečení drátu od termočládku.



Obr. 35 Horní unašeč

3.3.3 Labyrint

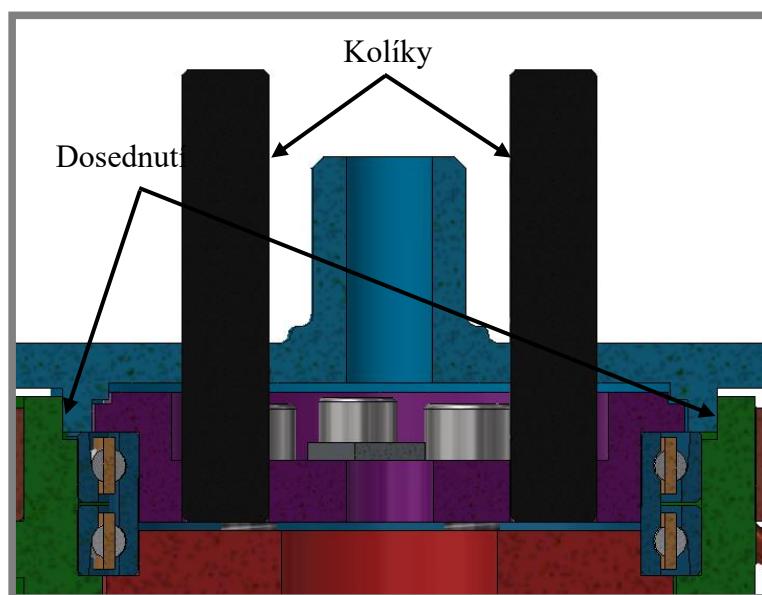
Ložisko je chráněno před vakuem stejným způsobem jako v první úpravě. První labyrint je vytvořen mezi horním fialovým přítlačným diskem a horním modrým unašečem a druhý labyrint je mezi spodním červeným diskem a spodním zeleným unašečem (viz obr. 36). Oba unašeče jsou uloženy v sobě s malou vůlí kvůli přesnému uložení horního unašeče, proto mezi unašeči labyrint není.



Obr. 36 Labyrint

3.3.4 Vycentrování

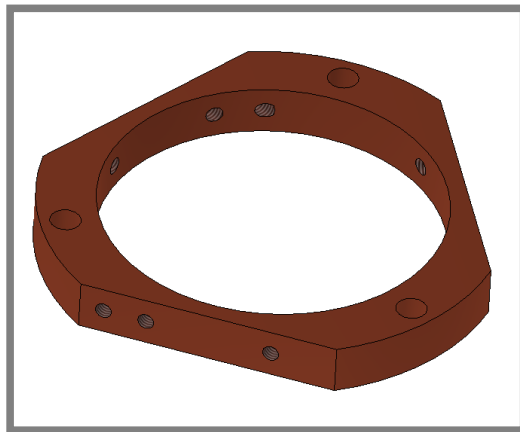
Centrování unašečů vůči přítlačným diskům bylo zkomplikováno umístěním vnitřního termočlánu. Termočlánek totiž překáží k použití střední díry v horním unašeči. Proto je v unašeči osm otvorů. Dva stejné otvory jako v unašeči jsou vytvořené v horním fialovém disku. K centrování tedy bude použito dvou kolíků (viz obr. 37). Po změření doby ochlazení ložiska se dá sestavení rozdělat a po vyndání termočlánu lze využít prostředního otvoru v unašeči a prostředního otvoru v horním disku.



Obr. 37 Centrování

3.3.5 Tepelné mosty

Tepelné mosty jsou stejného principu jako v první úpravě. Jedná se o měděný kroužek (viz obr. 38), který je nalisovaný na spodní unašeč. Ke kroužku jsou přichyceny dráty pomocí šroubu, nebo pomocí destičky a dvou šroubků. V tomto řešení musí být kroužek upraven, aby umožňoval odšroubování spodního disku od hřídele, aby se zachovalo snadná demontáž zařízení.



Obr. 38 Měděný kroužek

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V předchozí kapitole byly popsány dvě možné úpravy simulátoru. První varianta zahrnuje výměnu unašečů a přítlačných disků, zato druhá varianta zvažuje i výměnu hřídele a izolačního kroužku, proto bude realizována první varianta. Nové unašeče a přítlačné disky budou vyrobeny z nerezové oceli 17 240. Kroužek na upevnění tepelných mostů bude z mědi. Nové řešení oproti původnímu bude při sestavování vycentrované. Centrování zamezí vzniku kontaktu unašečů s disky. Měděný kroužek k připevnění tepelných mostů způsobí rovnoměrné předání tepla.

