



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

SIMULÁTOR KLUZNÉHO LOŽISKA

SLIDING BEARING APPARATUS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

KAROL SABO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. MARTIN HARTL, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Karol Sabo

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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:

Simulátor kluzného ložiska

v anglickém jazyce:

Sliding Bearing Apparatus

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh experimentálního zařízení sloužícího k stanovení geometrie mazacího filmu v kluzném hydrodynamicky mazaném axiálním ložisku s těmito parametry: kompaktní konstrukce užívající optickou měřicí metodu.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci):

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Formulaci řešeného problému a jeho technickou a vývojovou analýzu
4. Vymezení cílů práce
5. Návrh metodického přístupu k řešení
6. Návrh variant řešení a výběr optimální varianty
7. Konstrukční řešení
8. Závěr (Konstrukční, technologický a ekonomický rozbor řešení)

Forma práce: Průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ BP: konstrukční

Účel zadání: vzdělávací činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

GUO, F., WONG, P.L., FU, Z., MA, C. Interferometry measurement of lubricating films in slider-on-disc contacts. Tribology Letters. 2010, vol. 39, s. 71-79.

Vedoucí bakalářské práce: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalárska práca sa zaoberá návrhom experimentálneho zariadenia na zistenie geometrie filmu v hydrodynamicky mazanom axiálnom ložisku pomocou optickej interferometrie. Súčasťou práce je rešeršná časť o experimentálnych zariadeniach využívajúcich optickú interferometriu, konštrukčný návrh a výkresovú dokumentáciu navrhnutého zariadenia.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Minimálna hrúbka mazacieho filmu, optická interferometria, axiálne segmentové ložisko, hydrodynamické mazanie.

ABSTRACT

The bachelor's thesis concerns with a design of experimental apparatus for a film geometry detection in hydrodynamic lubrication thrust bearing using optical interferometry. The thesis includes the current state of knowledge about experimental apparatus using optical interferometry, engineering design and drawings of design apparatus.

KEY WORDS

Minimal oil-film thickness, optical interferometry, thrust pad bearing, hydrodynamic lubrication

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SABO, K. *Simulátor kluzného ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 47 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že bakalársku prácu *Simulátor klzného ložiska* som vypracoval samostatne pod vedením prof. Ing. Martina Hartla, Ph.D. a uviedol som v zozname všetky použité literárne zdroje.

V Brne 24. mája 2012

Vlastnoručný podpis autora

POĎAKOVANIE

Týmto by som chcel poďakovať prof. Ing. Martinovi Hartlovi, Ph.D. a Ing Milanovi Omastovi za užitočné a cenné rady, za trpezlivosť a za odbornú pomoc pri vypracovávaní bakalárskej práce.

Moja vďaka patrí tiež môjmu spolubývajúcemu Matejovi Kolárikovi za ochotnú a vrelú pomoc a tiež mojej priateľke a rodine za trpezlivosť.

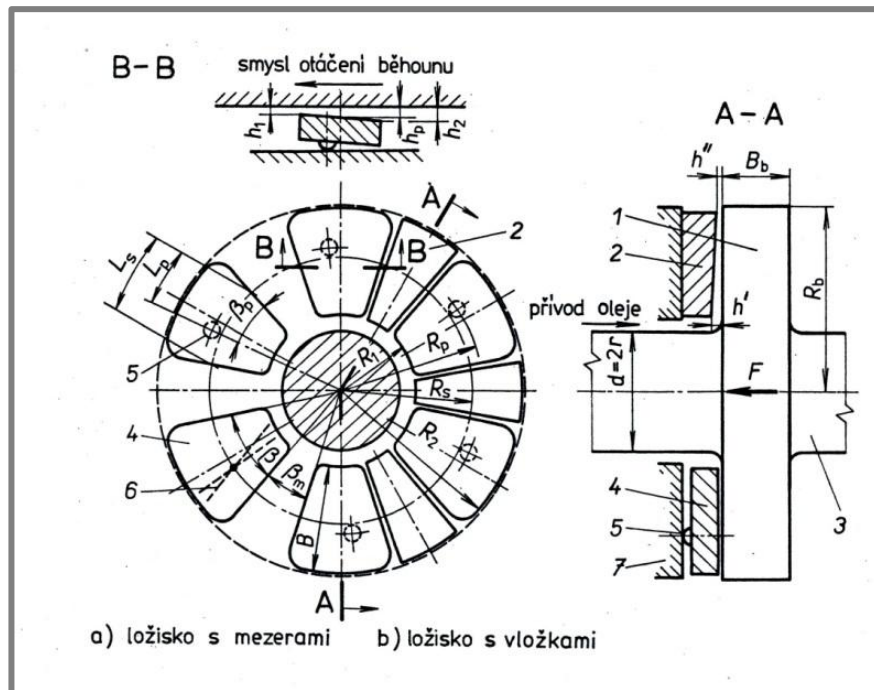
OBSAH

OBSAH	11
1 ÚVOD	12
2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	15
3 FORMULÁCIA RIEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA	21
3.1 Geometria klinovej medzery	21
3.2 Analytické riešenie tlaku a prietoku v kontakte	22
3.3 Súčasné zariadenie na výskum EHD mazania	25
4 VYMEDZENIE CIEĽOV PRÁCE	27
5 NÁVRH METODICKÉHO PRÍSTUPU K RIEŠENIU	28
5.1 Mechanická časť	29
5.2 Optická sústava	30
5.3 Časový harmonogram	30
6 NÁVRH VARIANT RIEŠENÍ A VÝBER OPTIMÁLNEJ VARIANTY	31
6.1 Varianta riešenia vertikálneho polohovača	32
6.2 Varianty riešenia na uhlové polohovanie	32
6.2.1 Varianta č.1	32
6.2.2 Varianta č.2	33
6.2.3 Varianta č.3	33
6.3 Výber optimálne varianty uhlového polohovača	35
7 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE	36
7.1 Umiestnenie	36
7.2 Uhlový polohovač	37
7.2.1 Platňa a lôžko guľôčky	37
7.2.2 Posuvná sústava	38
7.2.3 Naklápacia sústava	39
7.3 Vertikálny polohovač	40
7.4 Plávajúci segment	41
8 ZÁVER	42
9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	43
10 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN	45
11 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOU	46
11.1 Zoznam obrázkov	46
11.2 Zoznam grafou	46
11.3 Zoznam tabuliek	46
12 ZOZNAM PRÍLOH	47

1 ÚVOD

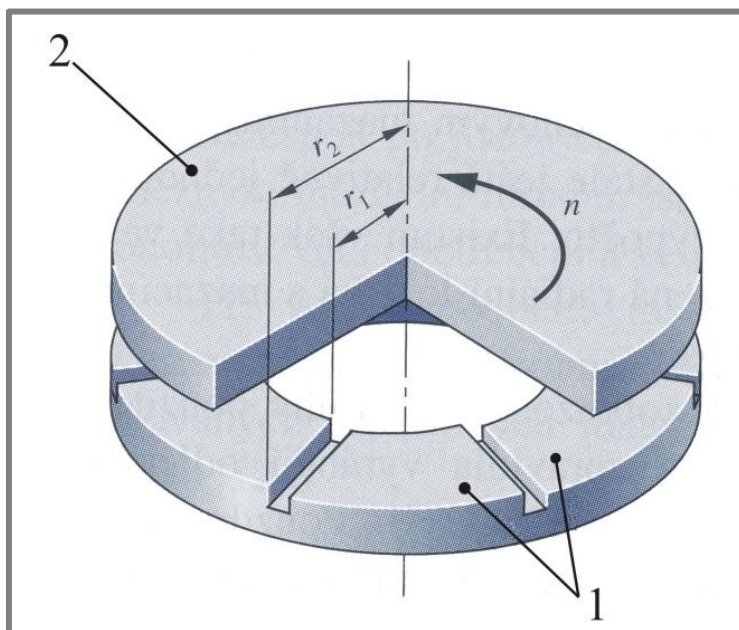
Hydrodynamické mazanie môžeme nájsť v mnohých technických aplikáciách a patrí medzi jedny z najviac využívaných druhov mazania na zníženie trenia a opotrebenia v klzných ložiskách. V režime hydrodynamického mazania sú klzné plochy oddelené relatívne hrubou vrstvou mazacieho filmu, ktorá vzniká účinkom relatívneho pohybu klzných plôch. Priľnavosť maziva na klzné plochy spôsobuje jeho prúdenie do klinovej medzery. Mazacia vrstva zaisťuje úplné oddelenie klzných plôch a je závislá na viskozite maziva, relatívnej rýchlosti klzných plôch a na zaťažení.

Hydrodynamické klzné ložisko je základná strojná súčiastka, ktorá sa využíva na vymedzenie vzájomnej polohy relatívne sa pohybujúcich častí a prenáša zaťaženie hriadeľa do rámu stroja. Klzné ložiská delíme na radiálne a axiálne. Základnými časťami axiálnych klzných ložísk sú podložka, segment a bežec. U segmentových klzných ložísk môžu byť segmenty konštrukčne riešené ako naklápajúce sa (obr. 1-1) alebo pevné (obr. 1-2) poprípade s plávajúce.



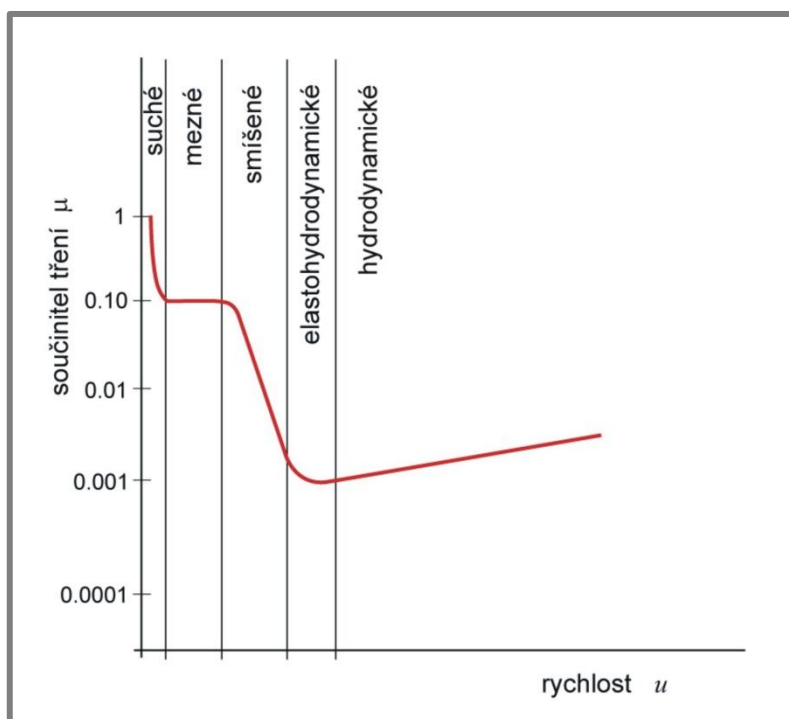
Obr. 1-1 Axiálne segmentové ložisko s naklápajúcimi sa segmentmi [1]
 1 – bežec, 2 – vložka, 3 – hriadeľ, 4 – segment, 5 – krížová alebo guľová podpera, 6 – priamková podpera, 7 – podložka

Axiálne klzné ložiská s naklápajúcimi segmentmi sa využívajú vo vysokootáčkových zariadeniach pri strednej až vysokej záťaži, ako sú napríklad turbokompresory, turbíny, čerpadla a mnohé iné. Segmenty v týchto ložiskách sú schopné sa naklápať a tým reagovať na každú prevádzkovú zmenu. Tieto ložiská sú pomerne lacné a keď pracujú v režime hydrodynamického mazania, je ich opotrebenie takmer nulové.



Obr. 1-2 Axiálne segmentové ložisko s pevnými segmentmi [2]
1 - pevné segmenty, 2 – bežec

Klzné ložiská v závislosti na rýchlosti môžu pracovať v piatich hlavných režimoch mazania, ktoré znázorňuje Stribeckova krivka (obr.1-3), ktorá zobrazuje závislosť koeficientu trenia na rýchlosti relatívne sa pohybujúcich plôch.



Obr. 1-3 Stribeckova krivka [3]

Pri medznom mazaní sú plochy od seba oddelené iba niekoľko molekúl hrubou vrstvou. Pri zmene prevádzkových podmienok, ako sú napríklad zaťaženie, teplota alebo rýchlosť, môže dôjsť k pretrhnutiu mazacej vrstvy a tým nastane medzné mazanie. Zmiešané mazanie nastáva pri prechode medzi medzným a hydrodynamickým mazaním. Pri hydrodynamickom mazaní sú relatívne pohybujúce sa klzné plochy od seba oddelené pomerne hrubou vrstvou mazacieho filmu. Elastohydrodynamické mazanie nastáva medzi klznými plochami, ktoré sa elasticky deformujú vplyvom vysokého kontaktného zaťaženia napríklad medzi valivými telieskami a krúžkami vo valivých ložiskách

Hydrodynamické klzné ložiská prechádzajú pri rozbehu aj dobehu celou Stribeckovou krivkou (všetkými režimami mazania) až kým sa nevytvorí nosná vrstva maziva a nenastane hydrodynamické mazanie. Prechod medzi režimami mazania pri rozbehu a dobehu ložiska je nežiaduci a odstraňuje sa skombinovaním s iným typom klzného ložiska, napríklad s hydrostatickým ložiskom. Súčiniteľ trenia je pri hydrodynamickom mazaní rádovo v stotinách, preto snahou konštruktérov pri veľkých klzných rýchlostiach je, aby klzné ložiská pracovali v oblasti hydrodynamického mazania a tak bola zaistená ich dlhodobá a spoľahlivá prevádzka.

Zisťovanie hrúbky mazacieho filmu v klznom ložisku začalo už v roku 1883, kedy bolo pozorované vytváranie tlaku v klznom ložisku [4]. O tri roky neskôr O. Reynolds publikoval diferenciálnu rovnicu druhého rádu [5], ktorá popisovala rozdelenie tlaku v klinovej medzere. Bol to matematický základ súčasnej teórie hydrodynamického mazania. O niekoľko rokov sa nové poznatky začali uplatňovať na konštrukciu radiálnych a axiálnych ložísk,

Kritickým parametrom, ktorý ovplyvňuje funkčnosť hydrodynamicky mazaného ložiska je hrúbka mazacieho filmu. V súčasnej dobe sa hľadajú možnosti modifikácií klzných povrchov za účelom lepšieho vytvárania nosnej vrstvy filmu. Na meranie hrúbky filmu boli použité rôzne experimentálne metódy, ktoré sa v dnešnej dobe dajú rozdeliť na elektrické, röntgenové, mechanické a optické [6]. Optická interferometria je jednou z najpoužívanejších metód. Pri meraní hrúbky mazacieho filmu pomocou optickej interferometrie zistíme hrúbku filmu pozdĺž celej klznej plochy, no inou metódou zistíme hrúbku filmu iba v jednom bode.

