



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTUKCE SIMULÁTORU AXIÁLNÍHO SEGMENTOVÉHO LOŽISKA

DESIGN OF AN AXIAL SEGMENT BEARING SIMULATOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JAN SEDLAČÍK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. PETR SVOBODA, Ph.D.

BRNO 2011

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2010/2011

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Jan Sedlačík

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

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

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

Konstrukce simulátoru axiálního segmentového ložiska

v anglickém jazyce:

Design of an axial segment bearing simulator

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem bakalářské práce je konstrukční návrh simulátoru axiálního segmentového ložiska s těmito parametry: velikost segmentu 18 x 18 mm, tloušťka segmentu 5 mm, průměr disku 150 mm, tloušťka disku 13 mm.

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 cílu 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 bakalářské práce: průvodní zpráva, technická dokumentace

Typ práce: konstrukční

Účel práce: pro V-V a tvůrčí činnost ÚK

Seznam odborné literatury:

S.B. Glavatskih, Tilting pad thrust bearings, In: D. Dowson, M. Priest, G. Dalmaz and A. A Lubrecht, Editor(s), Tribology and Interface Engineering Series, Elsevier, 2003, Volume 41, Tribological Research and Design for Engineering Systems, Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Pages 379-390, ISSN 0167-8922, ISBN 9780444512437, DOI: 10.1016/S0167-8922(03)80151-7.

Glavatskih, S B. "Laboratory research facility for testing hydrodynamic thrust bearings." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part J -- Journal of Engineering Tribology 216, no. 2 (April 15, 2002): 105-116. Academic Search Complete, EBSCOhost (accessed November 18, 2010).

Stahl, J, and B O Jacobson. "Design functions for hydrodynamic bearings." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part J -- Journal of Engineering Tribology 215.5 (2001): 405-416. Academic Search Complete. EBSCO. Web. 18 Nov. 2010.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/2011.

V Brně, dne 18.11.2010

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem simulátoru axiálního segmentového ložiska. Experimentální zařízení je navrženo pro studium tenkého mazacího filmu mezi segmentem axiálního ložiska a skleněným diskem. Snahou konstrukce je co nejvíce se přiblížit reálnému provozu ložiska. Použitím snímačů, způsobu zatěžování a mazání je zajištěna opakovatelnost podmínek experimentu. Práce obsahuje přehled zkonstruovaných zařízení a užitých metod měření, návrhy konstrukčních variant a popis navrhovaného zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

Experimentální zařízení, tloušťka mazacího filmu, axiální segmentové ložisko, optická interferometrie.

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with an engineering design of a hydrodynamic thrust bearing simulator. The experimental apparatus has been designed to study the oil-film thickness between the pad and the glass disc. The goal of this thesis is to approach real operating conditions. The repeatability of the experimental conditions is provided by using transducers, way of loading and lubrication. The bachelor thesis contains a summary of rigs designed and measuring methods used, designs of constructional variations and a description of the engineered apparatus are also included.

KEY WORDS

Experimental apparatus, oil-film thickness, hydrodynamic thrust bearing, optical interferometry.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma *Konstrukce simulátoru axiálního segmentového ložiska* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petra Svobody, Ph.D. a uvedl v seznamu všechny použité literární zdroje.

V Brně 20. května 2011

Vlastnoruční podpis autora

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za užitečné rady a odbornou pomoc při vypracovávání této bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za velkou podporu při psaní této práce.

OBSAH

OBSAH	11
ÚVOD	12
1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	13
1.1 Historie	13
1.1.1 Historie axiálních segmentových ložisek	13
1.1.2 Historie výzkumu axiálních segmentových ložisek	13
1.2 Axiálních segmentová ložiska	13
1.2.1 Axiální ložisko s naklápěcími segmenty	14
1.2.2 Axiální ložisko s pevnými segmenty.....	14
1.3 Faktory ovlivňující chování segmentu	15
1.3.1 Vliv polohy a tvaru podpěry	15
1.3.2 Vliv povrchu segmentu (kluzné dvojice).....	15
1.4 Mazání	16
1.4.1 Hydrostatické mazání	16
1.4.2 Hydrodynamické mazání	16
1.4.3 Hybridní mazání	18
1.5 Zařízení pro výzkum axiálních segmentových ložisek	19
1.5.1 Zkušební zařízení podle R. Bassani, E. Ciulli a P. Forte [10]	19
1.5.2 Zkušební zařízení podle G. K. Rightmire, V. Castelli, D. D. Fuller [12].	20
1.5.3 Zkušební zařízení podle S. B. Glavatskih [13]	21
1.6 Měření teploty	22
1.6.1 Vlepený termočlánek	22
1.6.2 Vlepený obtékaný termočlánek	23
1.6.3 Měření na vstupu a výstupu oleje ve spáře	24
1.7 Měření tloušťky olejového filmu	24
1.7.1 Optická interferometrie.....	24
1.7.2 Elektrické měření.....	25
2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A	
VÝVOJOVÁ ANALÝZA	26
3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE	27
4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ	28
5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY	29
5.1 Varianta č. 1.....	29
5.2 Varianta č.2.....	29
5.3 Varianta č. 3	30
5.4 Výběr optimální varianty.....	30
6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	32
6.1 Uložení kluzné dvojice	32
6.2 Vana, mazání a termo příslušenství.....	32
6.3 Polohování a naklápění segmentu	33
6.4 Zatěžování a tenzometr.....	34
6.5 Pohon, kluzná rychlost	35
7 ZÁVĚR	37
8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	38
9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN	40
10 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK	41
11 SEZNAM PŘÍLOH	42

ÚVOD

Existuje široké spektrum axiálních ložisek, která se liší nejenom pořizovacími náklady, ale i vlastními provozními vlastnostmi. Tyto parametry slouží jako měřítko při hodnocení ve stejných provozních podmínkách. Ložisko s naklápěcími segmenty je přímé řešení inženýrských aplikací Reynoldsovy rovnice hydrodynamického mazání. Vývoj numerických a experimentálních metod, výpočtové techniky dovoluje přesnější třírozměrnou analýzu provozu ložiska. Tyto možnosti berou v úvahu ztráty, které nejsou zvažovány v klasické teorii hydrodynamického mazání. Důkladnou analýzou ložiska v daných podmínkách se předchází chybám v návrhu. Nedílnou součástí analýzy jsou i experimenty simulující reálnou tribologickou soustavu. Důležitým aspektem životnosti a bezpečnosti ložiska je dostatečná tloušťka maziva v mezeře mezi segmentem a běhounem. Ke zjišťování tloušťky filmu a tvaru interferenčního obrazce je dnes jedna z nejpoužívanějších metod optická interferometrie.

Všech těchto prostředků bylo využito při vývoji axiálních ložisek od nejstaršího typu axiálního hřebenového ložiska. Toto ložisko však díky nedostatečnému přívodu maziva pracovalo za vysokých teplot a kvůli tomu i za malých středních tlaků na kluzných plochách [1]. Současná segmentová ložiska mají při zachování stejných pracovních podmínek několikanásobně menší rozměry a více než desetkrát větší únosnost.

Cílem práce je navrhnout zařízení, které simuluje chování axiálního segmentového ložiska, a to zejména pro lepší porozumění jeho chování za různých provozních podmínek.

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

1

1.1 Historie

1.1

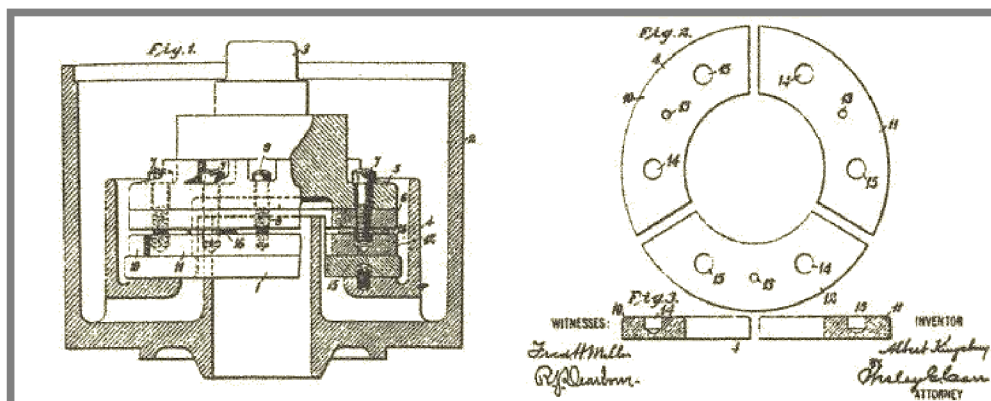
1.1.1 Historie axiálních segmentových ložisek

1.1.1

Základy teorie hydrodynamického mazání a experimenty s kluznými ložisky provedl jako první v roce 1883 Beauchamp-Tower [1]. První matematickou analýzu hydrodynamického mazání představil téhož roku N. P. Petrof [1]. Ucelenou teorii hydrodynamického mazání uveřejnil v r. 1886 Osbourne Reynolds [1].

První axiální ložisko s pevnými segmenty a s klínovou vrstvou maziva navrhli nezávisle na sobě A. G. M. Michell a A. Kingsbury [1]. A. G. M. Michell [1] si ho nechal v r. 1904 patentovat. Vývoj ložisek s pevnými segmenty a s naklápěcími segmenty probíhal současně. A. Kingsbury [2] již v r. 1898 navrhl a odzkoušel ložisko s naklápěcími segmenty a dal si ho v r. 1907 patentovat (obr. 1-1). Jeho první aplikace se datuje na rok 1912 v pensylvánské hydroelektrárně Holtwood, kde pracovalo po pětasedmdesát let bez výrazného opotřebení při zatížení 2,2 MN. Axiální ložisko s naklápěcími segmenty navrženo A. G. M. Michellem [3] bylo uvedeno do provozu v roce 1908. Ložisko bylo instalováno v odstředivém čerpadle a přenášelo zatížení 13,3 kN při 200 otáčkách za minutu.

Vývoj numerických metod a výpočetní techniky poskytly přesnou trojrozměrnou analýzu pracovních podmínek a díky tomu jsou moderní axiální ložiska schopna přenášet zatížení až do 60 MN [3].



Obr. 1-1 Patent kingsburyho ložiska [4]

1.1.2 Historie výzkumu axiálních segmentových ložisek

1.1.2

Experimentální výzkum axiálních segmentových ložisek byl poprvé uveden na začátku druhé poloviny minulého století. Jako první zveřejnil data a okolnosti svého výzkumu C. F. Kettleborough [5] v r. 1955. Dále ho až v roce 1968 následoval E. W. Hemingway a A. K. Tieu [5] v r. 1975. Jejich výzkum se týkal studie hydrodynamického olejového filmu a tření ložiska. J. W. Capitaio [5] r. 1976 a R. S. Gregory [5] v roce 1977 a 1979 věnovali svůj výzkum průtoku oleje a ztrátám výkonu určených z teplotní rovnováhy a teploty ložiska.

