VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONCEPČNÍ NÁVRH TESTERU OZUBENÍ PRO VESMÍRNÉ APLIKACE

CONCEPTUAL DESIGN OF A GEAR TESTER FOR SPACE APPLICATIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Florián

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Košťál, Ph.D.

BRNO 2022

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	**Vojtěch Florián**
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	**Ing. David Košťál, Ph.D.**
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Koncepční návrh testeru ozubení pro vesmírné aplikace

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Ozubená kola na satelitech na oběžné dráze musí pracovat bezporuchově po dobu delší než 10 let v nepříznivém kosmickém prostředí. Všechny volby materiálů a maziv ozubených kol se musí před startem otestovat na zemi v relevantních podmínkách a ověřit, jestli je předpokládané chování pravdivé.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Cílem práce je koncepčně navrhnout zařízení pro testování ozubených kol v relevantních podmínkách nízké oběžné dráhy (vakuum a široký rozsah teplot).
Dílčí cíle bakalářské práce:
– přehled testovacích zařízení používaných pro testování ozubených kol,
– tvorba konceptů testovacího zařízení,
– volba finálního konceptu a zdůvodnění,
– zpracování 3d modelů.

Seznam doporučené literatury:

ROBERTS, Emyr, W., ed. Space tribology handbook [online]. 5th. Warrington, UK: ESTL, 2013 [cit. 2019-7-1]. ISBN N/A. Dostupné z: http://www.esa.int/esapub/bulletin/bullet94/ROB.pdf

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D. ředitel ústavu	doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D. děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá koncepčním návrhem testeru ozubení pro vesmírné aplikace. Tester musí simulovat podmínky ve vesmíru a otestovat, zda ozubené kolo v těchto podmínkách zvládne fungovat. Zásadnější je otestovat materiál kola než jeho geometrii. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je vytvořena rešerše aktuálního poznání problematiky. Ve druhé části je popsáno několik koncepčních návrhů testerů a jejich modely. Následně je vybrán a detailně popsán koncept, který dokáže nejvěrněji simulovat reálné podmínky na nízké orbitě. Finální návrh tohoto konceptu usnadní testování ozubených kol a minimalizuje jejich poruchovost při provozu.

KLÍČOVÁ SLOVA

tester ozubení, ozubené kolo, vakuum, vysoké teploty, nízké teploty, vesmír

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the creation of a conceptual design of gears tester for space applications. The tester must simulate space conditions and test whether the gear can operate in those conditions. It is more important to test the wheel material than its geometry. The work is divided into theoretical and practical part. In the theoretical part, a search of current knowledge of the issue is created. The second part describes several conceptual designs of testers and their models. Subsequently, a concept that can most faithfully simulate real conditions in low orbit is selected and described in detail. The final design of this concept will facilitate the testing of gears and minimize their failure rate during operation.

KEYWORDS

gear tester, spur gear, vacuum, high temperatures, low temperature, space

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

FLORIÁN, Vojtěch. *Koncepční návrh testeru ozubení pro vesmírné aplikace.* Brno, 2022. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139444. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce David Košťál.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Davidovi Košťálovi, Ph.D. za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Davida Košťála. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

…….

Vojtěch Florián

OBSAH

1 ÚVOD 12

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 13

2.1 Využití ozubených kol ve vesmíru 13

2.1.1 Mechanismus rozvinutí reflektoru 14

2.1.2 Mechanismus trubicové antény 15

2.1.3 Teleskopický objektiv dalekohledu 16

2.2 Poruchy ozubení 17

2.2.1 Ulomení zubu 17

2.2.2 Adheze 17

2.2.3 Abraze 17

2.2.4 Teplotní opotřebení 17

2.3 Kontrola ozubení 18

2.3.1 Testy prototypů 18

2.3.2 Běhové zkoušky 18

2.3.3 Zkoušky na pulzátoru 20

2.3.4 Zkoušky na ohyb 21

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE 22

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ 24

4.1 Pohonná jednotka 25

4.1.1 Asynchronní motor 25

4.1.2 Krokový motor 25

4.2 Zátěžový mechanismus 26

4.2.1 Dvě ozubená kola 26

4.2.2 Kolo a hřeben 27

4.3 Brzdná jednotka 27

4.3.1 Asynchronní elektromotor 27

4.3.2 Torzní hřídel 28

4.3.3 Ozubená kola s šikmým čelním ozubením 28

4.3.4 Brzdná jednotka hřebene 29

4.4 Regulace teploty 29

4.4.1 Elektrokotel a chladící zařízení 29

4.4.2 Akumulační nádoby 30

4.4.3 Presto A80 31

4.5 Výroba vakua 31
4.5.1 Rotační vývěvy 32
4.5.2 Turbomolekulové vývěvy 32
4.5.3 Norma ISO-KF 33
4.5.4 Norma ISO-CF 34
5 FINÁLNÍ KONCEPT 35
6 DISKUZE 41
7 ZÁVĚR 42
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ 43
9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN 46
10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 47
11 SEZNAM TABULEK 49
12 SEZNAM PŘÍLOH 50

1 ÚVOD

I když se po přistání na Měsíci Američané prohlásili za vítěze prvního vesmírného závodu, je lidstvo teprve na začátku vesmírné éry. Průzkum okolí naší planety je fascinující a rychle se rozvíjející odvětví průmyslu, do kterého proudí nemalé finanční prostředky ze soukromého i veřejného sektoru.

Může se zdát, že převody ozubenými koly nemají ve vesmíru místo, ale opak je pravdou. Většina mechanismů s ozubenými koly se používá k dočasnému uzamčení rozměrných součástí, které se po vynesení na orbitu rozvinou. Dále je můžeme najít v mechanismech pro natočení antény, solárních panelů či jiných senzorů, nebo slouží k posouvání čoček při mechanickém zaostřování kamer. Ozubená kola jsou nezbytnou součástí pohonů a manipulačních ramen vesmírných sond.

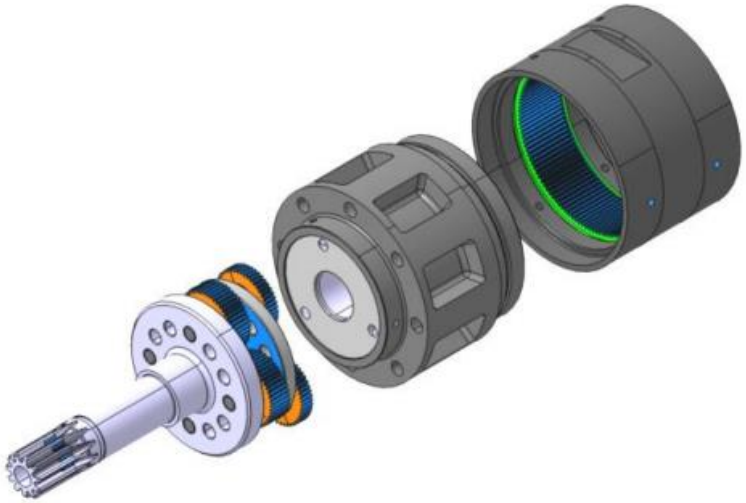
Vzhledem k relativně malému zatěžování zubů v mechanismech satelitů a vývoji v oblasti polymerních materiálů se právě tyto materiály s výhodou používají při konstrukci ozubení pracujících ve vesmíru. Díky jejich samomazným vlastnostem je možnost kontaminace satelitu minimální.

Aby mechanismy mohly fungovat bez údržby na oběžné dráze, případně v hlubokém vesmíru, je nutné je napřed na Zemi důkladně otestovat. Jednou z nejcitlivějších částí těchto mechanismů jsou ozubená soukolí, a právě jejich testováním se zabývá tato práce.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Využití ozubených kol ve vesmíru

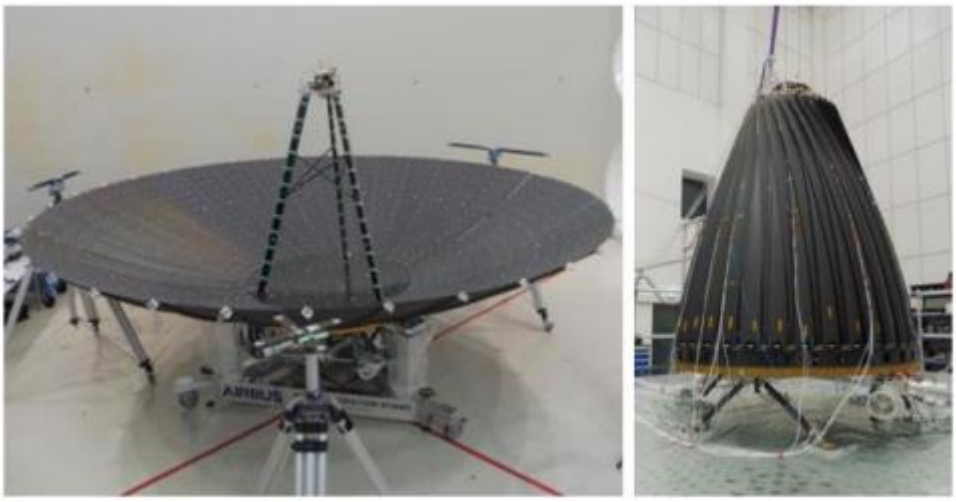
Nejčastěji se ozubená kola v satelitech využívají v převodovkách pevně spojených s motorem, ve kterých mění vstupní otáčky a kroutící moment na požadované parametry. Například firma Thales Avionics Electrical Motors (TAEM) vyvíjí modelovou řadu rotačních pohonů, které se skládají z krokového motoru a planetové převodovky (1).



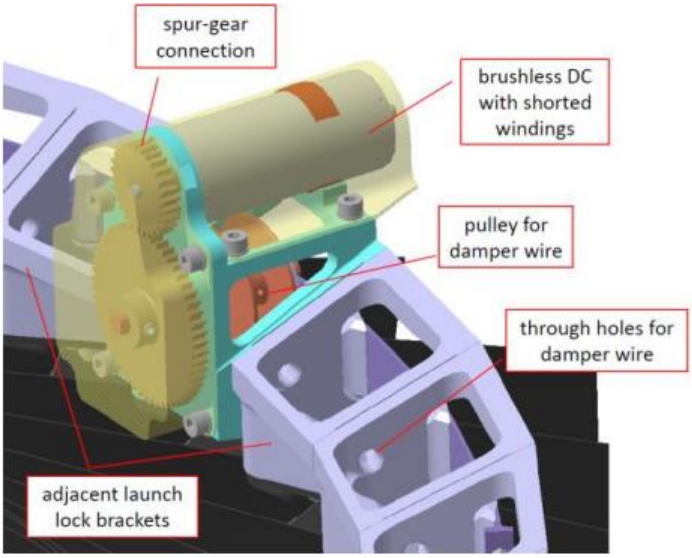
Obrázek 1 - Modul převodovky od TAEM (1)

2.1.1 Mechanismus rozvinutí reflektoru

Reflektor slouží k odrážení přijímaného signálu do svého ohniska, kde se nachází anténa, ta signál zachycuje a posílá ke zpracování do počítače satelitu. Při přepravě musí být reflektor ve svinutém stavu. Po dosažení orbity se musí rozvinout do své pracovní pozice. Reflektor se skládá z jednotlivých lamel, které jsou otočně připevněny k tělu satelitu, mezi každou lamelou a tělem je pružina, která tlačí lamelu do rozvinutého tvaru. Na druhém konci lamely se nachází konzola (lock brackets). Při svinutém stavu jednotlivé konzoly do sebe zapadají a vytvářejí tak zamykací kruh, který je po obvodu obmotán lankem (damper wire), procházejícím otvory v jednotlivých konzolách. Konce drátů jsou navinuty na cívkách ovládaných ozubenými koly a elektromotorem. Postupným odvinováním lanka dochází k otevření reflektoru antény do pracovní pozice (2).