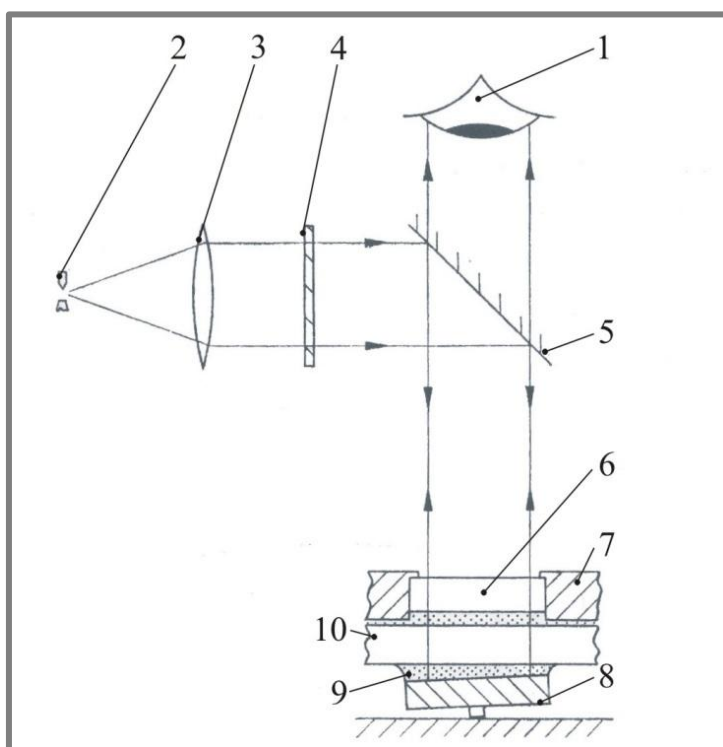
Záujmom tejto bakalárskej práce je navrhnúť experimentálne zariadenie na meranie hrúbky mazacieho filmu v axiálnom klznom ložisku pomocou optickej interferometrie.

2 PREHĽAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Experimentálne štúdie hydrodynamického mazania majú dlhú históriu. Prvé experimenty vnikli do popredia na konci 19. storočia a boli zamerané na zistenie tlaku v ložisku. Prvý takýto experiment uskutočnil Beauchamp Tower [4]. Neskorší matematický základ O.Reynoldsa [5] sa stal predmetom záujmu a východiskom mnohých vedcov. Avšak táto teória vychádzala z mnohých zjednodušujúcich predpokladov, podľa ktorých nebolo možné úplne presne popísať a pochopiť tvorbu mazacieho filmu. Až do príchodu výpočtovej techniky, a aj po ňom, sa vychádzalo z experimentálne získaných poznatkov. Tieto poznatky sa získavajú zväčša na experimentálnych zariadeniach tzv. tribometroch. Od konca 19. storočia až do dnes bolo navrhnuté veľké množstvo tribometrov, publikované veľké množstvo štúdií a získaných mnoho poznatkov, ktoré zlepšujú prevádzkové vlastnosti klzných ložísk pracujúcich v hydrodynamickom režime mazania.

Jedna zo štúdií bola publikovaná v roku 1975. Publikovali ju Robison a Cameron [7]. Výskum hrúbky mazacieho filmu bol realizovaný pomocou interferometrie na testovacom zariadení, ktoré si sami vyvinuli.

Základná idea testovacieho zariadenia je pritláčanie segmentov ložiska na rotujúci sklenený disk. Medzi diskom a povrchom segmentu sa vytvára nosná vrstva mazacieho filmu, ktorá je sledovaná optickou interferometriou. Schematický pohľad testovacieho systému môžeme vidieť na obr. 2-1.



Obr. 2-1 Schéma testovacieho systému [7]

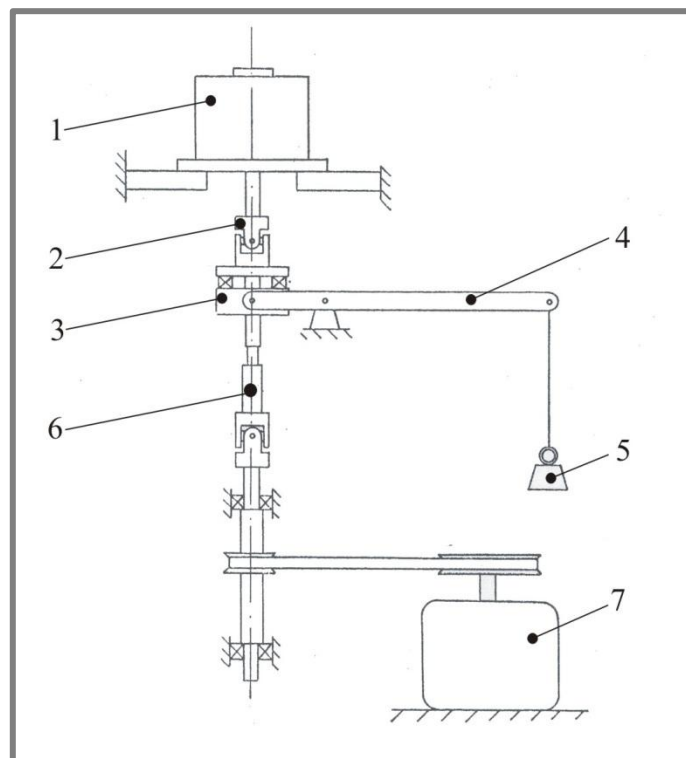
1 – objektív kamery, 2 – zdroj svetla, 3 – kolimačná šošovka,
4 – filter, 5 – delič zväzku, 6 – priezor, 7 – hydrostatické ložisko,
8 – segment, 9 – mazací film, 10 – sklenený disk

Na obr. 2-2 je zobrazený pohon testovacej hlavy 1 elektromotorom 7. Pohon je realizovaný pomocou remeňového prevodu na hriadeľ 6, ktorý privádza točivý moment do testovacej hlavy 1.

Sklenený disk je hrubý 13 mm. Pracovná strana disku je pokrytá semireflexnou vrstvou. Vzhľadom na vysokú krehkosť môže byť maximálne ohybové napätie v disku 6,9 MPa. Preto je z druhej strany disk podporovaný hydrostatickým ložiskom (14), v ktorom sú tri sklenené priezory 13, ktoré umožňujú pohľad na segmenty. Disk je pripojený na hriadeľ 1 cez pryžové puzdro 16, ktorého funkciou je tlmenie rázov.

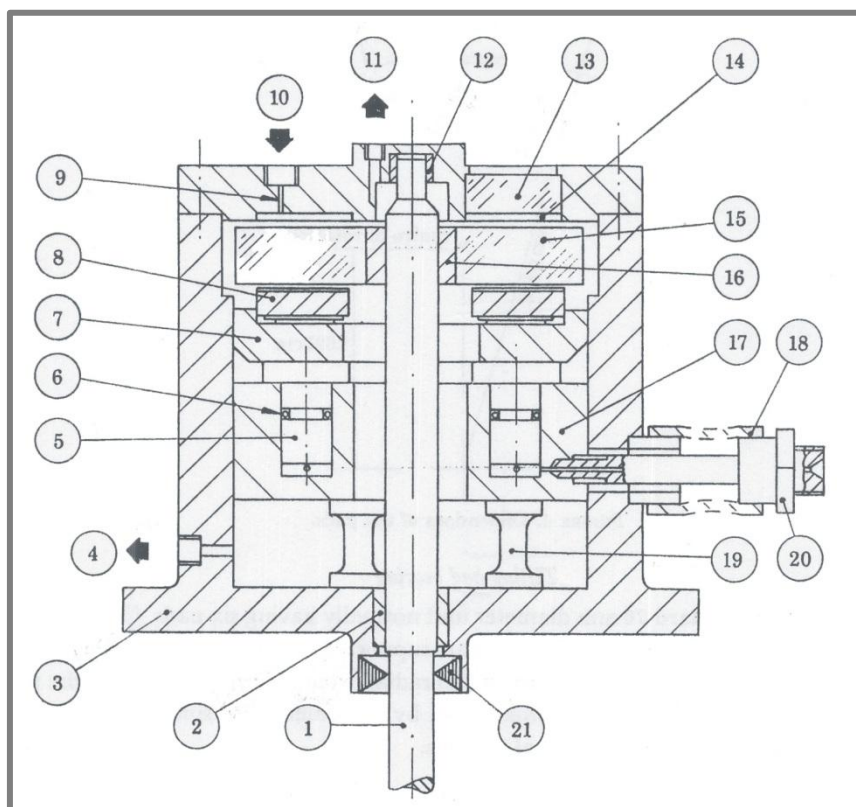
Na obr. 2-5 je zobrazený rez testovacej hlavy. V tomto zariadení je použité štandardné klzné ložisko s priemerom 76 mm, ktoré má 6 segmentov. Sú používané iba tri zo šiestich segmentov, aby bolo zaistené rovnomerné zaťaženie. Segmenty (8) sú na rotujúci disk 15 pritláčané odspodu. Segmenty sú podporované centrálnym čapom. Rozmery segmentu sú aproximované na geometricky jednoduchšie, kvôli ľahšej matematickej analýze.

Zaťažovanie je tvorené šiestimi piestami 5 o priemere 11 mm. Piesty sú utesnené tesniacimi O - krúžkami 6. To zapríčiňuje trenie. Skutočné zaťaženie je merané tenzometrom, ktorý má priemer 6,4 mm



Obr. 2-2 Schéma pohonu testovacej hlavy [7]

1 – testovacia hlava, 2 – univerzálny kĺb, 3 – axiálne ložisko,
4 – pákový prevod, 5 – závažie, 6 – hriadeľ, 7 – motor



Obr. 2-3 Celková časť testovacej hlavy [7]

1 – hriadeľ, 2 – teflónové klzné ložisko, 3 – teleso, 4 – výstup maziva, 5 – zaťažovací piest, 6 – tesniaci O krúžok, 7 – unášač, 8 – prítlačná podložka, 9 – kapilárny obmedzovač, 10 – vstup maziva, 11 – výstup maziva hydrostatického ložiska, 12 – teflónové klzné ložisko, 13 – sklenený priezor, 14 – hydrostatické ložisko, 15 – sklenený disk, 16 – pryžové puzdro, 17 – teleso zaťažené piestami, 18 – ohybná hadica, 19 – tenzometre, 20 – tlakový prívod pre zaťažovacie zariadenie, 21 – olejové tesnenie,

Ďalšiu štúdiu na skúmanie hrúbky mazacieho filmu publikovali Bassani, Ciulli a Forte [8]. Výskum bol realizovaný pomocou experimentálnej aparatury (obr. 2-4). Cieľom tejto štúdie je pochopenie javov v segmente naklápacieho axiálneho ložiska. Výskum bol realizovaný vždy na jednom z troch segmentov.

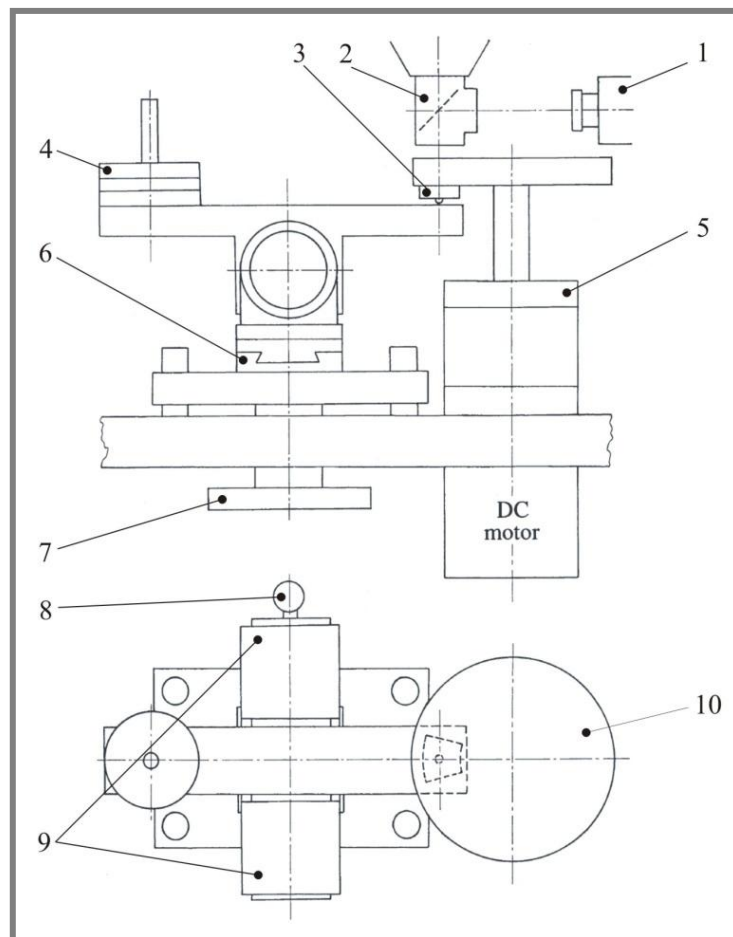
Hlavná myšlienka je meranie hrúbky mazacieho filmu, trecej sily a sklonu segmentu. Obzvlášť na meranie sklonu je použitá optická interferometria.

Pohon je realizovaný elektromotorom, ktorého otáčky sa môžu plynulo meniť v rozmedzí $0 - 3000 \text{ min}^{-1}$. K motoru je pripojený disk, ktorý je uložený v aerodynamickom ložisku 5. Na spodnej strane je disk chránený vrstvou SiO_2 a vrstvou chrómu, ktorá zväčšuje kontrast interferogramu.

