



# **VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## **FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## **ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# **EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO STUDIUM FILMU MAZIVA V PODDAJNÉM KONTAKTU BŘITOVÉHO TĚSNĚNÍ S VYUŽITÍM FLUORESCENCE**

EXPERIMENTAL RIG FOR STUDY OF LUBRICANT FILM IN COMPLIANT CONTACT OF OIL SEAL USING  
FLUORESCENCE TECHNIQUE

## **BAKALÁRSKA PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

## **AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Michal Michalec**

## **VEDÚUCI PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Kryštof Dočkal**

**BRNO 2016**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Michal Michalec**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Kryštof Dočkal**  
Akademický rok: 2016/17

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:

### **Experimentální zařízení pro studium filmu maziva v poddajném kontaktu břitového těsnění s využitím fluorescece**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Přestože je břitové těsnění běžně využívaná strojní součást, stále není plně objasněno chování maziva v kontaktu těsnícího břitu a hřídele. Tvar a materiál kontaktních těles představují komplikace při použití v tribologii standardně využívaných optických metod. Jednou z možností je využití fluorescenční mikroskopie na jednoúčelovém přípravku, kde bude hřídel nahrazena tělesem z opticky propustného materiálu.

Typ práce: vývojová – konstrukční

#### **Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem je konstrukce přípravku pro uchycení břitového těsnění umožňujícím pohled do kontaktní oblasti. Počítá se s využitím již existující aparatury a měřicí metody.

Díličí cíle bakalářské práce:

- identifikovat možnosti realizace pohledu do kontaktní oblasti,
- navrhnout koncepční návrhy přípravku,
- konstrukční návrh a realizace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2017.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

MYANT, C., T. REDDYHOFF a H.A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. Tribology International [online]. 2010, 43(11), 1960-1969 [cit. 2016-10-26]. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.03.013. ISSN 0301-679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10000770>

EL GADARI, M., A. FATU a M. HAJJAM. Shaft roughness effect on elasto-hydrodynamic lubrication of rotary lip seals: Experimentation and numerical simulation. Tribology International [online]. 2015, 88, 218-227 [cit. 2016-10-26]. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.03.013. ISSN 0301-679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X15001036>

FOWELL, M.T., C. MYANT, H.A. SPIKES a A. KADIRIC. A study of lubricant film thickness in compliant contacts of elastomeric seal materials using a laser induced fluorescence technique. Tribology International [online]. 2014, 80, 76-89 [cit. 2016-10-26]. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.05.028. ISSN 0301-679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X14002163>

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

---

## **ABSTRAKT**

Bakalárska práca sa zaoberá konštrukčným návrhom zariadenia, ktoré slúži k pozorovaniu hrúbky filmu maziva v líniovom poddajnom kontakte britového tesnenia. Problémom je, že pri použití súčastí z bežne používaných materiálov nie je možné nahliadnuť do ich vzájomného kontaktu. Preto je potrebné jedno z nich nahradiť telesom z opticky priehľadného materiálu, ktoré umožní náhľad dovnútra kontaktu využitím existujúcej aparatúry, ktorou je fluorescenčný mikroskop. V teoretickej časti je popísaná problematika mazania a pozorovacia metóda fluorescencie. Na základe poznatkov bolo navrhnuté zariadenie umožňujúce sledovanie správania maziva. Posledná časť práce detailne rozoberá návrh modifikujúci súčasnú aparatúru a popis jednotlivých častí. Funkčnosť navrhnutého experimentálneho zariadenia bola overená experimentami s použitím minerálneho oleja R834/80.

---

## **KEÚČOVÉ SLOVÁ**

Experimentálne zariadenie, Izoviskózne-Elastohydrodynamické mazanie, líniový kontakt

---

## **ABSTRACT**

The thesis deals with design of the device that is used for observation of lubricant film thickness in line, compliant contact of rotary lip seal. The problem is, that with use of components made from standard materials, it is not possible to look inside their contact. Therefore, it is necessary to replace one body by optical transparent material, that will allow the insight into the contact using existing equipment, which is fluorescence microscope. In theoretical part are described issues of lubrication and observing method of fluorescence. Based on findings, there was designed a device allowing observation of lubricant behaviour. The last part of thesis describes modified design of existing equipment and individual components in detail. Functionality of designed experimental rig was verified by experiments using of R834/80 mineral oil.

---

## **KEY WORDS**

Experimental rig, Isoviscous-Elastohydrodynamic lubrication, line contact

---



---

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

MICHALEC, M. *Experimentální zařízení pro studium filmu maziva v poddajném kontaktu břitového těsnění s využitím fluorescencce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 40 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Kryštof Dočkal.

---

---



---

## **ČESTNÉ PREHLÁSENIE**

Prehlasujem, že som bakalársku prácu „Experimentální zařízení pro studium filmu maziva v poddajném kontaktu břitového těsnění s využitím fluorescence“ vypracoval samostatne pod vedením Ing. Kryštofa Dočkala. Vychádzal som pri tom zo svojich znalostí, konzultácií, odbornej literatúry a prameňov uvedených v zozname literatúry.

V Brne dňa .....

.....  
Michal Michalec

## **POĎAKOVANIE**

Rád by som poďakoval Ing. Kryštofu Dočkalovi za odborné vedenie práce, cenné rady a pripomienky behom konzultácií, pomoc pri meraní a za ochotu a ústretovosť.

---



**OBSAH**

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Prehľad súčasného stavu poznania</b>	<b>13</b>
1.1 Popis problematiky mazania	14
1.2 Fluorescenčná mikroskopia	16
1.3 Mazacie médium	19
<b>2 Analýza problému a cieľ práce</b>	<b>20</b>
2.1 Cieľ práce	20
2.2 Analýza problému	20
<b>3 Koncepčné riešenie</b>	<b>21</b>
3.1 Spôsob náhľadu do kontaktu	22
3.2 Výber koncepčného riešenia	24
<b>4 Konštrukčné riešenie</b>	<b>25</b>
4.1 Popis konštrukcie	25
4.1.1 Nosný rám	26
4.1.2 Uloženie trubice	27
4.1.3 Vaňa na mazivo	29
4.1.4 Pohon	29
4.2 Zostavenie zariadenia	30
<b>5 Diskusia</b>	<b>32</b>
<b>6 Záver</b>	<b>35</b>
<b>7 Zoznam použitej literatúry</b>	<b>36</b>
<b>8 Zoznam použitých skratiek, symbolov a veličín</b>	<b>38</b>
<b>9 Zoznam obrázkov a grafov</b>	<b>39</b>
<b>11 Zoznam príloh</b>	<b>40</b>

## ÚVOD

Britové tesniace krúžky slúžia na tesnenie rotujúcich strojných súčastí. V dnešnej dobe sú neodmysliteľnou súčasťou väčšiny rotačných mechanizmov a používajú sa takmer vo všetkých odvetviach strojárstva. Ich hlavnou úlohou je zabezpečiť uloženie pred únikom maziva. V prašnom prostredí sa pre ešte lepšiu ochranu používa britové tesnenie s prachovkou, ktorá je spravidla umiestnená pred britom a bráni vnikaniu prachu a nečistôt do vnútra mechanizmu.

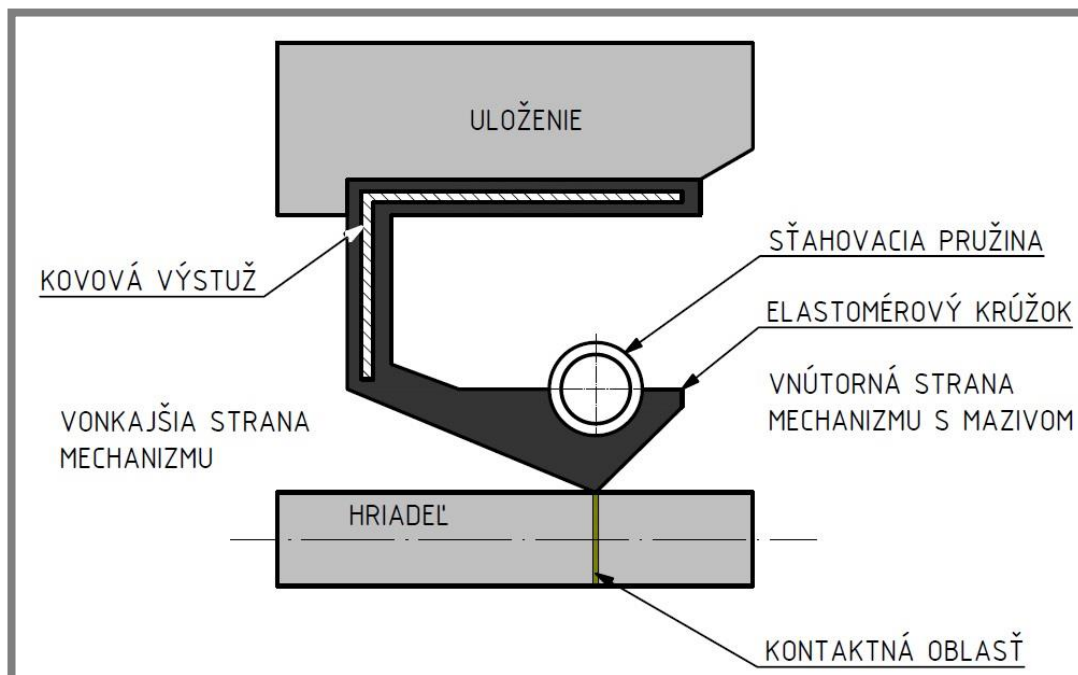
Medzi britom tesnenia a hriadeľom vzniká líniový, izoviskózne-elastohydrodynamicky mazaný (I-EHL) kontakt. Režim I-EHL je charakteristický pre nekonformné povrchy, u ktorých na relatívne malej kontaktnej oblasti dochádza k výrazným elastickým deformáciám povrchu telies a vysokej hrúbke filmu. Pri relatívnom pohybe a existencií konvergentnej medzery medzi povrchmi dochádza k nárastu tlaku v mazive, ktoré sa pohybuje v smere strednej rýchlosti povrchov. V prípade kontaktu britového tesnenia je smer strednej rýchlosti rovnobežný s kontaktnou líniou, kde povrchy nie sú konvergentné. Preto nie je jednoduché predikovať mechanizmy zodpovedné za mazanie kontaktu a tesnenia, čo komplikuje ďalšiu optimalizáciu životnosti britových tesnení a strát spôsobených trením.

Jedným z možných vysvetlení je fenomén mikro-elastohydrodynamického mazania (mikro-EHL), pri ktorého jednotlivé nerovnosti na povrchu fungujú ako samostatné kontakty, vytvárajúce konvergentné medzery pozdĺž línie kontaktu. Vzhľadom k neustále zvyšujúcim sa nárokom na výkonnosť a životnosť súčastí je výhodné poznať správanie maziva medzi britovým tesnením a protikusom. Analýza mazacieho filmu umožní optimalizáciu vlastností britového tesnenia a protikusu pre dosiahnutie lepších tesniacich vlastností a dlhšej životnosti.

Materiály používané na výrobu britových tesnení sa vyznačujú nízkou reflexivitou, a preto nie je možné použiť v tribológii najrozšírenejšiu metódu pre štúdium tenkých mazacích filmov – optickú interferometriu. Alternatívny prístup, ktorý sa v posledných rokoch dostáva do popredia je fluorescenčná mikroskopia, ktorá bola úspešne aplikovaná pri štúdiu poddajných kontaktov, kde materiál jedného zo skúmaných telies mal modul pružnosti rádovo v desiatkach až stovkách MPa a vykazoval podobné vlastnosti ako materiál britu tesnenia.

## 1 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Tesnenie sa skladá z viacerých častí z rôznych materiálov. Na obr. 1-1 je schéma uloženia britového tesnenia. Telo sa vystužuje oceľovým krúžkom pre dosiahnutie dostatočnej tuhosti tela v uložení, zatiaľ čo pružina zaisťuje správny radiálny prítlak tesniaceho britu o hriadeľ. Na výrobu krúžku sa používajú polymérne materiály - elastoméry a plasty. Elastoméry je možné za bežných podmienok deformovať dokonca aj malou silou, pričom táto deformácia je prevažne vratná, čo je výhodné najmä na to, aby tesnenie dobre dosadalo v uložení. Samotný brit môže byť vyrobený z gummy, ale používajú sa taktiež aj plasty.



Obr. 1-1 Schéma britového tesnenia [1]

Youngov modul pružnosti  $E$  sa u gummy pohybuje v desiatkach MPa, čo naznačuje, že potrebné napätie pre rovnakú deformáciu je omnoho menšie ako napr. v porovnaní s oceľou, kde sa modul pružnosti pohybuje v stovkách GPa. Poissonov pomer  $\mu$  gummy je približne 0,5, u plastov sa pohybuje v rozmedzí (0,3 – 0,5). Plasty sú za bežných podmienok tvrdšie a majú vyšší modul pružnosti, rádovo v jednotkách GPa. Po prekročení teploty skelného prechodu dochádza k zmene mechanických vlastností, kedy modul pružnosti poklesne približne o tri rády, čo je spôsobené zvýšenou pohyblivosťou častíc makromolekúl [2].