1.2 Axiálních segmentová ložiska

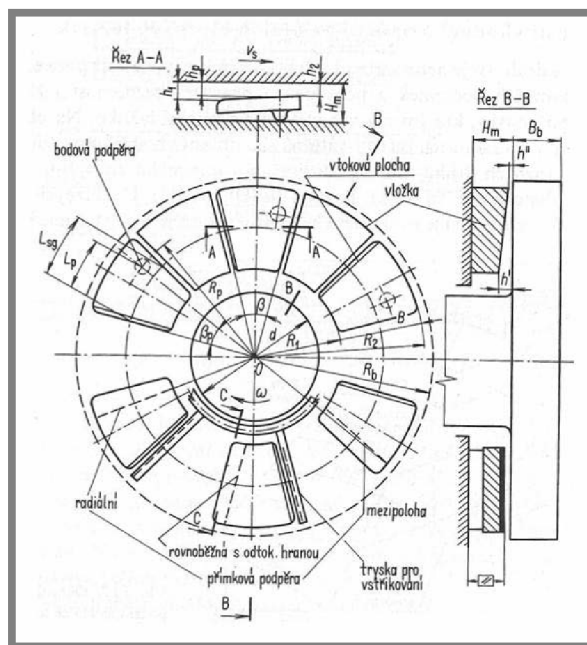
1.2

Axiální kluzná ložiska lze dělit podle několika hledisek. Základní veličinou bývá charakter a velikost zátěžné síly. Podle tohoto dělení může síla působit staticky nebo

dynamicky a v jednom nebo obou směrech. Jestli se jedná o stálý smysl zátěžné síly, můžeme použít ložisko jednostranné, při střídavém smyslu otáčení se používá ložisko oboustranné. Vzhledem ke smyslu otáčení v obou směrech mluvíme o tzv. reverzibilním ložisku. Podle podmínek a mazacího systému dále mluvíme o mazání hydrostatickém, hydrodynamickém a hybridním. Podle konstrukce se dělí na konstrukci s pevnými, plovoucími nebo naklápěcími segmenty.

1.2.1 Axiální ložisko s naklápěcími segmenty

Používají se při nestálých provozních podmínkách, hlavně při změně velikosti zátěžné síly. Vlivem působení různých zátěžných sil a rychlostí se segment samovolně naklápí a tak vzniká mezi kluznými plochami ideální vrstva maziva. Kluzná dvojice se skládá z dvou částí a to z vlastního ložiska a běhounu. Ložisko (obr. 1-2) je složeno z nosiče, podpěr a segmentů, případně trysek pro přívod oleje. Běhoun je „osazení“ hřídele.



Obr. 1-2 Schéma axiálního ložiska [1]

1.2.2 Axiální ložisko s pevnými segmenty

Ložisko je vyrobeno z jednoho kusu (obr. 1-3), segmenty mají konstantní sklon vůči kluzné ploše segmentu. Jsou vhodná pro určité, téměř neměnné provozní podmínky. Předpokládá se stejné zatížení všech segmentů ložiska. Obvykle rotuje běhoun a ložisko stojí, ale je možné opačné provedení, které se dá využít pro čerpání oleje. Výhodou je jejich poměrně jednoduchá konstrukce, výroba i montáž. Proto je i jejich cena v porovnání s ložiskem s naklápěcími segmenty menší [1].



Obr. 1-3 Ložisko s pevnými segmenty [6]

1.3 Faktory ovlivňující chování segmentu

1.3

1.3.1 Vliv polohy a tvaru podpěry

1.3.1

Únosnost segmentu závisí na poloze podpěry a na tvaru klínové vrstvy maziva. U ložisek pro jeden smysl otáčení je podpěra posunuta ve směru kluzného pohybu za osu segmentu a u ložisek pro oba směry otáčení je v ose segmentu [1]. Běžně se dnes používají dva druhy podpěr a to prahové, mnohdy ve tvaru části válce nebo kulová podpěra.

Podpěra tvaru prahu (obecně válcový) kolem kterého se segment naklání, může být radiální nebo rovnoběžná s odtokovou hranou nebo v mezipoloze. Nevýhodou podpory v radiální a v mezipoloze je různá tloušťka maziva na odtokové hraně [1]. Výhodou je však omezení radiálního průhybu, tudíž se nevyžaduje kalení.

Kulová nebo křížová poloha umožňuje naklápění segmentu nejen ve směru radiálním ale i v tangenciálním. Výhoda této podpěry je u velkých segmentů kde se může projevit vliv změny viskozity oleje při průtoku spárou, průhyb nebo tepelná deformace [1]. Kvůli velkým tlakům na podpěru se musí tyto segmenty kalit.

Podle dříve provedených výzkumů přeneseme segment nejvyšší zatížení, když je podpěra na 60 % vzdálenosti od vtokové hrany. Posunutí podpěry blíže k odtokové hraně vede k zesílení tloušťky mazacího filmu na náběžné hraně, což zabezpečí přítok většího množství chladnějšího oleje a tím i vyšší únosnost. Nejnižší teploty byly zjištěny při posunutí podpěry na 70 % a 80 %. Dále bylo také zjištěno, že minimální tloušťky mazacího filmu bylo dosaženo při poloze mezi 70-75 %. Optimální pozice podpory je tedy po zvážení všech aspektů na 65 % [3].

1.3.2 Vliv povrchu segmentu (kluzné dvojice)

1.3.2

Ložisková a bílá ocel byla objevena v r. 1839 Babbitem Issacem [3] a jsou to nejčastěji používané materiály při výrobě segmentů. Dále jsou používány slitiny cínu a olova, mají ale horší vlastnosti, které mohou být zlepšeny příměsí kadmia, niklu a chromu. Dalšími slitinami jsou slitiny hliníku a mědi. Nejvýhodnější je povrch s dobrými elastickými vlastnostmi a malou tepelnou vodivostí. Tímto materiálem je polytetrafluoroethylen (teflon). Teflon má malý koeficient tření, výbornou odolnost proti zadření a vysokou odolnost proti chemickým nečistotám a vlhkosti. Oproti oceli se u teflonu snížila nutnost údržby a prodloužila životnost. Jeho malá přilnavost sebou nese ale další problémy, a to jak ho připevnit k povrchu segmentu.

Hlavní kritéria pro posuzování těchto materiálů jsou odolnost proti zadíráání, geometrická přizpůsobitelnost, zatížitelnost, únavová pevnost, součinitel tření, korozivzdornost, otěruvzdornost a kavitační odolnost. Podle konkrétních případů přistupujeme k těmto podmínkám v rozdílném pořadí. Dále můžeme jmenovat ještě zabíravost, smáčivost mazivem, tvrdost, tepelnou vodivost a roztažnost, hustotu.

1.4 Mazání

Správné mazání ložiska má přímý vliv na jeho trvanlivost. Mazivo vytváří mezi kluznými plochami nosný mazací film, který brání vzájemnému styku třecích ploch. Použití vhodné mazací techniky a oleje vede k snížení teploty kluzné dvojice a ztrát. Taktéž správná teplota oleje je velmi důležitá pro provozní vlastnosti ložiska. Až 85 % ohřátého oleje vystupujícího z mezery předchozí vstupuje do následující [7]. Tento přenos se dá ovlivnit vhodným způsobem mazání. Pro každé podmínky se však hodí jiný typ ložiska a způsob mazání. Segmentová ložiska mohou být mazány hydrostaticky, hydrodynamicky nebo hybridně.

1.4.1 Hydrostatické mazání

U hydrostatického mazání je vrstva maziva vytvořena pomocí vysokotlakého čerpadla, které vtlačuje oleje mezi kluzné plochy. Pro toto mazání musí být v každém segmentu vytvořena hydrostatická komora. Vysokotlaký olej přivedený do komory nadzvedne běhoun a olej se protlačí mezi plochy.

1.4.2 Hydrodynamické mazání

Ložiska mazané hydrodynamicky projdou před dosažením podmínek nutných pro hydrodynamické mazání třemi fázemi. První je mezní mazání, to vzniká při rozběhu nebo doběhu stroje, při malé kluzné rychlosti. Při tomto režimu není mezi segmentem a běhounem vytvořena dostatečná tloušťka maziva. Dochází k přímému dotyku jak makrogeometrických, tak mikrogeometrických nerovností. Další fáze je smíšené mazání. Mazivo již zcela vyplnilo spáru mezi kluznými povrchy, ale ještě nemá dostatečnou tloušťku respektive únosnost. Stále ještě dochází k občasnému styku mezi plochami. Poslední režim je kapalínové mazání. U konformně zakřivených povrchů mluvíme o kapalínovém hydrodynamickém mazání. Mezi plochami je vytvořena dostatečná tloušťka maziva schopná přenášet zatížení [1].

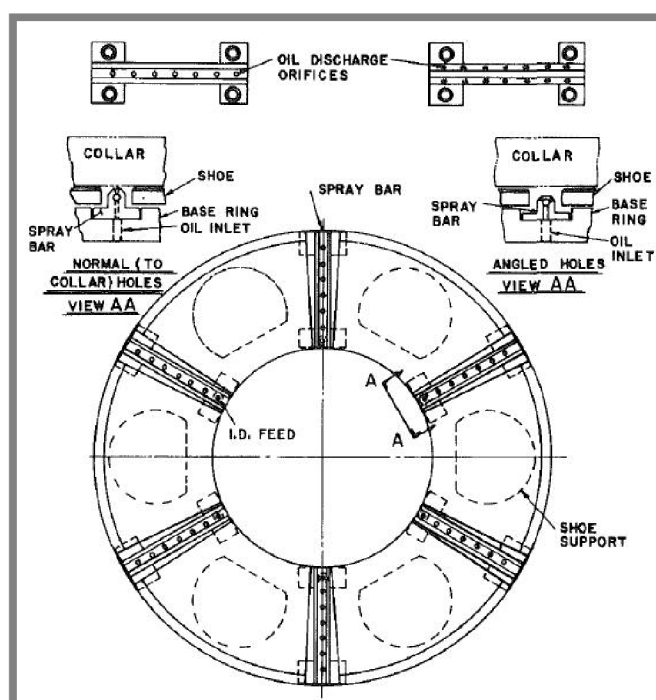
a) Zaplavení ložiska

Při tomto typu mazání je zaplavené celé ložisko včetně běhounu. Je to konvenčně používaná metoda, při níž protéká ložiskem přesně stanovené množství maziva. Ložisko se tedy v oleji brodí, tímto se zajišťuje i chlazení kluzné dvojice. Nevýhodou tohoto způsobu jsou velké ztráty vznikající při rotaci běhounu v oleji. Modifikace této metody je protékání ložiska. Olej vstupuje do uložení stejně jako u zaplavení, tzn. většinou axiálně kolem hřídele s tím rozdílem, že na vnějším obvodu je velký prostor pro odstříknutý olej, který dále odtéká tangenciálním odpadem. Tím se snižují ztráty výkonu ložiska [1].

