



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VÝVOJ HYDROSTATICKÉHO ULOŽENIA ROZMERNÝCH KONŠTRUKCIÍ

DEVELOPMENT OF HYDROSTATIC BEARING FOR LARGE
CONSTRUCTIONS

Ing. Michal Michalec

Pojednanie k štátnej doktorskej skúške
Discourse on the Dissertation Thesis

BRNO 2021



Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

Vývoj hydrostatického uloženia rozmerných konštrukcií

Development of hydrostatic bearing for large constructions

Ing. Michal Michalec

Autor práce
Author

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

Vedúci práce
Supervisor

Pojednanie k štátnej doktorskej skúške
Discourse on the Dissertation Thesis

Brno 2021

OBSAH

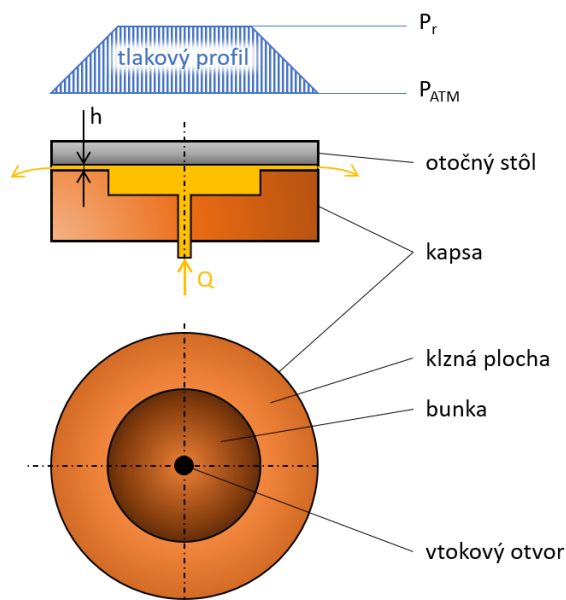
1	ÚVOD	5
2	VYMEDZENIE RIEŠENEJ PROBLEMATIKY A PREDBEŽNÉHO CIEĽA DIZERTAČNEJ PRÁCE	7
3	ZHRNUTIE SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA	9
3.1	Výpočet a parametre	12
3.1.1	Analytický prístup	12
3.1.2	Numerický prístup	18
3.2	Kapsa	19
3.2.1	Tvar kapsy a bunky	19
3.2.2	Hĺbka bunky	30
3.2.3	Podstava kapsy	46
3.2.4	Modifikácia klzných plôch	48
3.2.5	Geometrická presnosť klzných povrchov	51
3.3	Hydraulický okruh	52
3.3.1	Kompenzačné členy	53
3.3.2	Mazacie médium	56
4	ANALÝZA, INTERPRETÁCIA A ZHODNOTENIE POZNATKOV ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADE KRITICKEJ REŠERŠE	59
4.1	Zhodnotenie poznatkov o kapse HS ložiska	59
4.2	Zhodnotenie poznatkov o hydraulickom okruhu HS ložiska	61
4.3	Vyvodenie záverov získaných na základe rešerše	61
5	VYMEDZENIE CIEĽA DIZERATČNEJ PRÁCE A NÁVRH SPÔSOBU JEJ RIEŠENIA	64
5.1	Zameranie dizertačnej práce	64
5.2	Cieľ dizertačnej práce	64
5.3	Spôsob riešenia a použité metódy	67
5.3.1	Kompenzácia montážnych chýb poddajnou podstavou	67
5.3.2	Optimalizácia hĺbky a tvaru bunky	69
5.3.3	Kritický stav beztlakového dojazdu ložiska	70
5.4	Plán publikácií	71
6	SÚČASNÝ STAV RIEŠENIA DIZERTAČNEJ PRÁCE	73

6.1	Experimentálne zariadenie – DUAL-PAD	73
6.1.1	Nivelácia káps HS ložiska podľa tlakov	74
6.1.2	Kompenzácia montážnych chýb káps HS ložiska	74
6.1.3	Optimalizácia tvaru a hĺbky HS bunky	78
6.2	Hodnotenie modifikovaných klzných plôch HS ložísk	78
7	ZÁVER	80
8	BIBLIOGRAFIA	81
	ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV	90
	ZOZNAM TABULIEK	94
	ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ	95

1 ÚVOD

Hydrostatické (HS) ložiská sú kľúčovou súčasťou strojov vyžadujúcich dlhodobú životnosť, plynulý pohyb a presnosť. Ide o multidisciplinárny problém, ktorý okrem tribológie zasahuje do oblasti mechaniky tekutín, materiálov a výrobných technológií, apod., ktorých znalosti je potrebné prepojiť pre správnu funkciu HS uloženia. HS ložiská nachádzajú svoje uplatnenie v širokom spektre aplikácií – od malých vretien sústruhov, cez vedenia posuvov, až po obrovské teleskopy o priemeroch presahujúcich desiatky metrov [1]. Od vynájdenia HS mazania v roku 1852 L. D. Girardom, odvodením rovníc Reynoldsom v roku 1886, a publikáciou Lorda Rayleigha z roku 1918 [2] sa oblasť hydrostatického mazania začala postupne formovať a rozvíjať. Neskôr v 1989 Rowe [3] zhrnul predchádzajúci vývoj v tejto oblasti a v 1992 Bassani a Piccigallo [4] vydali rozsiahlu knihu pojednávajúcu o dôležitých častiach na základe dovtedajšieho výskumu. V 1995 predstavili Cheng a Rowe [5] odporúčanie pre stratégiu voľby externe tlakovaných ložísk. Neskôr v 2014 Li et al. [6] predstavili zhrnujúci článok zameraný na výskum v oblasti rozmerných hydrostatických uložení a v 2017 Liu et al. [7] vo svojej publikácii zdôraznili, že HS mazanie je stále aktuálnou témou s rastúcim trendom záujmu.