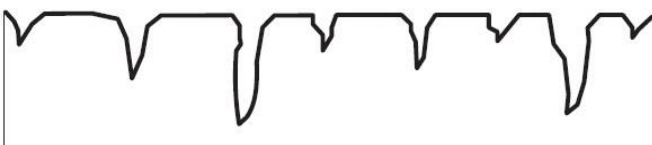

Tranzitná oblasť je veľmi dôležitým kritériom pre výber materiálu tesnenia, čo má vplyv na jeho správnu funkciu. Bežne používaná guma na výrobu tesnení je NBR (nitrilový kaučuk), ktorej teplotný rozsah uvedený výrobcom SKF je (-40 až 100) °C, no existujú viaceré modifikácie materiálov pre vyššie teplotné rozsahy až do 390 °C. Napríklad prevodovka automobilu môže dosahovať počas jazdy aj 150 °C a po odstavení v mraze musí znášať relatívne veľké výkyvy teplôt, a preto pri výbere materiálu tesnenia treba zväžiť teplotu prostredia a teplotu, ktorú môže mechanizmus pri chode dosiahnuť.

Odporúčaná drsnosť povrchu hriadeľa podľa ČSN 029401:1990 pod tesniace krúžky je  $R_a$  (0,2 až 0,4) pre obvodovú rýchlosť do 12 m.s<sup>-1</sup>. Je dôležité, aby opracovanie nezanechalo šróbovitú ryhu, ktorá by mohla spôsobiť netesnosti. Dôraz sa kladie aj na rozmerovú a geometrickú presnosť uloženia, aby sa predchádzalo hádzaniu, ktoré má výrazný vplyv na životnosť a efektívnosť tesnenia.

### 1.1 Popis problematiky mazania

V prípade predpokladaného mechanizmu mazania mikro EHL je veľmi dôležitá drsnosť povrchu, na ktorej bude závisieť hrúbka mazacieho filmu aj tesniaca schopnosť. Príliš vysoká drsnosť povrchu zvyšuje pravdepodobnosť výskytu kanálov, ktorými môže unikať mazivo, naopak príliš nízka hodnota drsnosti spôsobí nárast trenia vplyvom adhézie povrchov. Z týchto dôvodov výrobcovia uvádzajú vo svojich katalógoch odporúčania pre dané aplikácie za účelom bezproblémového chodu a vysokej životnosti.

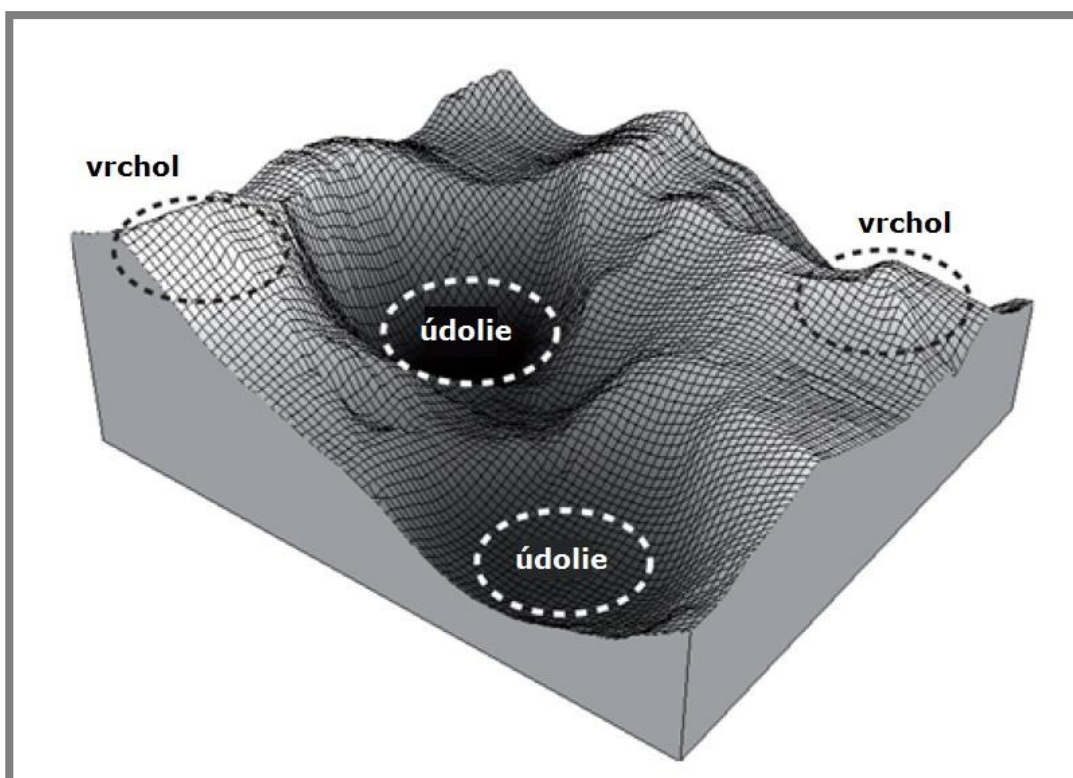
Najpoužívanejšie charakteristiky drsnosti povrchu  $R_a$ ,  $R_z$  a  $R_{zmax}$  sú definované v norme ISO 4287:1999. Pre tesniace povrchy je zvyčajne potrebné predpísať viacero parametrov. Často ide o parameter  $R_a$  v kombinácii s  $R_z$ , alebo charakteristikami založenými na Abbottovej krivke materiálu. Spoločnosť Trelleborg[3] považuje za významnú charakteristiku hodnotu nosného podielu povrchu  $R_{mr}$ , taktiež podľa normy ISO 4287:1999. Tento parameter je určený špecifickým tvarom profilu, ktorý je závislý na použítom spôsobe obrábania. Porovnanie významu charakteristík je zobrazené na obr. 1-2.

Profil povrchu	$R_a$	$R_z$	$R_{mr}$
uzatvorený tvar profilu 	0,1	1,0	70%
otvorený tvar profilu 	0,2	1,0	15%

Obr. 1-2 Tvar profilu povrchu [3]

Okrem 2D charakteristík štruktúry povrchu a opracovania je možné pomocou optických meracích prístrojov merať v 3D. Spolu s novými parametrami povrchu

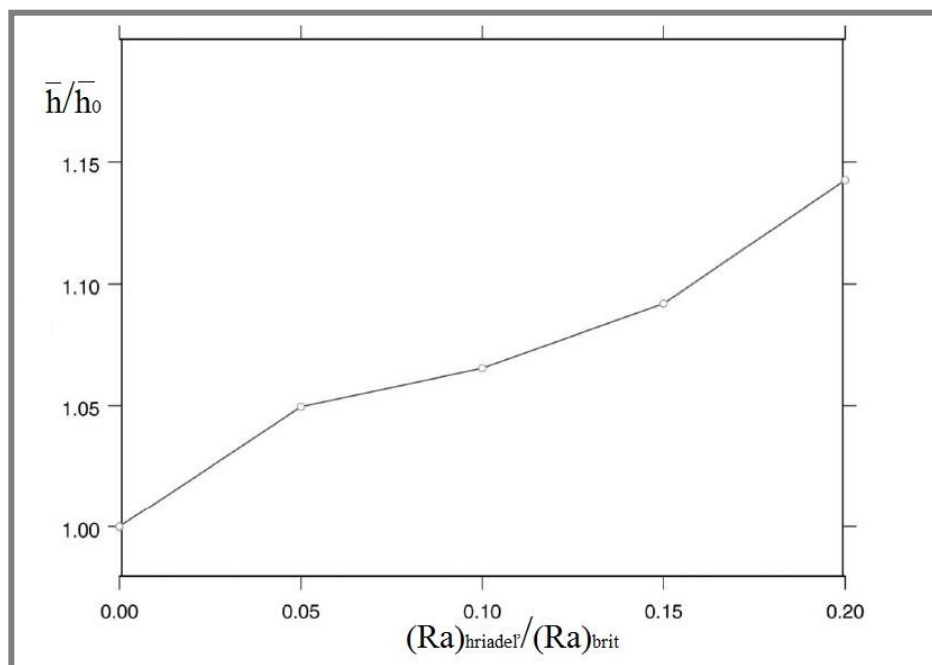
podľa normy ISO 25178:2016 sa naskytuje nový prístup k vyhodnocovaniu charakteristiky hriadele. Fehrenbacher [1] skúmal vplyv nerovností povrchu na trecie vlastnosti britového tesnenia práve na základe 3D parametrov. Pre tento prístup nie je dostatočné určiť priemernú odchýlku, príp. extrém, ale celé oblasti, ktoré môžu tvoriť údolia alebo vrcholky (Obr. 1-3). Vrcholky majú rovnaký vplyv ako údolia. Deformujú povrch tesnenia, čím spôsobujú netesnosť. Tieto charakteristiky je možné, podľa jeho zistení, využiť pri odhade prečerpávania maziva z kontaktnej oblasti do vnútornej strany mechanizmu s mazivom a zlepšiť tak funkčnosť. Ak by bolo možné optimalizovať priľnavosť tesnenia správnym opracovaním hriadele, potrebný prítlak britového tesnenia by mohol byť menší, čím by sa znížilo trenie a zvýšila životnosť britu.



Obr. 1-3 3D elementy povrchu [1]

Shen [4] sa vo svojej experimentálnej štúdií zaoberal správaním britového tesnenia v závislosti na opracovaní povrchu hriadele, kde porovnával hrúbku filmu na základe troch výpočtových modelov. Tieto modely pracujú s okrajovými podmienkami vychádzajúcimi z povrchu hriadeľa. Vstupné parametre boli určené na základe obvyklých prevádzkových podmienok. Z jeho zistení vyplýva, že výkyvy v hrúbke mazacieho filmu spôsobené nerovnosťami na povrchu hriadele majú za následok zväčšenie priemernej hrúbky filmu, nárast zaťaženia, spätné čerpanie maziva a pokles rýchlosti, pri ktorej dochádza k odchlopeniu povrchov tesnenia a hriadele. Táto rýchlosť je veľmi dôležitá najmä z toho dôvodu, že pri medznom režime mazania počas roztáčania hriadele z pokoja dochádza k opotrebeniu britu. Zvyšovaním rýchlosti narastá hrúbka filmu, až kým kontakt britu tesnenia a hriadele prejde do I-EHL režimu mazania, a preto je výhodné, aby bola odchlopovacia rýchlosť čo najnižšia.

Obr 1-4 zobrazuje závislosť drsnosti povrchu na priemernej hrúbke filmu, resp. ich pomerov, kde  $\bar{h}$  je priemerná hrúbka filmu,  $\bar{h}_0$  priemerná hrúbka filmu dokonale hladkej hriadele,  $R_{ahriadel}$  a  $R_{abrit}$  sú drsnosti povrchov britu a hriadele. Hodnoty boli získané simuláciou použitím parametrov skutočných súčastí. Zo závislosti vyplýva, že s rastúcou hodnotou drsnosti hriadele a znižujúcou sa drsnosťou britu, rastie aj hrúbka filmu maziva. Toto tvrdenie podporil vo svojej práci aj Gadari [5], kde navyše dodal, že s rastúcou strednou aritmetickou hodnotou drsnosti  $R_a$  hriadele klesá trecí moment, avšak pokiaľ je povrch hriadele príliš drsný, trenie výrazne narastá. Nárast strednej aritmetickej hodnoty drsnosti ovplyvňuje aj tok maziva a mohlo by viesť, dokonca, aj k jeho úniku. Tieto zistenia naznačujú, že je možné nájsť optimálnu hodnotu amplitúdy drsnosti hriadele kombináciou analytického modelu a experimentálnych parametrov. K tomu je potrebné analyzovať správanie filmu maziva vo vnútri kontaktu tvoreným britovým tesnením. Vzhľadom k materiálom používaných na výrobu britu, nie je možné využiť metódu optickej interferometrie z dôvodu nízkej odrazivosti povrchu.



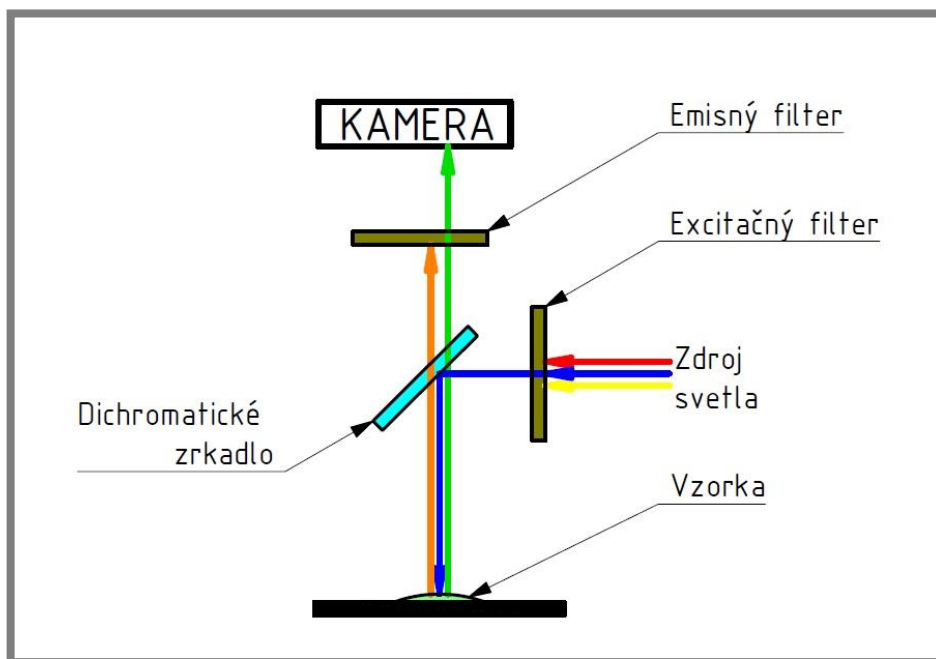
Obr. 1-4 Závislosť drsnosti povrchu na priemernej hrúbke filmu maziva [4]

## 1.2 Fluorescenčná mikroskopia

Metóda, ktorá bola v minulosti úspešne aplikovaná pre analýzu filmu maziva v poddajných kontaktoch, je fluorescenčná mikroskopia [6]. Na rozdiel od optickej interferometrie, ktorá určuje výšku medzery vyplnenú mazivom, fluorescenčná mikroskopia vyhodnocuje hrúbku maziva na základe intenzity svetelnej emisie vyžiarenej priamo z maziva alebo z pridanej fluorescenčnej značky zamiešanej v oleji. Tá je za určitých podmienok proporcionálna k hrúbke filmu. Oproti iným štandardným metódam táto metóda nevyžaduje odrazivé povrchy a je menej náchylná na prípadné škrabance alebo iné artefakty.