b) Mazání tryskami (Spray-feed)

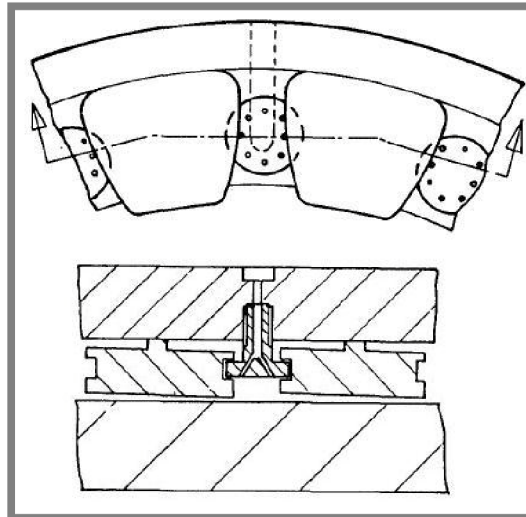
Tento systém se taky často nazývá přímé mazání. Olej je dopravován (vstřikován) na běhoun pomocí vhodných trysek umístěných mezi segmenty (obr. 4). Takto je olej vstřikován do bezprostřední blízkosti vtokové hrany. Díky tomuto systému se snižují

množství oleje potřebného pro mazání [8]. Kvůli horkému oleji ulpívajícímu na běhounu a tak následnému přenášení tepla na další segment se občas používají stěrky, které jsou umístěny za odtokovou hranou. Toto zařízení však vyžadovalo přesnost v řádech mikrometrů, což z důvodů axiálního házení, případným tepelným a tlakovým deformacím bylo nevhodné pro velké ložiska [1]. Tohoto efektu, odstranění zbytkového oleje, se u trysek využívá. Buď je proud oleje dostatečný a sám smyje horký olej nebo se použijí dvě paralelní trysky (viz obr. 4 nahoře) tak, že první tryska smyje horký olej a druhá nanese další olej. Takže horký olej se dvakrát po sobě míchá s olejem chladným.



Obr. 1-4 Umístění mazacích trysek v ložisku [8]

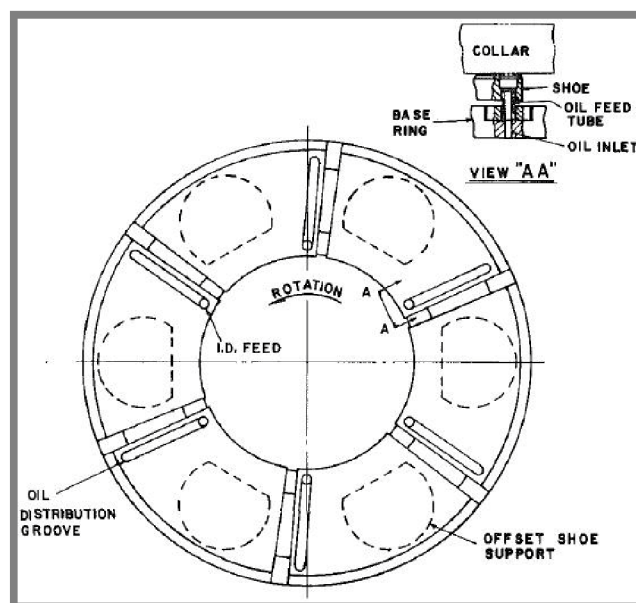
Tento způsob dvojího nanášení používá tryska od společnosti Glacier (obr. 1-5). Díky její konstrukci je vyřešeno upnutí segmentů a zároveň zabezpečeno mazání. Tato tryska je v podstatě dutý šroub s tryskami v deštníkovitém uspořádání [9]. Trysky rozmístěny do kruhu zároveň smývají teplý olej z předešlého segmentu a dodávají mazivo dalšímu. Snížením teploty je taky dosaženo nižších ztrát výkonu. Nevýhoda přímého mazání je velmi rychlé poškození kluzných ploch v případě poruchy mazání [1].



Obr. 1-5 Tryska Glacier [9]

c) Mazání pomocí drážky na vtokové hraně (Leading Edge Groove (LEG))

Na rozdíl od přímého mazání, kde je olej vstřikován mezi segmenty tato metoda přivádí chladný olej přímo do mezery mezi povrchem segmentu a běhounu (obr. 1-6). Drážka je umístěna na prodloužené vtokové hraně. Olej je do drážky vtačován přítokem na vnitřním nebo na vnějším obvodu ložiska. Tento typ mazání se používá pouze u ložiska pro jeden smysl otáčení. Ložisko vybavené tímto mazacím systémem pracuje s menším množstvím oleje. LEG taky snižuje ztráty a zvyšuje únosnost ložiska. V případě poruchy mazacího systému je ložisko ještě dostatečně dlouho zásobeno olejem z drážky.



Obr. 1-6 Ložisko mazané metodou LEG [8]

1.4.3 Hybridní mazání

U hybridního mazání kombinujeme hydrostatické a dynamické mazání. Hydrostatické se používá u rozběhu a zastavování stroje, kdy se netvoří samovolně

potřebná tloušťka maziva. Jakmile vzniknou podmínky pro hydrodynamické mazání, odstaví se hydrostatické čerpadlo.

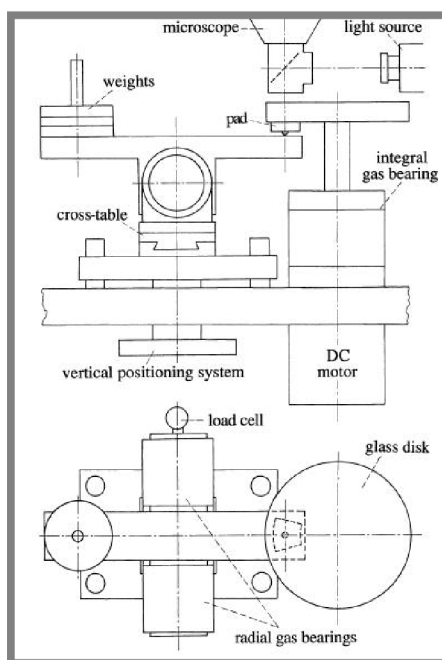
1.5 Zařízení pro výzkum axiálních segmentových ložisek

1.5.1 Zkušební zařízení podle R. Bassani, E. Ciulli a P. Forte [10]

Pro zkoumání segmentů axiálního ložiska použili R. Bassani, E. Ciulli a P. Forte [10] zařízení podobné tomu, které požívali již dříve pro výzkum bodového kontaktu [11] pouze s několika změnami (obr. 1-7). Skleněný disk, jehož úkolem je simulace běhounu, je k motoru připojen přímo. Elektromotor umožňuje plynulou regulaci otáček od 0 do 3000 ot/min. Zatížení segmentu je aplikováno jednoduše přes páku přidáváním závaží. Jelikož se jedná o konformně zakřivený povrch, zatížení se pohybuje v mezích od 10 N do 80 N. Při experimentech na tomto zkušebním zařízení byla měřena třecí síla pomocí momentového snímače. Páka se segmentem je umístěna na křížovém stole s mikrometrickým polohováním ve všech třech směrech. Boční posuvy slouží pro přesné nastavení pozorované oblasti a vertikální posuv je pro nastavení přesné vzdálenosti (mezery) mezi diskem a segmentem (vzorkem). V reálném axiálním ložisku mluvíme o této vzdálenosti jako o axiální vůli.

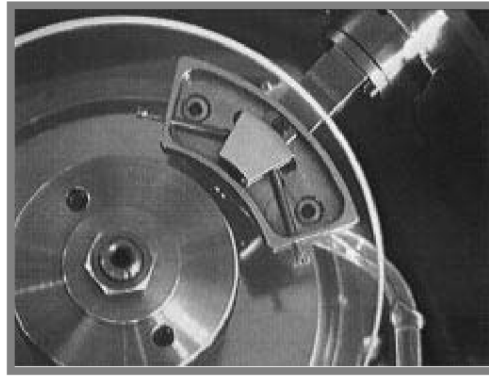
1.5

1.5.1



Obr. 1-7 Schéma zařízení [10]

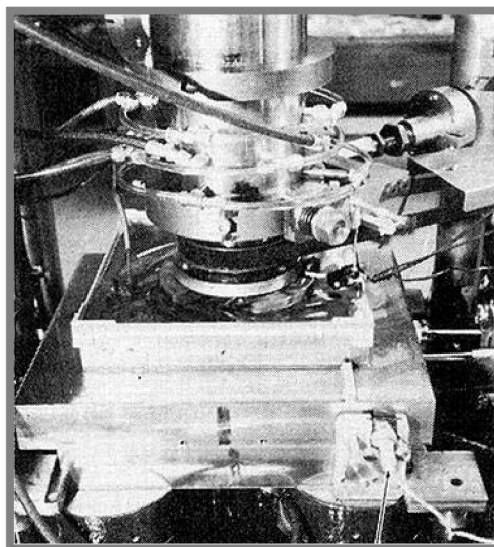
Olej je do vany (obr. 1-8) přiváděn pomocí potrubí připojeného ke dnu. Jeho teplota je měřena přímo ve vaně a to dvěma termočládky. Segmenty jsou ve vaně uchyceny pomocí dvou šroubů. Na segmentech jsou po stranách vyfrézované drážky, aby se mohly volně naklánět.



Obr. 1-8 Detail vany se segmentem [10]

1.5.2 Zkušební zařízení podle G. K. Rightmire, V. Castelli, D. D. Fuller [12]

Experimentální zařízení na zjišťování tloušťky mazacího filmu a tlakového profilu na segmentu axiálního ložiska zkonstruoval kolektiv G. K. Rightmire, V. Castelli, D. D. Fuller [12]. Měřené a následně publikované hodnoty byly zjištěny pro široký interval zatížení, rychlostí a pozic podpory segmentu. Testovací zařízení je v podstatě lis (obr. 1-9). Testovací stůl je složen z tří desek, z nichž jsou dvě pohyblivé v obou kolmých směrech vůči ose otáčení. Hlava (nosič) se segmenty je sešroubována dohromady s řemenicí a nasunuta na ose. Osa je součástí hydraulického pístu, který slouží k zatěžování. Hlava je tlačena proti bronzové desce. Ve vrchní bronzové desce jsou namontovány kapacitní sondy a tlakový snímač ve vzdálenosti 19,1 mm od sebe. Spodní pevná deska je položena na čtyřech nohách a od střední desky je oddělena vrstvou oleje. Skrz čtyři vtoky je mezi deskami vytvořena vrstva vysokotlakého oleje o tloušťce 0,2 mm. Desky se vzhledem k další pohybuji kolmo díky drážkám. Toto uložení zabezpečuje přesné polohování senzorů vůči segmentům a tak zjistit hodnoty pro celý povrch, také měřit třecí moment. Hlava se segmenty je poháněna přes řemen stejnosměrným motorem s plynulým řízením otáček.