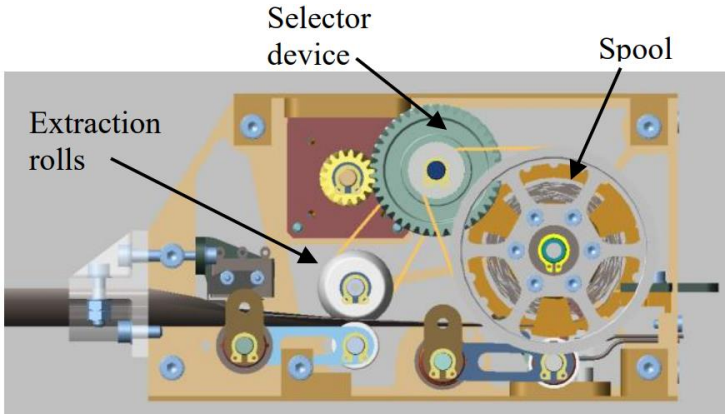
Obrázek 3 - Rozvinutý a svinutý reflektor (2)



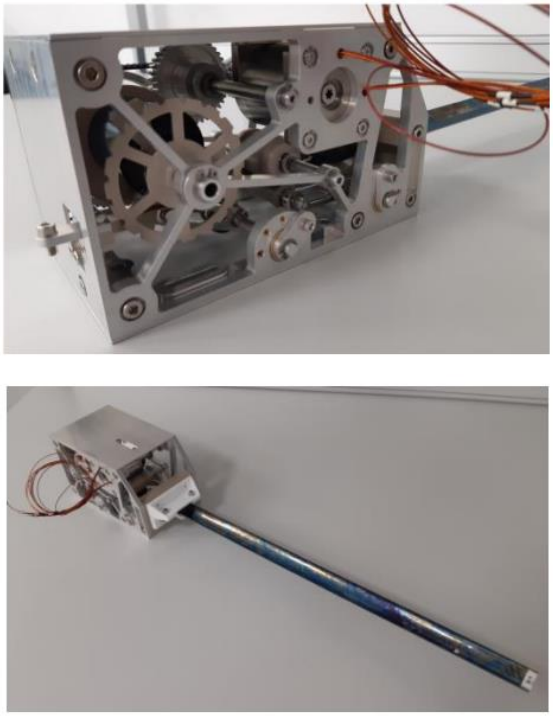
Obrázek 2 - Mechanismus povolení drátu (2)

2.1.2 Mechanismus trubicové antény

Aby bylo možné radarem prozkoumat objekty blízké Zemi[1], byla vyvinuta speciální srolovatelná anténa. Má tvar tenkého proužku namotaného na bubnu (Spool). Při rozvinutí mechanismus (Extraction rools) vytvaruje příčný profil antény do tvaru písmene „U“ na podobném principu jako svinovací metr viz obr. 4 a 5. Díky tomuto tvaru je odolná vůči namáhání na ohyb a nezbortí se. Při navíjení se průřez srovná zpět do obdélníku a je lehce navinut na buben. Díky variabilní délce může být anténa používána pro různé frekvence. Převod ozubenými koly zde opět realizuje redukci otáček a převod točivého momentu na navíjecí buben a podávací válce (3).



Obrázek 4 - Model mechanismu antény (3)



Obrázek 5 - Mechanismus antény (3)

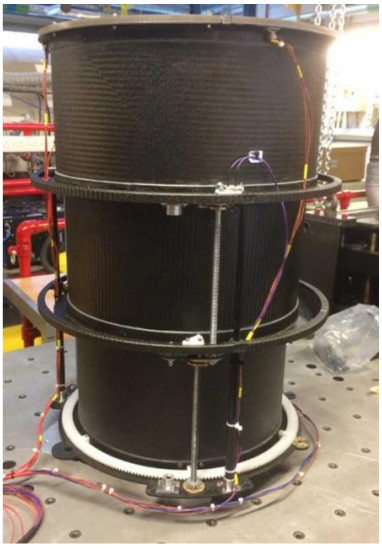
[1] Objekty, které obíhají Slunce ve vzdálenosti 0,983 až 1,3 AU. (1 AU = vzdálenost Slunce a Země)

2.1.3 Teleskopický objektiv dalekohledu

Aby bylo možné dopravit na oběžnou dráhu malé satelity určené k pozorování povrchu Země, musí být jejich objektivy pohyblivé. Ve vysunovacích mechanismech se používají ozubená kola. Jason Shore a jeho spolupracovníci ve své práci (4) vyvinuli mechanismus pro vysouvání objektivů teleskopů pro malé satelity. Používají při tom součásti vyrobené 3D tiskem plastů.

Pomocí elektromotoru je roztáčen ozubený věnec na spodním bubnu, ten otáčí pomocí spoluzabírajícího kola závitovou tyč. Ta pomocí dvojice ozubených kol převádí točivý moment na druhou závitovou tyč na horním bubnu. Díky matici připojené k oné tyči se horní buben vysouvá vzhůru. Po dosažení maximálního vysunutí se převod mezi tyčemi zablokuje a druhá matice začne vynášet prostřední buben vzhůru. Takto se objektiv vysune do plné délky.

Obrázek 6 - Mechanismus rozvinutí objektivu (4)



Obrázek 7 - Plně vysunutý model (4)

2.2 Poruchy ozubení

Poruch ozubení existuje velké množství, každá norma uvádí trochu jiný typ dělení poruch. Naprostá většina testů a norem se týká kovových materiálů. Můžeme z nich ale vyzdvihnout dva typy poruch, které lze matematicky vyjádřit, a to jsou lom v patě zubu (kontrola na ohyb), který může být únavový nebo křehký, a únavové opotřebení povrchu zubu (kontrola na dotyk) (5).

2.2.1 Ulomení zubu

K této poruše dojde, pokud se celý zub nebo jeho část odlomí, a to v důsledku buď krátkodobého přetížení a nebo únavou. Při přetížení dojde k překonání mezního stavu pružnosti a materiál se začne plasticky deformovat. *„Únavový lom vzniká vlivem cyklického přetížení nad mezí únavové nebo časové pevnosti materiálu. Lom je iniciován zpravidla koncentrací napětí v patě zubu. Na struktuře lomu je patrné postupné šíření únavové trhliny.“* (6)

2.2.2 Adheze

Při kontaktu dvou povrchů může docházet k mikrosvarům mezi nerovnostmi povrchů a jejich vytrhávání. To se nazývá adheze. Je jednou z hlavních příčin poškození povrchu ozubených kol z plastů. Lze jí předejít pomocí dostatečně tlustého filmu maziva, nebo použitím materiálů s nízkým třecím koeficientem.

2.2.3 Abraze

Abraze je poškození povrchu v důsledku vniku nečistot mezi povrchy dvou zubů. Cizí částice obrušují povrch a tím se degraduje. Tato porucha není většinou důvodem k vyřazení kola. Abrazi lze předejít čištěním maziva či zamezení pronikání prachu a jiných částic do prostoru soukolí.

2.2.4 Teplotní opotřebení

Plastové materiály jsou skvělými tepelnými izolanty, díky tomu se ale teplo vytvořené dotykem povrchů kumuluje v zubech kol. To může vést až k degradaci materiálu a jeho tečení. Podobná degradace může nastat také při vysokých teplotách v okolí soukolí. Teplotnímu opotřebení lze předejít chlazením pracovního prostředí nebo maziva, volbou odolnějšího materiálu, nebo například vložením kovového válečku do paty zubu, který akumuluje vytvořené teplo. (7)

2.3 Kontrola ozubení

Návrh ozubeného kola vychází z výpočtu napětí v dotyku a ohybu, zkušenosti konstruktéra a simulačních softwarů, které dokáží navrhnout geometrii ozubení a nasimulují záběr zubů. Pro většinu aplikací jsou tyto výpočty dostatečné. Pokud však konstruktér navrhuje ozubené kolo do speciálních podmínek, je odkázán na testování a na metodu pokus-omyl. Většinu takových testů provádějí výrobci ve vlastní režii se speciálním vybavením a know-how, průběh a výsledky testování nejsou veřejně přístupné a dohledat jich lze jen minimum (5).

Zkoušky ozubení můžeme rozdělit do několika základních kategorií:

- Testy prototypů
- Běhové zkoušky
- Zkoušky na pulzátoru
- Zkoušky na ohyb

2.3.1 Testy prototypů

Testy prototypů jsou nejjednodušší metodou, při které je zatěžován prototyp zařízení odpovídajícím zatížením a v definovaných podmínkách. Zkouška končí dosažením požadovaného počtu cyklů nebo vznikem poruchy. V případě poruchy je analyzován typ poruchy a její zdroj. Zkouška se následně opakuje s vylepšeným prototypem. Tento postup se opakuje, dokud všechny části stroje nedosáhnou požadované životnosti.