Boli použité tri testovacie segmenty (obr. 1-7) s vonkajším rádiom 42 mm a vnútorným rádiom 24 mm a uhlom výseku 30° . Plocha povrchu je 300 mm^2 . Každý segment má guľový čap s priemerom 3,175 mm. Tento čap umožňuje natočenie v dvoch osiach. Čap je vždy umiestnený na strednom priemere segmentu čo je 33 mm ale vychýlený od osi segmentu. Na obr. 2-5 vidíme tri používané segmenty. V ľavo na obrázku je zobrazené vychýlenie otočného čapu. Vychýlenie od osi segmentu je vždy o určitú hodnotu (0, 0,8 a 1,6 mm). Na segmente v pravo

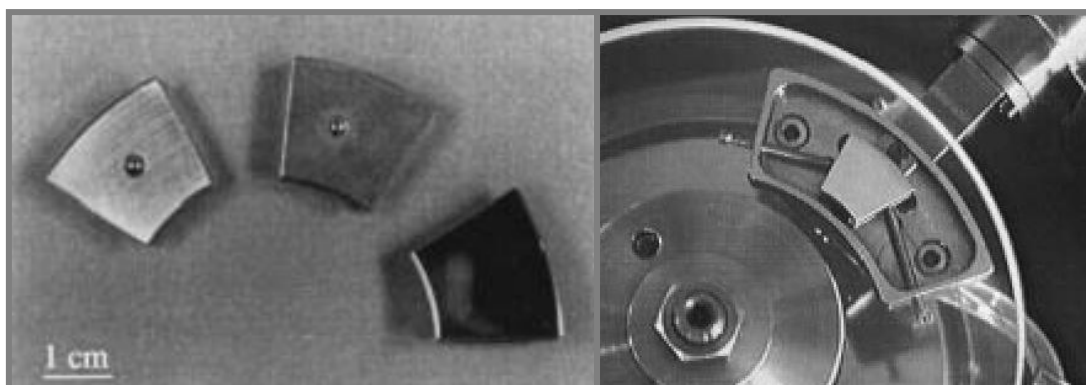
vidíme vybrúsenú pracovnú plochu. Segment je vyrobený z ocele AISI 430 kvôli dobrých reflexných vlastností. Predpísaná rovinnosť je 0,002 mm a štruktúra povrchu $R_a = 0,02 \mu\text{m}$. Na zlepšenie odrazu bola štruktúra povrchu zmenená na $R_a = 0,01 \mu\text{m}$. Segment je uchytený dvomi skrutkami s kužeľovými koncami v bočnej drážke. Podpora segmentu s postranným okrajom slúži ako zásobník maziva (obr. 2-6).

Celková schéma zariadenia je zobrazená na obr. 2-4. Zaťaženie 4 je aplikované pomocou pákového mechanizmu. Oporným bodom tohto mechanizmu je radiálne aerodynamické ložisko 9. Použitie tohto ložiska umožňuje merať treciu silu silomerom 8. Pákový mechanizmus so segmentom je pripojený k priečnemu stolu 6 s mikrometrickou presnosťou. Hrúbka filmu v mieste otočného čapu je meraná s indukčným snímačom s citlivosťou $125 \mu\text{m} \cdot \text{V}^{-1}$. Mazivo je do kontaktu privádzané dvomi otvormi v podpore segmentu. Teplota maziva je meraná dvomi termočlánkami umiestnenými v podpore segmentu.



Obr. 2-4 Schéma testovacieho zariadenia [8]

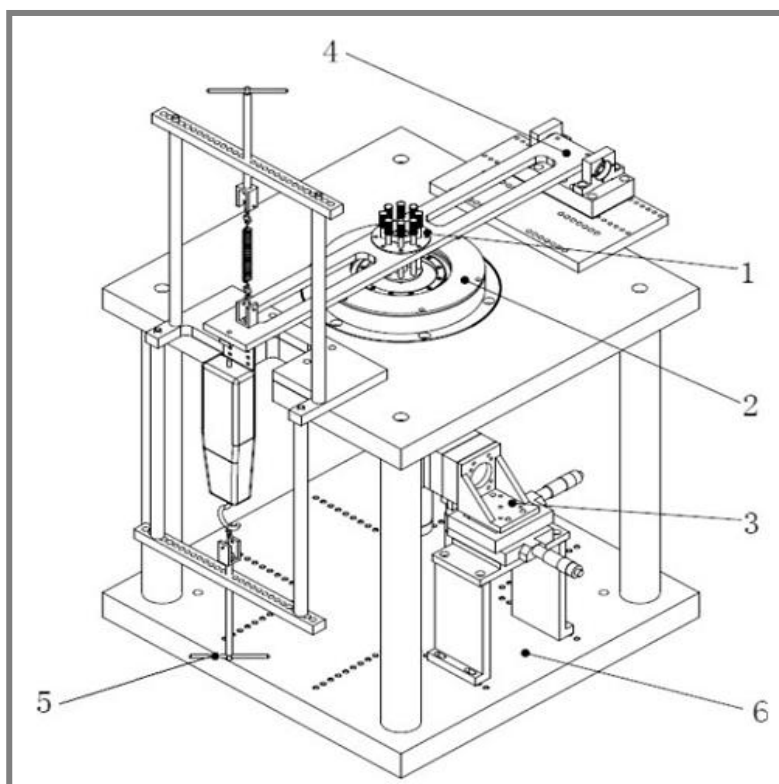
1 – zdroj svetla, 2 – mikroskop, 3 – segment, 4 – zaťaženie,
5 – integrované aerodynamické ložisko, 6 - priečny stôl,
7 – vertikálny stôl, 8 – dynamometer, 9 – radiálne aerodynamické ložisko, 10 – sklenený disk



Obr. 2-5 Tri testovacie segmenty [8]

Obr. 2-6 Detail podpory a uchytenie segmentu [8]

Jedna z najnovších štúdií bola publikovaná v roku 2010. Guo a kol. [9] publikovali štúdiu o meraní mazacieho filmu v kontakte segment s rotujúcim diskom. Cieľom ich štúdie bolo navrhnuť zariadenie na meranie hrúbky mazacieho filmu a následne preukázať prípustnosť a spoľahlivosť meracieho systému.



Obr. 2-7 Usporiadanie hlavných častí zariadenia [9]

1 – upevnenie a držanie jazdca, 2 – rotačná časť disku, 3 – interferenčná optika, 4 – zaťažovacie rameno, 5 – zaťažovacia páka, 6 – základný rám.

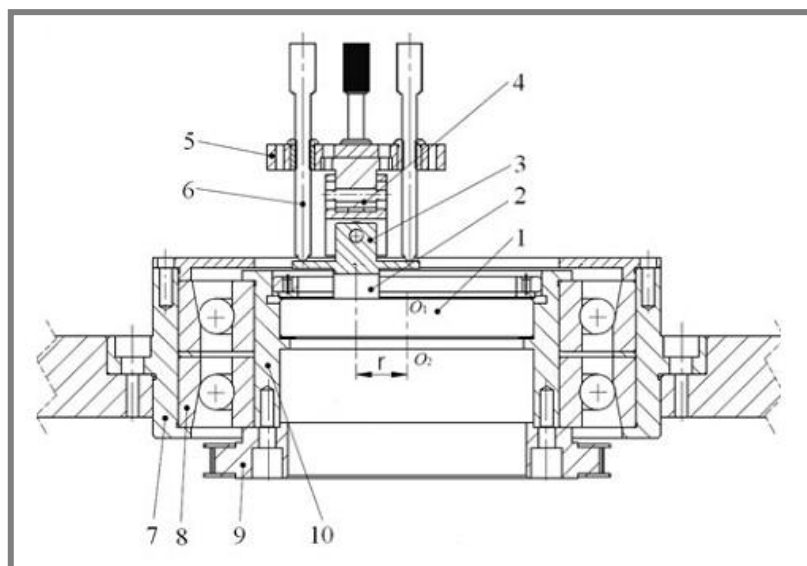
Hlavnou myšlienkou zariadenia je prítlačenie segmentu ložiska na rotujúci disk pri rôznych sklonoch segmentu. Merania boli prevedené za rôznych podmienok. Menil sa sklon segmentu, zaťaženie, rýchlosť mazacie a klzné materiály. Obrázok 2-7 zobrazuje hlavné časti testovacieho zariadenia. Je zložený z držiaku

jazdca a nastaviteľnej časti 1, rotujúceho disku 2, optického zariadenia 3, zaťažovacieho zariadenia 4 a 5 a základného rámu 6.

Na obr. 2-8 je zobrazený priečný rez držiaku jazdca a disku. Držiak jazdca s nastaviteľnou časťou 3 je uchytený k zaťažovaciemu ramenu 5 cez univerzálny kĺb 4. Tento kĺb umožňuje natočenie jazdca voči disku v dvoch smeroch. Nastavovacie skrutky 6, pomocou ktorých sa nastaví presný uhol sklonu jazdca. Skrutky sú umiestnené pravidelne na zaťažovacom ramene.

Disk je uchytený v objímke 10. Objímka je uložená v ložisku 8 a unášaná kladkou 9, ktorá je pripojená k motoru. Ložisko 8 je uchytené vo vonkajšej objímke 7, ktorá je pevne prichytená k základnému rámu. Disk je vyrobený z priehľadného materiálu (skla). Aby cez rotujúci disk mohli prechádzať svetelné lúče. Pracovná strana disku je pokrytá čiastočne semireflexnou vrstvou, ktorá slúži ako delič lúčov.

Segment je uchytený tak, aby mohli byť získané požadované uhly voči disku. Pri natočení segmentu a rotácií disku vzniká klinová medzera a v nej je generovaný mazací film. Povrch segmentu bol brúsený a vysoko leštený na zrkadlový povrch na zlepšenie interferomerického merania



Obr. 2-8 Priečný rez zostavy jazdca a rotačného disku [9]

1 – sklenený disk, 2 – jazdec, 3 – držiak jazdca, 4 – univerzálny kĺb, 5 – zaťažovacie rameno, 6 – nastavovacie skrutky, 7 – vonkajšia objímka, 8 – ložisko, 9 – remenica, 10 – vnútorná objímka.

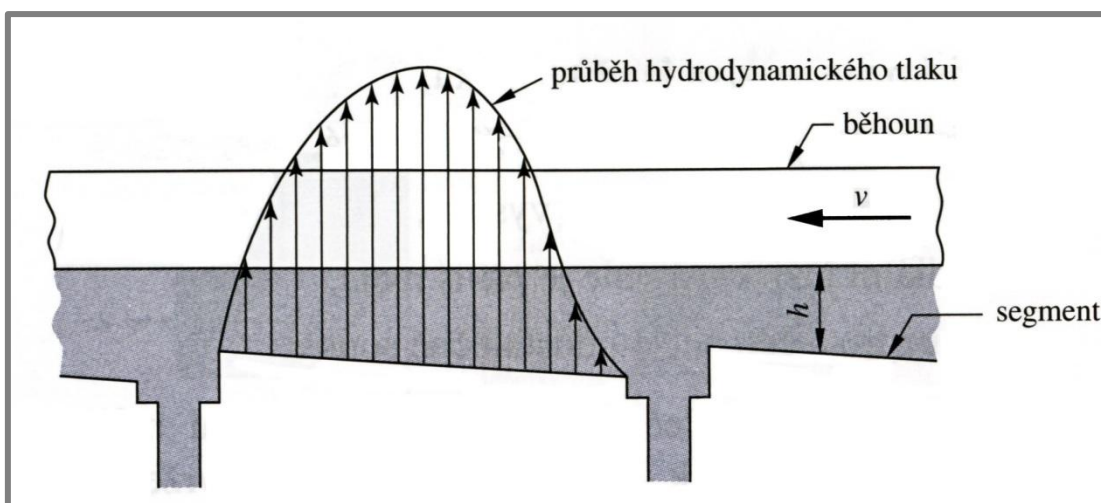
3 FORMULÁCIA RIEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

3

3.1 Geometria klinovej medzery

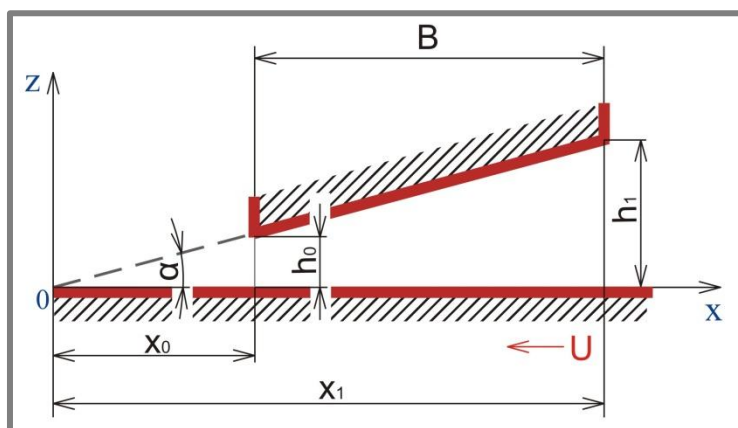
3.1

Návrh a výpočet axiálneho hydrodynamicky mazaného klzného ložiska je jednou z dôležitých aplikácií teórie hydrodynamického mazania. Segmentové axiálne klzné ložiská sú zobrazené na obr. 1-1 a obr. 1-2. Segmenty sú prispôbené tak, aby medzi bežcom a segmentom za určitých podmienok vznikla klinová medzera. V klinovej medzere vzniká nosné tlakové pole, ktorého priebeh je zobrazený na obr. 3-1.



Obr. 3-1 Priebeh tlaku v hydrodynamickom axiálnom ložisku [2]

Klinová medzera má určitú geometriu, ktorá je zobrazená na obr. 3-2. Najdôležitejším rozmerom klinovej medzery je minimálna hrúbka mazacieho filmu h_0 , ktorá sa nachádza na výstupe maziva z klinovej medzery. Ďalšími charakteristickými rozmermi klinovej medzery sú uhol natočenia segmentu α , hrúbka maziva na vstupe h_1 a rozmer segmentu B .