Obr. 1-9 Experimentální zařízení [12]

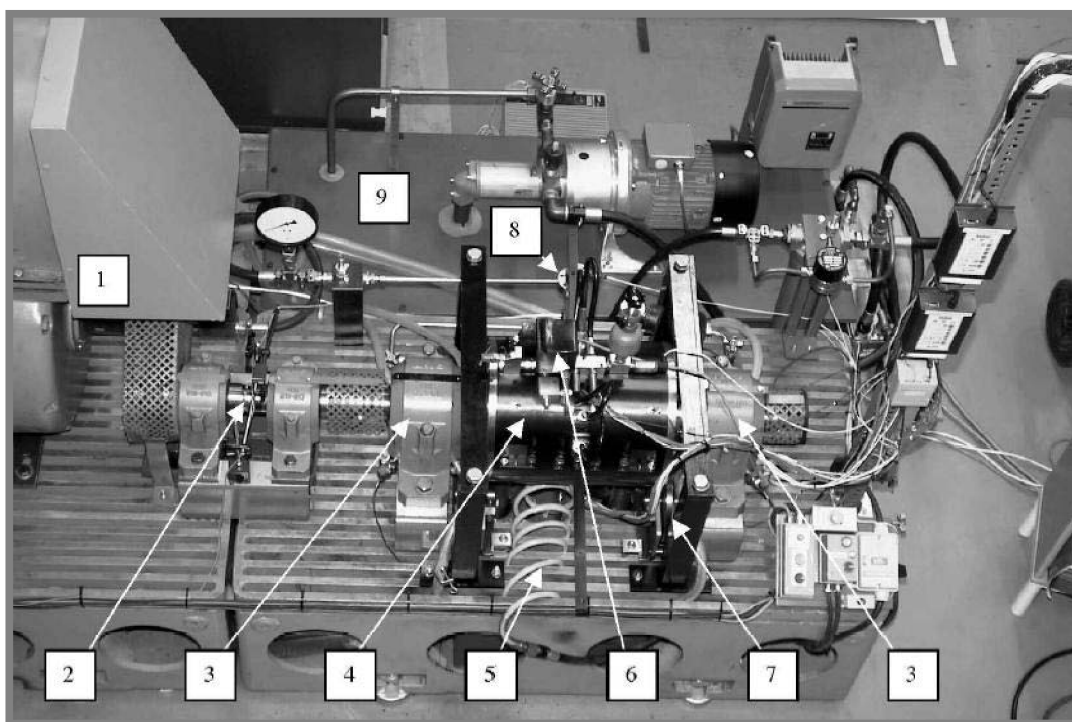
Po kalibraci pomocí mikrometrického zařízení byla kapacitní sonda schopna měřit přesné hodnoty v rozsahu 0 až 0,64 mm. Kapacitní sonda i tlakový snímač byli jako i u dalších zařízení mírně pod povrchem kluzné desky, aby nedošlo k jejich poškození. Tlakový snímač byl také překryt malou vrstvou gumy.

Vzhledem ke konstrukci zařízení a způsobům zjišťování měřených hodnot je tento směr pro vyvíjené zařízení nevhodný.

1.5.3 Zkušební zařízení podle S. B. Glavatskih [13]

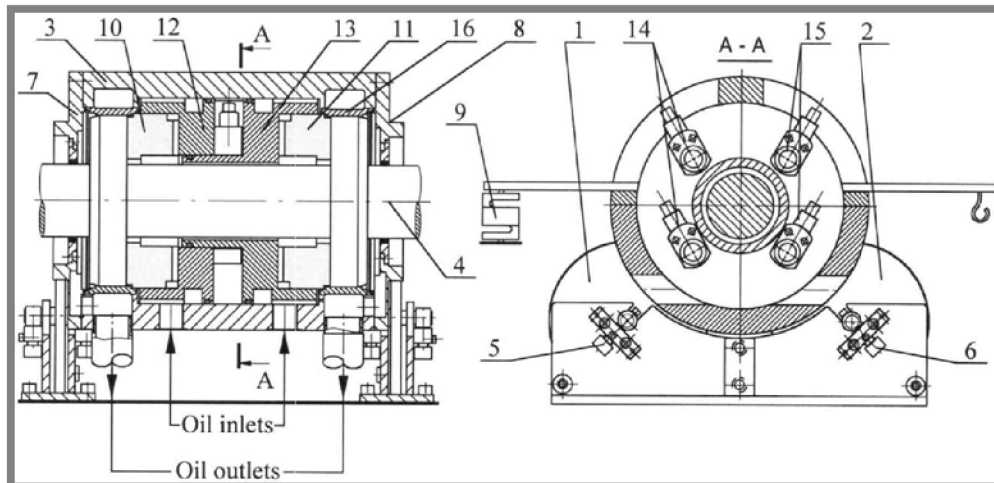
1.5.3

Další typ zkušebního zařízení pro axiální ložiska použil S. B. Glavatskih [13]. Toto zařízení je složeno z dvou identických axiálních ložisek k sobě obrácených zády (obr. 1-10). Každá ložisko pracuje se svým běhounem. Výhodou tohoto uložení je i to, že axiální síly působí pouze v domku mezi zkoumanými ložisky. Osa je uložena horizontálně na běžných radiálních ložiscích a poháněna přes řemenici elektromotorem. Maximální otáčky jsou tedy 1800 ot/min. Zatížení je vytvářeno pomocí čtyř pneumatických pístů. Písty jsou umístěny mezi ložisky, tlak je v nich vyvinut pomocí pumpičky a během testu je stále udržován. Maximální zatížení je 200 kN, což odpovídá 7,6 MPa na každé testované ložisko. Soustava obsahuje dva olejové systémy. První vysokotlaký pro hydrostatická radiální kuličková ložiska a druhý pro axiální ložiska.



Obr. 1-10 Experimentální zařízení [13]

1-motor, 2-hřídel, 3-radiální ložisko, 4-domeček s testovaným ložiskem, 5-přívodní hadice maziva, 6-hydraulický systém, 7-držák domečku, 8-váha, 9-olejový zásobník.



Obr. 1-11 Řez experimentálním zařízením [13]

3-tělo zařízení, 9-váha, 10,11-testovaná ložiska, 12,13-domečky, 14,15-pneumatické písty

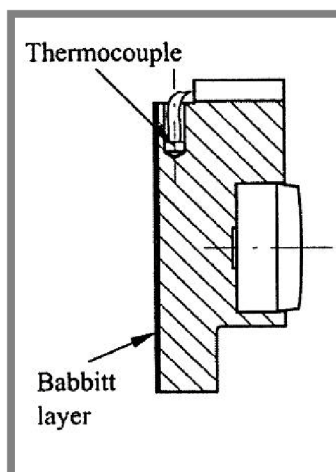
Hlavními parametry měřené při testech jsou ztráty, maximální teplota a tloušťka olejového filmu. Odhad ztrát byl měřen (vypočítán) pomocí třecího momentu, který se zjistí pomocí siloměru 9 připojeného k tělu zařízení 3 (obr. 1-11). Nebyla zde použita kalorimetrická technika, která je při výpočtu ztrát mnohem běžnější. Měření teploty a tloušťky filmu bude popsáno dále.

1.6 Měření teploty

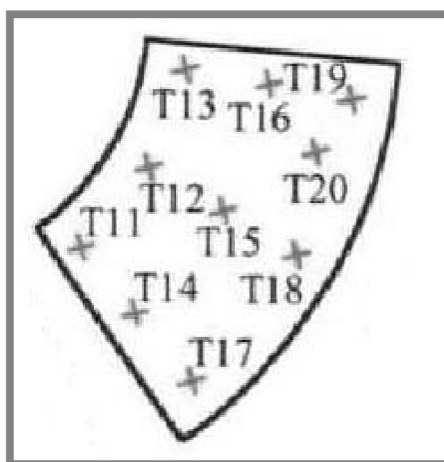
Teplota je základní limitující faktor pro bezpečný provoz ložiska. Měření teploty může být prováděno relativně snadno, ale může být také velmi nepřesné díky špatně zvolené metodě nebo umístění a instalaci senzoru [14]. Existuje mnoho druhů teplotních senzorů v různých velikostech. Při laboratorních testech jsou kladeny na tyto senzory vysoké nároky, jako jsou vysoká citlivost a přesnost.

1.6.1 Vlepený termočlánek

Měření teploty v segmentu prováděné pomocí termočláneků vlepených ve vyvrtaných dírách v segmentu. Termočlánek je asi tři milimetry pod povrchem (obr. 1-12), aby při zatížení nedošlo porušení celistvosti segmentu. Při testech provedených S. B. Glavatskym [13] byly segmenty vybaveny deseti termočláneky (obr. 1-13). Devět z nich jsou rozmístěny pravidelně po celé ploše segmentu pro zjištění tepelného obrazce a desátý je na pozici 75/75. Poloha 75/75 je standardní průmyslová poloha pro měření teploty; je definovaná na ploše segmentu jako 75 % vzdálenosti od vtokové hrany a 75 % vzdálenosti od vnitřního rádiusu [15].



Obr. 1-12 Vlepený termočlánek v segmentu [13]



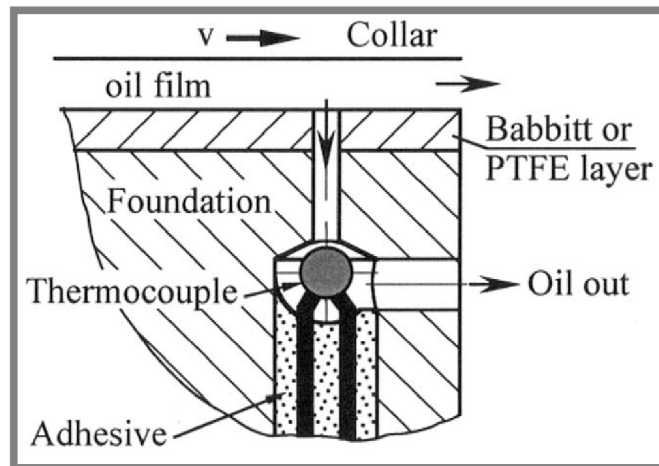
Obr. 1-13 Rozmístění termočláneků [13]

Teplota měřená termočlánekem v těle segmentu je nižší než teplota oleje. Odezva v měření je proto větší z důvodu teplotního zpoždění. Z tohoto důvodu nelze tato metoda použít při měření v teplotně proměnném módu. Situace je dále zhoršená, když na plochu segmentu použít materiál s nízkou tepelnou vodivostí např. teflon [14].

1.6.2 Vlepený obtékaný termočlánek

Nejvyšší citlivost a přesnosti měření teploty oleje mezi segmentem a běhounem je dosaženo tehdy, když je špička termočlánek v přímém kontaktu s horkým olejem z filmu. Termočlánek je vlepen do segmentu, tak aby byl v kontaktu pouze s horkým olejem. Olej vstupuje do prostoru malým otvorem o průměru 0,5 mm v kluzné ploše (obr. 1-14). Díky malé díře není také ovlivněna celistvost, jak je tomu u vlepených termočláneků. Poloha díry se při provedeném testu blížila poloze 75/75 [14].