Tab. 1 Vstupní hodnoty

Název	Hodnota
Síla upevnění ložiska	2000 N
Síla předepnutí ložiska	150 N

4.1 Volba pružin

Ložisko je potřeba předepnout silou 150 N. Předepnutí je vyřešeno stejně, jak v původním testeru pomocí 3 pružin na trnech. Z důvodu minimalizace nákladů byly zvoleny stejné pružiny. Jedná se o nerezové pružiny od firmy Alcomex s označením D2170. Do přítlačné síly je nutnost započítat gravitační sílu spodního unašeče, trnů s šroubky a měděný kroužek. Součástky dohromady váží 0,561 Kg.

$$Fg = m * g = 0,561 * 9,81 = 5,5 \text{ N}$$

Od požadované síly předepnutí se musí gravitační síla odečíst.

$$Fv = F - Fg = 150 - 5,5 = 144,5 \text{ N}$$

Výsledná síla, kterou bude jedna pružina působit na ložisko je

$$Fv1 = \frac{Fv}{3} = \frac{146,459}{3} = 48,2 \text{ N}$$

Výsledné stlačení jedné pružiny je potom

$$x = \frac{Fv1}{c} = \frac{48,2}{4,86} = 10 \text{ mm}$$

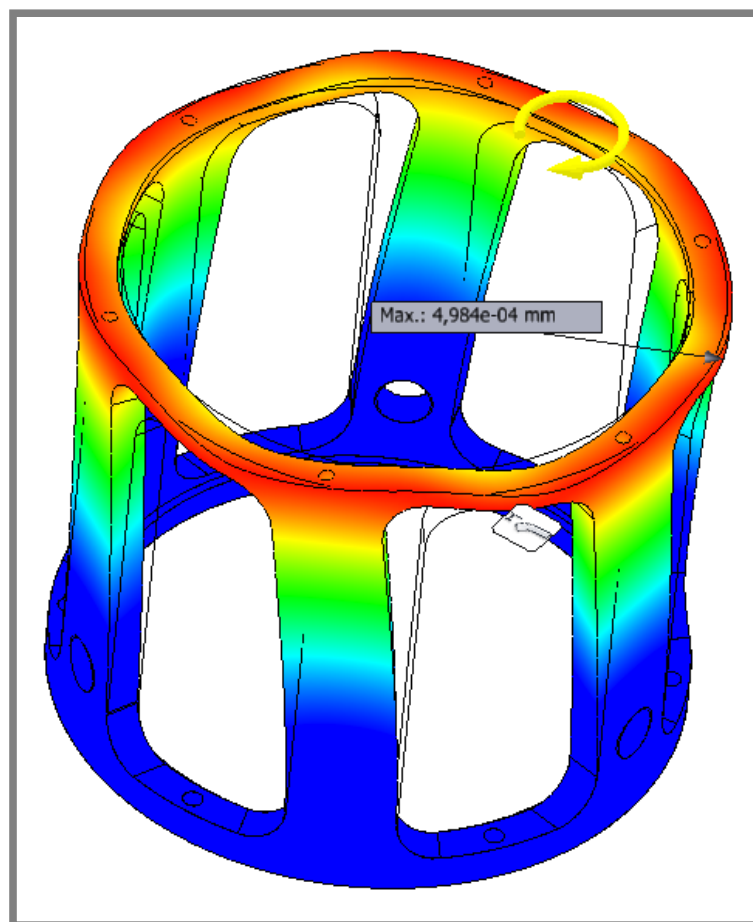
Na trnech je závit M6 se stoupáním 1 mm. Proto je pro předepnutí ložiska potřeba matice utáhnout o 10 otáček.

Použité parametry:

c [N/mm] tuhost pružiny
g [m/s²] gravitační zrychlení

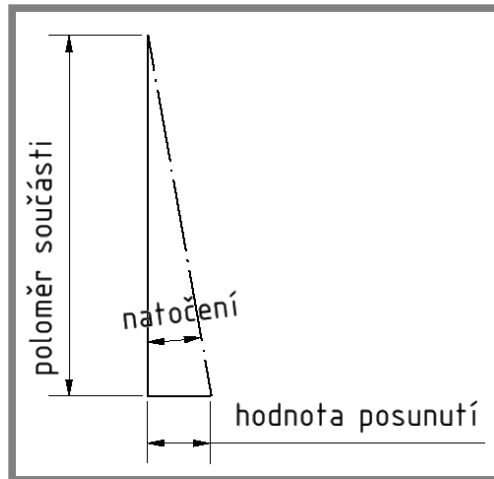
4.2 Torzní tuhost zařízení

Kvůli přesnosti měření třecího momentu ložiska, je potřeba stanovit chybu měření, která vznikne deformací komponent, které předávají krouticí moment. Pomocí programu Inventor byly provedeny pevnostní analýzy (viz obr 39), kvůli určení tuhosti.