Fenómén fluorescence je vlastnosťou niektorých látok, ktoré absorbujú dopadajúce svetlo určitej vlnovej dĺžky. Absorbovaná energia je následne vyžiarená vo forme emisie, ktorá má kvôli pochodom (nežiarivý prenos energie) nižšiu energiu, resp. vyššiu vlnovú dĺžku. Rozdiel vlnových dĺžok excitačného a emisného zväzku svetla je určený Stokesovým posunom. Po osvetlení získa molekula potrebnú energiu na prechod elektrónov do vyššej energetickej hladiny, tzv. excitovaného stavu, v ktorom ale elektróny nedokážu zotrvať. Ich návrat späť do pokojového stavu má za následok stratu energie, ktorá sa prejavuje vyžiarovaním fotónu s vyššou vlnovou dĺžkou a elektrón sa vráti na pôvodnú hladinu. Proces fluorescence je cyklický, a preto môže byť molekula fluoroforu opakovane excitovaná, avšak po určitej dobe dochádza k nenávratnej deštrukcii, známej ako fotovybelovanie (photobleaching) [7].

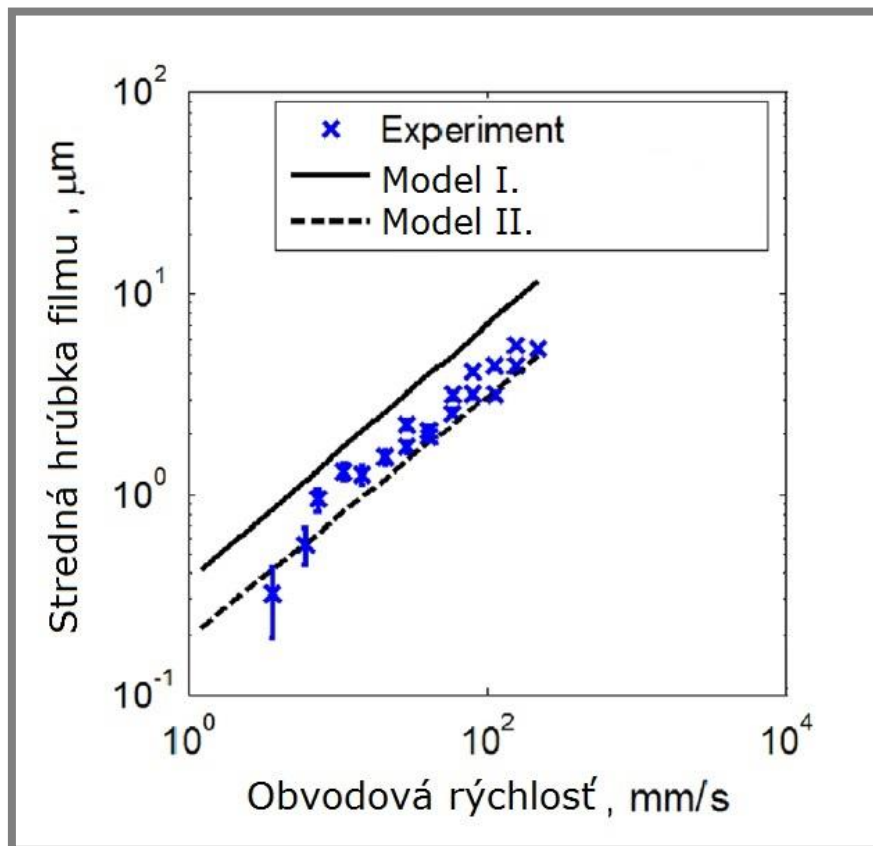
Fluorescencia molekuly je závislá na jej zložení a na prostredí, v ktorom sa nachádza. Existuje mnoho organických i anorganických molekúl s touto vlastnosťou, ktoré sú súčasťou roztokov alebo do nich môžu byť primiešané. V prípade prirodzenej fluorescence olejov je väčšinou interval vlnových dĺžok excitácie v oblasti UVA a UVB (280 až 400) nm svetla a emisia v oblasti modrého svetla. Oleje, do ktorých bolo fluorescenčné farbivo primiešané, vyžarujú svetlo podľa typu a vlastností pridaného farbiva. Aby bolo možné pozorovať emitovaný zväzok svetla je potrebné použiť sadu filtrov (Obr. 1-5), ktoré ho oddelia od excitačnej zložky.



Obr. 1-5 Princíp fluorescenčného mikroskopu [7]

Na meranie hrúbky filmu v poddajnom kontakte aplikoval Fowel [8] techniku laserom indukovanej fluorescence (LIF) využívajúcu laser ako zdroj energie vo forme dopadajúcich fotónov potrebných pre vznik excitácie. Pri veľmi nízkych obvodových rýchlostiach (7,3 mm/s) dosahovala hrúbka filmu (0 až 5)  $\mu\text{m}$ , pri vyšších obvodových rýchlostiach (1190 mm/s) bol zaznamenaný nárast hrúbky filmu na (10 až 20)  $\mu\text{m}$  v bezprostrednej blízkosti od centra kontaktnej zóny. Experimentálne hodnoty porovnával s teoretickými modelmi založenými

na Reynoldsovej rovnici. Na obr. 1-6 je zobrazená závislosť strednej hrúbky filmu na obvodovej rýchlosti povrchov. V rozsahu rýchlostí použitých pri experimente vyplýva, že s rastúcou rýchlosťou rastie aj hrúbka filmu a závislosť má približný lineárny priebeh.



Obr. 1-6 Závislosť strednej hrúbky filmu na obvodovej rýchlosti [8]

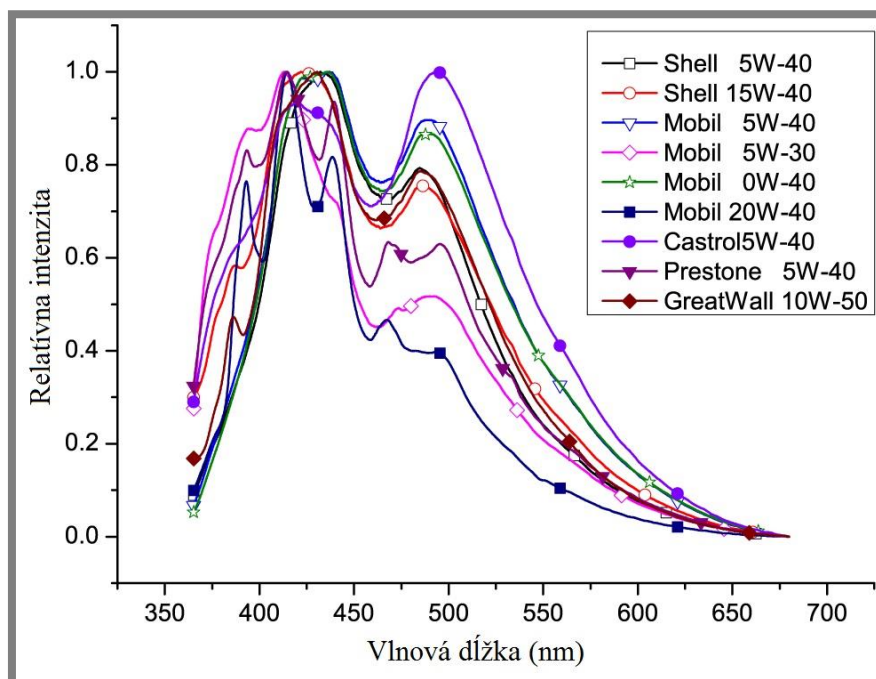
Obdobnú techniku merania LIF predstavil vo svojej odbornej práci Hidrovo[9]. Jedná sa o techniku ERLIF využívajúcu reabsorpciu a emisiu dvoch fluorescenčných farbív pre presnejšie meranie hrúbky filmu v zmysle potlačenia vplyvu pozadia a šumu. Kombinácia farbív sa volí tak, aby vykazovali vysoký stupeň emisnej reabsorpcie a výsledky sa vyhodnocujú na základe pomeru intenzity. Minimalizáciou chýb, spôsobených odchýlkami v intenzite osvetlenia a odrazivosti povrchov, bolo možné dosiahnuť hrúbku filmu v rozsahu (5 až 400)  $\mu\text{m}$  s presnosťou až 1%.

Pri samotnom pozorovaní treba brať na vedomie aj prostredie a materiály, s ktorými fluorescenčný roztok, resp. olej prichádza do kontaktu. Britové tesnenie sa vyrába z rôznych materiálov a niektoré zložky sa tiež môžu prejavovať prirodzenou fluorescenciou, čo môže spôsobovať šum vo výsledkoch. Rovnako ako hriadeľ vyrobená väčšinou z ocele môže obsahovať chróm a ďalšie prvky, ktoré spôsobujú zhasenie fluorescencie – pokles emisie.

### 1.3 Mazacie médium

Aby bolo možné pozorovať správanie maziva počas chodu prostredníctvom fluorescenčného mikroskopu, bude nevyhnutné použiť roztok, resp. mazivo s prirodzenou fluorescenciou alebo roztok maziva s fluorescenčným farbivom. Niektoré minerálne oleje sa vyznačujú prirodzenou fluorescenciou v oblasti UV (excitácia) a modrého svetla (emisía). Tá je poväčšine spôsobená prítomnosťou polycyklických aromatických skupín v molekulách maziva. Niektoré z nich sú používané ako fluorescenčné farbivá.

Niektoré bežne používané oleje, ako napríklad motorové, prejavujú známky fluorescencie. Na klasifikáciu motorových olejov sa používa časovo rozlíšená fluorescenčná spektroskopia (TRF). Použitím technológie TRF Taotao Mu [10] analyzoval a klasifikoval bežne používané motorové oleje od komerčných výrobcov. Každý typ oleja vykazoval známky fluorescencie s rôznou intenzitou a vlnovou dĺžkou ako je zobrazené na obr. 1-6. Toto zistenie by mohlo pomôcť pri eliminácii prípadného šumu vo výsledkoch na základe známej vlnovej dĺžky emitovaného svetla použitého roztoku za predpokladu využitia LIF.



Obr. 1-7 Závislosť intenzity a vlnovej dĺžky motorových olejov [10]

Z uvedených poznatkov vyplýva, že drsnosť hriadeľa má výrazný vplyv na hrúbku filmu maziva v poddajnom kontakte, rovnako ako aj na tesniacu schopnosť britového tesnenia [4]. Ďalší významný faktor, ktorý ovplyvňuje hrúbku filmu a zároveň uchováva mazivo v uložení je obvodová rýchlosť. Do určitej hodnoty rastie stredná hrúbka filmu maziva priamoúmerne so zvyšujúcimi sa otáčkami [8]. Pre pozorovanie kontaktnej oblasti bude najvhodnejšie použiť metódu fluorescenčnej mikroskopie, najmä z dôvodu vlastností určitých druhov olejov, ktoré vykazujú známky prirodzenej fluorescencie bez pridania fluorescenčného farbiva [10].

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CIEĽ PRÁCE

---

### 2.1 Cieľ práce

Táto práca sa zaoberá návrhom zariadenia, ktoré umožní využiť fluorescenčný mikroskop pre analýzu správania maziva vo vnútri I-EHL kontaktu britového tesnenia a hriadele vyrobenej z opticky číreho materiálu.

#### Čiastkové ciele:

- Návrh priehľadného protikusu
- Návrh zariadenia pre pozorovanie kontaktu tesnenia s hriadeľom
- Výroba a montáž zariadenia
- Testovanie zariadenia a skúmanie chovania maziva

### 2.2 Analýza problému

Aby bolo možné skúmať správanie maziva medzi hriadeľom a britovým tesnením pomocou mikroskopu, je potrebné umožniť náhľad do ich vzájomného kontaktu. Použitie súčastí z materiálov, akých sa bežne vyrábajú nie je možné, a preto je nutné niektorú z týchto dvoch súčastí nahradiť priehľadným variantom – súčiastkou vyrobenou z priehľadného plastu alebo skla. Výroba britového tesnenia z priehľadného plastu je síce možná, ale náklady na výrobu jedného kusa by boli vysoké, a navyše náhľad do kontaktu v prípade priehľadného tesnenia by bol zrejme nedostatočný pre skúmanie správania maziva v uložení a v mieste dotyku. Pri použití sklenenej trubice však vzniká ďalší problém – možnosť náhľadu na kontakt. Tesnenie nasadené na rotujúcu sklenenú trubicu nám umožní jediný spôsob ako pozorovať kontakt z vnútra trubice.