Obr. 3-2 Geometria klinovej medzery

3.2 Analytické riešenie tlaku a prietoku v kontakte

Analytické riešenie je založené na Reynoldsovej diferenciálnej rovnici. Táto rovnica popisuje vznik tlaku v klinovej medzere, ktorá vzniká za určitých podmienok, ako napríklad vzájomné natočenie a dostatočná rýchlosť klzných plôch. Reynoldsova rovnica bola odvodená za určitých zjednodušení:

- Mazivo je newtonovské, nestlačiteľné a má konštantnú viskozitu
- Prúdenie je laminárne
- Zotrvačné a tiažové sily maziva sú zanedbateľné
- Vrstva maziva nachádzajúca sa v bezprostrednej blízkosti klzného povrchu má rovnakú rýchlosť ako klzný povrch
- Zakrivenie ložiska je zanedbateľné

Pre jednoduchší výpočet je použitá aproximácia pre nekonečne dlhé ložisko [10], kde je šírka segmentu omnoho dlhšia a tak sa nemusí uvažovať bočný výtok. Na základe tohto zjednodušenia sa budú vypočítané hodnoty mierne odlišovať od skutočných hodnôt. Zariadenie by malo umožniť nastavenie klinovej medzery v rozsahu:

- $h_0 = 0 \div 1 \text{ mm}$
- $\alpha = 0 \div 0,25^\circ$

Relatívna rýchlosť klzných plôch U je závislá na otáčkach disku a vzdialenosti segmentu od stredu otáčania disku. Predbežne odhadovaná možná rýchlosť sa pohybuje medzi $0 \div 4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Viskozita je vlastnosť maziva a je závislá na teplote. Testy budú realizované pri stálej teplote 20°C . Pre výpočet bolo zvolené mazivo RENOLIN MA22, ktoré má kinematickú viskozitu pri 40°C $\nu_{40^\circ\text{C}} = 22 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Kinematická viskozita pri 20°C je $\nu_{20^\circ\text{C}} = 53 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a hustota $\rho = 866 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ [11]. Dynamická viskozita η sa vypočíta zo vzťahu $\eta = \nu \cdot \rho = 53 \cdot 10^{-6} \cdot 866 = 0,046 \text{ Pa} \cdot \text{s}$

Analytické riešenie je prevedené pre rozmery segmentu $B = 5 \text{ mm}$ a takto zvolenú geometriu klinovej medzery:

- | | |
|------------------------------------|--|
| • minimálna hrúbka mazacieho filmu | $h_0 = 0,0001 \text{ mm}$ |
| • uhol sklonu | $\alpha = 0,002^\circ$ |
| • rýchlosti klzných plôch | $U_2 = 2 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,
$U_5 = 5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,
$U_{10} = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ |

Hrúbka maziva na vstupe je daná vzťahom

$$h_1 = h_0 + B \cdot \tan(\alpha) = 10^{-4} + 5 \cdot \tan(0,002) = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ mm.} \quad (1)$$

Vstup a výstup maziva od počiatku súradnicového systému je daný vzťahom

$$x_0 = \frac{h_0}{\tan(\alpha)} = \frac{0,0001}{\tan(0,002)} = 2,86 \text{ mm} \quad (2)$$

$$x_1 = x_0 + B = 2,86 + 5 = 7,86 \text{ mm.} \quad (3)$$

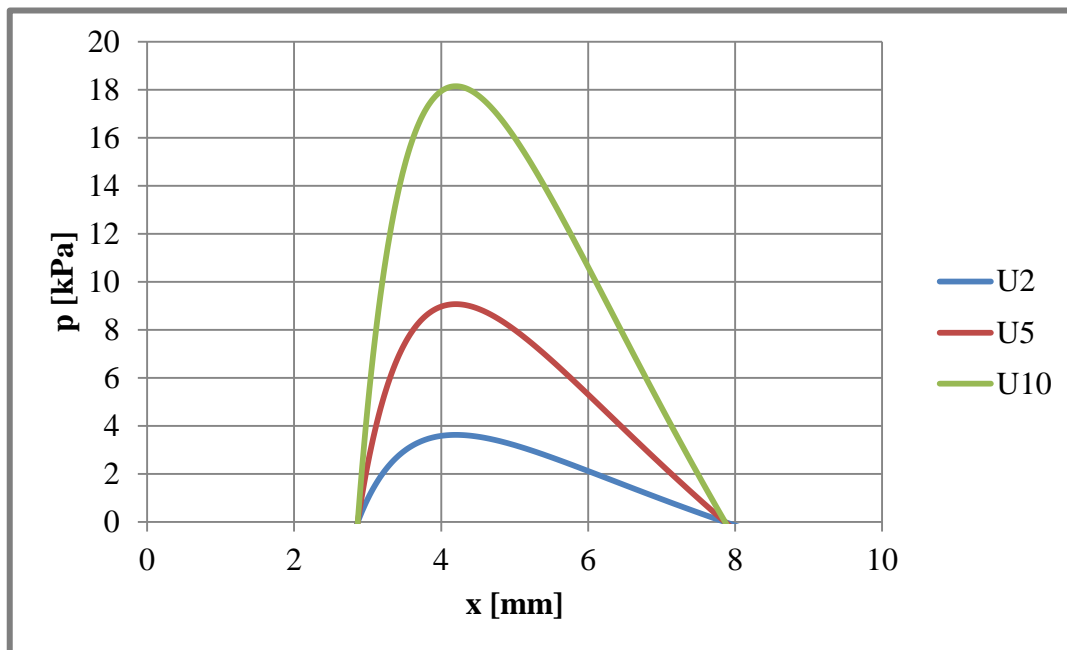
Priebeh tlaku sa určí vzťahom

$$p_2(x) = \frac{6 \cdot \eta \cdot U_2}{\alpha^2} \cdot \frac{(x_1 - x)(x - x_0)}{(x_1 + x_0) \cdot x^2} = \frac{6 \cdot 4,6 \cdot 10^{-8} \cdot 2}{0,002^2} \cdot \frac{(7,86 - x)(x - 2,86)}{(7,86 + 2,86) \cdot x^2}, \quad (4)$$

$$p_5(x) = \frac{6 \cdot \eta \cdot U_5}{\alpha^2} \cdot \frac{(x_1 - x)(x - x_0)}{(x_1 + x_0) \cdot x^2} = \frac{6 \cdot 4,6 \cdot 10^{-8} \cdot 5}{0,002^2} \cdot \frac{(7,86 - x)(x - 2,86)}{(7,86 + 2,86) \cdot x^2}, \quad (5)$$

$$p_{10}(x) = \frac{6 \cdot \eta \cdot U_{10}}{\alpha^2} \cdot \frac{(x_1 - x)(x - x_0)}{(x_1 + x_0) \cdot x^2} = \frac{6 \cdot 4,6 \cdot 10^{-8} \cdot 2}{0,002^2} \cdot \frac{(7,86 - x)(x - 2,86)}{(7,86 + 2,86) \cdot x^2}, \quad (6)$$

Priebeh tlakov je zobrazený v grafe 3-1.



Graf 3-1 Priebeh tlaku pri v klinovej medzere pri rôznych klzných rýchlostiach

Z grafu 3-1 vyplýva, že so zvyšujúcou sa rýchlosťou stúpa maximálny tlak, ktorý v bode $x = 4,2$ mm ma maximálnu hodnotu $p_1(4,2) = 3,63$ kPa, $p_2(4,2) = 9,1$ kPa a $p_3(4,2) = 18,15$ kPa.

Sila, ktorú prenáša olejový film v klinovej medzere jedného segmentu axiálneho ložiska rôznych rýchlostiach je

$$F_2 = \frac{6 \cdot \eta \cdot B \cdot U_2}{\alpha^2} \cdot \left(\ln \left(\frac{x_0}{x_1} \right) + 2 \cdot \frac{x_1 - x_0}{x_1 + x_0} \right) =$$

$$= \frac{6 \cdot 4,6 \cdot 10^{-8} \cdot 5 \cdot 2}{0,002^2} \cdot \left(\ln \left(\frac{2,86}{7,86} \right) + 2 \cdot \frac{7,86 - 2,86}{7,86 + 2,86} \right) = - 0,055 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_5 = - 0,14 \text{ N}$$

$$F_{10} = - 0,27 \text{ N}$$

Znamienko mínus znamená, že sila pôsobí proti smeru osi z.

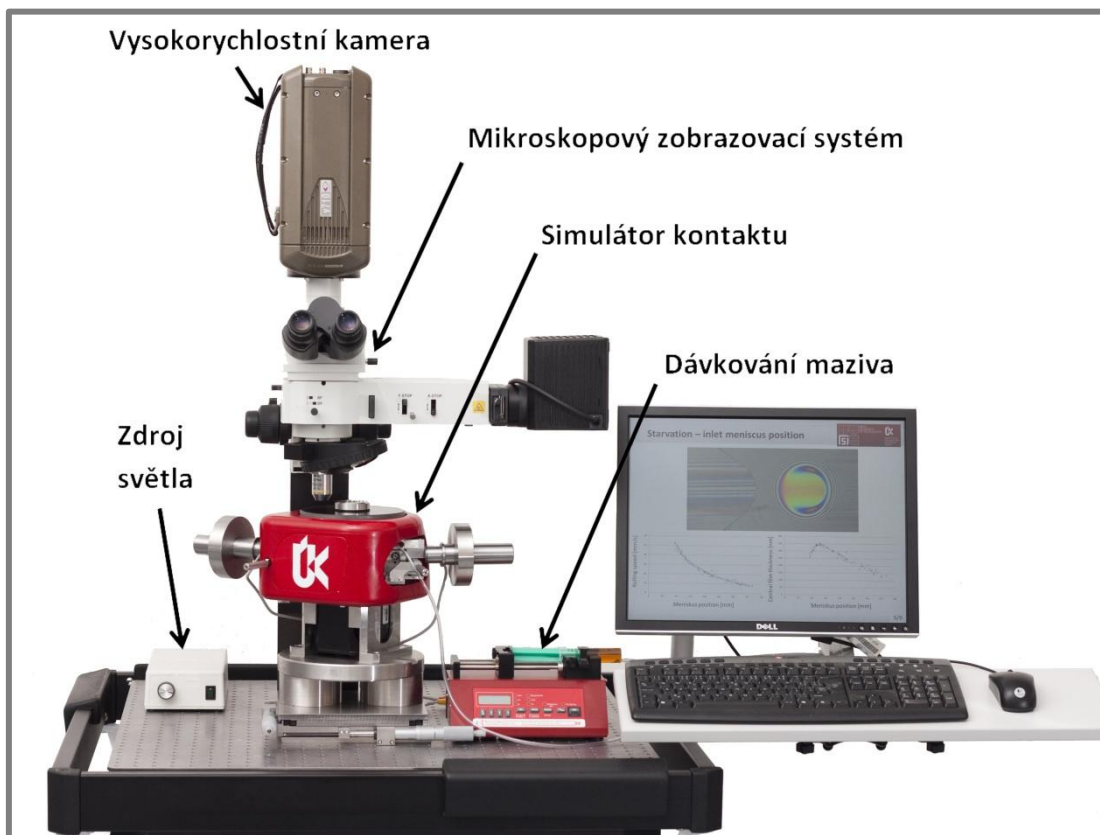
Prietok maziva klinovou medzerou je pri rôznych rýchlostiach je

$$Q_2 = U_2 \frac{h_1 \cdot h_0}{h_1 + h_0} = 2 \frac{0,27 \cdot 0,0001}{0,27 + 0,0001} = 7,3 \cdot 10^{-4} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (8)$$

$$Q_5 = 1,83 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$Q_{10} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

3.3 Súčasné zariadenie na štúdium utvárania mazacích filmov za podmienok nedostatočného zásobovania kontaktom mazivom



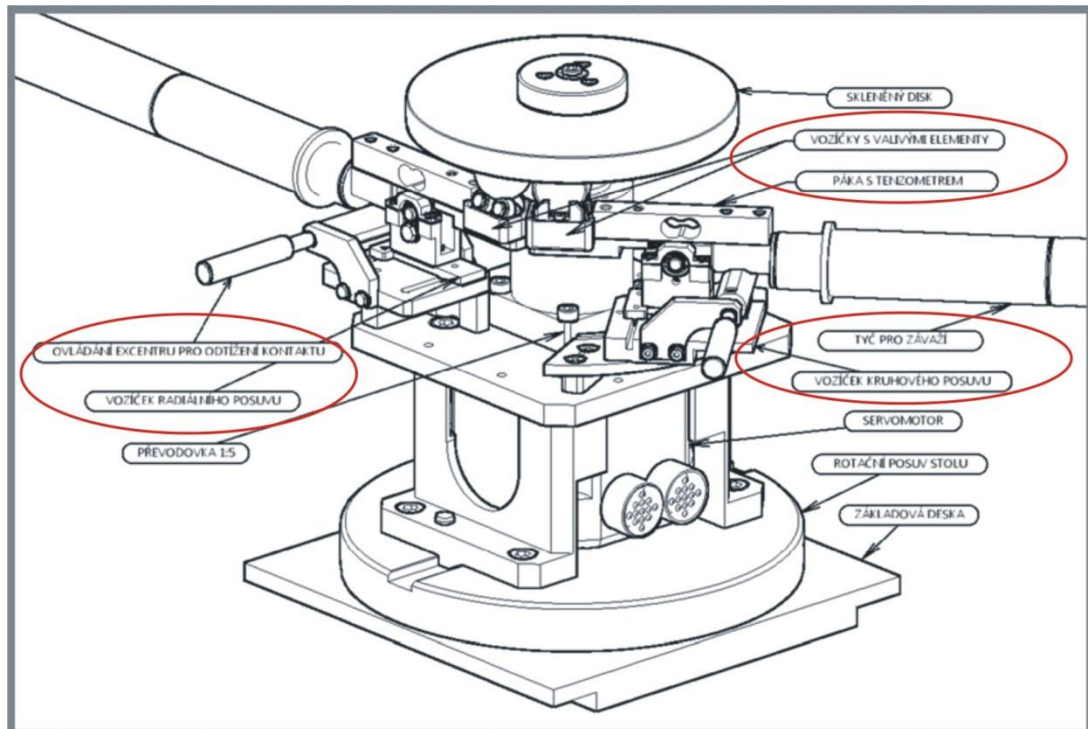
Obr. 3-3 Súčasné zariadenie na výskum EHD mazania

Súčasné zariadenie na štúdium utvárania mazacích filmov za podmienok nedostatočného zásobovania kontaktom mazivom je zobrazené na obr. 3-3 a skladá sa z mechanického simulátora, optickej sústavy a vyhodnocovacieho zariadenia. Zariadenie je umiestnené v tribologickom laboratóriu Ústavu konštruovania.

Mechanický simulátor spočíva v pritláčaní dvoch guľôčok k rotujúcemu sklenenému disku. Zaťaženie je realizované pomocou pákového mechanizmu, kde je možné meniť záťaž. Kontaktná plocha je meraná pomocou optickej interferometrie.

Optická sústava sa skladá z mikroskopového zobrazovacieho systému, zdroju svetla a vysokorychlostnej kamery.

Pripojenie simulátora bude vyžadovať odstránenie niektorých častí súčasného zariadenia. Na obr. 3-4 sú zobrazené hlavné časti mechanického simulátora a časti označené červenou farbou musia byť odstránené.



Obr. 3-4 Popis častí súčasného simulátoru [12]

4 VYMEDZENIE CIEĽOV PRÁCE

4

Cieľom tejto bakalárskej práce je konštrukčný návrh experimentálneho zariadenia (simulátoru) slúžiaceho k stanoveniu geometrie mazacieho filmu v klznom hydrodynamicky mazanom axiálnom ložisku pomocou optickej interferometrie.