2.3.2 Běhové zkoušky

Běhové zkoušky jsou základní metodou testování ozubení. Cyklicky je zatěžováno referenční soukolí ve zkušebních podmínkách, dokud nenastane porucha nebo není dosaženo požadovaného počtu cyklů. Naměřené hodnoty se vnáší do grafů, kde tvoří Wohlerovy křivky. Zkoušky probíhají na speciálních testovacích zařízeních, které můžeme rozdělit do dvou skupin dle využití energie (8):

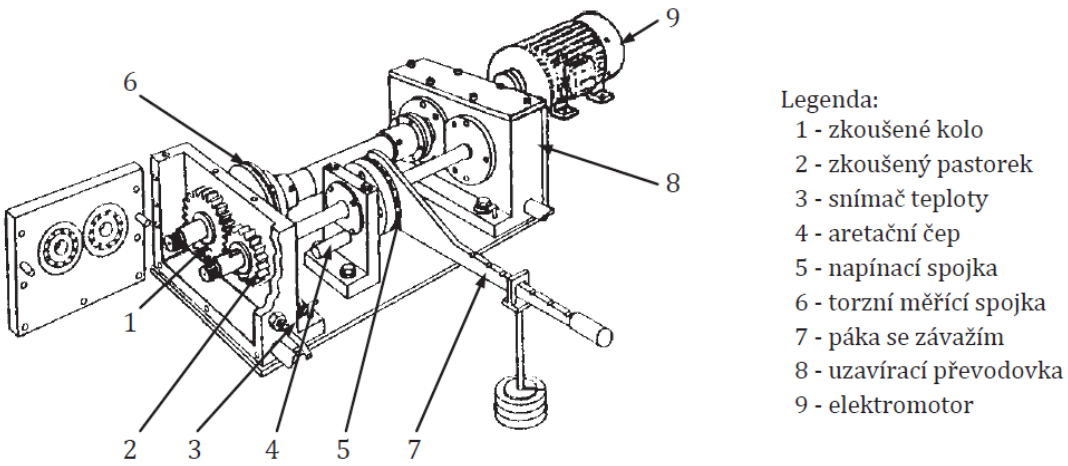
- S uzavřeným tokem výkonu
- S otevřeným tokem výkonu

Nebo podle typu zatížení můžeme rozdělit testery (8):

- Mechanické
- Elektrické
- Tekutinové

Zařízení s uzavřeným tokem výkonu

jsou vhodné pro dlouhodobé zkoušky díky menším nákladům na provoz, mají ale vyšší pořizovací cenu. Je potřeba dodávat pouze energii na překonání ztrát. První takové zkušební zařízení navrhl Niemann v roce 1951 na Katedře částí strojů Technické univerzity v Mnichově (5).



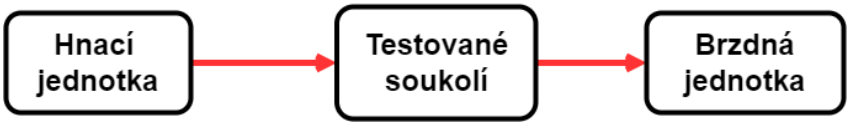
Obrázek 8 - Niemannovo zkušební zařízení (5)

Všechny uzavřené testery pracují podle schématu viz obr. 9, kde část energie spotřebovaná na zatížení testovaného soukolí se vrací zpět do hnací jednotky. Tím se snižují energetické náklady na provoz, ale komplikuje konstrukce. Jako hnací agregát se nejčastěji používá elektromotor.

Obrázek 9 - Schéma uzavřeného zkušebního zařízení

Zařízení s otevřeným tokem výkonu

Jsou konstrukčně jednodušší a cenově příznivější. Jejich nevýhodou je vysoká energetická spotřeba, protože je všechen brzdný výkon nenávratně ztracen nejčastěji v podobě tepla (9).



Obrázek 10 - Schéma otevřeného zkušebního zařízení

Mechanické zatížení

Mechanické zatížení je vhodné pro oba typy testerů s uzavřeným i otevřeným tokem výkonu. Použil ho Niemann ve svém zařízení, kde se předpětí realizuje pomocí natočení a následné fixace torzního hřídele nebo např. napínací spojkou.

U testerů s otevřeným tokem výkonu je mechanické zatížení vytvořeno například pomocí třecí brzdy, kde je energie odváděna ve formě tepla do okolí.

Elektrické zatížení

Elektrické zatížení se u otevřených okruhů z principu nevyužívá. U testerů s uzavřeným tokem výkonu je využíván jeden elektromotor jako hnací prvek a druhý jako generátor. Vygenerovanou elektrickou energií napájíme hnací elektromotor. Vzhledem k menší účinnosti elektromotoru pracujícím v módu generátoru musíme přidávat energii ze sítě.

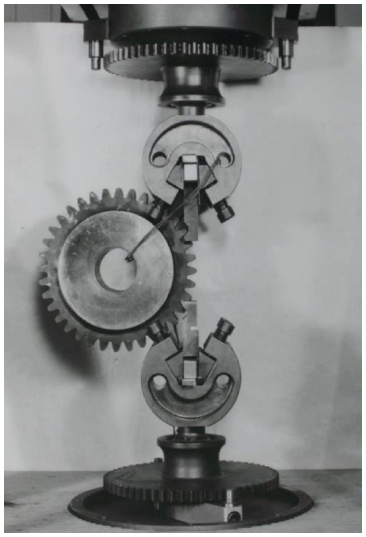
Tekutinové zatížení

Uzavřený okruh s tekutinovým zatížením se realizuje nejsložitěji. Jako zátěž zde můžeme použít kompresor či čerpadlo a na pohon elektromotor. Návrat energie probíhá např. pomocí turbíny a generátoru. Díky konstrukční obtížnosti se tekutinové zatížení hodí spíše do otevřených testerů a v uzavřených se nepoužívají (9).

V otevřeném okruhu má zatížení pomocí kapalin značné využití. Přes měřené soukolí je poháněno například čerpadlo vytlačující vodu z nádrže do výšky, odkud samovolně stéká zpět do napájecí nádrže. Je nutné kontrolovat teplotu vody, která se při průchodu čerpadlem ohřívá.

2.3.3 Zkoušky na pulzátoru

Zkoušky na pulzátoru jsou vhodné především pro tvrzené materiály. Zkouší se únavové namáhání na ohyb. Testované kolo se umístí mezi dvě čelisti, které se dotýkají pouze zubů a pulzují k sobě a od sebe. Díky ideálnímu zátěžovému cyklu je vhodná pro porovnání různých ozubených kol. Například můžeme porovnávat různé druhy tepelného zpracování a jeho účinky na životnost kola (5).

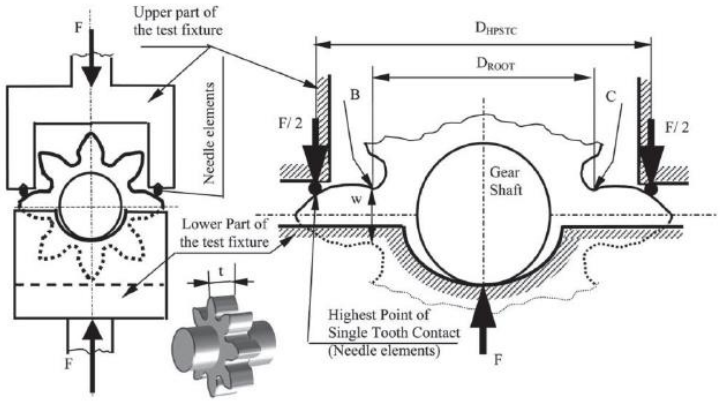


Obrázek 11 – Pulzátor (5)

2.3.4 Zkoušky na ohyb

Testují se zkušební vzorky s vrubem, který odpovídá poloměru patního přechodu, nebo bez vrubu. Zkoumá se pouze únavový lom, opotřebení povrchu u těchto zkoušek není relevantní.

Zajímavou metodou jsou zkoušky tříbokým ohybem. Kolo s nábojem je umístěno mezi dvě čelisti. Jedna přenáší sílu na náboj a druhá na dva protilehlé zuby pomocí tzv. jehel. Čelisti pulzují podobně jako u pulzátorových zkoušek (5).



Obrázek 12 - Zkouška trojbokým ohybem (5)

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍLE PRÁCE

Výsledkem této práce je návrh zkušebního zařízení, které otestuje životnost ozubených kol z různých typů polymerů v extrémních teplotních podmínkách a při tlaku, který zhruba odpovídá nízké oběžné dráze Země (LEO) ve výškách 200 až 500 km nad povrchem Země viz tab. 1.

Teplota	-40 °C až +90 °C
Vakuum	$1 \cdot 10^{-5}$ Pa
Průměr kol	10 mm až 100 mm
Zatěžující moment	20 Nm
Maximální otáčky	1000 min^{-1}
Maximální modul	6 (7) mm

Tabulka 1 - Požadované podmínky

Před testem konkrétního ozubení musí být znám počet cyklů, po které musí kolo v praxi pracovat bezporuchově. Vzhledem k tomu, že většina mechanismů v satelitech je zatěžována kvazistaticky, tedy otočí např. anténou a potom se nějakou dobu nepohybují, můžeme životnost redukovat z obvyklých 10^6 cyklů na menší hodnoty.

Testovat se budou nekorigovaná soukolí. Pokud se připustí malé podřezání zubů, je minimální počet zubů kol pro přímé čelní ozubení z_{min}=14.

$$m_{max} = \frac{d_{max}}{z_{min}} = \frac{100}{14} = 7{,}14\ mm \cong 7\ mm \quad (1)$$

Z rovnice (1), kde d_{max} je největší možný průměr kola, plyne, že je možné testovat kola s největším modulem 7 mm, pokud připustíme použití modulů 2. řady. V opačném případě je maximální modul roven 6 mm.

Přenos točivého momentu na testovaná kola bude realizován spojením těsným perem. Axiální poloha kola na hřídeli bude vymezena osazením hřídele na jedné straně a pojistným kroužkem na druhé.

Aby mohlo probíhat testování v uvedených tlacích, je potřeba vytvořit vakuovou komoru s hnací a brzdnou jednotkou umístěnou vně komory, vybrat vhodnou vývěvu a vyřešit její připojení ke komoře. Nejproblematičtěji se jeví utěsnění hřídelů předávajících točivý moment z testovaných kol na motor a brzdu.

Je také potřeba zajistit požadovanou teplotu prostředí uvnitř komory, vyřešit systém přívodu a odvodu tepla z komory, který bude funkční i při zadaných podmínkách.

Zmíněné parametry je potřeba průběžně kontrolovat, a proto součástí komory musí být také sensory na měření tlaku a teploty.

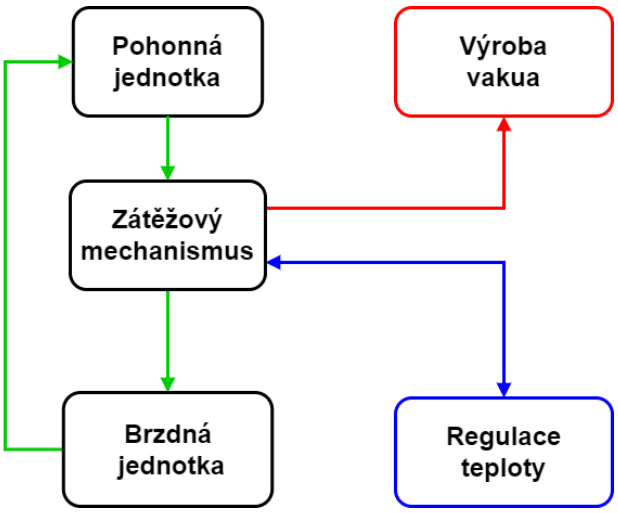
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Vzhledem ke složitosti problému, je navrhované zařízení (tester) pro běhové zkoušky ozubení rozděleno do pěti samostatných celků. Pro každý jednotlivý celek je navrženo a diskutováno několik variant řešení, které jsou vzájemně zaměnitelné. Na závěr je pro každý celek vytipována nejvýhodnější varianta a z nich je následně sestaven výsledný koncept.