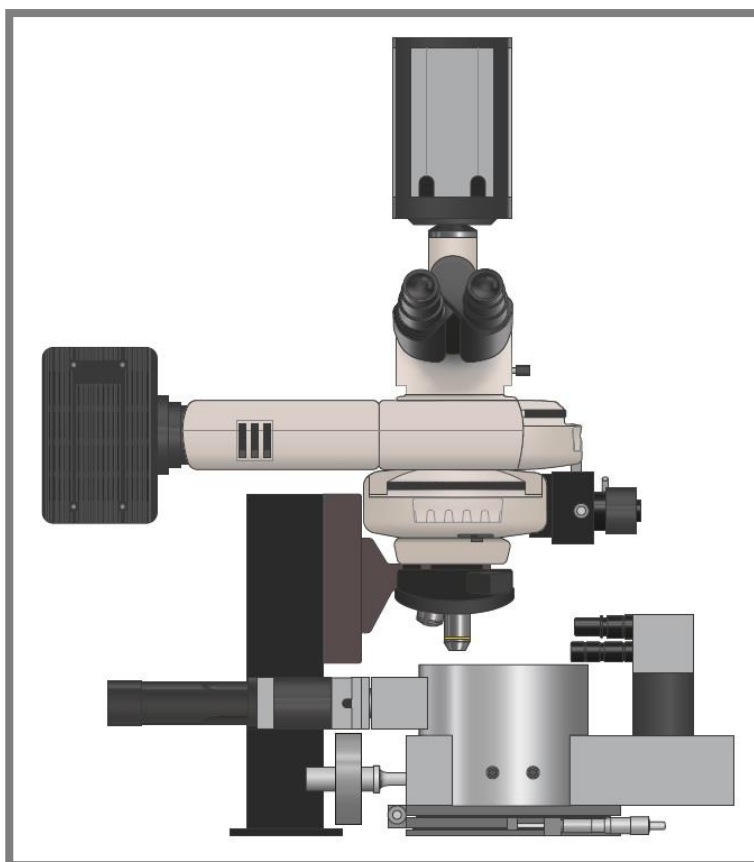
### 3 KONCEPČNÉ RIEŠENIE

Konštrukcia je limitovaná niekoľkými faktormi, ktoré je potrebné splniť pre úspešnú implementáciu navrhovaného simulátora:

- Montáž na súčasnú aparatúru (Obr. 3-1)
- Možnosť jednoducho meniť analyzované vzorky
- Jednoduchosť konštrukcie, zostavenej prevažne z nakúpených dielov, ktoré by mohli byť v prípade potreby využité pre iné zariadenie
- Jednoduchá modifikácia v prípade dodatočných požiadaviek

Počas prevádzky musí byť prítomný dostatočný objem maziva na zaplavenie kontaktnej oblasti z dôvodu dostatočnej cirkulácie, pričom tesnenie musí správne doliehať na trubicu, aby nedochádzalo k nežiadúcemu výtoku maziva. Pri natáčaní aparatúry by mohlo dochádzať k netesnostiam, a preto bude nevyhnutné použiť pre pohon zariadenia dve ložiská.

Britové tesnenia majú odporúčané prevádzkové rýchlosti, ktoré závisia na prevedení, rozmeroch a materiále britu tesnenia. Spoločnosť Trelleborg [6] uvádza pre svoje produkty podľa normy DIN 3760:1996 maximálnu pracovnú rýchlosť tesnenia 30 m/s. Pri experimentoch sa obmedzíme na nižšie rýchlosti, ktoré bude možné v prípade potreby regulovať výstupnými otáčkami motoru. Predpokladaný rozsah rýchlostí pre experimenty bude v rozmedzí (0 až 5) m/s.



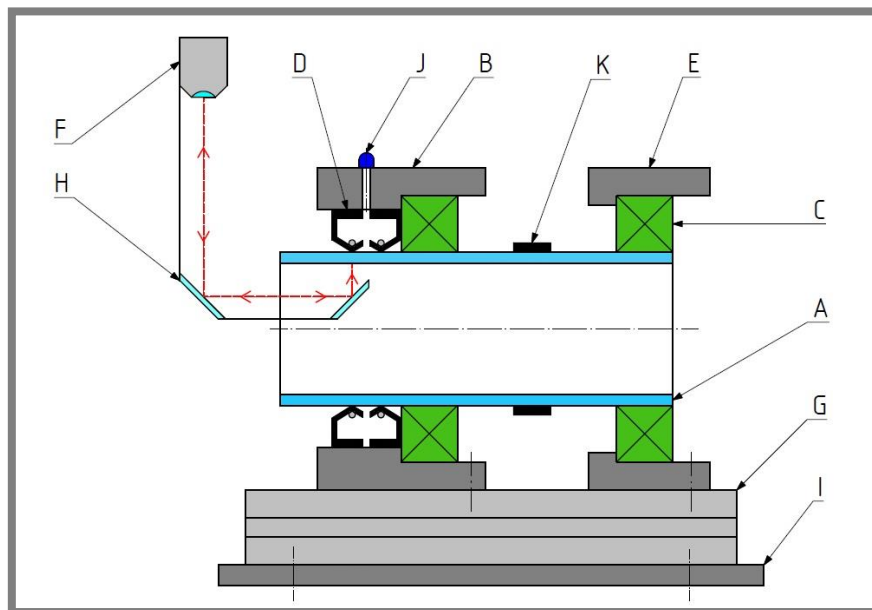
Obr. 3-1 Schéma súčasnej aparatúry

### 3.1 Spôsob náhľadu do kontaktu

Pri voľbe spôsobu náhľadu do kontaktu je nutné zohľadniť rozmery priestoru medzi objektívom a stolom súčasnej aparatury (obr. 3-1), kde bude umiestnený nosný rám s uloženiami a trubicou. Trubica teda nesmie byť príliš dlhá, aby nedochádzalo k veľkému obvodovému hádzaniu.

- Horizontálne usporiadanie

Sklenená tyč (A) je v tomto prípade umiestnená v uložení tesnení a ložiska (B) a ložiskovom telese (E), ktoré sú pripojené skrutkovými spojmi k nosnému rámu Alutec (G), ktoré zjednoduší montáž. Zariadenie bude poháňané remeňom (K), ktorý prenáša krútiaci moment od motora. Mazivo bude pridané prostredníctvom maznice (J). Takýto typ usporiadania vyžaduje dve britové tesnenia (D), aby mazivo nevytekalo stranou. Tento typ usporiadania vyžaduje dve zrkadlá (H), aby bolo možné, na základe zákona lomu, osvetliť mikroskopom (F) potrebné miesto kontaktu trubice a tesnenia. Výhodou tohto usporiadania je, že priestor medzi doskou stolu (I) a objektívom (F) je dostatočne veľký. Nevýhodou je problematický spôsob osvetlenia a náhľad na kontakt. Ďalšou nevýhodou je, že je nutné použiť dve tesnenia a maznicu, čo skomplikuje údržbu a prípadnú výmenu maziva.

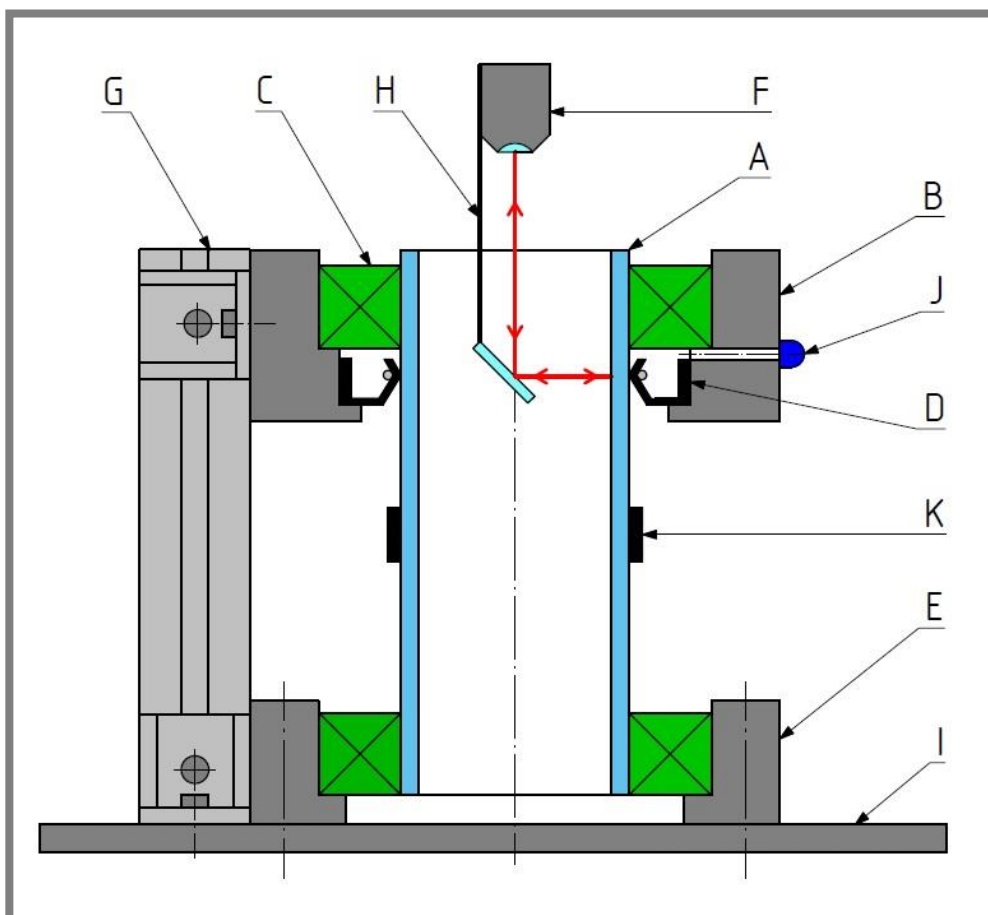


Obr. 3-2 Schéma horizontálneho usporiadania

- Vertikálne usporiadanie I.

Doska krížového stola (I) obsahuje diery, čo umožní jednoduché ukotvenie hliníkového rámu Alutec (G) a uloženie spodného ložiska (E) skrutkovými spojmi. K hliníkovému rámu je pripojené uloženie horného ložiska s britovým tesnením (B). Do uloženia ložiska (C) a britového tesnenia (D) je možné pridať mazivo prostredníctvom maznice (J). Ložiská by mali zabezpečiť stabilnú rotáciu sklenenej trubice (A), pri ktorej pomocou zrkadielka upevneného na tenkej tyči (H) pred objektívom mikroskopu (F) bude možné pozorovať správanie maziva v poddajnom kontakte britového tesnenia so sklenenou trubicou. Trubica bude poháňaná motorčekom a prenos krútiaceho momentu umožní ozubený remeň (K). Výhodou

tejto varianty je, že mazivo bude vplyvom gravitácie uchované v uložení s ložiskom, ktoré navyiac zabráni prípadnému úniku maziva. Nevýhodou však je, že priestor medzi doskou stola a objektívom je obmedzený a musíme prihliadať na maximálnu výšku trubice, ako aj na jej priemer, ktorý musí byť dostatočne veľký kvôli bezproblémovému náhľadu do kontaktu pomocou zrkadla. Ďalšími nevýhodami sú zložitejšia údržba v prípade potreby výmeny maziva a axiálne zaistenie trubice.

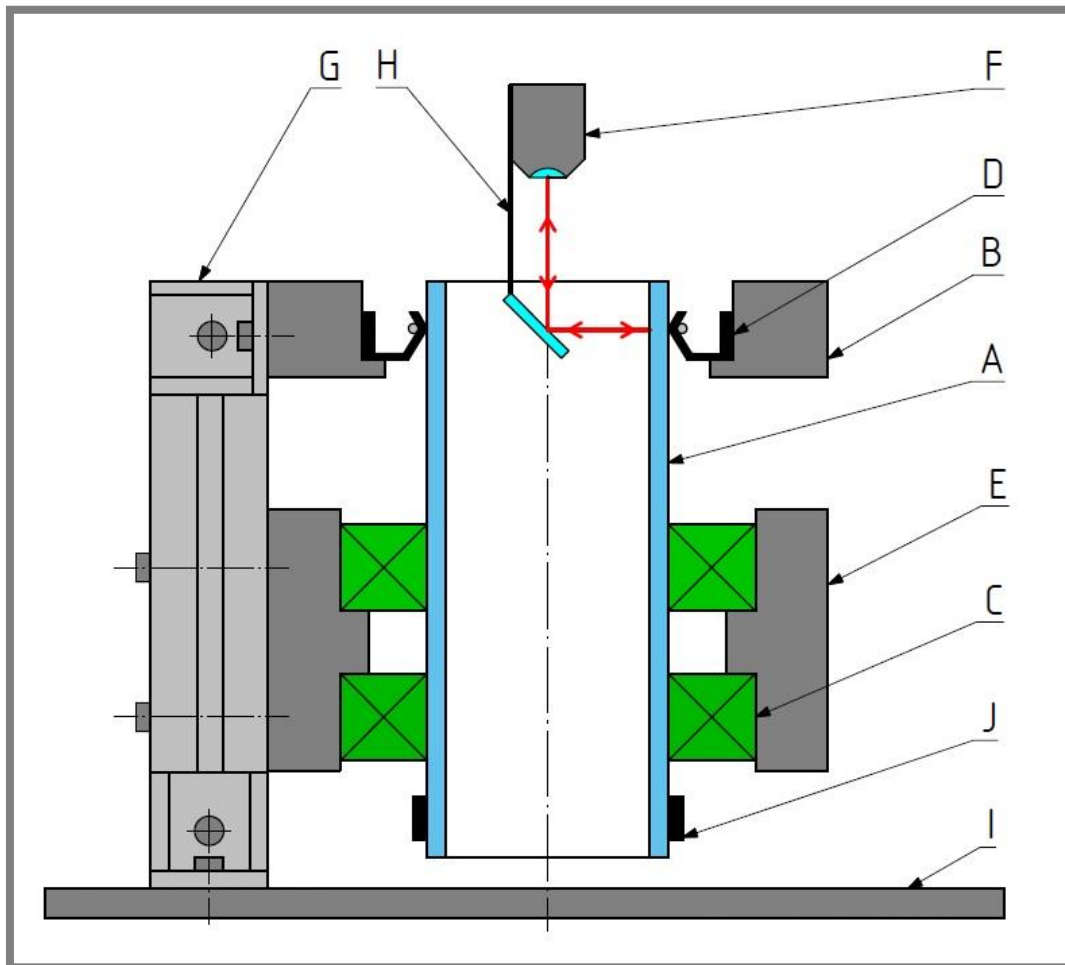


Obr. 3-3 Schéma vertikálneho usporiadania I.