Obr. 39 Pevnostní analýza vnějšího rámu

Postup při výpočtu byl takový, že se zjistilo místo a velikost posunutí způsobené kroutícím momentem 1Nm. Potom bylo vypočteno natočení součásti a zjistilo se tak jakou má součást torzní tuhost (viz obr 40).



Obr. 40 Postup řešení

Velikost natočení se spočítá přes goniometrickou funkci tangens.

$$\tan \alpha = \frac{\text{hodnota posunutí}}{\text{poloměr součásti}}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{\text{hodnota posunutí}}{\text{poloměr součásti}} [^\circ]$$

Tuhost se spočítá

$$k = \frac{\text{kroutící moment}}{\alpha} [Nm/^\circ]$$

Sestavení zařízení se dá nahradit systémem torzních pružin zapojených sériově.

Celková torzní tuhost se vypočítá

$$\frac{1}{k_s} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_6} + \frac{1}{k_7} + \frac{1}{k_8} + \frac{1}{k_9} + \frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_{11}}$$

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_6} + \frac{1}{k_7} + \frac{1}{k_8} + \frac{1}{k_9} + \frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_{11}}} =$$

$$k_s = \frac{1}{\frac{1}{1154} + \frac{1}{420} + \frac{1}{297} + \frac{1}{267} + \frac{1}{124173} + \frac{1}{27417} + \frac{1}{34295} + \frac{1}{943} + \frac{1}{69} + \frac{1}{2591}}$$

$$= 37,324 \text{ Nm/}^\circ$$

Z celkové tuhosti snadno zjistíme moment potřebný pro natočení o jeden stupeň.

$$M = k_s * \alpha =$$

$$M = 37,324 * 1 = 37,324 \text{ Nm}$$

Pro natočení celé soustavy o jeden stupeň je potřeba zatížit komponenty kroutícím momentem o velikosti 37,324 Nm. Taková situace nenastane, pokud ložisko bude správně fungovat. Ve skutečnosti zařízení bude pracovat v malém zatížení. Větší vliv na odchylku při měření bude mít zubová vůle v převodovce, která je 5 [arcmin]. V přepočtu na stupně to je 0,08333 stupně.

Při porovnání tuhostí změněných součástí a součástí z původního zařízení je zřejmé, že nové součásti nemají vliv na odchylku při měření, a to díky své vysoké torzní tuhosti.

Tab. 2 Kontrolované součásti

Název	Torzní tuhost
Příruba motoru	1154 Nm/°
Převodovka	420 Nm/°
Spodní spojka	297 Nm/°
Hřídel	267 Nm/°
Spodní přítlačný kroužek	124173 Nm/°
Horní přítlačný kroužek	27417 Nm/°
Spodní unašeč	34295 Nm/°
Horní unašeč	943 Nm/°
Horní spojka	69 Nm/°
Vnější pouzdro	2591 Nm/°
Vnější rám	2383 Nm/°

4.3 Upevnění vnitřního kroužku ložiska

Vnitřní kroužek ložiska musí být upevněn silou 2000 N. Kroužek ložiska je sevřen mezi dva přítláčné disky pomocí 4 šroubových spojů M5.

Tab. 3 Rozměry pro šroub M5x0.8 [mm] [17]

D	d3max	d2max
5	4.11	4,456

Síla na jeden šroub je

$$F = \frac{F_i}{4} = \frac{2000}{4} = 500 \text{ N}$$

Velikost dovoleného předpětí ve šroubu

$$F_i = 0,75 * Re * A_t = 0,75 * 200 * 12,5 = 1875 \text{ N}$$

Kontrola bezpečnosti šroubu vychází z napětí ve šroubu, které je

$$\sigma = \frac{F_i}{A_t} = \frac{1875}{12,5} = 132 \text{ MPa}$$

Potom je bezpečnost

$$k = \frac{Re}{\sigma} = \frac{200}{132} = 1,5$$

Utahovací moment pro sílu předpětí 2343 N je

$$M = K * F_i * D = 0,2 * 2343 * 5 = 1875 \text{ Nmm} = 1,875 \text{ Nm}$$

Kontrola počtu závitů n je

$$n = \frac{F}{\pi * d_2 * H_1 * p_d} = \frac{1875}{\pi * 4,45 * 0,445 * 60} = 6$$