Požiadavky, ktoré sú kladené na simulátor:

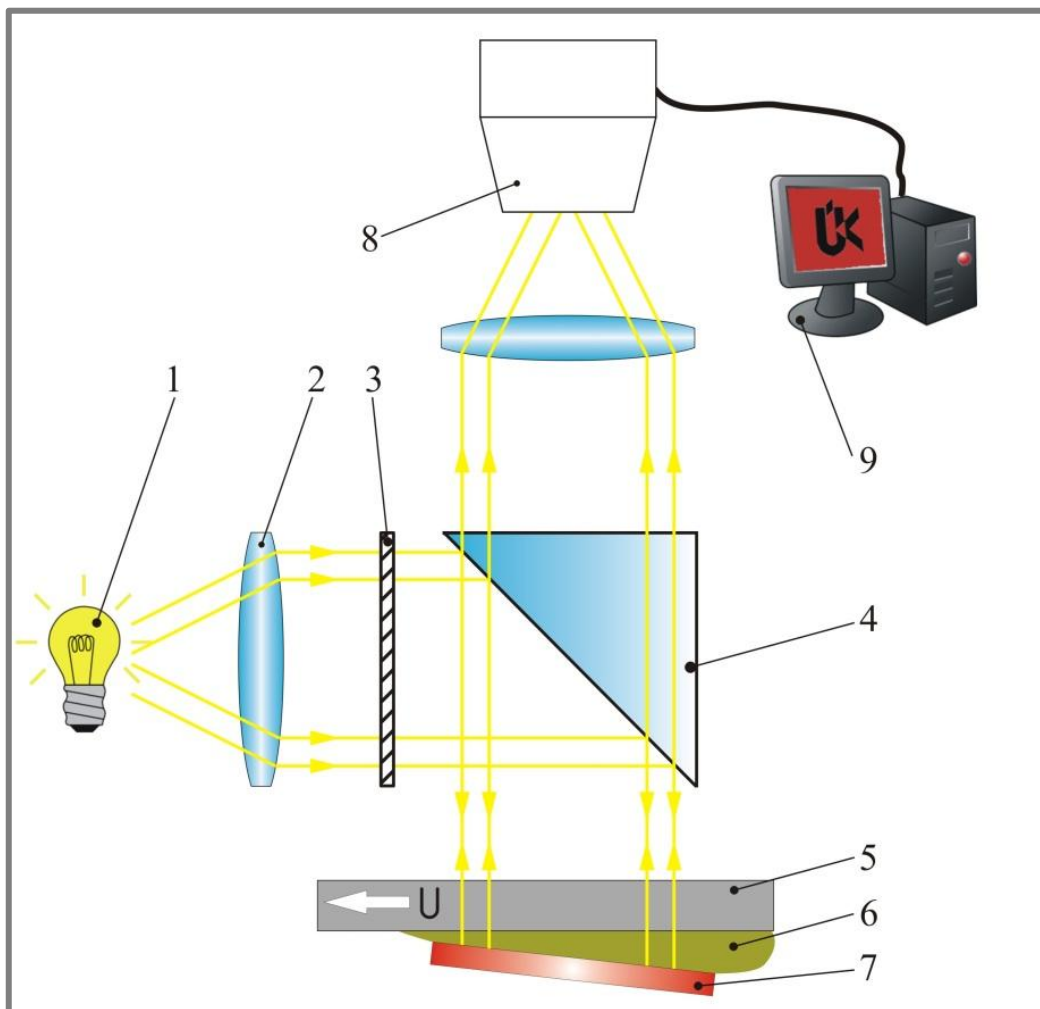
- kompaktnosť konštrukcie
- využitie optickej meracej metódy
- navrhnuť simulátor ako modifikáciu súčasného optického tribometru
- presné nastavenie geometrie klinovej medzery bez zaťaženia
- samočinné ustavenie klinovej medzery v závislosti na prevádzkových podmienkach testu

5 NÁVRH METODICKÉHO PRÍSTUPU K RIEŠENIU

Z rešeršnej časti vyplýva, že je len obmedzené množstvo konštrukčných návrhov experimentálnych zariadení na stanovenie geometrie mazacieho filmu v klznom hydrodynamicky mazanom axiálnom ložisku. Po preštudovaní predstavených konštrukčných návrhov možno vyvodit' záver, že žiadne konštrukčné riešenie neodpovedá daným požiadavkám zadania. Všetky riešenia sú ekonomicky náročné, rozmerovo objemné, prípadne tak konštrukčne riešené, že by nebolo možné ich použiť vo výskumnom laboratóriu ÚK.

Vzniká tu potreba navrhnuť experimentálne zariadenie slúžiace k stanoveniu geometrie mazacieho filmu v axiálnom ložisku pomocou optickej interferometrie, ktoré bude mať ekonomickú a kompaktnú konštrukciu.

Návrh konceptu experimentálneho zariadenia simulujúceho axiálne klzné ložisko je zobrazené na obr. 5-1 a skladá sa z dvoch základných častí a to optickej (mikroskopu) a mechanickej časti (simulátoru).

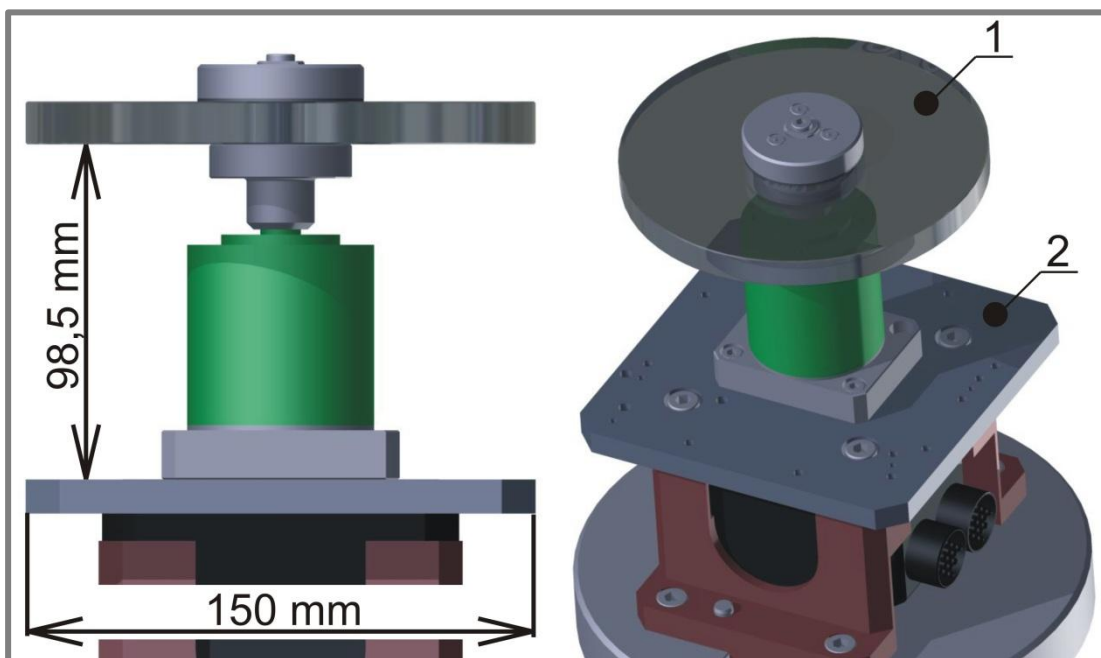


Obr. 5-1 Schéma meracieho zariadenia

1 – halogénová lampa, 2 – kolimačná šošovka, 3 – filter, 4 – delič lúčov, 5 – sklenený disk, 6 – vrstva mazacieho filmu, 7 – segment, 8 – mikroskop/kamera, 9 – vyhodnocovací počítač

5.1 Mechanická časť

Hlavnými časťami mechanickej sústavy simulátora (obr. 5-1) sú segment 5 a sklenený disk 7. Vzhľadom na obmedzenú pozorovaciu oblasť mikroskopu má segment veľkosť 5×5 mm. Simulátor by mal byť modifikáciou súčasného výskumného zariadenia v tribologickom laboratóriu Ústavu konštruovania VUT v Brne, ktorý sa používa na výskum chovania bodového kontaktu (obr. 3-3). Na obr. 5-2 sú zobrazené obmedzujúce rozmery tribometru. Disk 1 je súčasťou používaného zariadenia a je poháňaný cez prevodovku elektromotorom s plynulou reguláciou otáčok. Otáčky môžu byť regulované v rozsahu $0\div 600\text{ min}^{-1}$. Disk je prevedený z opticky transparentného materiálu – skla. Pre zaistenie dostatočného kontrastu interferencie je plocha na kontaktnej strane pokrytá vrstvou chrómu. Opačná strana disku je pokrytá antireflexnou vrstvou. Simulátor by mal byť priskrutkovaný k platni 2 zariadenia a nemôže presahovať výšku 98,5 mm. Platňa je široká 150 mm a sú v nej vyvrtané pripojovacie diery.



Obr. 5-2 Experimentálne zariadenie na výskum chovania bodového kontaktu (tzv. hladovění)
1 – sklenený disk, 2 - platňa

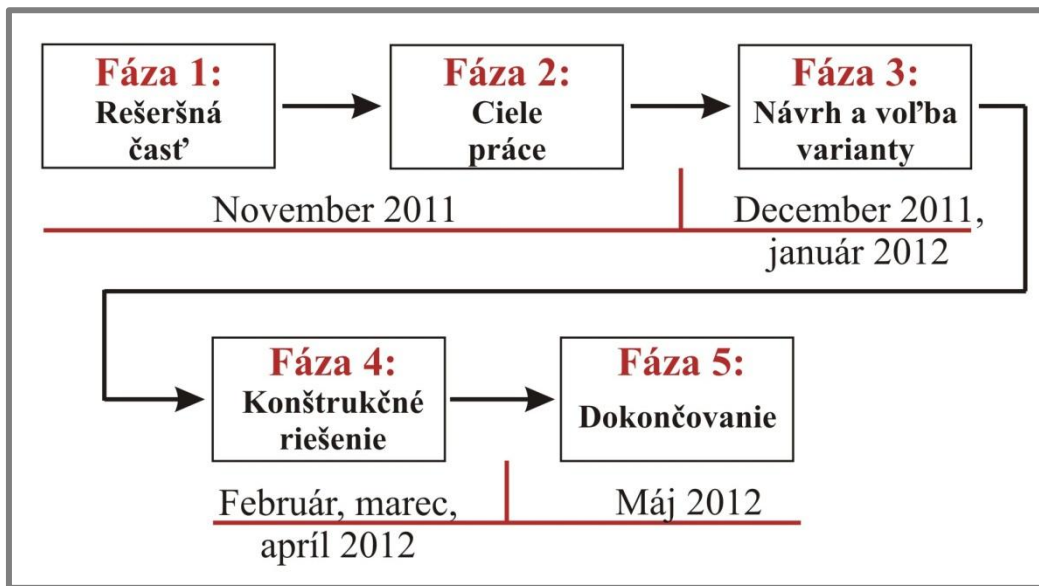
Mechanická sústava simulátora pozostáva z dvoch častí. Prvá časť zariadenia slúži na nastavenie presnej geometrie klinovej medzery, do ktorej bude prúdiť mazivo. Hrúbka maziva medzi diskom a segmentom bude meraná pomocou optickej časti, a nasledovne sa budú vyhodnocovať získané interferogramy.

Druhá časť predstavuje voľne naklápajúci sa segment (plávajúci), ktorý bude k disku pritláčaný pomocou pákového mechanizmu. Po ustálení vznikne klinová medzera určitej geometrie, v ktorej bude prúdiť mazivo a vytvárať tlakové pole. Nosná vrstva maziva, ktorá takto vznikne bude oddeľovať segment od disku. Hrúbka vzniknutej vrstvy maziva sa bude taktiež merať pomocou optickej časti.

5.2 Optická sústava

Optická sústava (obr. 3-1) sa skladá z mikroskopového zobrazovacieho systému a zdroju svetla. Mikroskopový zobrazovací systém pozostáva z priemyselného mikroskopu Nikon Optiphot 150 8 a digitálnej jednočipovej CCD kamery. Zdroj svetla pozostáva z episkopického osvetľovača 1, kolimačnej šošovky 2, filtra 3 a deliča lúčov 4. Záznam pozorovanej oblasti je prenášaný do vyhodnocovacej jednotky, ktorá pozostáva z osobného počítača 9.

5.3 Časový harmonogram

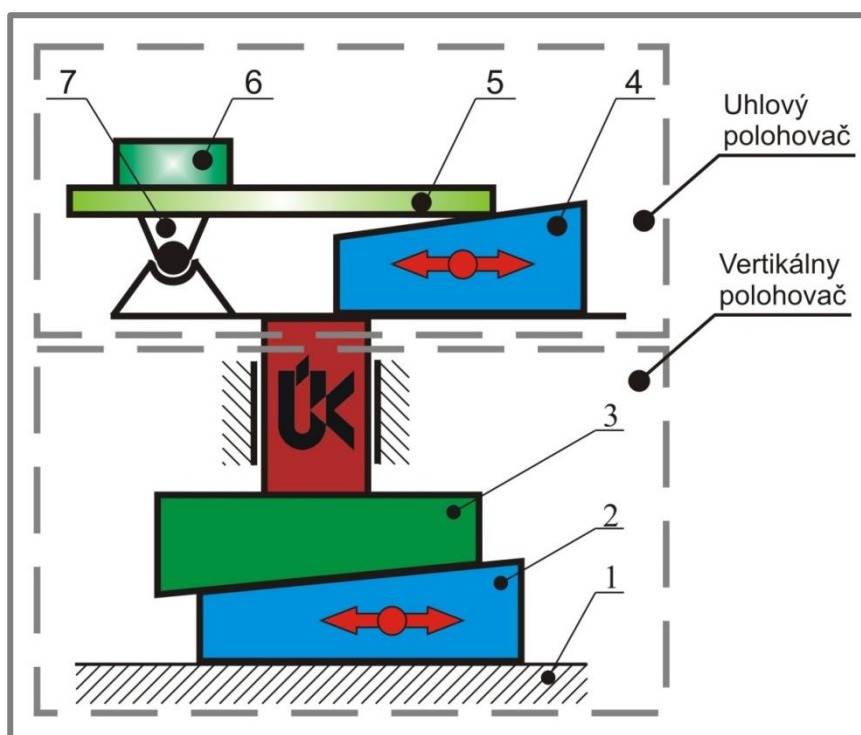


Obr. 5-3 Časová os metodického prístupu

- **Fáza 1: Rešeršná časť**
Získavanie informácií o problematike simulátorov hydrodynamického mazania a spracovanie rešeršnej časti práce.
- **Fáza 2: Ciele práce**
Ujasnenie si cieľov práce a spresnenie zadaných požiadavkou.
- **Fáza 3: Návrh a voľba varianty**
Návrh a zhotovenie variant riešenia.
Technická analýza a výber optimálnej varianty.
- **Fáza 4: Konštrukčné riešenie**
Spracovanie vybranej varianty do virtuálneho 3D modelu a vypracovanie výkresovej dokumentácie v programe Autodesk Inventor Profesionál 2011
- **Fáza 5: Dokončovanie**
Spisovanie použitej literatúry, skompletovanie a odovzdávanie práce.

6 NÁVRH VARIANT RIEŠENÍ A VÝBER OPTIMÁLNEJ VARIANTY

Mechanická časť slúžiaca na nastavenie presnej geometrie klinovej medzery je zobrazená na obr. 6-1 a rozdeľuje sa na dve nezávislé časti. Jedna časť bude slúžiť na uhlové a druhá na vertikálne polohovanie segmentu. Pri oboch polohovacích zariadeniach je najvýhodnejšie použiť mikrometrických hlavíc a klinového mechanizmu, ktorý má prevodový pomer 1:10. Tým sa zaistí dostatočná jemnosť nastavenia.