- Vertikálne usporiadanie II.

Toto usporiadanie je veľmi podobné tomu predchádzajúcemu. Uloženia ložísk boli nahradené ložiskovým telesom (E), ktoré je štandardne dodávané. V tomto prípade je tesnenie (D) samostatne uložené v olejovej vani (B). Pozorovanie poddajného kontaktu britového tesnenia (D) a sklenenej trubice (A) je riešené pomocou zrkadielka (H) pripevneného na objektív mikroskopu (F). Ložiská (C) zabezpečia bezproblémovú rotáciu mechanizmu a vzhľadom k ich polohe by nemalo dochádzať k naklápaniu sústavy vplyvom poháňaného remeňa (J). Hlavnou výhodou tohto usporiadania je jeho jednoduchá údržba v prípade potreby zmeny maziva. Použitie ložiskového telesa zabezpečí hladší a presnejší chod. Ďalšou výhodou je možnosť vybaviť mechanizmus krytkou nad vaňou s britovým tesnením, ktorá zamedzí prípadný únik maziva pri vyšších rýchlostiach. Nevýhodou je,

ako aj v predošlom prípade, obmedzená výška od dosky stolu po objektív mikroskopu a axiálne zaistenie trubice.



Obr. 3-4 Schéma vertikálneho usporiadania II.

### 3.2 Výber koncepčného riešenia

Všetky varianty sú konštrukčne rovnako zložité, avšak prvý variant bude vyžadovať pre úplné zaplavenie kontaktu viac maziva. Zároveň mechanizmus zrkadiel umiestnených pred objektív je zložitejší než pri ostatných konceptoch. Zvyšné varianty, kde je sklenená trubica nahradzujúca hriadeľ uložená zvislo, umožňujú jednoduchšiu výmenu maziva. V prípade vysokých otáčok, kedy by mohlo dôjsť k rozstreku maziva, je možné vaňu doplniť vekom. Hlavný rozdiel medzi variantami s vertikálne uloženou trubicou je rozmiestnenie ložísk. Vhodnejší sa javí variant s ložiskami umiestnenými do jedného domca, ktorý je aj štandardne dodávaný. V prípade výroby je možné zaistiť súosovosť priemerov pre ložiská. Tie je možné v tomto prípade predopnúť. Na základe týchto poznatkov sa tretí variant javí ako najvhodnejšia voľba, najmä kvôli jednoduchšej manipulácii s mazivom a možnosti úpravy zariadenia v prípade potreby.

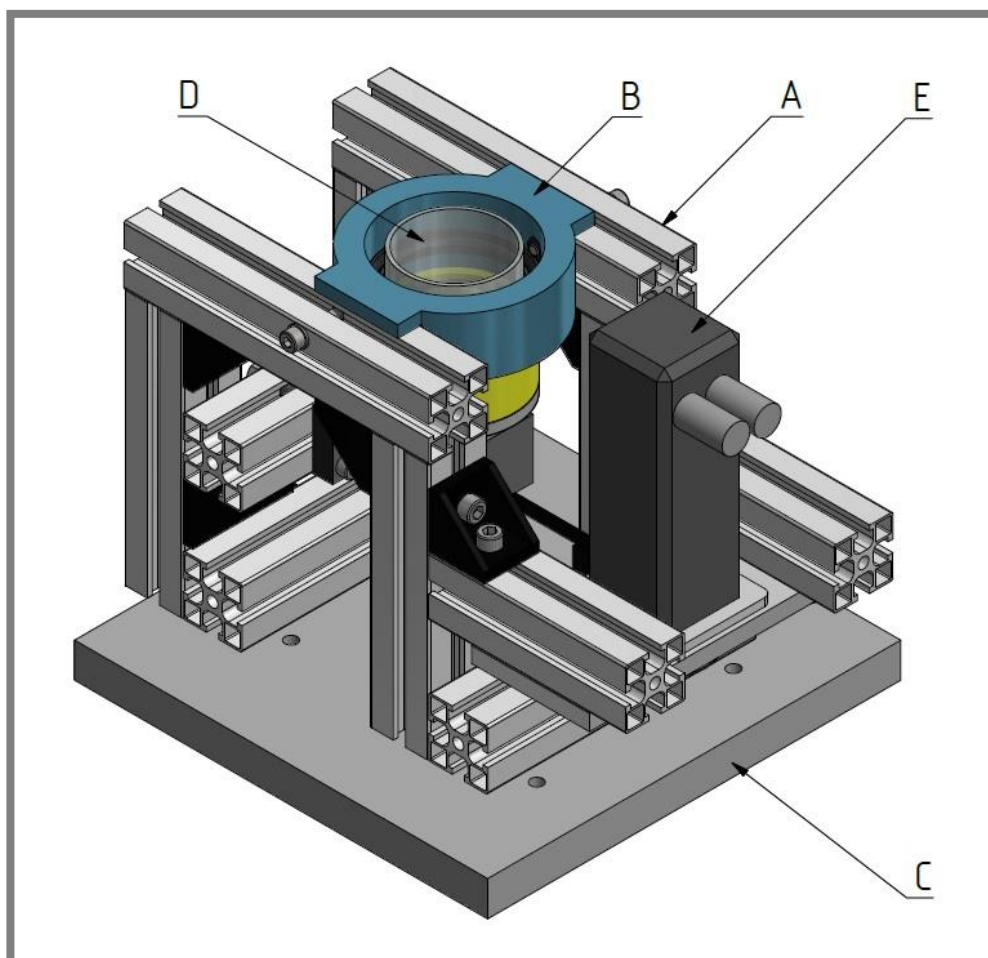
## 4 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

Po zvolení najvhodnejšieho spôsobu konštrukcie zariadenia bolo potrebné vykonať niekoľko úprav koncepčného návrhu konštrukcie pre prenos krútiaceho momentu od motoru na trubicu a z dôvodu požiadavky na jednoduchú výmenu sklenenej trubice.

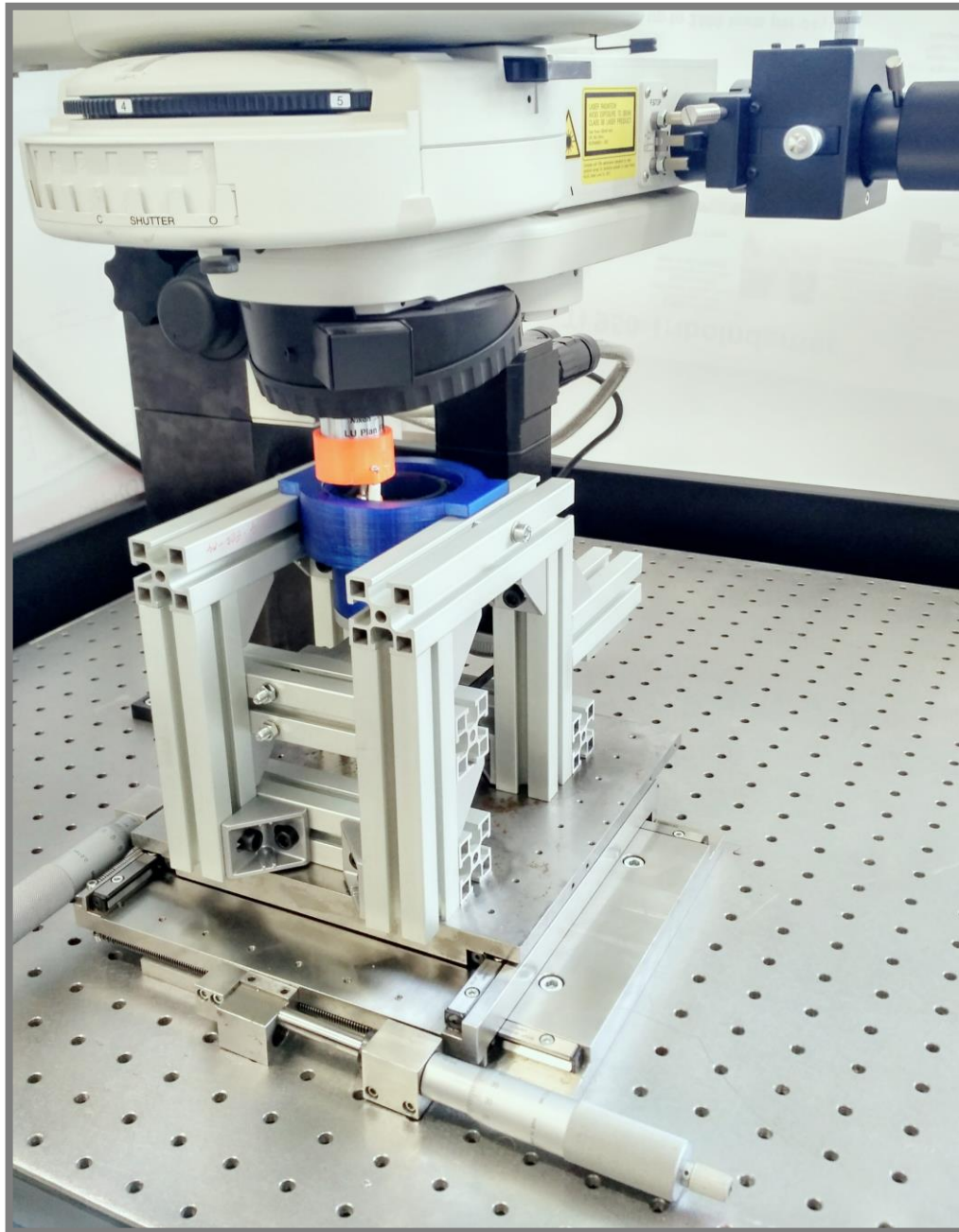
### 4.1 Popis konštrukcie

4.1

Model výsledného zariadenia, ktorý je zobrazený na obr. 4-1 sa skladá z dvoch častí. Prvú časť tvorí rám (A), ktorý musí byť dostatočne tuhý, aby počas prevádzky nedochádzalo k vibráciám alebo naklápaniu vane na mazivo (B) obsahujúcu britové tesnenie. Jednotlivé hliníkové nosníky rámu sú navzájom pospájané skrutkovými spojmi a ukotvené o dosku stola (C) vypožičanú z pôvodnej aparatúry. Druhú časť tvorí rotačné uloženie trubice na hriadeli s hnanou remenicou. Uloženie trubice (D) je upevnené ložiskovým telesom o rám. K prednej časti zariadenia je pripojený motor (E), ktorý poháňa zariadenie. Na obr. 4-2 je možné vidieť zostavené zariadenie, ktorého jednotlivé komponenty sú podrobnejšie popísané v nasledujúcich kapitolách.



Obr. 4-1 Model zariadenia

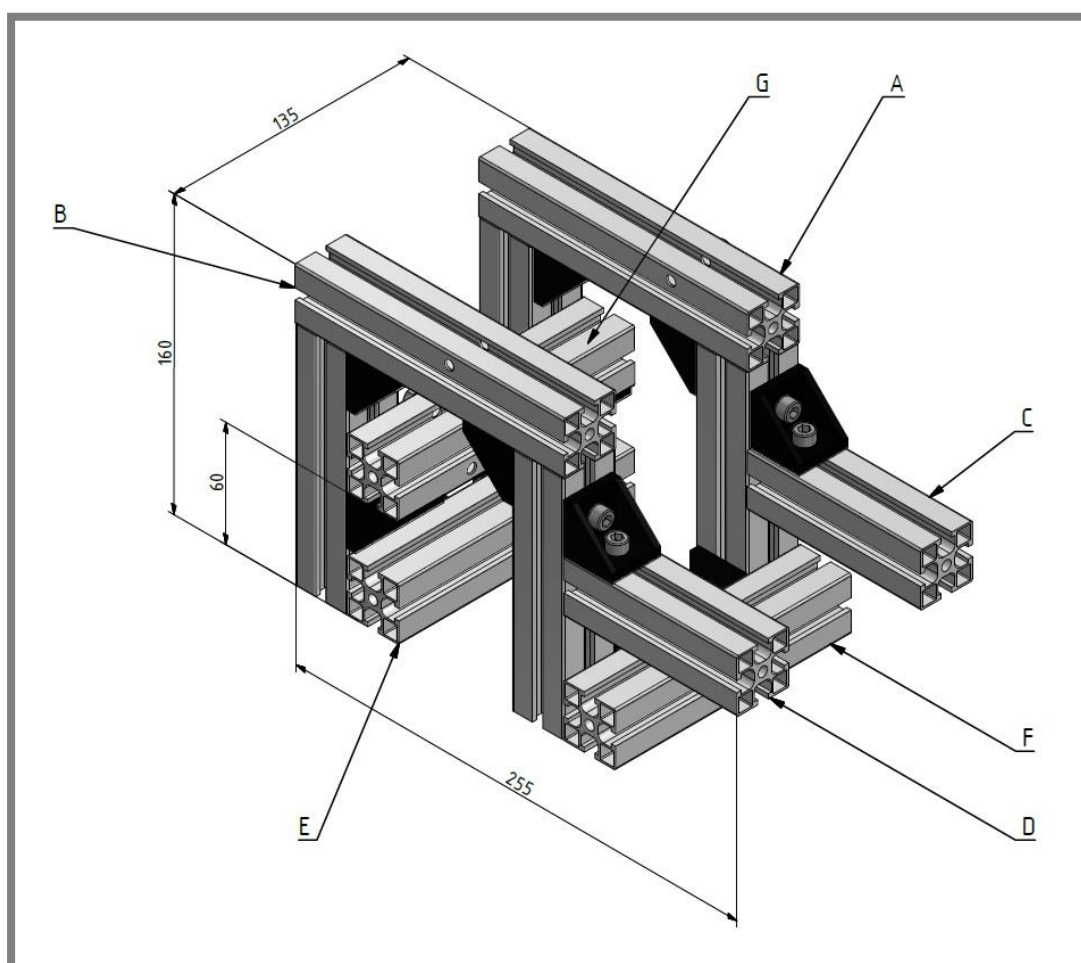


Obr. 4-2 Zostavené zariadenie

#### 4.1.1 Nosný rám

Konštrukcia rámu sa skladá z hliníkových profilov od firmy Alutec K&K [11]. Na stavbu zariadenia boli použité profily 30 x 30 mm, ktoré sú dostatočne pevné pre dané použitie. Štandardne sa používajú pre jednouúčelové stroje, montážne linky, a pod. Výhodou týchto profilov je najmä jednoduchá montáž a nízka hmotnosť. Nosníky sú pospájané fixačnými uholníkmi s rozmermi 28 x 28 mm, skrutkami M6 a štvorcovými maticami, ktoré presne zapadajú do drážky hliníkového profilu. Na schéme podľa obr. 4-3 sú tieto uholníky zobrazené čiernou farbou. Najvyššia prípustná výška, ktorá je vymedzená priestorom od dosky krížového stola