Pro účely snazší orientace je tester rozdělen do těchto částí:

- Pohonná jednotka
- Zátěžový mechanismus
- Brzdná jednotka
- Regulace teploty
- Výroba vakua

Jejich vzájemné propojení je zobrazeno na následujícím schématu (obr. 13), kde zelené šipky představují tok výkonu, modré tok tepla.



Obrázek 13 - Části testeru

Byl zvolen běhový tester s uzavřeným tokem výkonu z důvodu nižší energetické náročnosti. I přes to, že v případě otevřeného testeru lze snadněji regulovat zátěž například přidáním škrtícího ventilu za čerpadlo, ale za cenu velkých energetických ztrát.

4.1 Pohonná jednotka

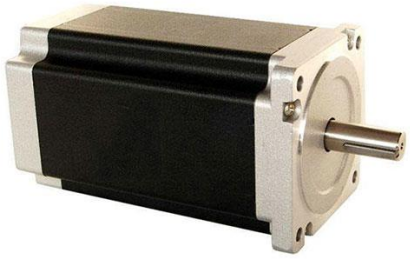
4.1.1 Asynchronní motor

Asynchronní motor je vhodný do běhových testerů především pro svoji jednoduchost, nízkou cenu a bezúdržbovost. Jedná o jeden z nejrozšířenějších typů elektromotorů, a tudíž lze vybrat motor podle potřebného výkonu a pomocí frekvenčního měniče mohou být jednoduše regulovány otáčky. Vzhledem k malým výkonům přenášeným ozubenými koly v satelitech, je vhodná jednofázová varianta motoru. Nevýhodou asynchronního motoru je vysoká kinetická energie nashromážděná v rotoru po vypnutí. Ta by mohla poškodit tester nebo znehodnotit zkoušené kolo. Proto by bylo vhodné použít brzdu tzv. protiproudem, kdy se obrátí smysl otáčení a rotor se zastaví. Může se použít např. motor K-DRIVES K1SA0090-6. Jde o jednofázový motor s výkonem 0,75 kW, otáčkami 1000 ot./min a kroutícím momentem 7,16 Nm. Je napájen běžným střídavým napětím 230 V dostupným na každém pracovišti, dostupný z e-shopu K-Drives (10).

Obrázek 14 - Asynchronní motor (10)

4.1.2 Krokový motor

Krokový motor je ideální pohonná jednotka, jeho použití v satelitech je dlouhodobě odzkoušené. V konkrétních vesmírných aplikacích se s výhodou používá možnost pootočení rotoru o daný úhel (krok), na druhou stranu je to ale málo využitelné v testovacích zařízeních, kde je nutné provést maximální počet zátěžných cyklů v co nejkratším čase. Na rozdíl od asynchronního motoru vyžaduje složitější řízení. Mohl by být použit krokový motor HN 200 3451 0350 NEMA34 – 7,6 Nm s krouticím momentem 7,6 Nm, dostupný na RAVEO e-shop (11).



Obrázek 15 - Krokový motor (11)

4.2 Zátěžový mechanismus

Zátěžový mechanismus je nejdůležitější částí testeru, ve které probíhá samotná zkouška. Princip zatížení záleží na typu testu, pokud je potřeba zjistit pevnost referenčního ozubení, je nutno použít co nejpodobnější mechanismus zatížení jako v provozu. Pokud ale mají být výsledkem hodnoty pro obecné použití, volí se normalizovaný mechanismus.

4.2.1 Dvě ozubená kola

Zatěžování pastorku s čelním ozubením a přímými zuby pomocí spoluzabírajícího kola je nejčastějším typem mechanismu používáného v testerech. Na pastorek je přiváděn výkon a z kola je odebírán do brzdné jednotky. Provádí se s ním normalizované testy za účelem stanovení hodnot do norem a materiálových listů. Použil ho i Niemann ve svém testeru (obr. 8). Díky metodice kontrolních výpočtů ozubených kol, kdy se všechny složitější druhy kol přepočtou na virtuální kolo s čelními přímými zuby, je také nejuniverzálnější. Pomocí několika málo koeficientů vztahujících se k provozním podmínkám a materiálu lze jednoduše vypočítat pevnost jakéhokoliv ozubeného kola. Tento mechanismus je také nejjednodušší na výrobu a montáž.

4.2.2 Kolo a hřeben

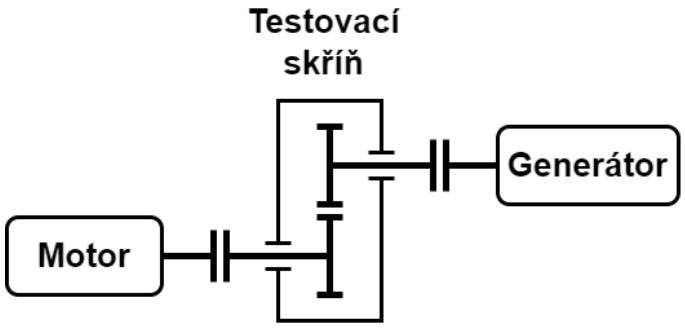
Test tohoto mechanismu je na rozmezí běhových a prototypových zkoušek. Je složený z ozubeného hřebenu a kola. Na kolo přivádíme výkon z pohonné jednotky a z hřebene ho odebíráme do brzdné jednotky. Může být použit v družicích při vysouvání/zasouvání měřících přístrojů. Výhodou je, že zuby jsou zatěžovány z obou stran. Tak je tomu v mnohých satelitech. Také se otestuje únosnost hřebene, která se může být odlišná. Jako pohonnou jednotkou je v tomto případě využíván krokový motor. Pro potřeby tohoto zkušebního mechanismu je nutná speciální brzdná jednotka viz kapitola 4.3.4.

4.3 Brzdná jednotka

Brzdná jednotka vyvíjí zatěžovací moment na testovaná kola. Dále pak v uzavřeném typu testeru předává energii zpět do systému. Díky tomu řešení pohonnou jednotkou je dodáván pouze výkon na pokrytí ztrát.

4.3.1 Asynchronní elektromotor

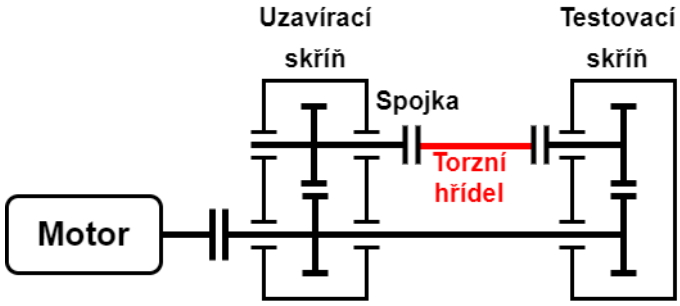
Výhodou asynchronního elektromotoru v generátorovém režimu je mechanická jednoduchost a kompaktnost výsledného zkušebního zařízení. Zatěžující moment by mohl být řízen pomocí různých typů průmyslových převodovek či variátoru zařazených mezi zátěžový mechanismus a elektromotor. Díky tomu, že se asynchronní motory vyrábějí ve velkých sériích, jedná se též o ekonomické řešení. Nevýhodou je potřeba řídící elektroniky pro návrat vygenerované elektrické energie do oběhu, která může být poměrně složitá.



Obrázek 16 - Asynchronní motor

4.3.2 Torzní hřídel

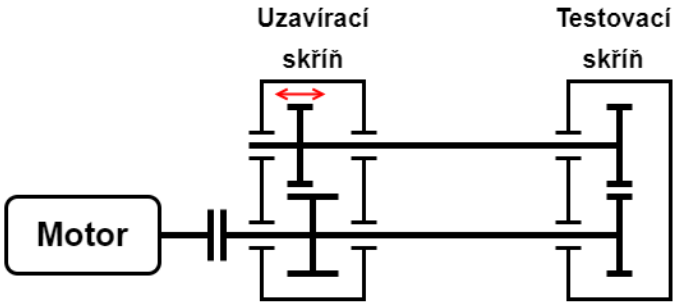
Zatěžovací moment může také vyvodit staticky předepnutý torzní hřídel. Moment vyvodíme pootočením jednoho konce hřídele ve spojce před začátkem testu, například pomocí zatěžovací páky. Podobně jako Niemman ve svém zkušebním zařízení (obr. 8). V průběhu testu zůstává moment konstantní a jeho hodnotu můžeme měnit pouze při přerušení zkoušky. Velikost zatěžovacího momentu určíme pomocí indukčního měřiče kroutícího momentu. Vrácení výkonu do systému se provádí pomocí uzavírací skříně, ve které jsou umístěna dvě ozubená kola se stejným převodovým číslem jako v zátěžovém mechanismu (obr. 17). Toto řešení je poněkud mechanicky složitější, ale stále ekonomické.



Obrázek 17 - Schéma testeru s torzním hřídelem

4.3.3 Ozubená kola s šikmým čelním ozubením

Zajímavé řešení poskytuje použití dvou kol se šikmými zuby v uzavírací skříni. Jedná se v podstatě o nástavbu k zatěžování pomocí torzního hřídele, kdy předepnutí není nastaveno natočením hřídele ve spojce, ale nastavuje se axiálním posunutím užšího kola oproti širšímu kolu se šikmými zuby. Díky skloněným zubům posunutí způsobí pootočení kola a tím i vyvození zatěžovacího momentu. Axiální posuv může být zajišťován pomocí aktuátoru nebo hydraulického pístu. Velikost momentu se opět určí pomocí indukčního měřiče kroutícího momentu. Výhodou je možnost měnit velikost zatížení na testovaných kolech v průběhu zkoušky. Jedná se ale o mechanicky nejsložitější variantu.



Obrázek 18 - Tester se šikmými zuby

4.3.4 Brzdná jednotka hřebene

Jako nejjednodušší brzda může být použita dvojice pružin připevněných na každém konci hřebene a k rámu (vakuové komoře). Jedná se o jednoduché řešení se snadnou regulací zatížení pomocí změny tuhosti pružin.

Druhou možností je vyvolání tlaku v uložení hřebene například pomocí brzdové destičky a hydraulického pístu, kterým lze regulovat přítlačnou sílu. Princip je podobný hydraulické kotoučové brzdě. Konstantní brzdná síla je v tomto případě vyvolána konstantním tlakem v pístu. Toto řešení má několik nevýhod.