Kde H_1 je

$$H_1 = \frac{D - d_3}{2} = \frac{5 - 4,11}{2} = 0,445 \text{ mm}$$

A tlak v závitu p_d je

$$p_d = \frac{0,6 * Re}{2} = \frac{0,6 * 200}{2} = 60 \text{ MPa}$$

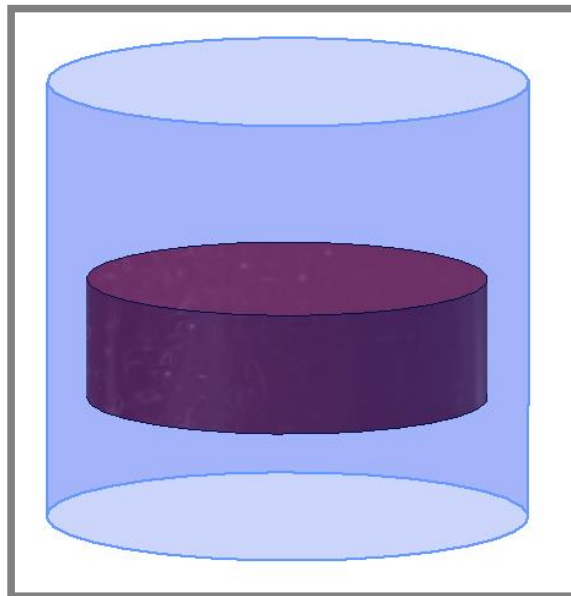
Šrouby jsou zašroubované ve spodním disku, který umožňuje zašroubování šroubů do hloubky 9 mm. Taková hloubka odpovídá 11 závitům. Počet závitů je téměř dvojnásobný než minimální počet.

Použité parametry:

A_t [mm ²]	průřez šroubu
R_e [MPa]	mez kluzu šroubu
K [-]	součinitel utahovacího momentu
D [mm]	jmenovitý průměr šroubu
d_3 [mm]	malý průměr šroubu
d_2 [mm]	střední průměr závitu šroubu

4.4 Tepelná výměna

Kvůli vakuu, ve kterém bude ložisko zkoušeno, bude probíhat tepelná výměna jen vedením a zářením. Pro testované podmínky -40 °C je potřeba zjistit čas ochlazení. Pro složitost povrchů součástí byl výpočet proveden na zjednodušeném modelu (viz obr. 41). Menší válec nahrazuje upevnění ložiska a větší válec, který ho obklopuje, nahrazuje prostor, ve kterém se nachází. Tato metoda ale není přesná, protože uvažujeme homogenní těleso. Ve skutečnosti je upnutí ložiska složené ze 4 hlavních částí, které jsou od sebe izolovány labyrintem, proto bude reálná doba ochlazení delší. Touto metodou, ale lze dobře srovnat účinnost výměny tepla vedením a zářením, proto byly vypočítány dvě možnosti.



Obr. 41 Zjednodušený model

4.4.1 Tepelná výměna zářením

Výpočet času ochlazení získáme

$$Q = \dot{Q} * \tau [J]$$

$$\tau = \frac{Q}{\dot{Q}} [s]$$

Kde Q je teplo, které válec odevzdá při ochlazování.

$$Q_1 = m * c * (T_2 - T_1) = 1 * 500 * (233,15 - 293,15) = -30000 J$$

c je měrná tepelná kapacita 17 240 oceli [18].

Znaménko mínus značí směr přechodu tepla, tzn. odevzdání okolnímu prostředí.

Jedná se o nestacionární výměnu tepla, kde se tepelný tok \dot{Q} mění s časem ochlazování. Čím více se teplota modelu blíží konečné teplotě, tím pomaleji se chladí. Pro výpočet klesajícího tepelného toku se celkové teplo rozdělilo do deseti intervalů po 3000 J. Pro každý interval byl spočítán vlastní tepelný tok. Tepelný tok pro jeden interval se spočítá

$$\dot{Q}_1 = \sigma_0 * \varepsilon_{12} * S_1 (T_i^4 - T_j^4) = [W]$$

Kde se emisivita ε_{12} získá z jednotlivých emisivit ε_1 a ε_2 . [19]