po objektív a nesmie byť presiahnutá, je 165 mm. Rám je pripevnený o dosku krížového stola profilmi (E) a (F), ktoré tvoria základňu celej konštrukcie. K základni sú pripevnené štyri zvislé nosníky nesúce profily (A) a (B). Medzi týmito profilmi je uchytená vaňa na mazivo dvomi skrutkami, ktoré neležia na jednej ose aby nedochádzalo k naklápaniu. Nosník (G) nesie ložiskové teleso pripevnené štyrmi skrutkami M5. Tento nosník je zdvihnutý o 60 mm od základnej dosky aby bola vzdialenosť ložísk od britového tesnenia čo najmenšia. Profily (C) a (D) slúžia ako základňa pre uchytenie motora. Tieto nosníky sú umiestnené taktiež 60 mm od základnej dosky, aby remenica motora a remenica uloženia boli v jednej rovine. Motor je umiestnený na doske s otvormi pripevnenej skrutkami M6 k nosníkom (Obr. 4-6). Dosku je možné posúvať v drážkach profilov, takže je možné jednoducho napnúť remeň bez ďalších úprav.

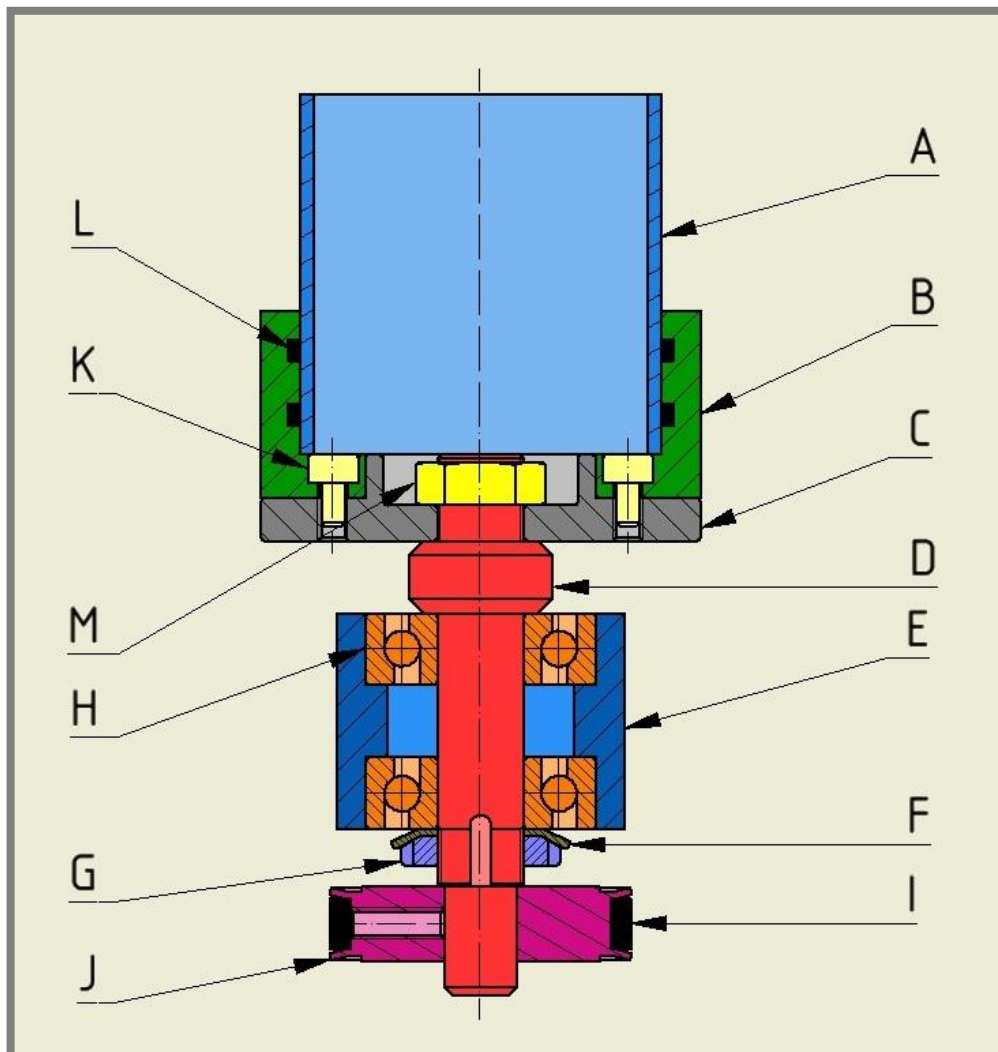


Obr. 4-3 Rám zariadenia

#### 4.1.2 Uloženie trubice

Jednou z požiadaviek na konštrukciu bola jednoduchá výmena sklenenej trubice (A). Tá je vyrobená z borosilikátového skla BK7, ktoré má dobré optické vlastnosti. Vonkajší priemer trubice má  $(50 \pm 0,5)$  mm, hrúbka steny sú  $(2 \pm 0,2)$  mm a dĺžka

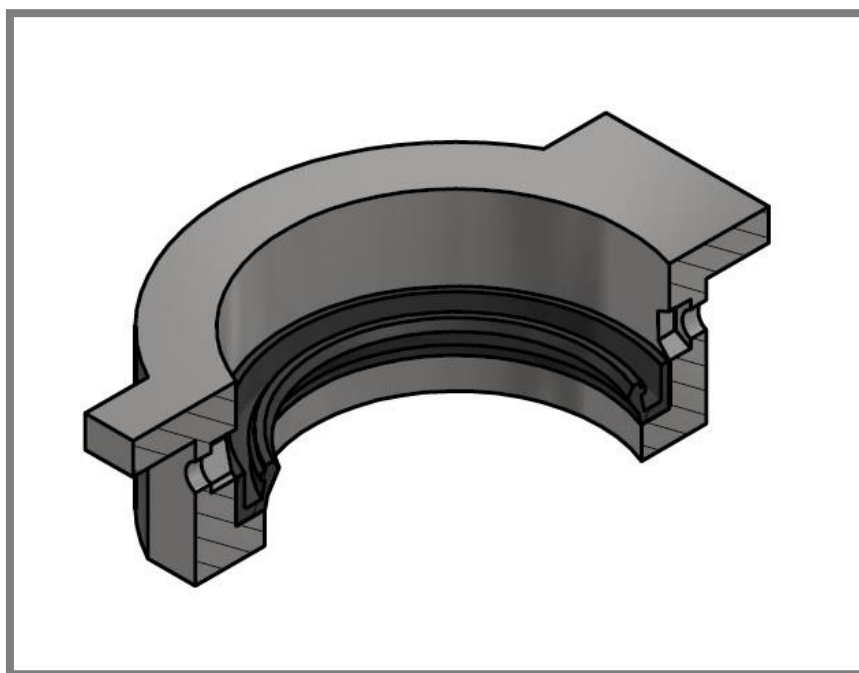
je 50 mm. Pre presnejšie výsledky je nevyhnutné, aby sa tvar trubice čo najviac približoval geometricky presnému valcu. Upevnenie je realizované plastovým držiakom (B), ktorý obsahuje dva O-krúžky (L) na zaistenie trubice, ktorý je vyrobený pomocou 3D tlače z materiálu PET. Držiak je upevnený štyrmi zápusťnými skrutkami M4 (K) o hliníkový rotačný disk (C), v ktorom sú narezané závit. Disk je osadený na hriadeľ (D) šmykovým uložením H6/h6, ktoré zabezpečí presné vedenie a stredenie súčastí a je zaistený maticou M12 (M). Uloženie hriadeľa je realizované ložiskovým telesom (E), ktoré je upevnené štyrmi skrutkami M5 priamo k nosnému rámu. Do ložiskového telesa sú nalisované ložiská s kosoúhlým stykom 7201 (H) usporiadané do O. Toto usporiadanie sa vyznačuje prenosom axiálnych síl a vysokou tuhosťou voči naklápaniu. Hriadeľ je axiálne zaistený KM maticou (G) s MB podložkou (F), ktorá po dotiahnutí vyvolá predpätie ložísk, čo bude mať za následok hladší chod mechanizmu. Pohon hriadeľa je realizovaný remenicou (J), ktorá je zaistená nastavovacou skrutkou M4. Prostredníctvom ozubeného remeňa (I) je na hriadeľ prenášaný krútiaci moment od motoru, ktorý je upevnený na rám zariadenia.



Obr. 4-4 Uloženie trubice

### 4.1.3 Vaňa na mazivo

Aby bolo možné pozorovať správanie v poddajnom kontakte trubice a britového tesnenia, je potrebné aby bolo prítomné mazivo. Zásobník musí byť dostatočne veľký, aby olej zaplaval celý objem tesnenia. Na obr. 4-5 je zobrazený model vane, do ktorej je vložené britové tesnenie G 50-65-8 NBR. Samotná konštrukcia je pomerne jednoduchá, vaňa má dve rovné plochy s osadením, aby presne dosadla na nosníky, o ktoré je zaistená dvomi skrutkami M5. Matice sú utopené vo vani, aby neprekážali tesneniu. Nádoba je vyrobená pomocou 3D tlače z PET filamentu. Tento materiál je menej náchylný k tepelnej rozťažnosti počas výroby, ako napríklad filament ABS, tým pádom je možné dosiahnuť presnejší výrobok. Spomínaný materiál má navyše pomerne dobrú odolnosť voči olejom, čo by malo zabezpečiť dlhšiu životnosť súčasti. Pri výmene oleja a následnom čistení je však potrebné zvážiť, aký roztok sa použije, pretože PET materiál má podmienenú odolnosť voči acetónu, a teda pri častom a intenzívnom kontakte by mohlo dôjsť k poškodeniu vane. V tom prípade je možné vaňu vyrobiť z iného, odolnejšieho materiálu, ako napr. z ocele.

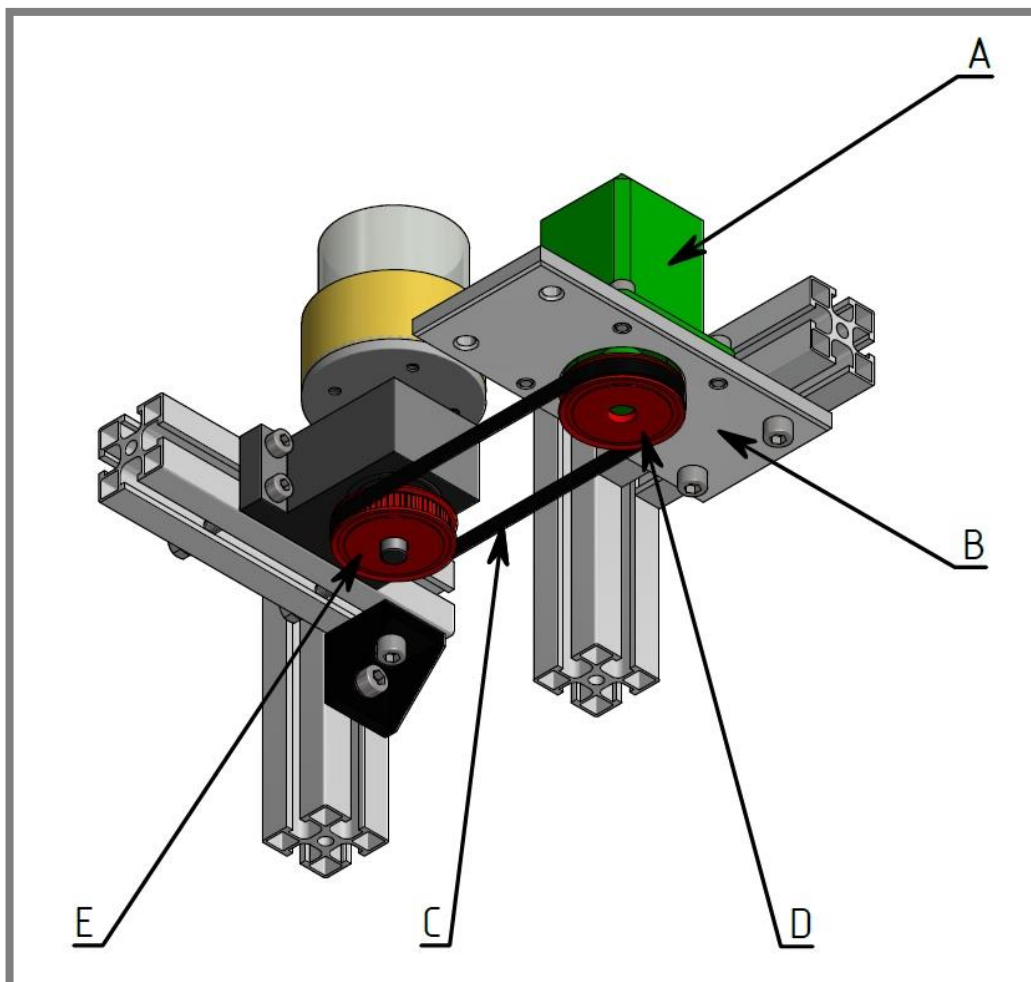


Obr. 4-5 Model vane na mazivo

### 4.1.4 Pohon

Jednou z ďalších častí, ktoré tvoria mechanizmus je servomotor poháňajúci trubicu. Jeho maximálne výstupné otáčky sú  $3000 \text{ min}^{-1}$ , čo je v tomto prípade dostatočne veľký rozsah pre stanovené optimálne otáčky pre experiment, teda (0 až  $1900$ )  $\text{min}^{-1}$ . Hodnoty otáčok a krútiaceho momentu je možné riadiť prostredníctvom softvéru. Motor (A) je osadený v hliníkovej doske (B) a zaistený štyrmi skrutkami M5. V plechu sú štyri otvory na skrutky, ktorými je pripojený k rámu zariadenia. Na prenos krútiaceho momentu je použitý remeňový prevod s ozubeným uzatvoreným (C) remeňom 2GT širokým 6 mm a dlhým 332 mm.