1.6.2



Obr. 1-14 Umístění termočláčku obtékaného olejem [14]

Pro měření teploty běhounu a hřídele se ukázalo jako nejlepší použít termistory. Jsou vlepeny asi 1,5 mm pod povrchem teplo vodivým lepidlem. Termistory jsou preferovány před termočládky díky menším rozměrům, rychlejší odezvě a nízké ceně.

1.6.3 Měření na vstupu a výstupu oleje ve spáře

Měření teploty oleje vtékajícího a odtékajícího do a z mezery mezi segmenty a běhounem je nejjednodušší. Teplota vtékajícího oleje je měřitelná relativně přesně, protože olej není tepelně namáhán. Teplota vytékajícího oleje je v případě ustálených podmínek měřena taky přesně, ale při zkoumání přechodových jevů je měření nepřesné, díky pomalé odezvě termočládku a změnám teploty oleje. Hodnoty měřené za konstantních podmínek jsou využívány spíše pro určení ztrát pomocí kalorimetrické techniky.

1.7 Měření tloušťky olejového filmu

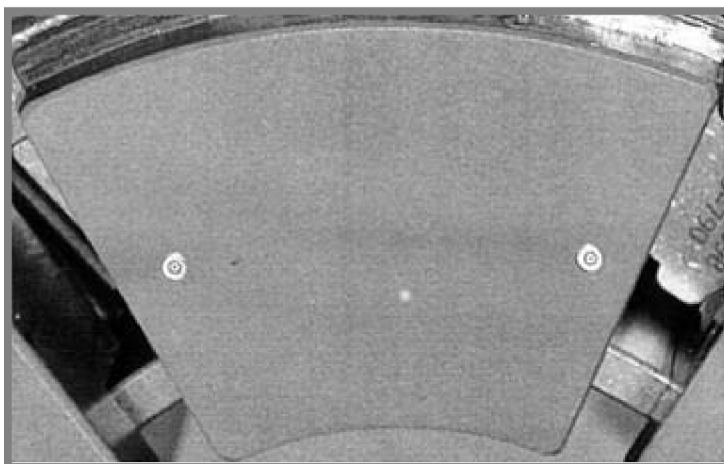
Metody pro zjišťování tloušťky filmu můžeme klasifikovat do čtyř tříd. První třída jsou elektrické, ve kterých se využívá odporového, kapacitního nebo indukčního měření. Další třídou je rentgenové měření. Následuje zjišťování mechanické, kam řadíme napěťová měřidla nebo dynamometry. A jako poslední je třída optická. Do této třídy patří interferometrie, laserová difrakce a fluorescence. Optická interferometrie je jedna z nejpoužívanějších technik pro její schopnost dát přesné hodnoty a detailní vyhodnocení tloušťky filmu v celé kontaktní ploše [11].

1.7.1 Optická interferometrie

Pro zjišťování interferenčního obrazce se používají dva druhy světla, a to bílé nebo monochromatické. Při použití bílého světla je výsledný obraz kvalitnější, ale na druhé straně nedá zjistit tloušťka větší než $\lambda/4$. Monochromatické světlo získané pomocí laseru nebo bílého světla s interferenčním filtrem dovoluje měření až do několika mikrometrů. Každé barvě interferogramu odpovídá určitá hodnota tloušťky mazacího filmu. Interferogram je následně vyhodnocen pomocí kalibrační tabulky.

1.7.2 Elektrické měření

Měření pomocí kapacitních senzorů, které jsou umístěny poblíž vtokové a odtokové hrany na středním průměru ložiska v zařízení S. B. Glavatskiho [13]. Tyto senzory mají závit M4 a jejich špičky jsou mírně zapuštěny pod povrchem ložiska (minimálně 0,01 mm) (obr. 1-15). Je to proto, aby nedošlo ke kontaktu mezi senzorem a běhounem a případnému zničení.



Obr. 1-15 Umístění senzorů tloušťky filmu na povrchu segmentu [15]

Měření pomocí indukčních senzorů je provedeno podobně jako u kapacitních. Senzory jsou zalepeny 0,5 mm pod povrchem ložiska. Špička je od vodivého materiálu segmentu oddělena nevodivým lepidlem aby nedošlo k rušení magnetického pole senzoru. Narušení magnetického pole by mělo za následek menší rozsah [15].

2 FORMULACE ŘEŠENÉHO PROBLÉMU A JEHO TECHNICKÁ A VÝVOJOVÁ ANALÝZA

Zařízení pro experimentální výzkum axiálních segmentových ložisek se skládá z dvou hlavních částí, a to z mechanické části tzn. simulátoru a části optické. Pomocí simulátoru navodíme mezi skleněným diskem a zkušebním vzorkem (segmentem) podmínky co nejvíce podobné reálným provozním podmínkám axiálního segmentového ložiska. Za pomoci optické části budeme pozorovat olejovou vrstvu vzniklou v mezeře mezi diskem a segmentem a následně vyhodnocovat pořízené interferogramy.

1. Kluzná dvojice

Ve zkušebních zařízeních se používají jako vzorky buď celá ložiska, nebo samostatné segmenty. Podle použité konstrukce tvoří vzorky kontakt s různými druhy běhounů. Běhouny se liší podle zkoumaných veličin a taky druhů použitých sond a senzorů. Ocelový disk [13], popřípadě ocelová deska [12] se používají při měření pomocí elektrických sond. V těchto případech je vzorek upnut v domečku. Všechny veličiny, jako jsou tloušťka olejového filmu, teplota segmentu, teplota oleje, rozložení tlaku na segmentu a třecí síla, jsou měřeny pomocí elektrických a mechanických sond a senzorů. Data jsou vyhodnoceny pomocí vhodného softwaru. Dalším typem běhounu je skleněný disk [10]. U konstrukce tohoto typu je kontakt vzorku a disku sledován pomocí optické soustavy. Zde se k určení tloušťky olejového filmu používá optická interferometrie. Senzory a sondy užití u těchto zařízení slouží především k nastavení parametrů experimentu.

2. Zatěžování

Vhodný způsob zatěžování je důležitý především pro konstrukční návrh. Běžně použitý typem je mechanické zatěžování tzn. pákový mechanismus [10]. Vzorek je umístěn na jedné straně a na druhé straně je závaží. Dále se dá použít pneumatický způsob [13], a to pomocí jednoduchých pneumatických pístů, které působí proti sobě. Nebo se dá použít taky hydraulického zatěžování [12]. V tomto zařízení konstrukcí připomínalo lis. Rozsah zatížení je určen podle zkoumaného vzorku, tak aby se experimenty blížili co nejlíže reálné situaci.

3. Mazání

Aby nedošlo k opotřebení nebo poškození vzorku popřípadě běhounu je nutné použití vhodného mazacího způsobu. V případě použití celého ložiska se hodí jedna z konvenčních metod mazání popsanych v kapitole 1.4. Při použití pouze jednoho segmentu se jeví jako nejhodnější vložit vzorek do vany a přivádět olej do ní.

4. Pohon

Běžně se používají elektromotory s frekvenčními měniči pro regulaci otáček. Otáčky se pohybují v intervalu od 0 do 3000 za minutu. U testů ložisek pracujících při vysokých otáčkách se horní hranice intervalu pohybuje kolem 12000 otáček za minutu. Ve většině případů je poháněn běhoun (disk), jak je tomu i při běžném použití ložisek.

3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je navrhnout simulátor segmentu axiálního ložiska, který bude používán v tribologické laboratoři na Ústavu konstruování VUT v Brně. V zařízení bude používáno pro experimenty na segmentu o rozměrech 18x18 mm a výšce 5 mm. Segment bude v kontaktu se skleněným diskem o průměru 150 mm a tloušťce 13 mm. Ze zadání nevyplývají žádná zásadní omezení v konstrukci nebo v použitém zařízení. Nejdůležitějšími parametry zařízení jsou zajistit vhodný rozsah otáček a zvolit správný rozsah zatížení. Zatížení se bude pohybovat v rozmezí od 0 do 150 N, přičemž je vycházeno z maximální únosnosti zkušební vzorku. Důraz je nadále kladen na nastavitelnost polohy segmentu vůči disku a samozřejmě zjištění přívodu dostatečného množství oleje. Z ekonomického hlediska se návrh bude snažit využít široké vybavenosti laboratoře. V co největší míře se konstrukce bude skládat z již pořízených součástí a vybavení.

4 NÁVRH METODICKÉHO PŘÍSTUPU K ŘEŠENÍ

Návrh bude realizován na základě vědomostí nabytých při studiu na fakultě strojního inženýrství a ze studií již provedených na toto téma. Řešení musí korespondovat s cíli uvedenými v předchozí kapitole. Nejdůležitější je navrhnout zařízení, taky aby bylo co nejsnadněji možno nastavit parametry experimentu. Konstrukce bude vycházet z dosud používaných a navržených experimentálních zařízení. Hlavní prvky konstrukce budou vycházet ze zařízení, které použili R. Bassani, E. Ciulli a P. Forte [10], částečně bude konstrukce vycházet i z již používaného zařízení pro výzkum bodového kontaktu.

Konstrukce bude navržena v programu Autodesk Inventor Professional 2011. Výkres sestavy, kusovník a výrobní výkresy budou vytvořeny pomocí programu AutoCAD Mechanical 2011.

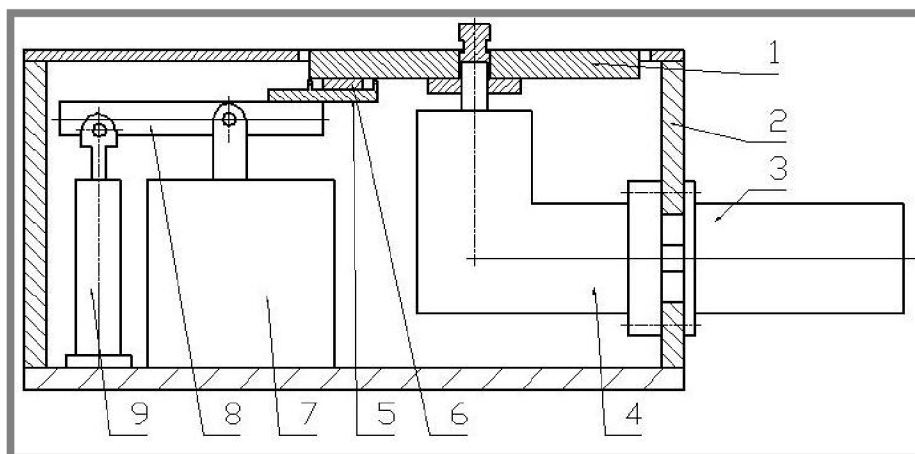
5 NÁVRH VARIANT ŘEŠENÍ A VÝBĚR OPTIMÁLNÍ VARIANTY

5

5.1 Varianta č. 1

5.1

Varianta č. 1 je schematicky zobrazena na obr. 5-1 a vychází z konstrukce [10]. Segment 6 je upevněn ve vaně 5 (navrhnutá vana vychází z použité u konstrukce [10] viz obr. 1-8) ta je přišroubována k páce 8. Zatěžování je vyvoláno pomocí pneumatického pístu, který je tlakován jednoduchou pumpičkou. Konstantní zatížení je sledováno pomocí manometru. Podobným způsobem byla zatěžována ložiska v experimentálním zařízení [13]. Disk 1 je poháněn pomocí servomotoru 3, na který je připojena převodovka 4 s pravouhlejším kolenem. Polohování segmentu je zajištěno pomocí dvou na sobě položených polohovacích mikrometrických stůlů 7. Jeden stůl slouží k nastavování axiální vůle mezi diskem a segmentem, druhý pak k naklápění segmentu v tangenciálním směru vůči disku. Celý mechanismus je vestavěn v krabici 2 a ta je připevněna k pracovnímu stolu pomocí dvou šroubů.