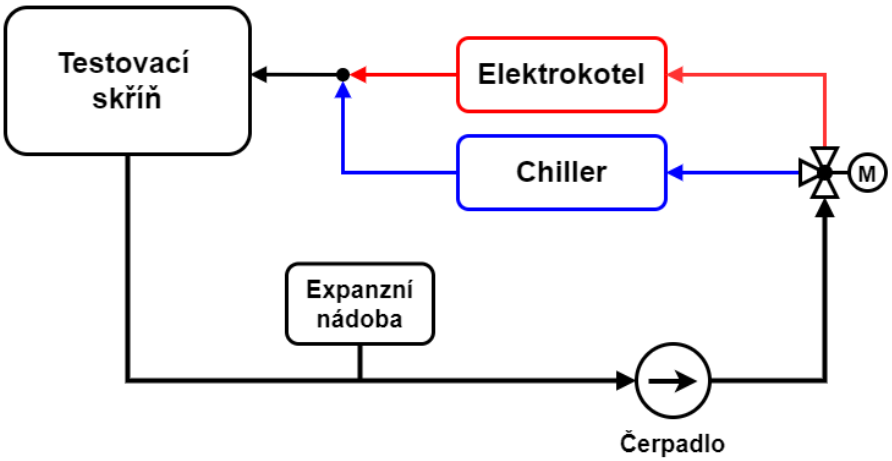
Materiál destičky a hřebenu se obrušuje a tím je znečišťována vakuová komora. Vzniklé nečistoty mohou poškodit zkušební vzorek. Místo finančně náročnějšího pístu lze použít šroub, který je ale potřeba pravidelně dotahovat k zamezení postupnému snižování třecí síly.

4.4 Regulace teploty

Aby bylo možné testovat kola v daných podmínkách, musíme regulovat teplotu. Jako nejlepší výměník tepla pro vakuum se jeví dvouplášťová vakuová komora, kde v prostoru mezi stěnami proudí chladící kapalina (12). Aby bylo dosaženo požadované teploty, musí být kapalina o několik desítek stupňů Celsia teplejší nebo chladnější, než je požadovaná teplota v komoře. Teplotu kapaliny lze regulovat následujícím způsoby:

4.4.1 Elektrokotel a chladící zařízení

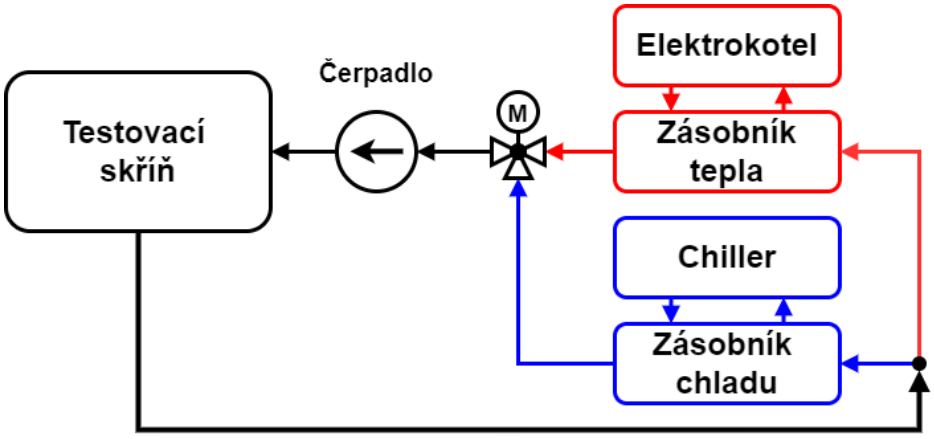
Systém regulace teploty se skládá z elektrokotle, chladícího zařízení (dále jen chiller) a trojcestného ventilu. V okamžiku, kdy je potřeba zvýšit teplotu v komoře, ventil přepojí oběh chladící kapaliny na větev s kotlem, který ohřeje kapalinu na požadovanou teplotu. Elektrokotel je vhodný zejména pro svoji snadnou regulaci. Ve druhém případě, kdy je potřeba naopak chladit, ventil přepne na větev s chillerem, který kapalinu vychladí. Pokud by čerpadlo nebylo součástí kotle ani chilleru, je nutné ho instalovat do systému před ventil ve směru oběhu kapaliny. Většina chillerů není konstruována pro vyšší teploty než +35 °C, proto je v případě testování za vyšších teplot nutné vložit do systému ještě jednu paralelní větev s druhým chillerem, nebo vzduchem chlazeným chladičem, který by chladil např. z +90 °C na +30 °C a druhý by po přepnutí větve kapalinu dochladil na požadovanou teplotu. Systém by měl zahrnovat i expanzní nádobu, vyrovnávající změnu objemu kapaliny při změnách teploty.



Obrázek 19 - Schéma regulace teploty I

4.4.2 Akumulační nádoby

Při potřebě rychlejší změny teploty se do systému přidají akumulační nádoby. Jedna nádoba slouží jako zásobník chladu, z něhož je odebíráno teplo pomocí chilleru. Druhá nádoba je využívána jako zásobník tepla, do kterého by teplo dodával elektrokotel. Teplota je regulována pomocí směšovacího ventilu, který směšuje kapalinu z obou nádob tak, aby dosáhla požadované teploty. V tomto případě je nutné použití čerpadla pro oběh kapaliny v systému.



Obrázek 20 - Regulace teploty II

4.4.3 Presto A80

Presto A80 je kompresorové chladící zařízení od německé společnosti Julabo o chladícím výkonu 1,1 kW při -40 °C a topném výkonu 1,5 kW. Umí regulovat teplotu kapaliny v rozsahu od -80 °C do +250 °C. Díky svému jednoduchému ovládání je ideální pro experimentální účely. Je napájeno ze sítě 230 V a 50 Hz a přebytečné teplo odvádí do vzduchu, tudíž není zapotřebí sekundární chladící systém. Toto zařízení je schopné snížit teplotu chladící kapaliny rychlostí 10 °C za minutu nebo teplotu zvýšit rychlostí 14 °C za minutu. Společnost Julabo dodává taktéž všechny potřebné doplňky pro provoz, jako je chladící kapalina, propojovací hadice atd. Toto řešení je ale také dražší než předchozí koncepty. (13)

Obrázek 21 - Presto A80 (13)

4.5 Výroba vakua

Vakuum je definováno jako prostor o nižším tlaku než okolí a s malou hustotou částic. V technické praxi se vakuum rozděluje na několik stupňů viz tab. 2 (14).

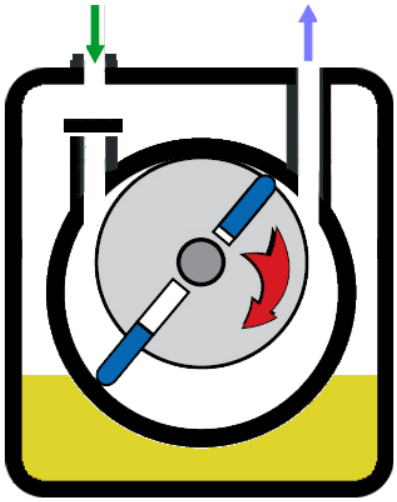
Pásmo vakua	**Tlak [Pa]**
Atmosférický tlak	10^5
Nízké vakuum (LV)	10^4 až 10^2
Střední vakuum (MV)	10^2 až 10^{-1}
Vysoké vakuum (HV)	10^{-1} až 10^{-5}
Ultra vysoké vakuum (UHV)	10^{-5} až 10^{-10}
Extrémně vysoké vakuum (XHV)	menší jak 10^{-10}

Tabulka 2 - Rozdělení vakua (14)

Absolutně nejnižší dosažená hodnota tlaku v experimentu je $1{,}33 \cdot 10^{-11}$ Pa a v otevřeném vesmíru se pohybuje mezi hodnotami 10^{-4} a 10^{-15} Pa. Vakuum je vytvářeno pomocí speciálních plynových čerpadel tzv. vývěv. Existuje mnoho konstrukcí a principů fungování vývěv.

4.5.1 Rotační vývěvy

Rotační vývěvy jsou základním typem vývěv. Fungují na principu excentricky uloženého náboje s lopatkami, který nasává plyn z komory přes sací ventil, stlačuje ho a následně přes výstupní ventil vypouští. Výhodou je, že tento typ vývěv umožňuje vypouštět odčerpaný plyn přímo do atmosférického tlaku, ale s jejich pomocí lze vytvořit pouze jemné vakuum. Existují jak v jednostupňové, tak i dvoustupňově verzi, kdy jsou zařazeny dvě vývěvy sériově za sebou. Nevýhodou je vznik tření mezi lopatkami a stěnami sací komory, které se redukuje mazáním. Olej se v průběhu čerpání částečně odpařuje, a jeho páry mohou znečistit vakuum. (15)



Obrázek 22 - Rotační vývěva (18)

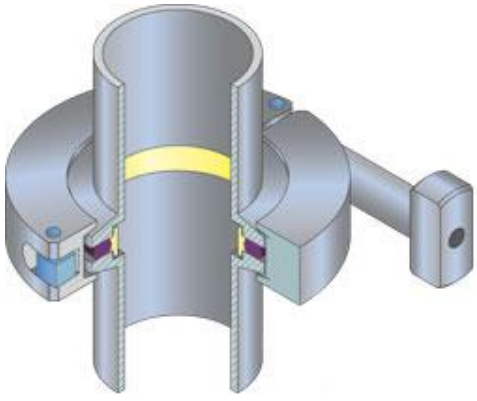
4.5.2 Turbomolekulové vývěvy

Turbomolekulární vývěvy používají k vytvoření ultravysokého vakua. Jejich princip spočívá v udělování kinetické energie částicím plynu, které jsou vystřelovány ven z vakuové komory. Kinetická energie je molekulám dodávána pomocí několika rychle se točících lopatkových věnců. Díky své konstrukci ale nedokáží čerpat do atmosférického tlaku, a tudíž je potřeba za ně zařadit druhou vývěvu pracující na jiném principu tak, aby se snížil tlak na výstupu turbomolekulární vývěvy (16).