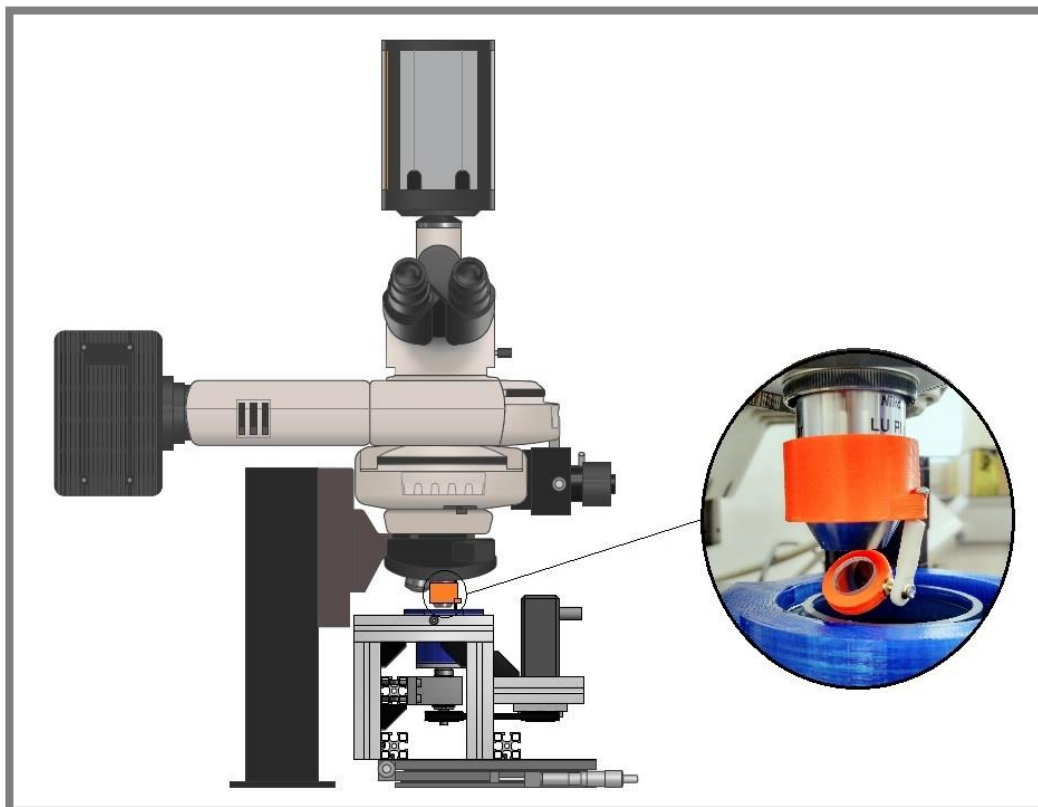
Remenica poháňaná motorom (D) má rovnako ako remenica poháňajúca hriadeľ uloženia (E) 60 zubov a prevodový pomer je teda 1. Obe remenice sú zaistené nastavovacími skrutkami M4. Remeň je možné jednoducho predopnúť posunutím dosky s motorom po nosníkoch. Doska je pripevnená štyrmi skrutkami M6 a štvorhrannou maticou k nosníku.



Obr. 4-6 Pohon trubice

## 4.2 Zostavenie zariadenia

Pre možnosť pozorovania kontaktu je potrebné presmerovať zdroj svetla z objektívu do kontaktu britového tesnenia. Na základe zákona odrazu je lúč odrazený od zrkadielka do miesta kontaktu, ktoré je umiestnené v plastovom držiaku. Namontovaný držiak je zobrazený na obr. 4-7. Zrkadielko je uložené v plastovej obrube, vyrobenej pomocou 3D tlače. Tá je upevnená plastovou spojku, ktorá obsahuje kĺb umožňujúci natáčanie zrkadielka podľa potreby. Spojka je prichytená skrutkou M2 k objímke pod uhlom  $25^\circ$ , aby bola zaistená poloha zrkadielka priamo pod objektívom. Objímka je vyrobená taktiež pomocou 3D tlače a je zaistená nastavovacou skrutkou M2 pre zachovanie polohy na objektíve. Zariadenie bolo po zostavení namontované spolu s držiakom zrkadla na aparáturu fluorescenčného mikroskopu (obr. 4-7).



Obr. 4-7 Schéma výsledného zariadenia s detailom na držiak zrkadla

## 5 DISKUSIA

Výsledkom tejto bakalárskej práce je funkčné zariadenie, ktoré umožní nahliadnuť do kontaktnej oblasti britu tesnenia a pomôže objasniť správanie maziva v poddajnom kontakte. Zariadenie bolo navrhnuté, zostrojené a otestované, aby sa overila jeho funkčnosť a odhalili sa prípadné nedostatky.

Najskôr bolo potrebné navrhnuť teleso z opticky priepustného materiálu, ktoré nahradilo hriadeľ, aby umožnilo fluorescenčným mikroskopom priamo pozorovať kontakt britového tesnenia s telesom. Ako priehľadné teleso bola použitá sklenená trubica z borosilikátového skla. Tento materiál má dobré optické vlastnosti a je používaný na výrobu laboratórneho skla, čo zaručuje výbornú chemickú odolnosť. Vzhľadom na rozmerovú odchýlku trubice bolo nutné zamedziť prešmykovanie v držiaku. Z toho dôvodu boli do držiaku pridané drážky na O-krúžky. Dôležitá je aj geometrická presnosť trubice. Pri veľkých odchýlkach by mohlo dochádzať k hádzaniu a skresľovaniu výsledkov.

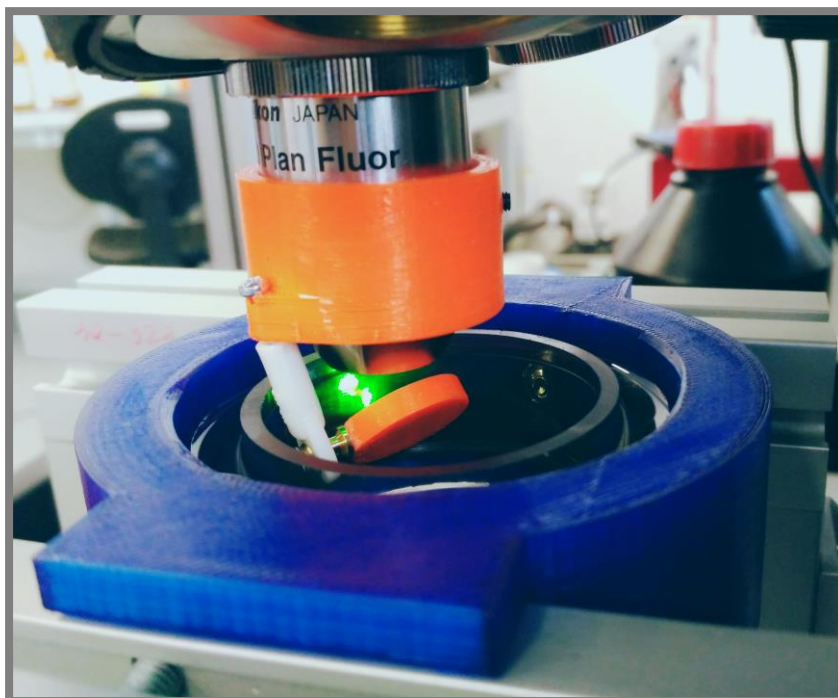
Ďalej bolo potrebné navrhnuť dostatočne pevný rám, aby sa predišlo vibráciám a prípadnému poškodeniu zariadenia. Jedným z limitujúcich faktorov bola maximálna možná výška rámu, ktorá je vymedzená od krížového stolu po objektív mikroskopu. Rám musel byť upravený tak, aby bola trubica čo najkratšia kvôli prípadnému hádzaniu. Ďalšie opatrenie pre zamedzenie hádzania bolo relatívne presné napojenie rotačného disku na osadenie hriadele za účelom stredenia súčastí, ktoré tvoria šmykové uloženie s malou vôľou. Tuhosť celého uloženia eliminuje prípadné vibrácie, čoho cieľom bolo vyvolanie predpätia v ložiskách pritiahnutím hriadele poistnou maticou. Ložiskové teleso nesúce celú rotačnú časť mechanizmu s trubicou je pripojené k rámu a poháňané servo motorom, ktorý je upevnený rovnako k nosnému rámu pomocou dosky. Vďaka tomu je možné napínať remeň posúvaním dosky s motorom po drážkach profilov rámu. Vzhľadom k tomu, že otáčky a krútiaci moment motoru je možné riadiť softvérom priamo z PC, nebol potrebný žiaden prevodový mechanizmus. Pri rozbehu je potrebné zvyšovať otáčky plynule, aby nedochádzalo k nárazovému preťažovaniu mechanizmu, čo by mohlo viesť k poškodeniu súčastí.

Pre pozorovanie kontaktnej oblasti bolo potrebné umožniť presmerovanie zdroja svetla vo forme svetelného lúča vyžarovaného z objektívu mikroskopu do kontaktu britového tesnenia. Prenos lúča je realizovaný pomocou zrkadielka uloženého v držiaku na úrovni britu tesnenia tak, ako je schematicky zobrazené na obr. 3-4.

Vzhľadom k tomu, že sklenená trubica má pomerne hladký povrch, teplota bude rýchlo rásť vplyvom vysokého trenia. Z toho dôvodu bol použitý na overovací experiment minerálny olej R834/80, ktorého viskozita sa s rastúcou teplotou zmení menej než vysoko viskózne oleje, čo môže poskytnúť stabilnejšie výsledky. Jedná sa o základový olej bez aditív s viskozitou 0,24 Pa.s pri 20°C, ktorý má schopnosť prirodzenej fluorescence.

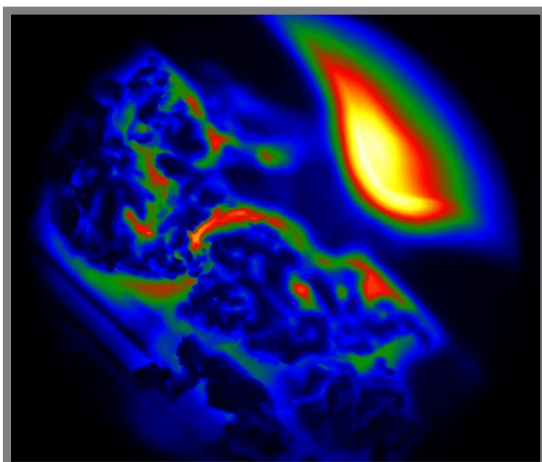
Počas overovania funkčnosti bolo zistené, že z dôvodu krátkej pracovnej vzdialenosti objektívu 10x (17 mm) nie je možné získať zrkadlom dostatočne hlboko, pretože dochádzalo k stretu objímky a sklenenej trubice (obr. 5-1). Tento problém bol vyriešený úpravou vane na mazivo. Celková hĺbka vane bola zmenšená a britové tesnenie bolo umiestnené čo najvyššie k okraji sklenenej trubice, maximálne však do takej výšky, aby zostala kontaktná oblasť kompletne zaplavená mazivom.

Táto úprava môže mať negatívny dopad na veľkosť hádzania. Pri použití objektívu 5x nepredstavovala poloha kontaktu problém.