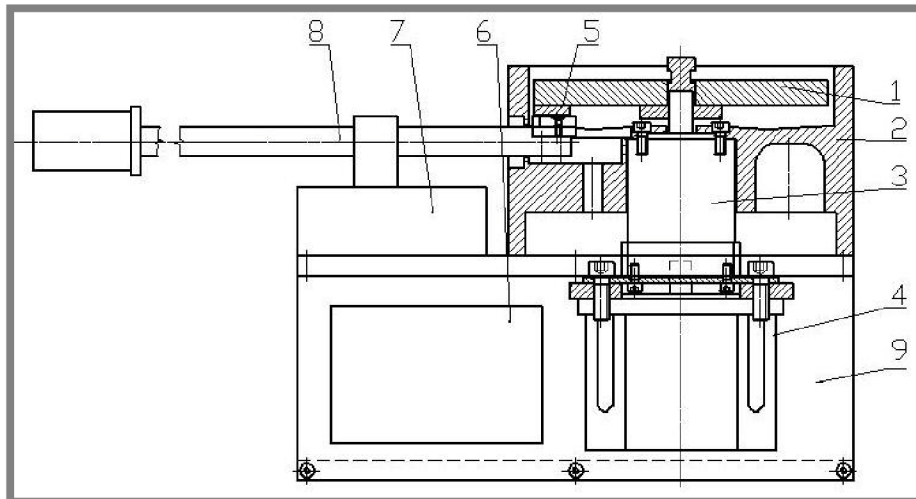
Obr. 5-1 Návrh varianty č. 1

1-skleněný disk, 2-krabice, 3-servomotor, 4-převodovka, 5-vana, 6-segment, 7-mikrometrický polohovací stůl, 8-páka, 9-pneumatický píst.

5.2 Varianta č. 2

5.2

Varianta č. 2 je schematicky zobrazena na obr. 5-2. Konstrukce opět vychází z konstrukce [10]. Zatížení mezi segmentem 5 a diskem 1 je vyvozeno přes páku 8. Charakter zatěžování je mechanický, pomocí ocelových kotoučů nasunutých na konci tyče. Různá zatížení jsou zde dosažena kalibrovanými kotouči. Mazací olej se do mezery mezi diskem a segmentem vstříkuje pomocí trysky. Olej je pumpován pomocí čerpadla 6 uloženého v základní krabici 9. Teplota soustavy je zajištěna díky vyfrézovanému kanálu ve vaně 2. Tato vana má již válcovitý tvar a páka se segmentem do ní vstupuje z boku dírou s těsněním. Pohon je zajištěn servomotorem 4 VUES F504-A s převodovkou 3. Kvůli různým roztečím děr je motor a převodovka spojena spojkou. Disk je na hřídel připevněn pomocí používaného unášeče. Polohování segmentu je zajištěno opět pomocí mikrometrického polohovacího stolu 7. U této konstrukce není umožněné tangenciální naklápění, takže lze simulovat pouze naklápěcí segment a ne pevný segment.

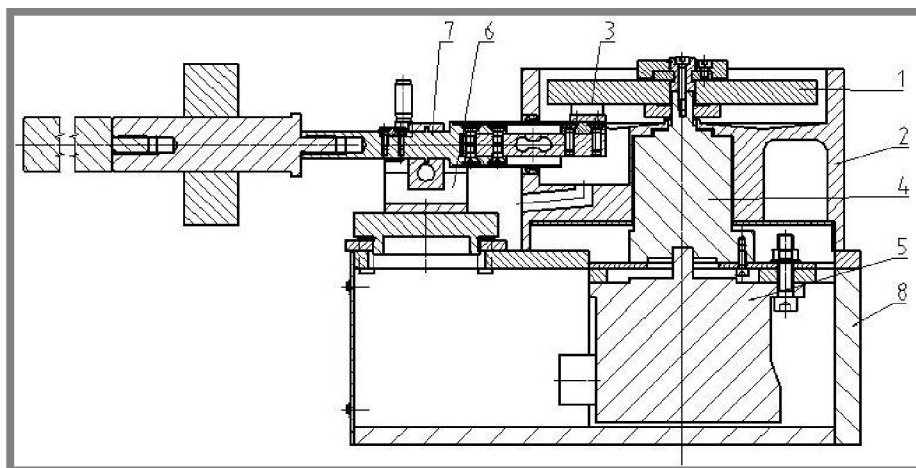


Obr. 5-2 Návrh varianty č. 2

1-skleněný disk, 2-vana, 3-převodovka, 4-motor, 5-segment, 6-čerpadlo, 7-polohovací mikrometrický stůl, 8-páka

5.3 Varianta č. 3

Varianta č. 3 je schematicky zobrazena na obr. 5-3. Konceptem toto zařízení vychází z již používaného simulátoru pro bodový kontakt. Mechanická část vychází ze zařízení [10]. Segment 3 je upevněn na sestavené páce 7. Tyč se skládá z několika částí včetně tenzometru k určování přesného zatížení mezi segmentem a diskem 1. Segment se nastavuje pomocí polohovacího stolu. Axiální vůle mezi segmentem a diskem se nastavuje pomocí matice s jemným závitem M60x1. Tangenciální natočení je zajištěno mechanismem s mikrometrickou hlavicí. Pohon disku je řešen jako ve variantě č. 2. V podstatě se jedná o upravenou konstrukci varianty č. 2.



Obr. 5-3 Návrh varianty č. 3

1-disk, 2-vana, 3-segment, 4-převodovka, 5-motor, 6-polohovací stůl, 7-páka, 8-základna

5.4 Výběr optimální varianty

Varianta č. 1 je konstrukčně nejjednodušší. Její největší nevýhodou je odkapávající olej z rotujícího disku. Taky použití pneumatického zatěžování není ideální řešení.

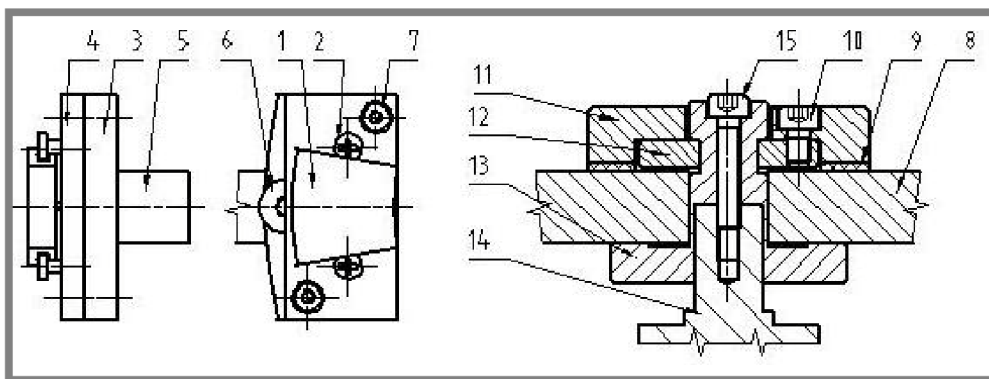
Konstrukce vany nedovoluje maximální využití šířky disku. Taky vzhledem ke změně motoru simulátoru není tato varianta použitelná. U varianty č. 2 byla navrhována válcová vana položená na základně. Základna je větších rozměrů kvůli uložení čerpadla pro mazání segmentu. Kvůli velkým rozměrům čerpadla však tato varianta taky nevyhovuje. Použití mikrometrického polohovacího stolu taky nepřichází v úvahu kvůli jeho malé nosnosti. Varianta č. 3 se jeví jako nejvhodnější. Obsluha a nastavování parametrů jsou jednoduché a využití šířky disk u je v maximální možné míře.

Kvůli jednoduchosti obsluhy a univerzálnosti simulování pevného i naklápěcího segmentu je volena varianta č. 3.

6 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

6.1 Uložení kluzné dvojice

Kluzná dvojice se skládá ze segmentu a skleněného disku (obr. 6-1). K uchycení segmentu využijeme způsob používaný v ložisku. Segment 1 je přišroubován dvěma šrouby 2. Hlava šroubu je vložena v drážkách na bocích segmentu. Drážka je širší než hlava šroubu takže se segment může samovolně naklánět na podpoře, tzn. přizpůsobovat svůj náklon zatížení a kluzné rychlosti. Segment je položen na dvou deskách 3 a 4. Deska 3 je přišroubovaná k tenzometru 5 dvěma šrouby 6 v ose páky. Deska 4 je přišroubovaná šrouby 7 k desce 3 mimo osu. Toto uložení zabezpečuje širokou variabilitu rozměrů testovaných segmentů. V případě simulování pevného segmentu vypodložíme segment tak aby se nemohl samovolně naklápět. Jeho naklápění budeme nastavovat pomocí mechanismu popsaného v kapitole 6.3. Disk 8 je k hřídeli převodovky 14 připevněn pomocí unášeče. Unášeč se skládá ze spodního dílu 13, který je přišroubován k hřídeli šroubem 15, následuje matice 12 a příložka 11. Aby disk v unášeči neprokluzoval je mezi příložkou a diskem pryžový kroužek 9. Vše se stáhne pomocí tří šroubů 10.