Obrázek 23 - Turbomolekulární vývěva (19)

4.5.3 Norma ISO-KF

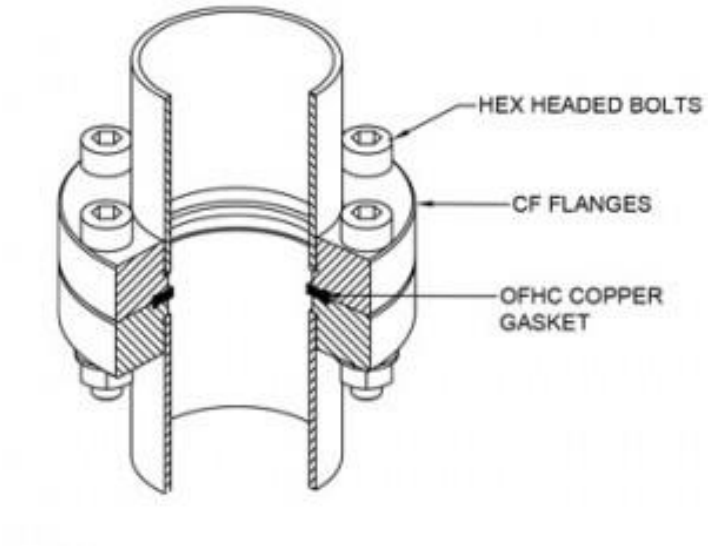
ISO-KF je označení normy pro spojování dílů vakuového systému až do tlaku 10^{-8} Pa (s kovovým těsněním i více jak 10^{-9} Pa) a průměru 50 mm. Spojení se skládá ze dvou symetrických kuželů (šrafovaně), mezi nimiž je umístěn o-kroužek (fialově) s vodící válcem (žlutě). Spojení je zajištěno upínacím kroužkem (modrozeleně), který k sobě přiblíží kužely, tím stlačí o-kroužek a utěsní spoj. Při použití kovových těsnění je třeba používat speciální upínací kroužky, které vyvodí větší tlak na těsnění. Jednotlivé rozměry jsou definovány v normách ISO 2861 a DIN 28403 (17).



Obrázek 24 - ISO-KF (17)

4.5.4 Norma ISO-CF

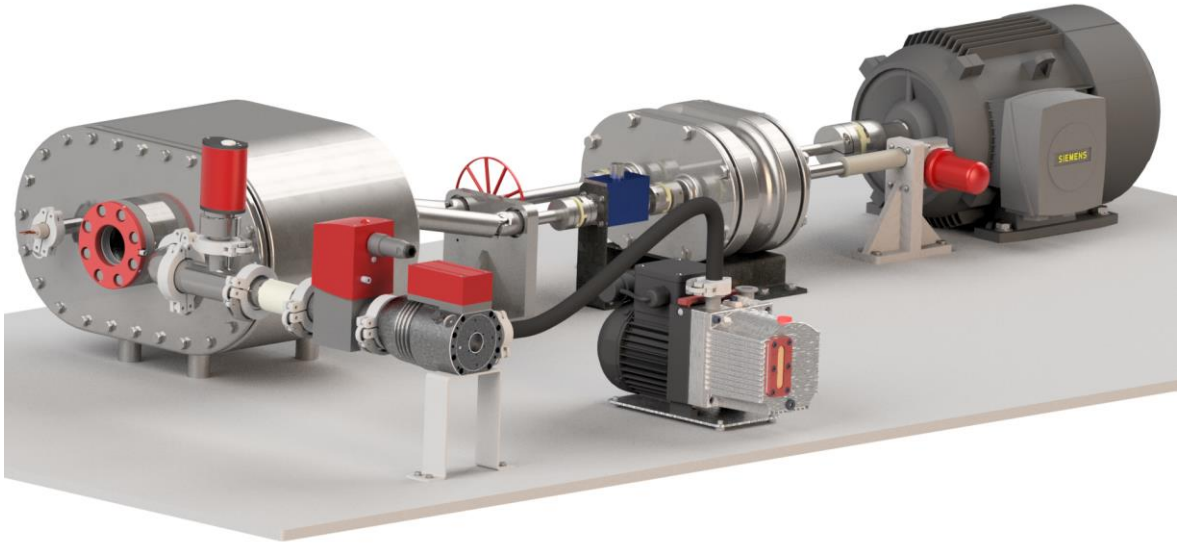
ISO-CF je další norma pro spojování částí vakuových zařízení. Spojuje jednotlivé díly pomocí dvou symetrických přírub, mezi kterými je kovové těsnění a jsou sešroubovaná k sobě. Dokáže udržet vakuum až do velikosti 10^{-12} Pa při teplotě až 450 °C. Pro běžné použití jsou spojované části vyrobeny z oceli 1.4307 a maximální rozměr spojů je DN 250. Je popsána v normě ISO 3669 (17).



Obrázek 25 - ISO-CF (17)

5 FINÁLNÍ KONCEPT

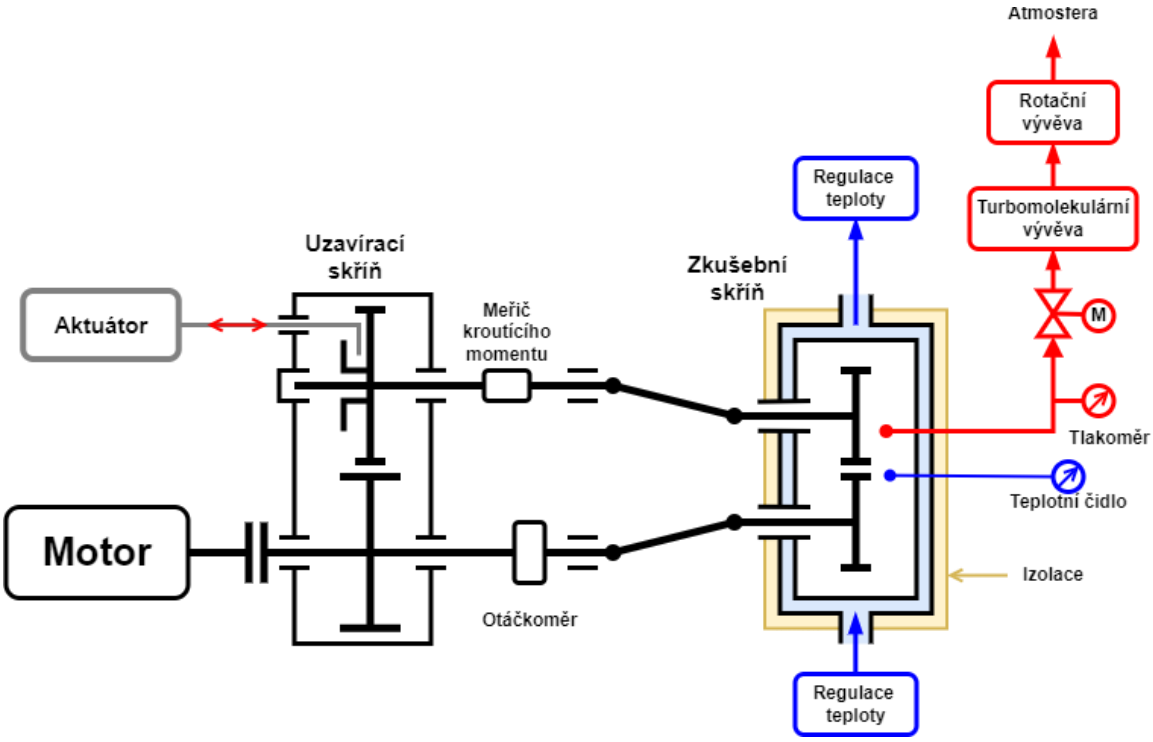
Jako finální koncept byl zvolen tester s uzavřeným tokem výkonu, kde zatěžující moment je vyvolán axiálním posunem ozubených kol se šikmými zuby vůči sobě a zátěžovým mechanismem v podobě dvou ozubených kol s čelními přímými zuby s převodovým číslem 1. Jako pohonná jednotka je použit asynchronní elektromotor, viz kapitola 4.1.1.



Obrázek 26 - Finální tester

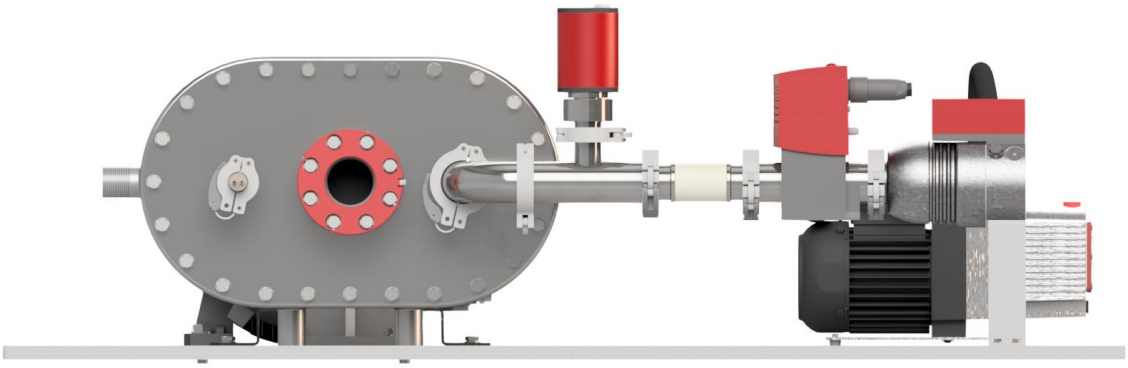
Vakuum je vytvářeno turbomolekulární vývěvou HiPace 80 od společnosti Pfeiffer, která dokáže vytvořit vakuum o minimální velikosti $1 \cdot 10^{-5}$ Pa s maximálním výkonem 110 W při napájení 24 V DC a proudu 4,6 A, při delších pracovních časech je nutné použit chladící zařízení též od společnosti Pfeiffer. Za ní je sériově zařazena rotační vývěva Duo 3 od stejné firmy s výkonem 250 W při napájení 230 V AC a proudu 6 A. Obě vývěvy jsou spojeny flexibilní hadicí s koncovkami DN 16 ISO KF. Pokud by se ukázalo, že se teplo přenáší potrubím až k vývěvě, je nutné přidat do potrubí izolátor. Před turbomolekulární vývěvu je zařazen ventil DVC 040 PX ovládaný pomocí napětí 24 V DC. Taktéž je do potrubí zařazeno tlakové čidlo MPT 200 AR s analogovým výstupem 0–10 V schopné měřit tlaky $5 \cdot 10^{-9}$ až $1 \cdot 10^{-3}$ hPa na principu studené katody napájené 24 V DC. Do ústí vakuového potrubí je umístěno těsnění s mřížkou pro zamezení průniku nečistot do vývěv. Aby se zamezilo přenášení vibrací z vývěvy do testovací komory, je před vývěvu umístěn pružný člen potrubí. Všechny části systému na výrobu vakua jsou dodávány od společnosti Pfeiffer. Spoje vakuového systému jsou realizovány pomocí spojek ISO KF.

Zkušební skříň je realizována jako dvouplášťová, kde prostorem mezi stěnami proudí chladící médium. Pro lepší přenos tepla je vhodné vnitřní povrch komory natřít černou matnou barvou, která odolá zadaným teplotám. Skříň je vyrobena z ocele jako dva odlitky, které se po povrchové a tepelné úpravě svaří. Po stranách jsou navařeny armatury pro připojení chladícího okruhu. Přední a zadní stěnu tvoří příruby.