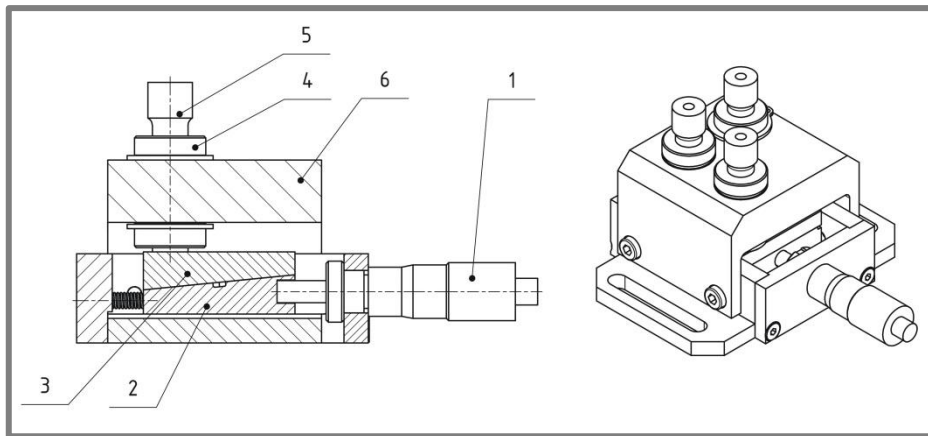
Obr. 6-1 Schéma simulátoru

1 – spodná drážka, 2 – spodný klin, 3 – vrchný klin, 4 – klin, 5 – nastavovacia platňa, 6 – segment, 7 – otočná väzba (bod)

Náklon segmentu musí byť realizovaný v dvoch rovinách a preto je v uhlovom polohovači najdôležitejším prvkom otočný bod, ktorý musí zaisťovať náklon v dvoch rovinách, musí mať malé rozmery a minimálne vôle.

Nakoľko systém vertikálneho polohovača je jednoduchý a nie je možné výrazných modifikácií, bude predstavená iba jedna varianta riešenia. Navrhnutá varianta je opísaná v kapitole 6.1.

6.1 Varianta riešenia vertikálneho polohovača



Obr. 6-2 Varianta riešenia vertikálneho polohovača

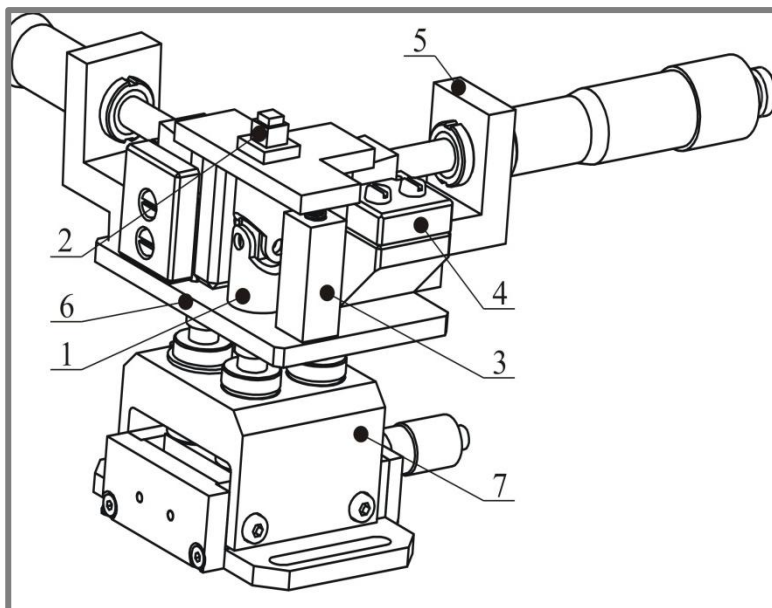
1 – mikrometrická hlavica, 2 – spodný klin, 3 – vrchný klin, 4 – guľôčkové puzdro, 5 – vzperka, 6 – držiak puzdra

Varianta riešenia vertikálneho polohovača je zobrazená na obr. 6-2. Presné posunutie spodného klinu 2 je realizované pomocou mikrometrickej hlavice 1. Vratný pohyb spodného klinu je zabezpečený skrutkovou valcovou tlačnou pružinou, ktorá je vedená kolíkom aby nenastal medzný stav vzpernej stability pružiny. Oba kliny sú vedené vo vodiacej drážke. Táto drážka bude priskrutkovaná k existujúcemu tribometru a bude umožňovať nastavenie vzdialenosti segmentu voči stredu otáčania disku. K vrchnému klinu 3 sú priskrutkované tri vzperky 5, ktoré sú vedené v guľôčkových puzdách 4. K vzperkám bude priskrutkovaný uhlový polohovač.

6.2 Varianty riešenia na uhlové polohovanie

6.2.1 Varianta č.1

Varianta č.1 je zobrazená na obr. 6-3. Otočný bod segmentu je realizovaný v kĺbovej spojke 1. Tento kĺb dovoľuje natočenie v dvoch rovinách a má veľký uhol náklonu. Na nastavovaciu platňu je pripevnený segment 2. Disk je pritláčaný na kliny pomocou tlačnej pružiny, ktorá je vo vodiacej drážke pružiny 3. Klin je vedený vodiacou drážkou klinu 4, ktorá sa skladá zo štyroch častí aby bola zaistená jednoduchšia výroba. K vodiacej drážke je priskrutkovaný držiak mikrometru 5. Do tohto držiaka je nasunutá mikrometrická hlavica, na ktorú je naskrutkovaná matica mikrometru. Hriadeľový kĺb, vodiaca drážka klinu a vodiaca drážka pružiny sú priskrutkované k platni 6. Táto platňa bude pripevnená na vertikálny polohovač.



Obr. 6-3 Varianta č.1

1 – kľbová spojka, 2 – segment, 3 – vodiaca drážka pružiny,
4 – vodiaca drážka klinu, 5 – držiak mikrometru, 6 – platňa,
7 – vertikálny polohovač

6.2.2 Varianta č.2

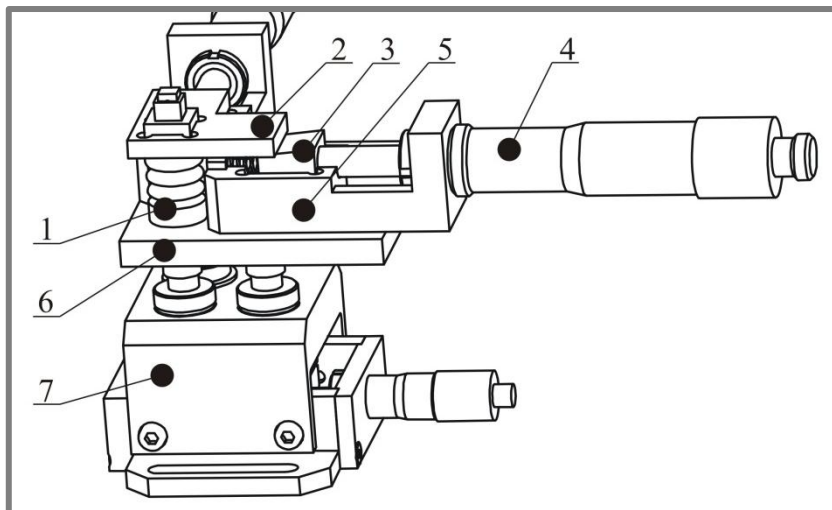
6.2.2

Druhá varianta riešenia je zobrazená na obr. 6-4. Hlavný rozdiel oproti prechádzajúcej variante spočíva v realizácii otočného elementu. V tejto variante je namiesto kľbovej spojky použitá vlnovcová spojka 1, ktorá je prichytená k nastavovacej platni 2 pomocou kolíku. Klin 3 je na mikrometrickú hlavicu 4 pritláčaný tlačnou pružinou. Dotyk klinu a segmentu je na rohu platne. Pritláčanie nastavovacej platne ku klinom je len pomocou vlastnej váhy disku. Drážka klinu 5 a držiak mikrometrickej hlavice sú vyrobené ako jeden kus, čo zabezpečuje jednoduchšie dodržanie geometrických tolerancií. Vlnovcová spojka a drážka sú pripojené k platni 6 kolíkmi. Platňa sa priskrutkuje k vertikálnemu polohovaču 7.

6.2.3 Varianta č.3

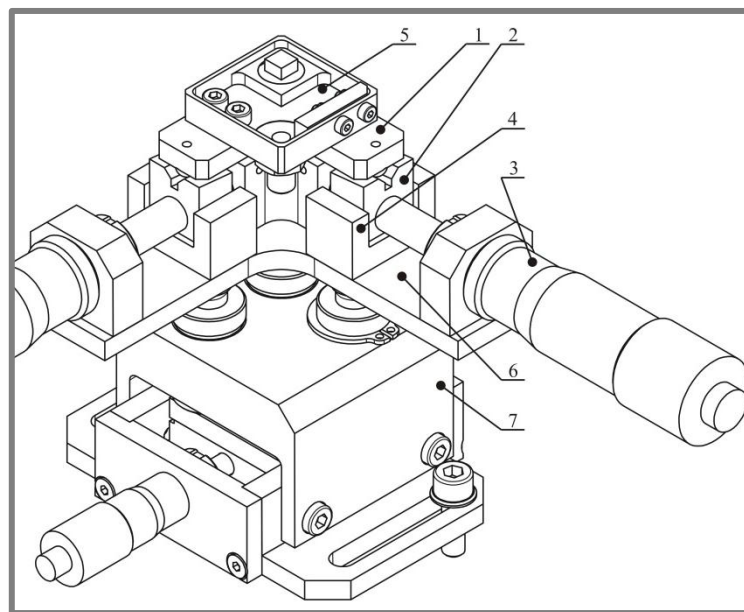
6.2.3

Varianta č.3 je zobrazená na obr. 6-5, ktorá je konštrukčne spojenie dvoch predchádzajúcich variant. Najväčším rozdielom je realizácia otočného bodu segmentu. Ten je realizovaný oceľovou guľôčkou, ktorá je uložená v lôžku guľôčky a nastavovacia platňa 1 sa okolo nej môže naklápať. Tlačná pružina pritláča klin 2 na mikrometrickú hlavicu 3, a tak zabezpečuje jeho vratný pohyb. Medzi diskom a klinom je ako klzný element vložená oceľová guľôčka. Drážka klinu 4 je z jedného kusu. Vratný pohyb disku je zabezpečuje ťažná pružina. K vani 5 je priskrutkovaná pryžová stierka na zotieranie oleju z disku. Držiak mikrometru, drážka a lôžko guľôčky sú priskrutkované k platni 6, ktorá je priskrutkovaná k vertikálnemu polohovaču 7.



Obr. 6-4 Varianta č.2

1 – vlnovcová spojka, 2 – nastavovacia platňa, 3 – klin, 4 – mikrometrická hlavica, 5 – vodiaca drážka, 6 – platňa, 7 – vertikálny polohovač



Obr. 6-5 Varianta č.3

1 – nastavovacia platňa, 2 – klin, 3 – mikroskopická hlavica, 4 – drážka klinu, 5 – vaňa, 6 – platňa, 7 – vertikálny polohovač

6.3 Výber optimálne varianty uhlového polohovača

6.3

Varianta č.1 je konštrukčne zložitá a použitie hriadeľového kĺbu ako otočného elementu nie je v tomto prípade najvhodnejšie kvôli jeho vôľam. Taktiež zhotovenie vodiacej drážky klinu z viacerých častí sa nejaví ako najvhodnejšie riešenie kvôli značnej nepresnosti skrutkových spojov. V tejto variante nie je riešené stieranie oleja z disku. Táto varianta nie je vhodná.

Varianta č.2 je rozmerovo objemnejšia ako varianta č.1. Vlnovcová spojka, ktorá je použitá v tejto variante nie je vhodné riešenie kvôli veľkému počtu stupňov voľnosti. Taktiež nie je riešené stieranie oleja z disku. Táto varianta nie je vhodná.

Varianta č.3 je konštrukčne zložitejšia ale použitie guľôčky ako otočného elementu je najvhodnejšie a najekonomickejšie. Vyriešené je aj stieranie a odvod oleja z disku. Táto varianta je najvhodnejšia a preto volím túto variantu.

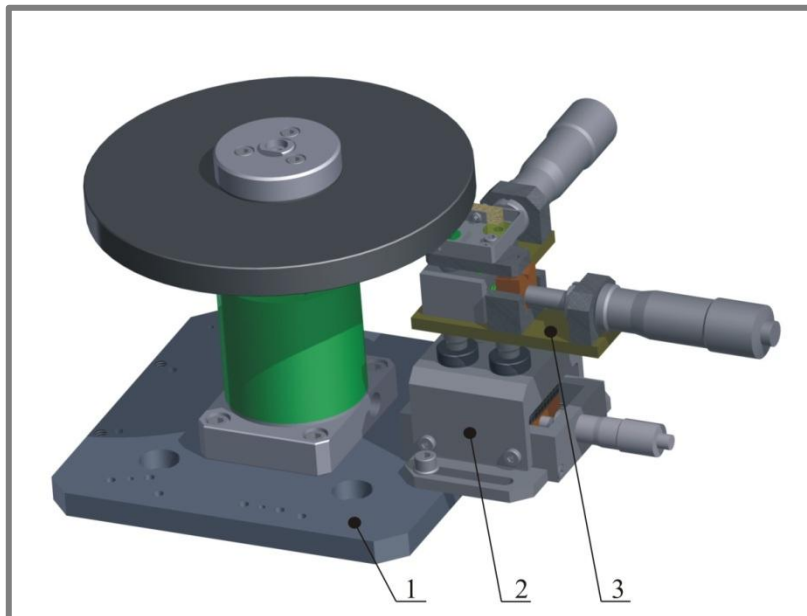
7 KONŠTRUKČNÉ RIEŠENIE

7.1 Umiestnenie

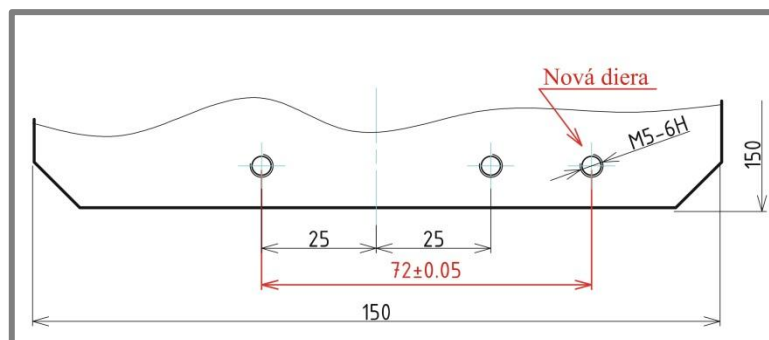
Simulátor bude priskrutkovaný dvomi skrutkami M5 na platňu existujúceho tribometru (obr. 5-2), ktorý je umiestnený v tribologickom laboratóriu ÚK. Pripojenie simulátora vyžaduje vyvrtanie jednej novej diery so závitom M5 do platne motoru. Umiestnenie novej pripojovacej diery je na obr. 7-2.