Obr. 6-1 Uložení kluzné dvojice

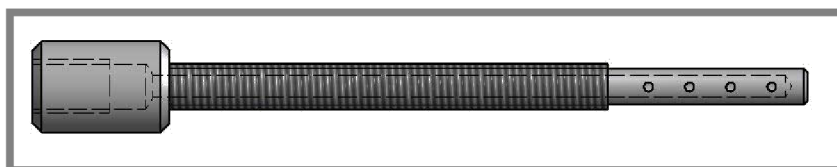
1-segment, 2-šroub segmentu, 3-spodní deska, 4-vrchní deska, 5-tenzometr, 6-šroub, 7- šroub, 8-disk, 9-pryžový kroužek, 10-šroub, 11-příložka, 12-matice, 13-unášeč, 14-hřídel, 15-šroub

6.2 Mazání, vana a termo příslušenství

a) Tryska

Při návrhu mazací techniky jsme vycházeli z používaných způsobů mazání. Konstrukce nám nedovoluje použití zaplavovacího způsobu z důvodu vytékání oleje z vany technologickými otvory. Abychom zajistili univerzálnost zařízení, je technologie LEG taky nepoužitelná. Nejvhodnější způsob mazání v simulátoru se jeví použití mazací trysky. Při návrhu trysky jsme vycházeli z provedených studií a směrnic pro výpočet ložisek [1]. Tryska je zobrazena na obr. 6-2. Na vstupu trysky je závit M6 pro našroubování běžného šroubení. Samotnou trysku tvoří čtyři díry o průměru 1 mm, rovnoměrně rozložené tak, aby zásobily segment olejem po celé jeho šířce. Podle výzkumu W. W. Gardnera [16] má objemový průtok maziva významný vliv na pracovní teplotu ložiska a ztráty. Typická tloušťka vrstvy maziva se pohybuje od 0,025 mm do 0,075 mm. Určení objemového průtoku maziva je značně komplikované. Samotný výpočet sebou nese spoustu neznámých, které se určují

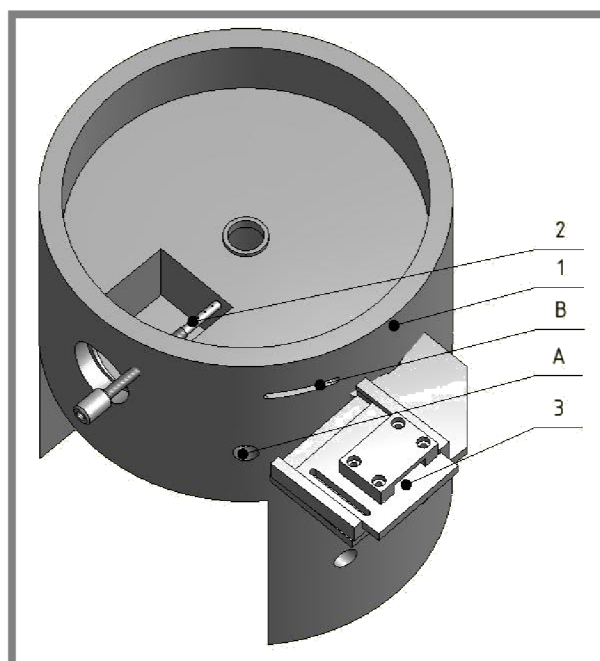
pouze pro celá ložiska. Důležité zjištění je, že množství maziva nemá přímý vliv na tloušťku olejového filmu, ta je ovlivněna především viskozitou a teplotou maziva podle studie S. B. Glavatskiho a S. DeCamillo [17]. Objemový průtok je tedy stanoven z dat studií. Průtok oleje je pro všechny rychlosti a zatížení konstantní. Přepočtem na 1 mm^2 je stanovený maximální průtok na $0,5 \text{ l/min}$. Čerpadlo bude umístěno samostatně mimo simulátor. Vzhledem k množství oleje bude nutno zajistit rezervoár s olejem.



Obr. 6-2 Tryska

b) Vana a termo příslušenství

Jednou z hlavních částí simulátoru je vana 1 (obr. 6-3). Tryska 2 přivádí do kluzné dvojice olej, který odtéká dírou ve dně. Pro temperaci celé soustavy je ve spodu vany vyfrézován temperanční kanál. Kanál je zaslepen dnem, které je k vaně přilepeno pomocí dvousložkového lepidla na kov. Vtok temperanční kapaliny je na obr. 6-3 označen jako A. Odtok je na průměru o 90 vlevo. Měření teploty je prováděno pomocí termočlánek. Termočlánek je připevněn k polohovací konzole 3. Sonda je do kontaktu vedena otvorem B.

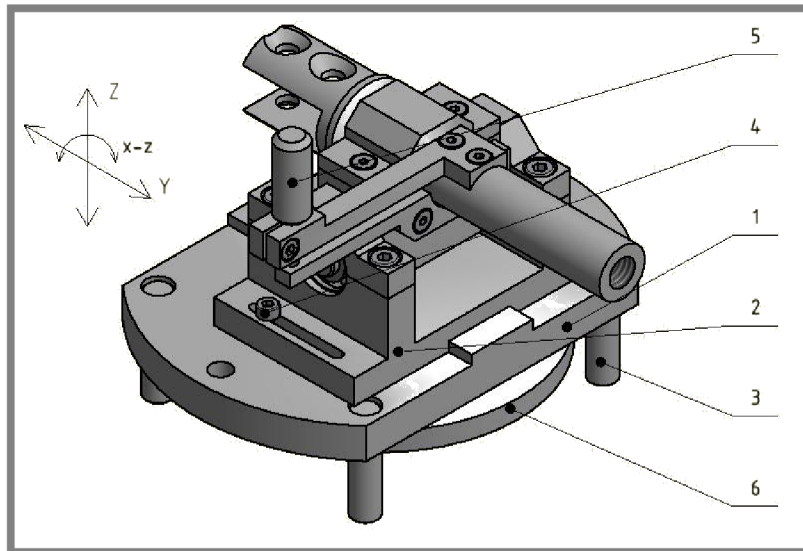


Obr. 6-3 Vana

6.3 Polohování a naklápění segmentu

Řešení posuvu je realizován pomocí jednoduchého posuvného mechanismu ve dvou osách. Vzhledem k velikosti zatížení, rozměrům simulátoru a pořizovací ceně bylo použití mikrometrických stolů a lineárního vedení nevhodné. Základem

polohovacího stolu je základní deska 1 se čtyřmi čepy 3 (obr. 6-4). Čepy zajišťují pouze jeden stupeň volnosti a to ve směru osy z. V tomto směru je jemné nastavení zajištěno maticí 6 se závitem M60x1. Pootočením matice o jeden stupeň základní deska stoupne (klesne) o 0,0028 mm. To zaručuje dostatečnou jemnost při nastavování axiální vůle. Základní deska polohovacího stolu je ještě pojištěna dvěma šrouby pro aretaci a zamezení chvění při testu. K posunutí ve směru osy y je použita přesná drážka na pojezdu 2. Toto vedení slouží k nastavení polohy segmentu vůči ose disku. Tento posuv zajistí využití plochy disku od maximálního průměru 150 mm do průměru 62 mm. K tomuto posuvu se vztahuje kluzná rychlost v kapitole 6.5.

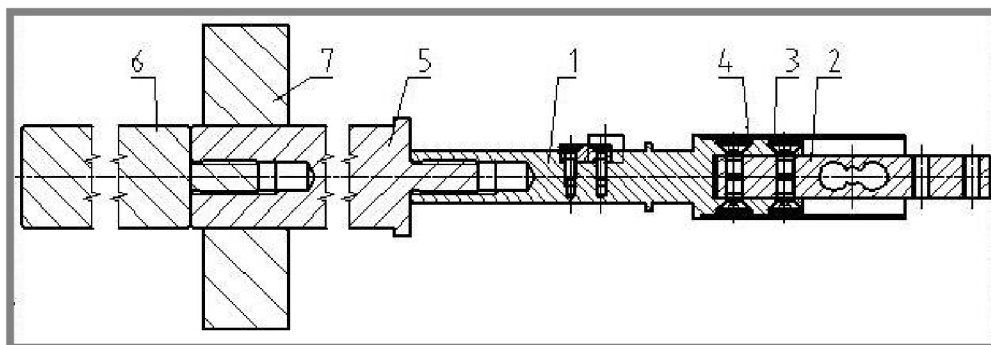


Obr. 6-4 Polohovací stůl

Naklápění segmentu je nutné k simulování pevného segmentu. Při simulaci naklápěcího segmentu je natočení páky nulové. Pro simulaci pevného segmentu se sklon segmentu nastaví pomocí mikrometrického mechanismu. Mikrometr 5 je pomocí držáku spojen s pákou. Osa páky je současně taky osou otáčení tohoto mechanismu. Sklony pevných segmentů se pohybují do 1°. Nastavení mikrometru na hodnotu 1 mm znamená natočení páky respektive plochy segmentu právě o 1°.

6.4 Zatěžování a tenzometr

Zatížení je aplikováno na kluznou dvojici pomocí dvojitě vratné páky (obr. 6-5). Na prvním konci je tenzometr 2 se segmentem a na druhém závaží 7. Páka je složena ze střední části 1, tyče na závaží 5 a prodloužení tyče 6. Tenzometr, typ DF2S-5 dodávaný firmou HBM, je přišroubován ke střední páce pomocí čtyřech šroubů 4. Čtyři šrouby jsou použity z pevnostního a konstrukčního hlediska, protože profil páky v oblasti spoje s tenzometrem je značně ztenčený. K páce je přilepena trubka 3. Tato konstrukce byla zvolena z důvodu utěsnění vstupu páky do vany. Tenzometr byl uložen tak, aby nedocházelo k chybě měřených hodnot na vstupu do vany vlivem kontaktu s těsněním a třením v ložiskovém domečku. Různou hodnotu zatížení dosáhneme posuvem závaží na tyči a případně přidáním dalšího kotouče.

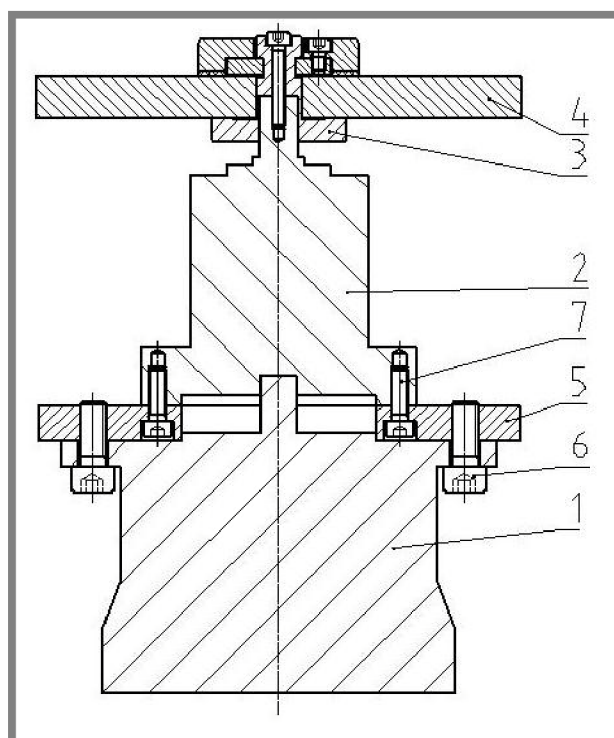


Obr. 6-5 Páka

6.5 Pohon, kluzná rychlost

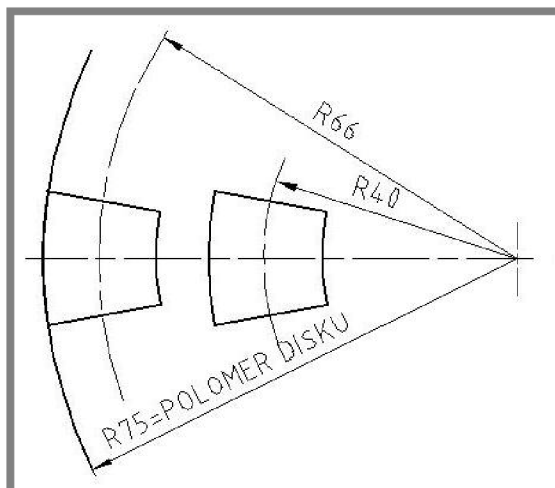
Pohon zajišťuje servomotor F504-A, který je spojen s převodovkou 2 pomocí spojky. Spojka 5 je nutná kvůli různým roztečím přírub na motoru a převodovce. Použitá převodovka má převodový stupeň 1:5, takže maximální otáčky disku jsou 600 za minutu. Motor 1 je ovládán frekvenčním měničem pro plynulé řízení otáček. Přímou na hřídel převodovky je přišroubován unášec 3 s diskem 4.