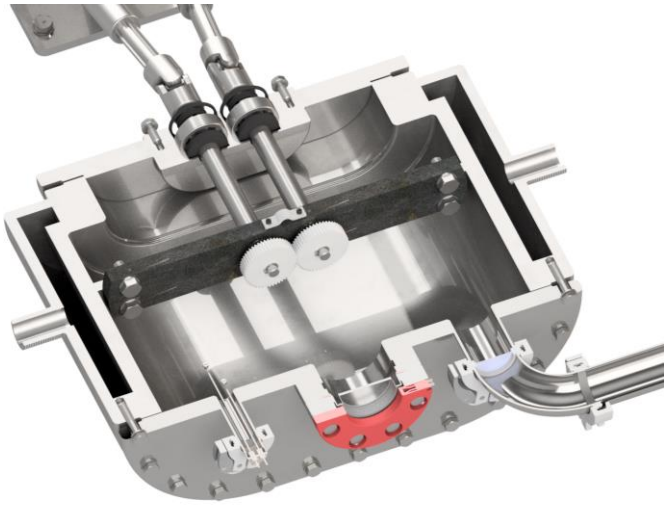
Obrázek 27 - Schéma testeru

Na přední přírubě testovací skříně jsou navařeny dva konektory ISO KF o průměru DN 16 a DN 40 pro připojení průchodky termočlánku a potrubí vakuového systému. A do jejího středu je navařena příruba DN 63 CF pro připevnění průzoru s osvětlením, pro možnost vizuální kontroly zkušebního vzorku v průběhu testu.



Obrázek 28 - Přední příruba

V zadní přírubě je uložení hřídelů, na kterých jsou uložena testovaná kola. Utěsnění vakua na hřídelích je realizováno pomocí gufer od americké společnosti Performance Sealing INC, která vyrábí specializovaná těsnění na objednávku. Těsnění typu Duruseal HF je schopno utěsnit vakuum až do tlaku 10^{-7} Pa při maximální obvodové rychlosti 30 m/min. Příruby jsou utěsněny pomocí plochých teflonových těsnění na míru. Uložení hřídelů také zajišťuje příčník připevněný šrouby ke dvěma návarkům uvnitř komory. Hřídele jsou uloženy na dvou kuličkových ložiscích s kosoúhlým stykem od výrobce NSK řady Spacea typu YS, které mohou pracovat ve vakuu až do 10^{-8} Pa a teploty 350 °C. Ložiska jsou zajištěna pomocí KM matice a MB podložky. Pro zamezení vniku nečistot je těsně před vnější konec hřídele umístěno gufero typu G.



Obrázek 29 - Testovací skříň

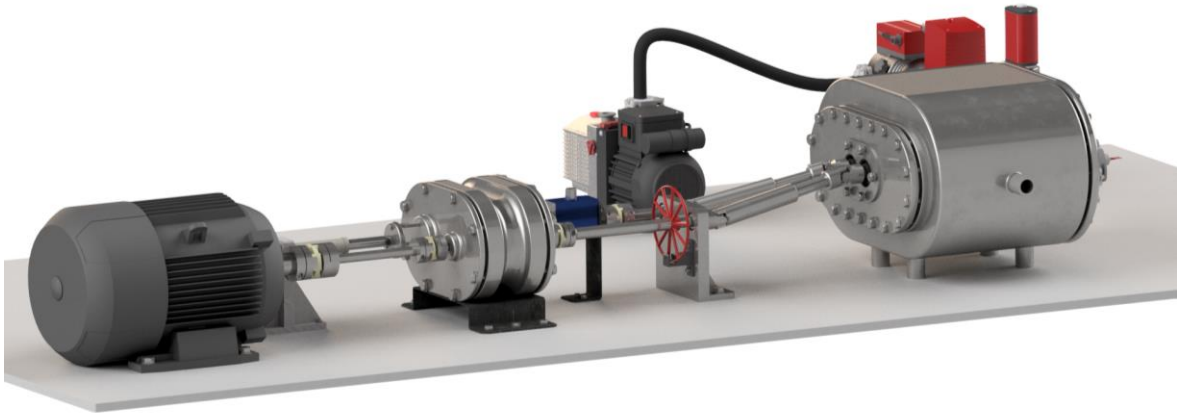
Tester umožňuje zkoušky kol o průměru od 10 mm do 100 mm jednoduchou výměnou zadní příruby a příčníku podle potřebné rozteče os odstupňované po 10 mm. Rozteče jsou rozděleny do tří skupin, viz tab. 3. Hřídele a jejich uložení jsou stejné vždy jen v jedné skupině průměrů. Pokud by bylo nutné testovat kola s jinou osovou vzdáleností, je nutné vyrobit přírubu a příčník na míru pro nejbližší průměrovou skupinu.

Skupina	1			2			3			
Osová vzdálenost [mm]	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Tabulka 3 - Skupiny uložení

Aby byla umožněna změna osové vzdálenosti, je testovací komora připojena ke zbytku zařízení pomocí dvou výsuvných kloubových hřídelů typu H s jehličkovým uložením, jenž je bezúdržbové, od společnosti T.E.A Technik s.r.o.

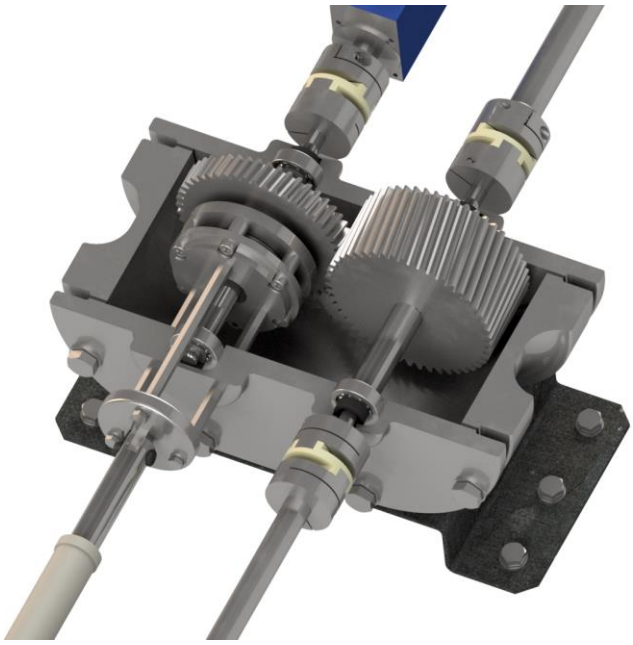
Na spojovacích hřídelích je umístěn měřič otáček pomocí laserové závory a indukční měřič kroutícího momentu T21WN s rozsahem do 20 Nm a výstupem ±10 V s frekvencí 10 kHz, který měří až do 19 000 otáček za minutu.



Obrázek 30 - Spojení skříní

Uzavírací skříň je složena ze dvou přírub a komory. V přírubách jsou uloženy hřídele pomocí kuličkových ložisek. Příruby jsou utěsněny plochým těsněním z materiálu NBR 70. Zavírací kola se šikmými zuby jsou mazána plastickým mazivem.

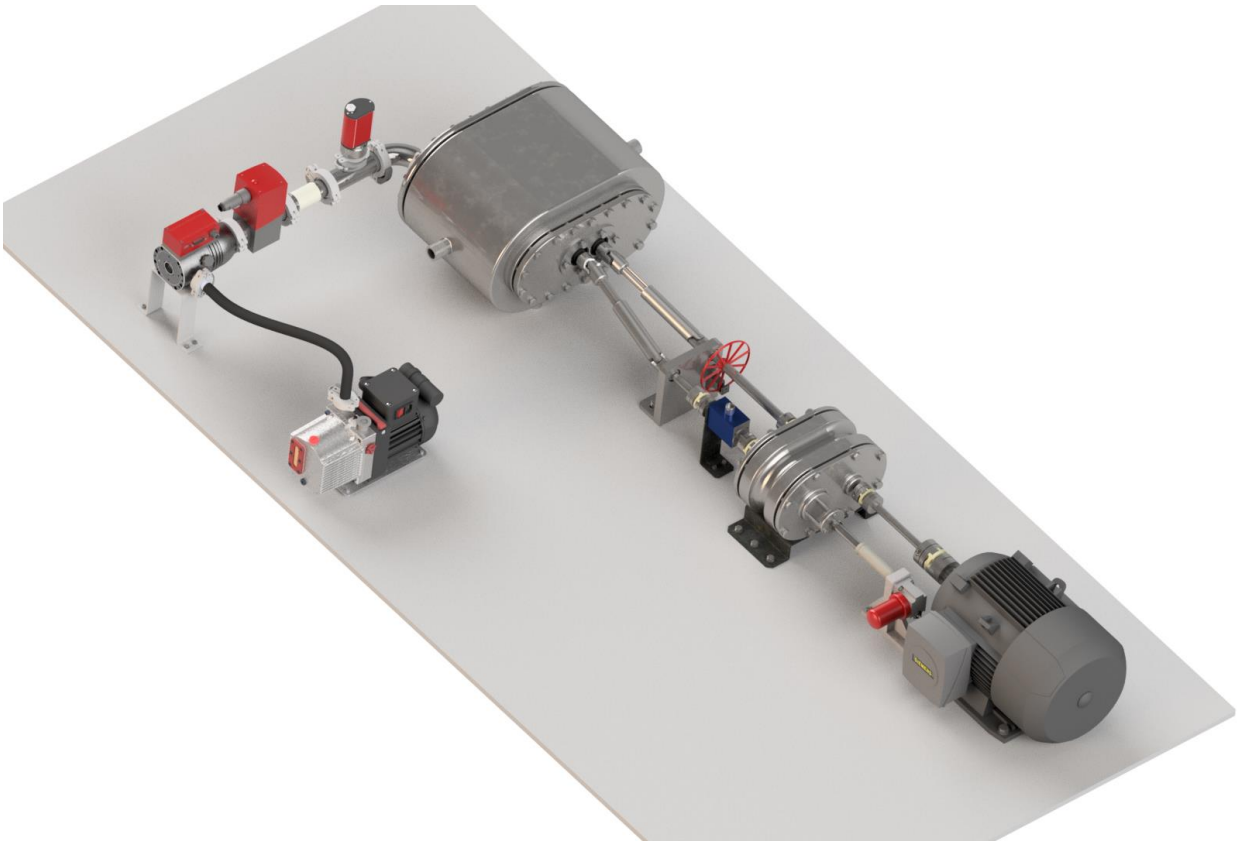
Zatěžující moment je vyvozen axiálním posuvem užšího kola pomocí aktuátoru TA10 od společnosti Timotion, který je napájen 24 V DC. Pozice je měřena pomocí Hallovy sondy. Zvládne vyvinout maximální sílu 6 kN s maximální posunem 300 mm dle konfigurace. Výhodou je možnost manuálního ovládání. Nevýhodou je, že díky složitosti systému není možné odhadnou, jakou změnu kroutícího momentu způsobí minimální krok aktuátoru. Tudíž není známá jemnost jeho regulace.