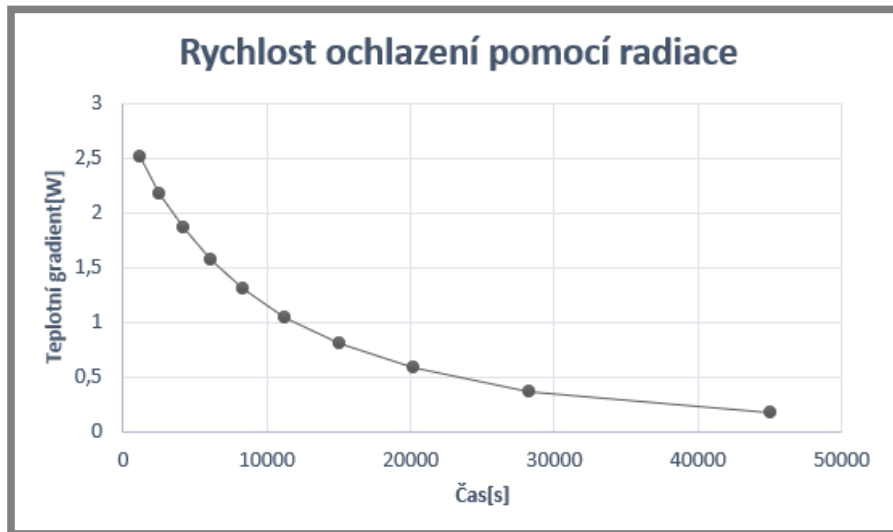
$$\varepsilon_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{S_1}{S_2} * \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} = \frac{1}{\frac{1}{0,5} + \frac{0,0251}{0,0641} * \left(\frac{1}{0,5} - 1\right)} = 0,418$$

Výpočet času ochlazení pro jeden interval je

$$\tau = \frac{Q_1}{\dot{Q}_1} [s]$$

Kde Q_1 je teplo jednoho intervalu a \dot{Q}_1 je tepelný tok jednoho intervalu.

Celkový čas ochlazení je součtem jednotlivých časů ochlazení intervalů. Z grafu na obr. 42 lze rozpoznat, že jde o hyperbolickou funkci v prvním kvadrantu. Doba ochlazení přibližně odpovídá 12 hodinám.



Obr. 42 Rychlost ochlazení pomocí radiace

Použité parametry:

T_i [K]	původní teplota
T_j [K]	koncová teplota
m [kg]	hmotnost
c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
σ_0 [W.m ⁻² .K ⁻⁴]	Stefan – Boltzmannova konstanta
S_1 [m ²]	plocha ochlazovaného povrchu
S_2 [m ²]	plocha chladného povrchu
ε_1 [-]	emisivita ochlazovaného povrchu
ε_2 [-]	emisivita chladného povrchu

4.4.2 Tepelná výměna vedením

Ochlazení lze značně urychlit přidáním prvků, které dobře vedou teplo. Pro jednoduchost lze použít měděné vodiče. Jsou levné, jednoduché na použití a především dobře vedou teplo [20]. Postup výpočtu je stejný jako v předchozím případě. Výpočet se rozdělil do intervalů, ve kterých se spočítal tepelný tok. Potom se vypočítaly časy ochlazení jednotlivých intervalů, které se sečetly, a tak se získal celkový čas ochlazení. Tepelný tok jednoho intervalu je

$$\dot{Q}_1 = S * \frac{t_i - t_j}{\frac{l}{\gamma}} [W]$$

Kde plocha S je plocha průřezů všech drátů. Tloušťka drátů byla zvolena 4 mm a délka l je 100 mm.

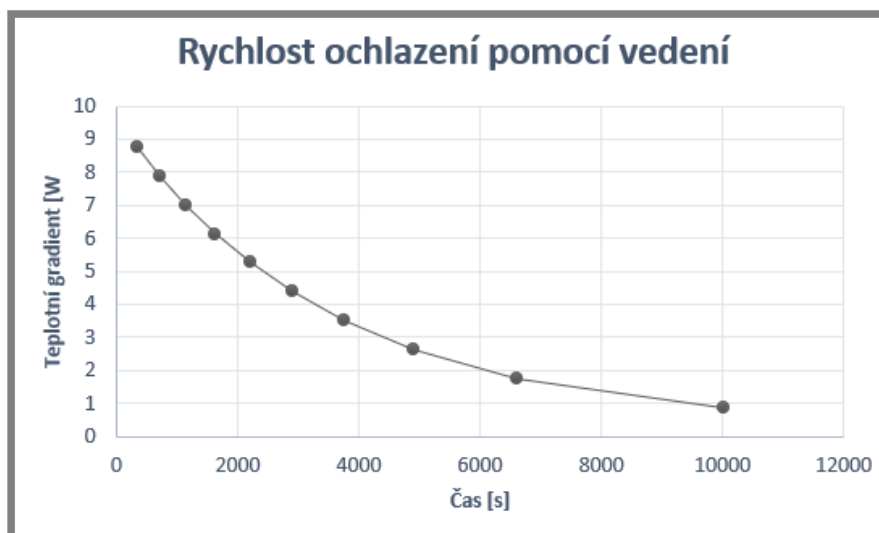
$$S = \pi * r^2 * \text{počet drátů} = \pi * 0,002^2 * 3 = 3,76 * 10^{-5} \text{ mm}^2$$