6.5



Obr. 6-6 Motor s převodovkou

Kluzná rychlost u segmentu se určuje pro střední průměr. Maximální kluzné rychlosti nastane, když je vnější hrana segmentu na úrovni vnější hrany disku. Vzhledem k možnosti polohování segmentu vůči ose otáčení disku, a to o 26 mm od vnější hrany segmentu, je na této poloze kluzná rychlost menší. Schéma poloměrů je na obr 6-7.



Obr. 6-7 Schéma poloměrů

Střední rychlost v třecích povrchů závislá na poloměru R při maximálních otáčkách $n=600$ ot/min.

$$v = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot n \text{ (m} \cdot \text{s}^{-1}\text{)}$$

kde:

π (1) je Ludolfovo číslo

R (mm) -střední poloměr

n (s⁻¹) -otáčky

v (m·s⁻¹) -rychlost

Tab. 6-1 Střední kluzná rychlost

R (mm)	v (m·s ⁻¹)
66	4,15
40	2,51

7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo navrhnout experimentální zařízení schopné simulovat axiální segmentové ložisko. Toto zařízení je určeno pro experimenty tribologické laboratoři na Ústavu konstruování. Navrhnuté zařízení splňuje požadavky na zkušební vzorek a rozměr skleněného disku a další cíle z kapitoly 3.

V průběhu řešení této práce byly navrženy tři možné konstrukce, z nichž jsem vybral nejvhodnější variantu pro experimenty a pro nastavování jednotlivých parametrů testů.

Při návrhu uložení segmentu se vycházelo ze způsobů používaných v reálných ložiscích. Z tohoto důvodu se mohou při testech použít i další segmenty. Maximální velikost segmentu je však omezena rozměry plochy nosiče segmentu.

Správný způsob mazání je důležitý pro zajištění celistvého olejového filmu mezi segmentem a diskem. Při nedostatečném přívodu maziva by mohlo dojít k poškození disku. Naopak nadbytečný průtok nemá vliv na tloušťku olejové vrstvy, která bude hlavním objektem experimentů.

Některé prvky konstrukce vychází z již použitých zařízení a další prvky byly navrženy na základě odborných konzultací. K hlavním prvkům konstrukce patří vana, motorová část, polohovací stůl a zatěžovací páka.

Po výrobě zařízení je nutné provést testy ke kalibraci zařízení a k odstranění konstrukčních nedostatků. Nejdůležitější bude nastavení přesné axiální vůle.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ŠEVČÍK, V., KNOTEK, M. *Segmentová ložiska*, 1. vyd., SNTL., Praha 1985. 303 s.
- [2] Universe brochure, [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.kingsbury.com/pdf/universe_brochure.pdf >
- [3] GLAVATSKIH, S. B. *Tilting pad thrust bearings*, In: D. Dowson, M. Priest, G. Dalmaz and A.A Lubrecht, Editor(s), Tribology and Interface Engineering Series, Elsevier, 2003, Volume 41, Tribological Research and Design for Engineering Systems, Proceedings of the 29th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Pages 379-390, ISSN 0167-8922, ISBN 9780444512437.
- [4] Albert Kingsbury [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.massengineers.com/Documents/albert_kingsbury.pdf>
- [5] An experimental study of hydrodynamic tilting thrust bearings, [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <<http://www.mech.unimelb.edu.au/people/staffresearch/AFMS%20site/9/TieuReid.pdf>>
- [6] Renewal Parts Maintenance Brochure, [online]. [cit. 2011-04-10]. Dostupné na World Wide Web: <http://www.mdaturbines.com/wp-content/uploads/2010/01/RenewalPartsMaintenance_Brochure.pdf>
- [7] WASILCZUK, M., ROTTA, G. *Modeling lubricant flow between thrust-bearing pads*, Tribology International, Volume 41, Issues 9-10, Nordtrib 2006, September-October 2008, Pages 908-913, ISSN 0301-679X.
- [8] MIKULA, A. M., GREGORY, R. S. *A Comparison of Tilting Pad Thrust Bearing Lubricant Supply Methods*, J. Lub. Tech. 105, 39 (1983), DOI:10.1115/1.3254540
- [9] NEW, N. H. *Experimental Comparison of Flooded, Directed, and Inlet Orifice Type of Lubrication for a Tilting Pad Thrust Bearing*, J. Lub. Tech. 96, 22 (1974), DOI:10.1115/1.3451900
- [10] BASSANI, R., CIULLI, E., FORTE, P. *An investigation on thrust bearing tilting pads*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology April 1, 1998, vol. 212, no. 4, 271-277, DOI:10.1243/1350650981542083.
- [11] BASSANI, R., CIULLI, E. *Lubricant film thickness and shape using interferometry and image processing*, In: D. Dowson, C.M. Taylor, T.H.C. Childs, G. Dalmaz, Y. Berthier, L. Flamand, J.-M. Georges and A.A. Lubrecht, Editor(s), Tribology Series, Elsevier, 1997, Volume 32, Elastohydrodynamics - '96 Fundamentals and Applications in Lubrication and Traction, Proceedings of

the 23rd Leeds-Lyon Symposium on Tribology held in the Institute of Tribology, Department of Mechanical Engineering, Pages 81-90, ISSN 0167-8922, ISBN 9780444828095.

- [12] RIGHTMIRE, G. K., CASTELLI, V., FULLER, D. D. *An Experimental Investigation of a Tilting-Pad, Compliant-Surface, Thrust Bearing*. Journal of Lubrication Technology, January 1976: pages 95-110.
- [13] GLAVATSKIH, S. B. *Laboratory research facility for testing hydrodynamic thrust bearings*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers -- Part J -- Journal of Engineering Tribology 216, no. 2 (April 15, 2002): 105-116. Academic Search Complete, EBSCOhost (accessed November 18, 2010).
- [14] GLAVATSKIH, S. B. *A method of temperature monitoring in fluid film bearings*, Tribology International, Volume 37, Issue 2, Austrib 2002, February 2004, Pages 143-148, ISSN 0301-679X.
- [15] MCCARTHY, D. M. C., GLAVATSKIH, S. B., SHERRINGTON, I. *Oil-film thickness and temperature measurements in PTFE and babbitt faced tilting-pad thrust bearings*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology March 1, 2005, vol. 219, no. 3, 179-185, DOI: 10.1243/135065005X9853.
- [16] GARDNER, WILLIS W., *Tilting pad thrust bearing tests - influence of oil flow rate on power loss and temperatures*, In: D. Dowson, C.M. Taylor, T.H.C. Childs, G. Dalmaz, Y. Berthier, L. Flamand, J.-M. Georges and A.A. Lubrecht, Editor(s), Tribology Series, Elsevier, 1998, Volume 34, Tribology for Energy Conservation, Proceedings of the 24th Leeds-Lyon Symposium on Tribology, Pages 211-217, ISSN 0167-8922, ISBN 9780444500335.
- [17] GLAVATSKIH, S. B., DECAMILLO, S. *Influence of oil viscosity grade on thrust pad bearing operation*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology May 1, 2004 218: 401-412, DOI:10.1243/1350650042128085.

9 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A VELIČIN

π	1	je Ludolfovo číslo
R	mm	-střední poloměr
n	s^{-1}	-otáčky
v	$m \cdot s^{-1}$	-rychlost

10 SEZNAM OBRÁZKŮ, GRAFŮ A TABULEK

- Obr. 1-1** Patent kingsburyho ložiska [4]
Obr. 1-2 Schéma axiálního ložiska [1]
Obr. 1-3 Ložisko s pevnými segmenty [6]
Obr. 1-4 Umístění mazacích trysek v ložisku [8]
Obr. 1-5 Tryska Glacier [9]
Obr. 1-6 Ložisko mazané metodou LEG [8]
Obr. 1-7 Schéma zařízení [10]
Obr. 1-8 Detail vany se segmentem [10]
Obr. 1-9 Experimentální zařízení [12]
Obr. 1-10 Experimentální zařízení [13]
Obr. 1-11 Řež experimentálním zařízením [13]
Obr. 1-12 Vlepený termočlánek v segmentu [13]
Obr. 1-13 Rozmístění termočlánků [13]
Obr. 1-14 Umístění termočlánku obtékaného olejem [14]
Obr. 1-15 Umístění senzorů tloušťky filmu na povrchu segmentu [15]
Obr. 5-1 Návrh varianty č. 1
Obr. 5-2 Návrh varianty č. 2
Obr. 5-3 Návrh varianty č. 3
Obr. 6-1 Uložení kluzné dvojice
Obr. 6-2 Tryska
Obr. 6-3 Vana
Obr. 6-4 Polohovací stůl
Obr. 6-5 Páka
Obr. 6-6 Motor s převodovkou
Obr. 6-7 Schéma poloměrů
- Tab. 6-1** Střední kluzná rychlost

11 SEZNAM PŘÍLOH

SS-01-00-A0
SS-01-00-A4-1
SS-01-00-A4-2
SS-01-00-A4-3
SS-01-00-A4-4
SS-01-02-A3
SS-01-03-A3
SS-01-04-A3
SS-01-05-A4
SS-01-06-A3
SS-01-07-A3
SS-01-08-A4
SS-01-09-A1
SS-01-10-A4
SS-01-11-A4
SS-01-12-A4
SS-01-13-A4
SS-01-14-A4
SS-01-15-A4
SS-01-16-A4
SS-01-17-A4
SS-01-18-A4
SS-01-19-A4
SS-01-20-A3
SS-01-21-A3
SS-01-22-A4
SS-01-23-A4
SS-01-24-A4
SS-02-00-A2
SS-02-01-A3
SS-02-02-A4
SS-02-03-A4
SS-02-04-A4
SS-02-05-A4
SS-02-06-A4
SS-02-07-A4
SS-02-08-A4