Zobrazenie navrhutej celkovej zostavy je na obr. 7-1. Simulátor sa skladá z dvoch častí a to z vertikálneho polohovača 2, ktorý zaisťuje nastavenie vertikálnej polohy segmentu a k nemu je priskrutkovaný tromi skrutkami M4 uhlový polohovač 3, ktorý zaisťuje uhlové nastavenie voči disku.

V konštrukcii sú použité skrutkové valcové ťažné a tlačné pružiny od spoločnosti ALCOMEX [13]. Na výrobu všetkých častí je navrhnutá nerezová oceľ 17 241 a polotovary sú volené z katalógov spoločnosti NOVEL [14].



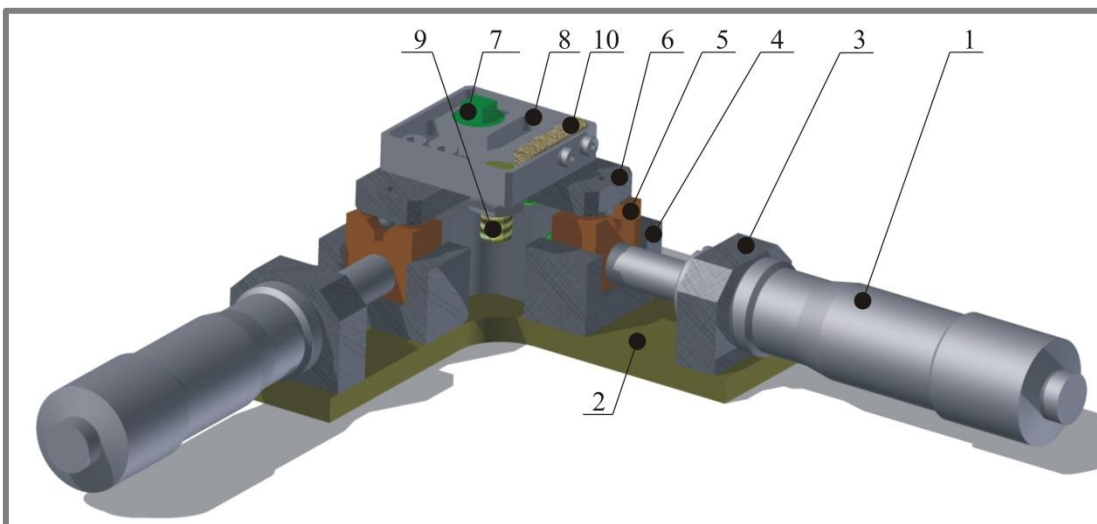
Obr. 7-1 Modifikácia existujúceho tribometru
1 – časť tribometru, 2 – vertikálny polohovač, 3 – uhlový polohovač



Obr. 7-2 Umiestnenie novej pripojovacej diery

7.2 Uhlový polohovač

Konštrukčné riešenie mechanickej časti na presné nastavenie klinovej medzery je zobrazené na obr. 7-2. Otočný element je oceľová guľôčka s priemerom 10 mm. Klzné elementy medzi klinom a nastavovacou platňou sú taktiež oceľové guľôčky ale s priemerom 5 mm.



Obr. 7-3 Uhlový polohovač

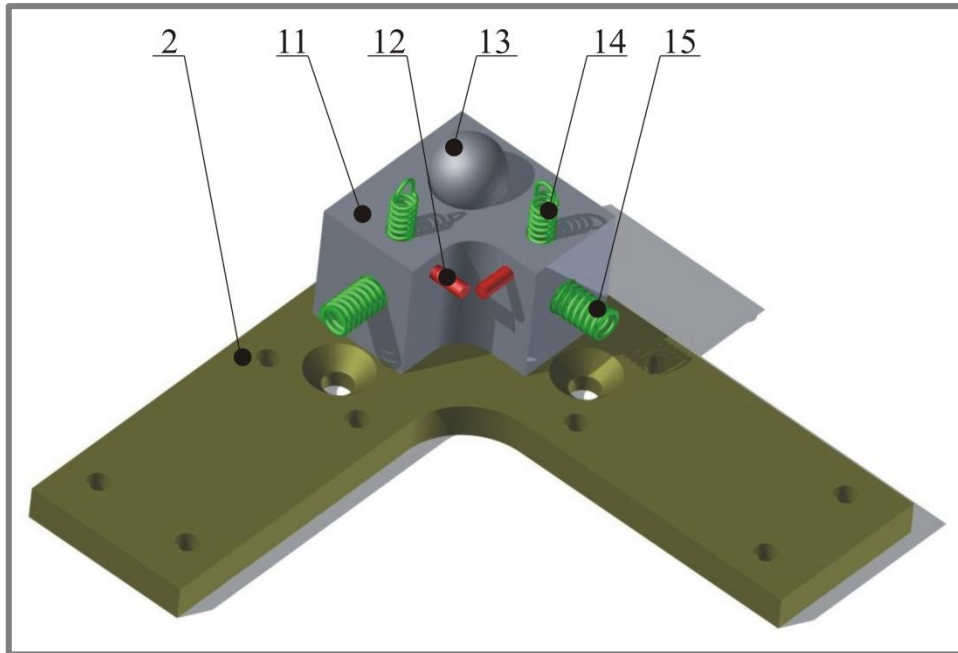
1 – mikrometrická hlavica, 2 – platňa, 3 – držiak mikrometru, 4 – drážka klinu, 5 – klin, 6 – nastavovacia platňa, 7 – segment, 8 – vaňa, 9 – vypúšťacia redukcia, 10 – pryžová stierka

7.2.1 Platňa a lôžko guľôčky

Platňa a lôžko guľôčky tvoria základné časti uhlového polohovača a sú zobrazené na obr. 7-4. Lôžko guľôčky 11 je priskrutkované k platni 2 dvomi skrutkami M3. V lôžku guľôčky je uložená oceľová guľôčka o priemere 10 mm. K lôžku sú prichytené drôtikmi o priemere 2 mm dve skrutkové valcové ťažné pružiny z nerezového materiálu s označením TR130 14, ktoré zaisťujú vratný pohyb nastavovacej platne. Lôžko slúži tiež ako oporná plocha tlačným pružinám z nerezovej ocele s označením DR1420 15, ktoré zabezpečujú vratný pohyb klinu. Pružiny sú vedené v diere o priemer 5 mm. Základné parametre pružín sú uvedené v tabuľke 7-1.

	Poddajnosť c ($N \cdot mm^{-1}$)	Priemer drôtu d (mm)	Stredný priemer D_m (mm)
TR130	1,96	0,5	3
DR1420	2,45	0,63	4
DR990	0,36	0,4	3,2

Tab. 7-1 Tabuľka parametrov skrutkových valcových pružín

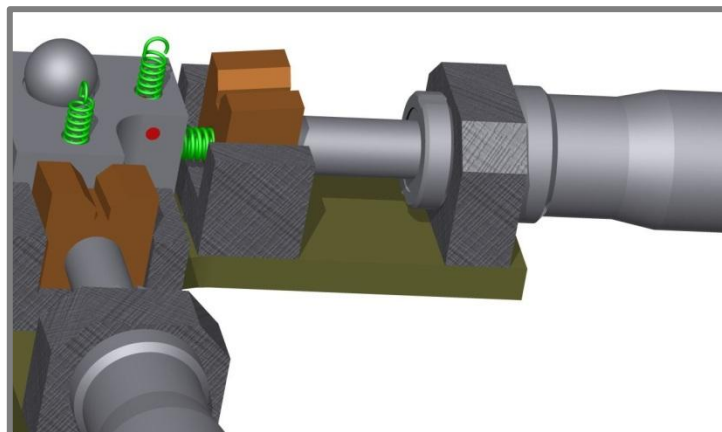


Obr. 7-4 Základné časti uhlového polohovača
 2 – platňa, 11 – lôžko guľôčky, 12 – drôt 12, 13 – oceľová guľôčka, 14 – ťažná pružina,
 15 – tlačná pružina

7.2.2 Posuvná sústava

Posuvnú sústavu (obr. 7-5) tvoria mikroskopická hlavica, držiak mikrometru, drážku klinu a klin. Držiak mikrometru a drážka klinu sú priskrutkované k platni skrutkami M3. V drážke je vedení klin, ktorého posuv je realizovaný pomocou mikrometrickej hlavice. Klin zabezpečuje prevodový pomer medzi posuvom a zdvihom 1:10. Prevodový pomer je docielený sklonením plochy pod uhlom $\gamma = \arctan(0,1) = 5,71^\circ$.

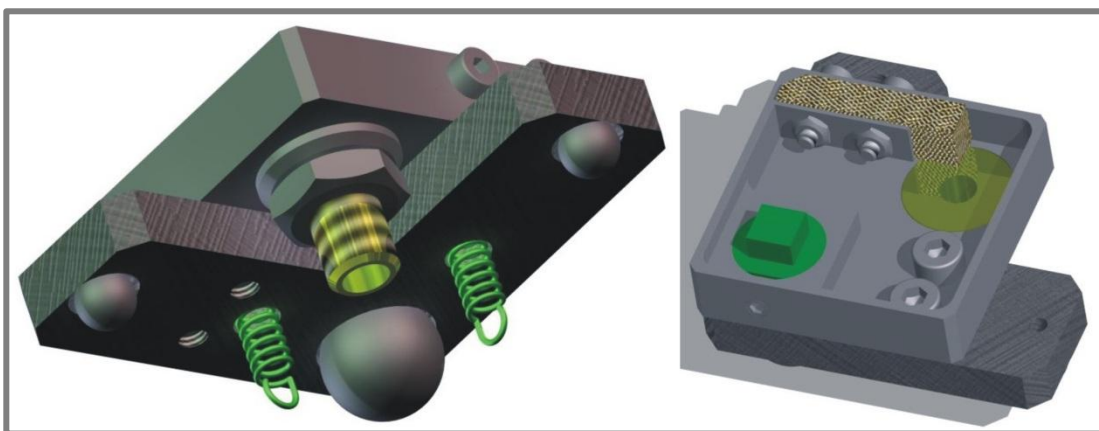
V zariadení sú navrhnuté dve rovnaké mikrometrické hlavice s objednávacím číslom 110-106 od spoločnosti MITUTOYO [15]. Rozsah merania (posuvu) majú $0 \div 1$ mm, minimálny posuv je 0,0001 mm. Upínať sa budú pomocou upínacej matice M12, ktorá je ich súčasťou. Priemer upínacej časti je 12 mm. Cena jednej hlavice je 206 €.



Obr. 7-5 Posuvná sústava

7.2.3 Naklápacia sústava

Naklápacia sústava sa skladá z nastavovacej platne, oceľových guľôčok, vaničky, segmentu, stierky, prítlačného plechu a je zobrazená na obr. 7-6. Pryžová stierka s prítlačným plechom je priskrutkovaná k vane dvomi skrutkami M2 a slúži na zotieranie maziva z disku. Zotreté mazivo z disku bude stekať do vane, ktorá slúži ako zachytávač maziva. Vaňa má objem približne $2\,400\text{ mm}^3$ a cez redukčnú skrutku bude odtekať do externého zásobníku. Vo vani je uložený segment a zaistený staváciou skrutkou proti otáčaniu. Vaňa je priskrutkovaná dvomi skrutkami M3 k nastavovacej platni. Oceľové guľôčky slúžia ako klzný element medzi klinom a naklápacou platňou. Vratný pohyb nastavovacej platne zabezpečuje skrutková valcová ťažná pružina TR130. Celá naklápacia sústava je spojená s lôžkom a posuvnou sústavou.



Obr. 7-6 Naklápacia sústava

Minimálny možný náklon segmentu závisí na delení stupnice mikrometru, prevodovom pomere klinu a na dĺžke ramena L nastavovacej platne.

- Delenie stupnice mikrometru $x = 0,0001\text{ mm}$
- Prevodový pomer klinu $i = 10$
- Dĺžka ramena nastavovacej platne $L = 28,6\text{ mm}$

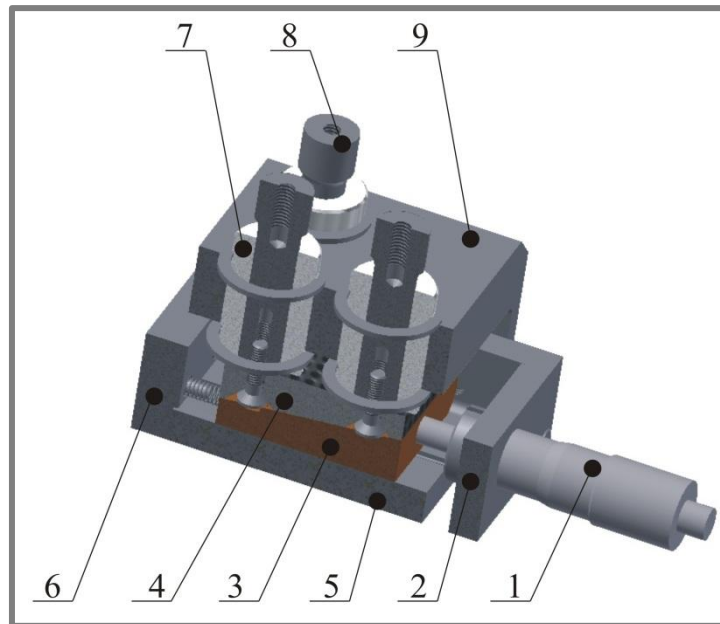
minimálny zdvih klinového mechanizmu pri pootočení mikrometru o jeden dielik

$$h = \frac{x}{i} = \frac{0,0001 \cdot \text{mm}}{10} = 0,00001\text{ mm} \quad (9)$$

minimálny uhol náklonu

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h}{L}\right) = \arctan\left(\frac{0,00001 \cdot \text{mm}}{28,6 \cdot \text{mm}}\right) = 0,00002^\circ \quad (10)$$

7.2.4 Vertikálny polohovač



Obr. 7-7 Vertikálny polohovač
 1 – mikrometrická hlavica, 2 – predná príložka, 3 – spodný klin,
 4 – horný klin, 5 – vodiaca drážka, 6 – zadná príložka, 7 –
 guľôčkové puzdra, 8 – vzperky, 9 – držiak puzdier