Potom je čas ochlazení jednoho intervalu

$$\tau = \frac{Q_1}{\dot{Q}_1} [\text{s}]$$

Kde Q_1 je množství tepla jednoho intervalu.

Celková doba ochlazení odpovídá 3 hodinám. Z porovnání doby ochlazení pomocí radiace a vedení vyplývá, že vedení je několikrát rychlejší než radiace. Vedení je rychlejší z důvodů většího teplotního gradientu (viz obr. 43)



Obr. 43 Rychlost ochlazení pomocí vedení

Použité parametry:

Q [J]	odevzdané teplo
γ [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$]	součinitel tepelné vodivosti
t_i [$^{\circ}\text{C}$]	původní teplota
t_j [$^{\circ}\text{C}$]	koncová teplota
r [m]	poloměr drátu

5 DISKUZE

Bakalářská práce řeší konstrukční úpravu již vytvořeného testeru ložisek pro otestování nového a menšího ložiska. Nejprve byla provedena rešerše původního zařízení, na základě které byla vytvořena dvě koncepční řešení. Obě dvě úpravy se snaží vylepšit původní zařízení, a to v centrování a rychlejším předávání tepla ložisku. První úprava se snaží využít maximum původních součástí, zato druhá varianta zahrnuje výměnu hřídele a izolačního kroužku. Hlavní prioritou bylo maximální využití stávajících komponent, proto bude realizováno první koncepční řešení.

Nový návrh se snaží zefektivnit předávání tepla. Tepelná radiace neumožňuje dostatečně rychlou výměnu, proto nemělo cenu zvětšovat povrch unašečů. Nejúčinnější cestou je pro výměnu tepla formou vedení. Původní zařízení bylo uzpůsobeno k připevnění tří tepelných mostů na horní unašeč. Z testování zařízení vyplynulo, že doba výměny tepla je dlouhá. Účinnost tepelných mostů značně ovlivňuje plocha, kterou je připevněna k unašeči, proto nové řešení využívá největší možnou plochu pro předání tepla díky nalisovanému měděnému kroužku. Kroužek je umístěn naproti ložisku a obepíná tak celý obvod unašeče.

Protože návrh byl omezen prostorem a musí splňovat zadané funkce vznikly poměrně komplikované tvary součástek. Po výměně původní klece za novou, vyšší, by se docílilo zvětšení prostoru pro změnu upnutí ložiska. Větší prostor by umožňoval lepší upevnění termočlánku a odvod drátů od něj. Větší prostor umožňuje vytvoření větších dílů s vyšší torzní tuhostí. Nárůst váhy je ale nechtěný, protože by došlo k většímu zatížení ložiska gravitační silou.

Kvůli požadavku přesného předepnutí ložiska je nutné předem pružinám přesně změřit jejich reálnou tuhost a zvážit všechny součástky, které budou předepnutí ovlivňovat. Po změření reálných hodnot je nutné vypočítat přesný počet otáček utahovací matice tak, aby pružiny působily požadovanou silou předpětí.

6 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo vytvořit konstrukční návrh úpravy simulátoru pro testování ložisek. Byly vypracovány dvě možné úpravy zařízení tak, aby mohlo být nové ložisko otestováno.

V první části bakalářské práce byl shrnut současný stav poznání, ve kterém byla vysvětlena specifika, která ovlivňují funkci ložiska ve vesmírných podmínkách. Dále bylo popsáno a vysvětleno, z čeho se současný simulátor skládá. Byly popsány hlavní funkční celky a důvody pro jejich použití.

Při koncepčním řešení byly vytvořeny dvě varianty úpravy. První varianta se omezila na výměnu pouze čtyř součástí, a to horního a spodního unašeče a upevňujících disků. Tato úprava nabízí ekonomičtější řešení a poskytuje větší místo mezi unašečem a spojkou. Nevýhodou je komplikovanější sestavování upevnění ložiska. Druhá varianta zahrnuje výměnu hřídele a izolačního kroužku. Výhodou této varianty je její demontáž ale na úkor menšího prostoru mezi spojkou a horním unašečem.