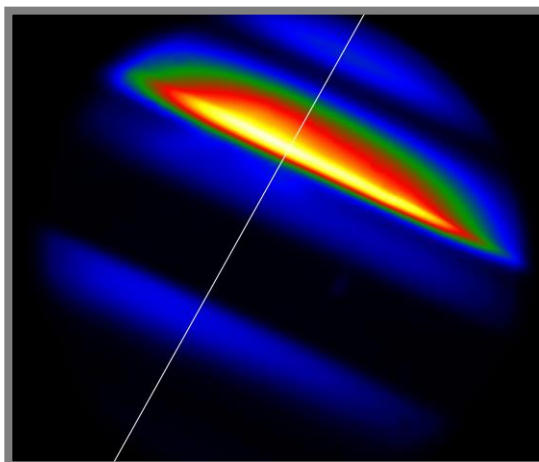


Obr. 5-1 Maximálna hĺbka zrkadla umožňujúca zaostrenie

Po úpravách bolo zariadenie uvedené do prevádzky a po zaostrení bolo možné pozorovať kontaktnú oblasť britového tesnenia. Počas experimentu boli použité filtre DAPI a záznam pozorovania bol realizovaný pri 5-násobnom zväčšení. Rýchlosť bola postupne zvyšovaná v rozmedzí až do  $7 \text{ m.s}^{-1}$  (so súčasnou aparátúrou je možné ísť až na  $7,8 \text{ m.s}^{-1}$ ), kedy došlo k zadreniu britového tesnenia vplyvom vysokého trenia (obr. 5-2). Prudký nárast trenia bol zrejme spôsobený nedostatkom oleja, ktorý bol pri overovacom experimente vplyvom vysokých otáčok rozstreknutý a kontakt začal hladovať.

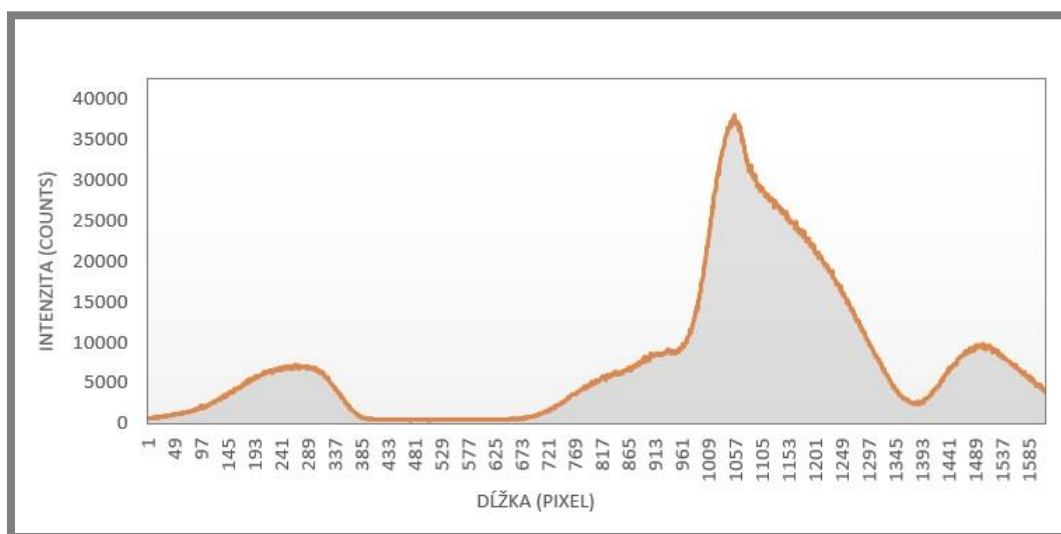


Obr. 5-2 Zadrenie tesnenia



Obr. 5-3 Kontaktná oblasť tesnenia

Tvar kontaktu je viditeľný na obr. 5-2 pri rýchlosti sklenenej trubice  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$  za podmienok úplného preklzu. Profil rozloženia intenzity vedený naprieč kontaktom, kolmo na smer pohybu je zobrazený na obr. 5-3. Miesta s nízkou intenzitou predstavujú miesta dotyku tesniaceho krúžku a sklenenej trubice. Vzhľadom k veľmi nízkej intenzite na dĺžke (385 až 683) pixelov je možné usúdiť, že táto oblasť má veľmi nízku hrúbku mazacieho filmu. Tá môže byť spôsobená veľmi nízkou drsnosťou povrchu sklenenej trubice, kde sa bez nerovností na povrchu nemôže uplatňovať fenomén mikro-EHL, ktorý je často diskutovaný v súvislosti s britovým tesnením. Použitý olej vykazoval počas celého experimentu výraznú fluorescenciu. Zaznamenané hodnoty intenzity v závislosti na polohe pre uvedenú priamku sú vykreslené v grafe na obr. 5-4.



Obr. 5-4 Profil kontaktu

## 6 ZÁVER

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo navrhnúť a zostrojiť zariadenie, ktoré umožní skúmať a lepšie porozumieť správaniu maziva v poddajnom kontakte britového tesnenia s využitím fluorescenčnej mikroskopie. Pozorovanie kontaktu tesnenia s hriadeľom vyrobených z bežne používaných materiálov fluorescenčným mikroskopom však nie je možné, a preto bolo nutné navrhnúť jednu z týchto súčastí priehľadnú, ktorá by umožnila nahliadnúť priamo do kontaktu.

V teoretickej časti práce boli popísané a rozobrané dôležité aspekty, ktoré by mohli mať vplyv na hrúbku filmu maziva v poddajnom kontakte a tesniacu funkciu britových tesnení. Z poznatkov vyplýva, že je možné nájsť optimálny pomer drsnosti britu tesnenia a drsnosti povrchu hriadele pre dosiahnutie maximálnej životnosti týchto súčastí. Nebezpečný stav nastáva pri rozbehu, kedy je nutné prekonať trecí odpor priliehajúceho tesnenia, až kým nedosiahne tzv. odchlopovacia rýchlosť, kedy sa medzi britom tesnenia a hriadeľom vytvorí súvislá tenká vrstva maziva. Pri dosiahnutí tejto rýchlosti nedochádza k výtoku maziva vďaka spätnému prečerpávaniu spôsobenému deformáciou britu v smere otáčania. Významný je taktiež poznatok, že so zvyšujúcou sa obvodovou rýchlosťou rastie aj hrúbka filmu maziva.

Na pozorovanie kontaktu bola zvolená fluorescenčná mikroskopia, ktorá nevyžaduje vysokú odrazivosť povrchov ako napr. optická interferometria. Najväčšou výhodou tejto metódy je prirodzená fluorescencia pri použití určitých druhov olejov. Ak by bola známa vyžarovaná intenzita použitého maziva, bolo by možné na základe uvedených poznatkov eliminovať prípadný šum vo výsledkoch.

V nasledujúcej kapitole boli navrhnuté možné varianty konštrukcie zariadenia podľa požiadaviek. Priehľadná časť mechanizmu bola zvolená sklenená trubica, ktorá nahradila hriadeľ. Vďaka tomuto bolo možné nahliadnúť mikroskopom do kontaktu tesnenia a trubice.

V ďalšej kapitole je podrobne popísaný najvhodnejší návrh konštrukcie, ktorý bol zrealizovaný a zostavený. Na konštrukciu boli primárne použité súčasti, ktoré by bolo možné použiť pre stavbu iného zariadenia, prípadne komponenty nachádzajúce sa priamo na ústave. Po zostavení a namontovaní zariadenia namiesto pôvodnej aparatúry nasledovalo testovanie.

V priebehu riešenia bakalárskej práce boli splnené všetky hlavné i čiastkové ciele. Zariadenie bolo po menších nevyhnutných úpravách odskúšané a ohodnotené ako plne funkčné pre pozorovanie, takže ďalšie úpravy nie sú potrebné.

**7 ZOZNAM POUŽITEJ LITERATURY**

- [1] FEHRENBACHER, Cornelius, Lothar Hoerl, Frank Bauer a Werner Haas. Description of the Pumping Rate of Shaft Counterfaces in the Sealing System Radial Lip Seal Using the 3D Parameters of ISO 25718. *Tribology Online*. 2016, 11(2), s. 69-74. DOI: 10.2474/trol.11.69
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-617-6.
- [3] TRELLEBORG s.r.o. Trelleborg sealing solutions, s.r.o.: *Těsnění rotačních pohybů* [online] 2007. Dostupné z: [https://tss-static.com/remotemedia/media/globalformastercontent/downloadsautomaticallycreatedbyscript/catalogs/rotary\\_cz.pdf](https://tss-static.com/remotemedia/media/globalformastercontent/downloadsautomaticallycreatedbyscript/catalogs/rotary_cz.pdf)
- [4] SHEN, Dawei a Richard F. SALANT. Elastohydrodynamic Analysis of the Effect of Shaft Surface Finish on Rotary Lip Seal Behavior. *Tribology Transactions* [online]. 2003, 46(3), s. 391-396 [cit. 2017-05-16]. DOI: 10.1080/10402000308982642. ISSN 1040-2004. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10402000308982642>
- [5] EL GADARI, M., A. FATU a M. HAJJAM. Shaft roughness effect on elastohydrodynamic lubrication of rotary lip seals: Experimentation and numerical simulation. *Tribology International* [online]. 2015, 88, 218-227 [cit. 2016-10-26]. DOI: 10.1016/j.triboint.2015.03.013. ISSN 0301-679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X15001036>
- [6] MYANT, C., T. REDDYHOFF a H.A. SPIKES. Laser-induced fluorescence for film thickness mapping in pure sliding lubricated, compliant, contacts. *Tribology International* [online]. 2010, 43(11), 1960-1969 [cit. 2016-10-26]. DOI: 10.1016/j.triboint.2010.03.013. ISSN 0301-679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X10000770>
- [7] ROST, F.W.D. *Fluorescence microscopy*. Cambridge: Cambridge University Press, 1992. ISBN 0-521-42277-9.
- [8] FOWELL, M.T., C. MYANT, H.A. SPIKES a A. KADIRIC. A study of lubricant film thickness in compliant contacts of elastomeric seal materials using a laser induced fluorescence technique. *Tribology International* [online]. 2014, 80, 76-89 [cit. 2017-05-16]. DOI: 10.1016/j.triboint.2014.05.028. ISSN 0301679x. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301679X14002163>
- [9] HIDROVO, H. Carlos a Douglas P. Hart. Emission reabsorption laser induced fluorescence (ERLIF) film thickness measurement. *Measurement Science and Technology*. 2001, 12, s. 467-477. Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/12/4/310>

- [10] MU, Taotao, S. Chen, Y. Zhang, P. Guo , H. Chen a F. Meng. Motor Oil Classification Based on Time-Resolved Fluorescence. *PLoS ONE*. 2014, 9(7). Dostupné z: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0100555>
- [11] ALUTEC K&K a.s. *ALUTEC: Hliníkový konstrukční systém* [online]. 2015 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://aluteckk.cz/>

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

### Zoznam skratiek:

Skratka	Význam
3D	Trojrozmerný
ABS	Akrylonitrilbutadiénstyrén
EHL	Elastohydrodynamic lubrication
ERLIF	Emission reabsorbtion laser induced fluorescence
I-EHL	Isoviscous-elastohydrodynamic lubrication
LIF	Laser induced fluorescence
NBR	Nitril – Butadién kaučuk
PET	Polyetyléntereftalát
TRF	Time-resolved Fluorescence
UV	Ultrafialový

### Zoznam symbolov:

Symbol	Popis
$\mu$	Poissonova konstanta
E [MPa]	modul pružnosti v ťahu
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	priemerná aritmetická odchylka profilu drsnosti
$R_{mr}$ [ $\mu\text{m}$ ]	materiálový podiel drsnosti povrchu
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	najväčšia výška nerovnosti profilu
$R_{zmax}$ [ $\mu\text{m}$ ]	maximálna hĺbka drsnosti

**9 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV****9**

<b>Obr. 1-1</b> Schéma britového tesnenia [1]	13
<b>Obr. 1-2</b> Tvary profilu povrchov [3]	14
<b>Obr. 1-3</b> 3D elementy povrchu [1]	15
<b>Obr. 1-4</b> Závislosť drsnosti povrchu na priemernej hrúbke filmu maziva [4]	16
<b>Obr. 1-5</b> Princíp fluorescenčného mikroskopu [7]	17
<b>Obr. 1-6</b> Závislosť strednej hrúbky filmu na obvodovej rýchlosti [8]	18
<b>Obr. 1-7</b> Závislosť intenzity a vlnovej dĺžky motorových olejov [10]	19
<b>Obr. 3-1</b> Schéma súčasnej aparatúry	21
<b>Obr. 3-2</b> Schéma horizontálneho uloženia	22
<b>Obr. 3-3</b> Schéma vertikálneho uloženia I.	23
<b>Obr. 3-4</b> Schéma vertikálneho uloženia II.	24
<b>Obr. 4-1</b> Model zariadenia	25
<b>Obr. 4-2</b> Zostavené zariadenie	26
<b>Obr. 4-3</b> Rám zariadenia	27
<b>Obr. 4-4</b> Uloženie trubice	28
<b>Obr. 4-5</b> Model vane na mazivo	29
<b>Obr. 4-6</b> Pohon trubice	30
<b>Obr. 4-7</b> Schéma výsledného zariadenia s detailom na držiak zrkadla	31
<b>Obr. 5-1</b> Maximálna hĺbka zrkadla umožňujúca zaostrenie	33
<b>Obr. 5-2</b> Zadrenie tesnenia	33
<b>Obr. 5-3</b> Kontaktná oblasť tesnenia	33
<b>Obr. 5-4</b> Profil kontaktu	34

## 11 ZOZNAM PRÍLOH

---

Samostatné prílohy:

**Príloha 1** 3D model zariadenia

**Príloha 2** 3D model držiaku

**Príloha 3** Výkresová dokumentácia:

1 Výkres zostavy	EZG-Z/00
2 Rotačné uloženie	EZG-Z/01
3 Ložiskové teleso	EZG-Z/02
4 Vaňa s tesnením	EZG-Z/03
5 Ložiskový domec	EZG-K/01
6 Príruba	EZG-K/02
7 Nosník 1	EZG-K/03
8 Nosník 2	EZG-K/04
9 Nosník telesa	EZG-K/05
10 Hriadel'	EZG-K/06
11 Vaňa	EZG-K/07
12 Podstava	EZG-K/08
13 Držiak trubice	EZG-K/09
14 Základová doska	EZG-K/10
15 Trubica	EZG-K/11