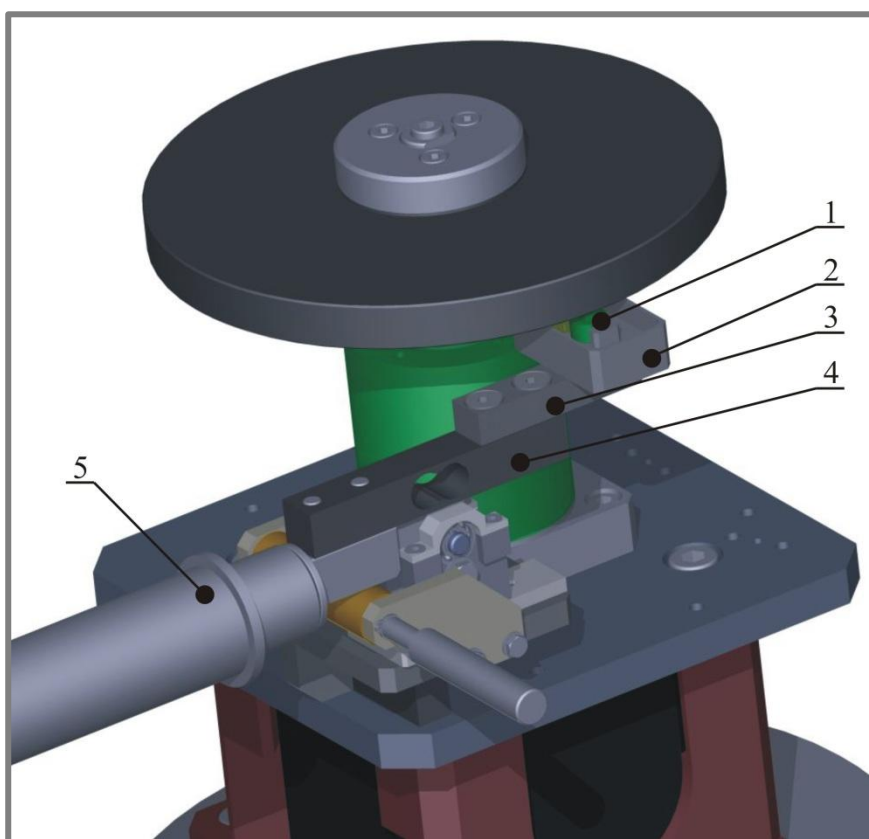
Vertikálny polohovač slúži na vertikálne nastavenie segmentu a je zobrazený na obr.7-7. V konštrukcii sú použité tri guľôčkové puzdra s označením LME-8UU 7 od spoločnosti TEA TECHNIK s.r.o. [16], jedna mikrometrická hlavica 1 od spoločnosti MITUTOYOU s objednávacím číslo 148-104 [15], ktorá má rozsah merania 13 mm a delenie stupnice je po 0,001 mm. Hlavica bude upnutá upínacou skrutkou v prednej príložke 2. Hlavicom sa bude posúvať spodný klin 3, ktorý bude pohybom vpred nadvihovať vrchný klin 4. Oba klíny budú vedené drážkou 5. Na klznej ploche má spodný klin drážky, ktoré budú slúžiť ako zásobníky maziva. Vratný pohyb spodného klinu budú zaisťovať dve skrutkové valcové tlačné pružiny z nerezovej oceli DR990, ktoré budú vedené kolíkom a opornú plochu budú mať v zadnej príložke 6. K vrchnému klinu budú priskrutkované tri vzperky 8 o priemere 8 mm skrutkami M3. Tyče budú vedené guľôčkovými puzdrami, ktoré budú uložené s presahom v držiaku 9 a proti axiálnemu posuvu poistené poistnými krúžkami. Držiak puzdier bude priskrutkovaný k drážke štyrmi skrutkami M4. Klinový prevodový pomer je rovnaký ako u uhlového polohovača (1:10) takže uhol sklonu klinu bude taktiež rovnaký ($\gamma = 5,71^\circ$).

Jemnosť vertikálneho posuvu je závislá na delení stupnice mikrometrickej hlavy a na prevodovom pomere klinového prevodu. Minimálny možný vertikálny posuv segmentu je $z = y / i = 0,001 / 10 = 0,0001$ mm. Kde y je delenie stupnice mikrometrickej hlavy 148-104 a i je prevodový pomer klinového prevodu.

7.3 Plávajúci segment

Táto konštrukčná časť slúži na simuláciu tvorby mazacieho filmu pri určitom zaťažení a určitej klznej rýchlosti a bude to modifikácia zariadenia na výskum bodového kontaktu (obr. 3-4). Zobrazenie konštrukčného riešenia a pripojenie na zariadenie je zobrazené na obr. 7-8 ; .

Segment 1 je uložený na oceleovej guľôčke o priemere 5 mm, a tak sa môže naklápať v dvoch rovinách a vytvoriť tak klinovú medzeru určitej geometrie. Guľôčka je uložená vo vaničke 2, ktorá je priskrutkovaná k podložke vaničky 3 dvomi skrutkami M3. Podložka je priskrutkovaná dvomi skrutkami M5 k tenzometru 4 zariadenia. Tenzometer slúži na meranie zaťaženia segmentu, ktoré bude vyvíjať pákový mechanizmus 5.



Obr. 7-8 Upevnenie plávajúceho segmentu

1 – segment, 2 – vanička, 3 – podložka vaničky, 4 – tenzometer, 5 – pákový mechanizmus

8 ZÁVER

Táto bakalárska práca sa zaoberá konštrukčným návrhom simulátoru, ktorý bude simulovať hydrodynamické mazanie v axiálnom klznom ložisku. Výhodou tohto návrhu je, že je to modifikácia súčasného zariadenia na výskum EHD mazania, a kontakt môže byť pozorovaný optickou interferometriou. Konštrukčný návrh bude realizovaný v nasledujúcich mesiacoch a bude sa používať na výskum hydrodynamického mazania. Po výrobe a zostavení bude musieť byť simulátor otestovaný a prípadné chyby opravené.

Simulátor bude slúžiť pre výskumné účely Ústavu konštruovania. V konštrukcii je umožnená jednoduchá výmena klzného segmentu, ktorý môže byť vyrobený z rôznymi modifikáciami a z rôznych materiálov.

9 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. *Části strojů*. 5., přeprac. vyd. (v SNTL 1. vyd.). Praha: SNTL, 1989, 775 s. Česká matice techn. ISBN 80-030-0046-7.
- [2] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [3] Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně Ústav konstruování. *TRIBOLOGIE-Přednáška 1*. [online]. [cit. 2012-05-21] Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/tribologie/prednasky/prednaska1.pdf>
- [4] B. Tower, First report on Friction Experiments, *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 1883, s. 632-666.; Second report, *ibid.*, 1885, s. 58-70; Third report, *ibid.*, 1888, s. 173-205, Fourth report, *ibid.*, 1891, s. 111-140.
- [5] O. Reynolds, On the Theory of Lubrication and its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil, *Phil. Trans. R. Soc.*, Vol. 177, 1886, s. 157-234.
- [6] SEDLAČÍK, J. *Konstrukce simulátoru axiálního segmentového ložiska*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 42 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Petr Svoboda, Ph.D
- [7] ROBINSON, C. L. a A. CAMERON. Studies in Hydrodynamic Thrust Bearings. III. The Parallel Surface Bearing. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 1975-04-24, roč. 278, č. 1283, s. 385-395. ISSN 1364-503x. DOI: 10.1098/rsta.1975.0031. Dostupné z: <http://rsta.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rsta.1975.0031>
- [8] BASSANI, R, E CIULLI a P FORTE. An investigation on thrust bearing tilting pads. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 1998-1-1, roč. 212, č. 4, s. 271-277. ISSN 1350-6501. DOI: 10.1243/1350650981542083. Dostupné z: <http://pij.sagepub.com/lookup/doi/10.1243/1350650981542083>
- [9] GUO, F., P. L. WONG, Z. FU a C. MA. Interferometry Measurement of Lubricating Films in Slider-On-Disc Contacts. *Tribology Letters*. 2010, roč. 39, č. 1, s. 71-79. ISSN 1023-8883. DOI: 10.1007/s11249-010-9575-7. Dostupné z: <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s11249-010-9575-7>
- [10] NOSKIEVIČ, Jaromír et al. *Mechanika tekutin*. Praha: SNTL, 1987.
- [11] Hydraulic Oil Supplier, Hydraulic Oil, Base Oil, Performance Oil. *VISCO MARKETING* [online]. 2009-2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.enerplus.com.my/industry-hydraulicoil.html>

- [12] KOŠŤÁL, D. *Studium utváření mazacích filmů za podmínek nedostatečného zásobování kontaktu mazivem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 74 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Ivan Křupka, Ph.D.
- [13] *Alcomex Spring Works: pružiny-katalogové i na míru* [online]. 2007 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: <http://www.alcomex.cz/Katalog/katalog.php>
- [14] Nerezové plechy | NOVEL. NOVEL, s.r.o. *Nerez NOVEL | nerezové materiály* [online]. 2011 [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.novel.sk/nerezove-materialy/>
- [15] MITUTOYO Česko. *Ruční měřidla*. [online]. s.142-169. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: <http://www.mitutoyo.cz/pdf/katalog/cz/Rucni-meridla.pdf>
- [16] T.E.A. TECHNIK. *Kuličková pouzdra LME uzavřená*. [online]. 2007. [cit. 2012-05-21]. Dostupné z: http://www.teatechnik.cz/download.php?file=doc/Kuli%C4%8Dkov%C3%A1_pouzdra_LME.pdf
- [17] SVOBODA, Pavel, Ján BRANDEJS, Jiří DVOŘÁČEK a František PROKEŠ. *Základy konstruování*. třetí, upravené a doplněné. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2009. ISBN 978-80-7204-633-1.
- [18] SVOBODA, Pavel. *Výběr z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 3. Brno: CERM, 2009, 223 s. ISBN 978-80-7204-636-2.
- [19] LEINVEBER, Jan a Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky: pomocná učebnice pro školy technického zaměření*. 4., dopl. vyd. Úvaly: Albra, 2008, 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.

**10 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV
A VELIČÍN**

h	(mm)	- minimálny zdvih klinového mechanizmu
h_0	(mm)	- minimálna hrúbka mazacieho filmu
h_1	(mm)	- hrúbka mazacieho filmu na vstupe do klinovej medzery
i		- prevodový pomer klinového mechanizmu
$p(x)$	(Pa)	- závislosť tlaku v klinovej medzere na premennej x
x	(mm)	- delenie stupnice mikrometrickej hlavice 110-106
x_0	(mm)	- vzdialenosť výstupu z klinovej medzery od počiatku súradného systému
x_1	(mm)	- vzdialenosť vstupu z klinovej medzery od počiatku súradného systému
y	(mm)	- delenie stupnice mikrometrickej hlavice 148-104
z	(mm)	- minimálny vertikálny posuv
B	(mm)	- šírka segmentu
F	(N)	- sila prenášaná mazacím filmom
L	(mm)	- dĺžka ramena nastavovacej platne
Q	(mm ³ ·s ⁻¹)	- prietok maziva klinovou medzerou
U	(mm·s ⁻¹)	- relatívna rýchlosť klzných plôch
α	(°)	- uhol sklonu segmentu
γ	(°)	- uhol sklonu plochy segmentu
η	(Pa·s)	- dynamická viskozita
$\nu_{20^\circ\text{C}}$	(mm ² ·s ⁻¹)	- kinematická viskozita pri 20°C
$\nu_{40^\circ\text{C}}$	(mm ² ·s ⁻¹)	- kinematická viskozita pri 40°C
ρ	(kg·m ⁻³)	- hustota

Indexy 2, 5 a 10 sa vzťahujú k rýchlostiam 2, 5 a 10 mm·s⁻¹

11 ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

11.1 Zoznam obrázkov

- Obr. 1-1** Axiálne segmentové ložisko s naklápajúcimi sa segmentmi
- Obr. 1-2** Axiálne segmentové ložisko s pevnými segmentmi
- Obr. 1-3** Stribeckova krivka
- Obr. 2-1** Schéma testovacieho systému
- Obr. 2-2** Schéma pohonu testovacej hlavy
- Obr. 2-3** Celková časť testovacej hlavy
- Obr. 2-4** Schéma testovacieho zariadenia
- Obr. 2-5** Tri testovacie segmenty
- Obr. 2-6** Detail podpory a uchytenie segmentu
- Obr. 2-7** Usporiadanie hlavných častí zariadenia
- Obr. 2-8** Priečny rez zostavy jazdca a rotačného disku
- Obr. 3-1** Priebeh tlaku v hydrodynamickom axiálnom ložisku
- Obr. 3-2** Geometria klinovej medzery
- Obr. 3-3** Súčasné zariadenie na výskum EHD mazania
- Obr. 3-4** Popis častí súčasného simulátoru
- Obr. 5-1** Schéma meracieho zariadenia
- Obr. 5-2** Experimentálne zariadenie na výskum chovania bodového kontaktu (tzv. hladovění)
- Obr. 5-3** Časová os metodického prístupu
- Obr. 6-1** Schéma simulátoru
- Obr. 6-2** Varianta riešenia vertikálneho polohovača
- Obr. 6-3** Varianta č.1
- Obr. 6-4** Varianta č.2
- Obr. 6-5** Varianta č.3
- Obr. 7-1** Modifikácia existujúceho tribometru
- Obr. 7-2** Umiestnenie novej pripojovacej diery
- Obr. 7-3** Uhlový polohovač
- Obr. 7-4** Základné časti uhlového polohovača
- Obr. 7-5** Posuvná sústava
- Obr. 7-6** Naklápacia sústava
- Obr. 7-7** Vertikálny polohovač
- Obr. 7-8** Upevnenie plávajúceho segmentu

11.2 Zoznam grafov

- Graf 3-1** Priebehy tlaku pri v klinovej medzere pri rôznych klzných rýchlostiach

11.3 Zoznam tabuliek

- Tab. 7-1** Tabuľka parametrov skrutkových valcových pružín

12 ZOZNAM PRÍLOH**12.1 Technická dokumentácia**

A2-00-2012	ZOSTAVA SIMULÁTORU	VÝKRES ZOSTAVY
A1-00/01-2012	UHLOVÝ POLOHOVAČ	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-01/01-2012	LÔŽKO GULÔČKY	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-02/01-2012	PLATŇA	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-03/01-2012	DRŽIAK MIKROMETRU	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-04/01-2012	VODIACA DRÁŽKA 2	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-05/01-2012	KLIN	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-06/01-2012	POLOHOVACIA PLATŇA	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-07/01-2012	SEGMENT	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-08/01-2012	VAŇA	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-09/01-2012	VYPÚŠŤACIA REDUKCIA	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-10/01-2012	PRYŽOVÁ STIERKA	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-11/01-2012	PLECH	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-12/01-2012	DRÔT 12	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-13/01-2012	DRÔT 8	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-00/02-2012	VERTIKÁLNY POLOHOVAČ	VÝKRES ZOSTAVY
A3-01/02-2012	VODIACA DRÁŽKA	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-02/02-2012	SPODNÝ KLIN	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-03/02-2012	VRCHNÝ KLIN	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-04/02-2012	VZPERKA	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-05/02-2012	DRŽIAK PUZDRA	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-06/02-2012	PREDNÁ PRÍLOŽKA	VÝKRES SÚČIASTKY
A4-07/02-2012	ZADNÁ PRÍLOŽKA	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-00/03-2012	PLÁVAJÚCI SEGMENT	VÝKRES ZOSTAVY
A4-01/03-2012	PODLOŽKA VANIČKY	VÝKRES SÚČIASTKY
A3-02/03-2012	VANIČKA	VÝKRES SÚČIASTKY