V následné kapitole byla první varianta zanalyzována a bylo zjištěno jakou mají nové součásti torzní tuhost. Byla ověřena bezpečnost hlavních funkčních uzlů a byly ověřeny předpoklady doby ochlazení před a po použití tepelných mostů.

Veškeré požadavky konstrukce úpravy simulátoru byly splněny. Nové řešení umožňuje otestovat ložisko v požadovaných podmínkách. Ložisko bude správně přichyceno a předepnuto a měřeno pomocí snímače momentu. Teplota je zaznamenávána termočlánky, které jsou umístěné kolem ložiska.

7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**7**

- [1] ZARETSKY, E.V. Liquid lubrication in space. *Tribology International*. 1990, 2(23), 75-93
- [2] MOBLEY, J. a M. ROBERTSON a Ch. HODGES. Extended Life Testing of Duplex Ball Bearings. *Proceedings of the 43 rd Aerospace Mechanisms Symposium*. 2016, , 121-123.
- [3] POŠTA, J. a P. VESELÝ a M. DVOŘÁK. Degradace strojních součástí. Praha : ČZU, 2002. 67 s. ISBN 80-213-0967-9.
- [4] Vady s poškození ložisek. *ZKL* [online]. 2012 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/11-vady-s-poskozeni-lozisek>
- [5] LEGER, L.J. a K. DUFRANE. *SPACE STATION LUBRICATION CONSIDERATIONS*. 1987, , 285-294.
- [6] BOWDEN, F. P. a J. E. YOUNG. Friction of clean metals and the influence of adsorbed films. *The Royal Society* [online]. 1951, , 311-325. DOI: 10.1098/rspa.1951.0162.
- [7] FUSARO, R. L. a M. M. KHONSARI. LIQUID LUBRICATION FOR SPACE APPLICATIONS. *NASA Technical Memorandum 105198*. 1992.
- [8] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology. Fourth edition*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN 978-0-12-397776-2.
- [9] REICHL, J. a M. VŠETIČKA. Vypařování a kapalnění. [Http://fyzika.jreichl.com](http://fyzika.jreichl.com) [online]. 2018 [cit. 2018-02-04]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/652-vyparovani-a-kapalneni>
- [10] WITTKE, J.H. Electron Microanalysis Core Facility. *Nau.edu* [online]. Flagstaff, Arizona: Arizona Board of Regents., 2018, 2015 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://nau.edu/cefns/labs/electron-microprobe/gle-510-class-notes/instrumentation/>
- [11] Flow regimes. *Lazzero.com* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.lazzero.com/en/technology/thermodynamics-and-vacuums/flow-regimes>
- [12] SLAVÍČEK, P. a V. ŠTĚPÁNKOVÁ aj. KOLÁR. *Vakuová fyzika 1* [online]. Brno: muni PRESS, 2016 [cit. 2018-04-27]. ISBN 978-80-210-8473-5. Dostupné z: <https://is.muni.cz/el/1431/jaro2017/F4280/um/Vakuova-fyzika-1.pdf>

- [13] ANDERSON, M. J., S. Freeman, S.; FREEMAN a E. W. ROBERTS,. Evaporative losses of vacuum-compatible oils through labyrinth seals. In: *Proceedings of the 10th European Space Mechanisms and Tribology Symposium*. San Sebastián, Spain: ESA Publ. Division, 2003, 255 - 270. ISBN 9290928344
- [14] HALLIDAY, B.S. An introduction to materials for use in vacuum. *Vacuum*. Great Britain: Elsevier, 1987, **8-9**(23), 583-585.
- [15] SHAPIRA, Y. a D. LICHTMAN. 8. PROPERTIES OF MATERIALS USED IN VACUUM TECHNOLOGY. *Methods in Experimental Physics* [online]. 1980, (14), 345-423.
- [16] SGOBBA, S. Materials for high vacuum technology: an overview. *CERN Accelerator School: Vacuum in Accelerators* [online]. CERN, 2006, (28), 117-143. Dostupné také z: <https://cds.cern.ch/record/983744/files/p117.pdf>
- [17] METRICKÝ ZÁVIT M0,25-M600 rozměry. *E-konstrukter* [online]. -: -, - [cit. 2017-04-05]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/metricky-zavit-m0-25-m600-rozmary>
- [18] ASM. *Asm.matweb* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mq304a>
- [19] TABLE OF EMISSIVITY OF VARIOUS SURFACES. *Mikron Instrument Company* [online]. , 1-9 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: http://www-eng.lbl.gov/~dw/projects/DW4229_LHC_detector_analysis/calculations/emissivity2.pdf
- [20] Tepelná vodivost pevných látek. *Vscht.cz* [online]. [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://vscht.cz/uchi/e_tabulky/tepvods.html