Obrázek 31 - Uzavírací skříň

Regulace teploty je řešena pomocí zařízení Presto A80 od společnosti Jubalo, viz kapitola 4.4.3. Pro přenos tepla je zvolena kapalina Thermal P90 na bázi silikonu, která pracuje v teplotním rozsahu od -90 °C do +170 °C. Jak kapalinu, tak i ostatní potřebné doplňky jako hadice, konektory, ovladače atd. distribuuje společnost Jubalo. Vzhledem k použitému kontrolnímu průzoru je omezena rychlost teplotních změn na 5 °C/min. Aby bylo zamezeno teplotním ztrátám je zkušební komora obalena izolací Armaflex. Jedná se o pružnou parotěsnou pěnovou hmotu, prodávanou v deskách a trubicích o různé tloušťce. Pro dosažení potřebných izolačních vlastností pro kapalinu o teplotě -80 °C a chladící výkon 0,1 kW je zapotřebí tloušťka 64 mm (2 vrstvy 32 mm). Díky uzavřeným buňkám nepropouští vzdušnou vlhkost, která by mohla namrzat na vnějším povrchu komory a ničit tak izolaci. Nevýhodou je nutnost důkladného slepení všech spojů k zamezení průniku vlhkosti. Ke snížení tepelných ztrát přispěje i obalení vakuového potrubí stejnou izolační hmotou.

Teplota je měřena termočlánkem typu K na příčníku, který měří teploty od -200 °C do +1300 °C. Informace jsou přenášeny ven z komory pomocí průchodky od společnosti Pfeiffer s připojovacím rozměrem DN 16 ISO KF.



Obrázek 32 - Finální koncept

6 DISKUZE

Finální koncept umožňuje testovat ozubená kola ve vysokém vakuu až 10^{-5} Pa a při teplotách od -40 °C po 90 °C. Použitá teplotní regulace zvládne vytvořit i vyšší teploty až do 170 °C. Díky možnosti měnit teploty a zatěžující moment v průběhu testu můžeme dostatečně přesně nasimulovat skutečné podmínky, kterým jsou ozubená kola vystavena v satelitech. Další předností testeru je možnost jednoduché změny osové vzdálenosti testovaných kol. Nevýhodou je možnost testovat kola bez větších zásahů do testeru pouze s převodovým číslem jedna. Model finálního konceptu má cca 2 m na délku, proto nemusí být vhodný do menších laboratoří. Vzhledem k složitosti systému je obtížné předem určit, jestli minimální krok aktuátoru mění kroutící moment s dostatečnou citlivostí. Proto se chování testeru musí nejprve otestovat na vzorku ozubených kol se známými vlastnostmi, aby bylo možné určit veškeré charakteristiky zařízení. Také není dořešen způsob izolace, aby bylo opakovaně možné demontovat přední přírubu a vyměnit testované vzorky.

Pro podrobnější měření podmínek v komoře a zlepšení pochopení vlivů na životnost ozubení je možné do komory přidat další senzory např. senzor vlhkosti.

7 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout koncept zařízení, které otestuje ozubená kola v podmínkách, kterým jsou vystavena na nízké oběžné dráze Země (tab. 1). To se podařilo a byl navržen tester pro běhové zkoušky ozubení s uzavřeným tokem výkonu, který zvládne vytvořit prostředí s vakuem o velikosti 10^{-5} Pa a teplotami od -40 do +90 °C. Díky své konstrukci dokáže měnit zatěžovací moment v průběhu testu a tím přiblížit test reálným podmínkám. Maximální velikost kroutícího momentu je stanovena na 20 Nm při otáčkách 1000 min^{-1}. Díky jednoduché výměně je možné měnit osovou vzdálenost testovaných kol od 10 mm po 100 mm. Modifikací uložení hřídelů se umožní zvětšit osovou vzdálenost až na 175 mm. Koncept byl vymodelován v softwaru Autodesk Inventor 2022 a do příloh zařazen ve formátu STEP.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

(1) ANDERS, J. a JB. MONDIER. *Development of a modular product line of rotary actuators for european space mechanisms* [online]. 6 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.esmats.eu/esmatspapers/pastpapers/pdfs/2021/anders.pdf

(2) SCHWARZ, Sebastian a Reiner BARHO. *Deployment mechanism for a 5m unfurlable reflector* [online]. 7 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.esmats.eu/esmatspapers/pastpapers/pdfs/2019/schwarz.pdf

(3) GABIOLA, Iker, Iñaki GILA a Jon JON GUERRA. *HF-VHF Compact Tubular Deployable Antenna Mechanism* [online]. 7 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.esmats.eu/esmatspapers/pastpapers/pdfs/2021/gabiola.pdf

(4) SHORE, Jasin, Roy BLOWS, Andrew VIQUERAT, Guglielmo AGLLIETTI, David GOODING a Guy RICHARDSON. *A new generation of deployable optics for earth observation using small satellites* [online]. 8 [cit. 2022-03-21]. Dostupné z: https://www.esmats.eu/esmatspapers/pastpapers/pdfs/2019/shore.pdf

(5) MARŠÁLEK, Petr. *Únavové zkoušky ozubených kol* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10084/101245. Disertační práce. Vysoká škola Báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Havlík, Ph.D.

(6) OPOČENSKÝ, Martin. *Pevnostní výpočty ozubených soukolí v převodovkách osobních automobilů* [online]. Liberec, 2018 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/handle/15240/152211. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Ing. Robert Voženílek, Ph.D.

(7) KIM, Choong Hyun. *Durability improvement method for plastic spur gears* [online]. 8 [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X06000326

(8) VOSYKA, Jakub. *Zkušební zařízení pro testování kuželových ozubených kol* [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/10467/73384. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta Strojní. Vedoucí práce Ing. Petr Karel, Ph.D.

(9) ŽÁČEK, Jan. *Konstrukce zařízení pro výzkum mazání ozubených převodů* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: http://hdl.handle.net/11012/81415. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav konstruování. Vedoucí práce Petr Svoboda.

(10) *K-Drives - eschop: Elektromotor K-DRIVES jednofázový K1SA0090-6* [online]. Mohelnice: K-Drives CZ, 2022 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.elektromotory.cz/goods/index/id/2322

(11) *RAVEO e-schop: Krokový motor - NEMA34 – 7,6 Nm* [online]. Otrokovice: RAVEO, 2014 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: http://www.motory-prevodovky.cz/elektromotory/krokove-elektromotory/krokovy-motor-nema34-7-6-nm-detail

(12) *Angelantoni Test Technologies: What is a Thermal Vacuum Chamber and how does it work?* [online]. Italia [cit. 2022-04-08]. Dostupné z: https://acs.angelantoni.com/en/resources/what-is-a-thermal-vacuum-chamber

(13) *JULABO: PRESTO A80 Process system* [online]. In: . [cit. 2022-03-28]. Dostupné z: https://www.julabo.com/en/products/highly-dynamic-temperature-control-systems/presto-process-systems/presto-a80

(14) DUŠEK, Petr. *Vakuová technika* [online]. Brno, 2020, 83 s. [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/lfo5r/. Bakalářská práce. Katedra fyziky, chemie a odborného vzdělávání Pedagogické fakulty Masarykovy univerzity. Vedoucí práce Mgr. Lukáš Pawera.

(15) *Vakuum Servis: Rotační vývěva* [online]. Rožnov pod Radhoštěm: Vakuum servis, 2018 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.vakuum-servis.cz/novinky/rotacni-vyveva

(16) *Vakuum Bohemia: Turbomolekulární olejové vývěvy* [online]. Jihlava: VAKUUM BOHEMIA, 2019 [cit. 2022-02-25]. Dostupné z: https://www.vakuum-bohemia.cz/turbomolekularni-olejove-vyvevy

(17) *Vacuum Technology Book* [online]. Volume II. Asslar, Germany: Pfeiffer Vacuum GmbH, 2013 [cit. 2022-02-25]. ISBN N/A. PI 0355 PEN. Dostupné z: https://www.pfeiffer-vacuum.com/en/

(18) *Průmyslové vakuum: Rotační olejové vývěvy* [online]. 2018 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://www.prumyslove-vakuum.cz/vakuove-technologie/rotacni-olejove-vyvevy/

(19) Vývěva: Turbomolekulární vývěva. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%BDv%C4%9Bva

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

- AC – střídavé napětí (z anglického alternating current)
- DC – stejnosměrné napětí (z anglického direct current)
- d_{max} – maximální průměr kola
- HV – Vysoké vakuum (z anglického high vacuum)
- LEO – nízká oběžná dráha Země (z anglického Low Earth Orbit)
- m_{max} – maximální možný modul
- UHV – Ultra vysoké vakuum (z anglického ultra-high vacuum)
- z_{min} – minimální počet zubů kola

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obrázek 1 - Modul převodovky od TAEM (1) 13
Obrázek 2 - Mechanismus povolení drátu (2) 14
Obrázek 3 - Rozvinutý a svinutý reflektor (2) 14
Obrázek 4 - Model mechanismu antény (3) 15
Obrázek 5 - Mechanismus antény (3) 15
Obrázek 6 - Mechanismus rozvinutí objektivu (4) 16
Obrázek 7 - Plně vysunutý model (4) 16
Obrázek 8 - Niemannovo zkušební zařízení (5) 19
Obrázek 9 - Schéma uzavřeného zkušebního zařízení 19
Obrázek 10 - Schéma otevřeného zkušebního zařízení 19
Obrázek 11 – Pulzátor (5) 21
Obrázek 12 - Zkouška trojbokým ohybem (5) 21
Obrázek 13 - Části testeru 24
Obrázek 14 - Asynchronní motor (10) 25
Obrázek 15 - Krokový motor (11) 26
Obrázek 16 - Asynchronní motor 27
Obrázek 17 - Schéma testeru s torzním hřídelem 28
Obrázek 18 - Tester se šikmými zuby 28
Obrázek 19 - Schéma regulace teploty I 30
Obrázek 20 - Regulace teploty II 30
Obrázek 21 - Presto A80 (13) 31
Obrázek 22 - Rotační vývěva (18) 32
Obrázek 23 - Turbomolekulární vývěva (19) 33
Obrázek 24 - ISO-KF (17) 33
Obrázek 25 - ISO-CF (17) 34
Obrázek 26 - Finální tester 35
Obrázek 27 - Schéma testeru 36
Obrázek 28 - Přední příruba 36

Obrázek 29 - Testovací skříň 37
Obrázek 30 - Spojení skříní 38
Obrázek 31 - Uzavírací skříň 39
Obrázek 32 - Finální koncept 40

11 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Požadované podmínky 22

Tabulka 2 - Rozdělení vakua (14) 31

Tabulka 3 - Skupiny uložení..... 37

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – 3D model testeru