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

c [N/mm]	-tuhost pružiny
g [m/s ²]	-gravitační zrychlení
A_t [mm ²]	-průřez šroubu
Re [MPa]	-mez kluzu šroubu
K [-]	-součinitel utahovacího momentu
D [mm]	-jmenovitý průměr šroubu
d_3 [mm]	-malý průměr šroubu
d_2 [mm]	-střední průměr závitu šroubu
T_1 [K]	-původní teplota zařízení
T_2 [K]	-koncová teplota zařízení
m [kg]	-hmotnost
c [J.kg ⁻¹ .K ⁻¹]	-měrná tepelná kapacita
σ_0 [W.m ⁻² .K ⁻⁴]	-Stefan – Boltzmannova konstanta
S_1 [m ²]	-plocha ochlazovaného povrchu
S_2 [m ²]	-plocha chladného povrchu
ε_1 [-]	-emisivita ochlazovaného povrchu
ε_2 [-]	-emisivita chladného povrchu
Q [J]	-odevzané teplo
γ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	-součinitel tepelné vodivosti
t_1 [°C]	-původní teplota zařízení
t_2 [°C]	-koncová teplota zařízení
r [m]	-poloměr drátu

9 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1	Testované ložisko	13
Obr. 2	Tester živostnosti ložisek z [2]	14
Obr. 3	Závislost viskozity a rychlosti vypařování z [7]	16
Obr. 4	Závislost viskozity a teploty z [7]	17
Obr. 5	Režim proudění plynů z [10]	17
Obr. 6	Střední volná dráha různých plynů z [11]	18
Obr. 7	Rozdělení pravděpodobnosti směrů molekul po odrazu z [12]	18
Obr. 8	Model současného zařízení	20
Obr. 9	Upevnění ložiska	21
Obr. 10	Upevnění vnějšího kroužku ložiska a) horní disk b) spodní disk	21
Obr. 11	Upevnění vnitřního kroužku ložiska a) spodní unašeč b) horní unašeč	22
Obr. 12	Předeprnutí vnitřního kroužku	23
Obr. 13	Labyrint	23
Obr. 14	Tepelné mosty	24
Obr. 15	Klec	24
Obr. 16	Hřídel	25
Obr. 17	Příruba	25
Obr. 18	Odvod drátů	26
Obr. 19	Potrubí na tvorbu vakua	28
Obr. 20	Prostor pro úpravu	30
Obr. 21	Srovnání ložisek	31
Obr. 22	Koncepční řešení 1	32
Obr. 23	Upevnění vnitřního kroužku	33
Obr. 24	Upevnění k hřídeli	34
Obr. 25	Horní přítlačný disk a) pohled shora b) pohled zesponu	34
Obr. 26	Spodní přítlačný disk	35
Obr. 27	Spodní unašeč a) pohled shora b) pohled zesponu	35
Obr. 28	Horní unašeč	36
Obr. 29	Labyrint	36
Obr. 30	Centrování	37
Obr. 31	Měděný kroužek	37
Obr. 32	Koncepční řešení 2	38
Obr. 33	Uchycení vnitřního kroužku ložiska a) spodní disk b) horní disk	39
Obr. 34	Spodní unašeč a) pohled shora b) pohled zesponu	39
Obr. 35	Horní unašeč	40
Obr. 36	Labyrint	40
Obr. 37	Centrování	41
Obr. 38	Měděný kroužek	42
Obr. 39	Pevnostní analýza klece	44
Obr. 40	Postup řešení	45
Obr. 41	Zjednodušený model	48
Obr. 42	Rychlost ochlazení pomocí radiace	50
Obr. 43	Rychlost ochlazení pomocí vedení	51

10 SEZNAM TABULEK

10

Tab. 1 Vstupní hodnoty	43
Tab. 2 Kontrolované součásti	46
Tab. 2 Rozměry pro šroub M5x0.8 [mm] [17]	47

11 SEZNAM PŘÍLOH

Název	Číslo výkresu
Př. 1 Sestava	01-00-A2
Př. 2 Spodní disk	01-01-A2
Př. 3 Horní disk	01-02-A2
Př. 4 Unašeč horní	01-03-A2
Př. 5 Unašeč spodní	01-04-A2
Př. 6 Měděný kroužek	01-05-A3
Př. 7 Deska	01-06-A4
Př. 8 Kusovník	01-07-A2