Princíp HS mazania, na ktorom HS ložiská fungujú, spočíva v nepretržitej dodávke tlakového oleja do kapsy, pričom vzniká rovnomerná mazacia vrstva (h) oddeľujúca klzné povrchy (Obr. 1-1). Kapsa je tvorená bunkou a vtokovým otvorom, pričom bunka slúži na nadvihnutie bremena keď sú klzné plochy dosadnuté a následne tvorí prevládajúcu časť nosnej zložky počas prevádzky, najmä pri nízkych rýchlostiach. Tlak oleja v oblasti bunky je približne konštantný a smerom von z kapsy postupne klesá na atmosférický tlak [8]. HS ložisko zobrazené na Obr. 1-1 je tzv. **otvoreného typu**. V prípade protíahľých HS káps ide potom o **uzavretý typ** HS ložiska.



Obr. 1-1 Schéma princípu funkcie HS ložiska.

Hlavnými výhodami HS ložísk je veľmi nízke trenie (tvorené šmykovým trením kvapaliny), zanedbateľné opotrebenie, veľmi nízka hlučnosť, plynulý chod bez nežiaduceho stick-slip efektu [9], vysoká tuhosť a schopnosť tlmenia vibrácií. Veľkou výhodou je aj, že na rozdiel od hydrodynamických (HD) ložísk dokážu fungovať aj pri nulových rýchlostiach [10] pri plnom zaťažení, kvôli čomu sa často používajú tzv. hybridné ložiská kombinujúce pozitívne vlastnosti HS a HD mazania. Nevýhodami sú vyššie počiatočné náklady na agregát a kvalitu klzných povrchov, a nutnosť neustálej prevádzky hydraulického agregátu počas chodu ložiska pre zamedzenie havarijných stavov počas prevádzky a poškodeniu klzných povrchov, čo výrazne navyšuje energetickú náročnosť HS uložení.

Veľká časť pozornosti bola doposiaľ venovaná optimalizácii geometrie [11–14] a hydraulických prvkov riadiacich mazaciu vrstvu [14–18]. Návrh optimálnych veličín je len jedným z krokov k dosiahnutiu bezporuchovej a dlhodobej prevádzky HS uložení. Problematika návrhu veľkorozmerných HS ložísk je komplexným problémom [4, 5] a spočíva v zohľadňovaní ďalších faktorov, ktoré môžu ovplyvniť výslednú presnosť a správanie uloženia. Súvisí to najmä s vyrobiteľnosťou rozmerných kusov v celku s určitou presnosťou, možnosťami nadrozmernej prepravy, prístupnosťou v mieste montáže, a aj so samotnou presnosťou montáže. Len veľmi málo úsilia bolo venované kompenzácií geometrických nepresností a nerovnomernému zaťaženiu, ktoré môžu viesť až k havarijnému stavu. Veľkou otázkou stále zostáva vhodnosť poddajných materiálov pre klzné povrchy a podstavu káps, ktoré by mohli kompenzovať vzniknuté geometrické chyby a zaistiť tak čo najrovnomernejšiu distribúciu mazacej vrstvy.

Predložené pojednanie sa zaoberá problematikou návrhu rozmerných HS uložení. Práca je zameraná na vytýčenie všetkých podstatných častí a procedúr, ktoré je nutné uvažovať pre dosiahnutie optimálnej a dlhodobej prevádzky HS ložiska veľkých rozmerov.

2 VYMEDZENIE RIEŠENEJ PROBLEMATIKY A PREDBEŽNÉHO CIEĽA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Oblasť HS uložení zaznamenala v priebehu uplynulých desaťročí značný pokrok a rýchly rozvoj technológií pomáha jej napredovaniu [3, 7]. Problematika HS ložísk je na rozdiel od iných typov strojných súčastí veľmi špecifická a zasahuje do viacerých oblastí, od tribológie, cez mechaniku tekutín, až po výrobné technológie. Samotný návrh HS uloženia je pomerne komplexnou úlohou, nakoľko jednotlivé parametre sa vzájomne ovplyvňujú [19, 20].

Výskum a vývoj v oblasti HS uložení sa preto nezameriava iba na samotnú kapsu ložiska, ale i na rovnako podstatnú časť ktorou je hydraulický okruh. V prevažnej väčšine prípadov bola pozornosť smerovaná na malé HS ložiská v rozsahu do desiatok, až stoviek mm, aj napriek tomu, že oblasť rozmerných uložení zaznamenala v posledných rokoch nárast dopytu po HS ložiskách z oblastí od ťažkých obrábacích zariadení, cez vesmírnu pozorovaciu techniku, energetiku, až po manipulačnú techniku železníc, javísk a mnohé ďalšie.

Na rozdiel od iných typov uložení ponúkajú HS ložiská značné benefity. V porovnaní s HS ložiskami narážajú rozmerné valivé uloženia na svoje limity [21, 22] a stále sú negatívne ovplyvňované prítomnosťou stick-slip efektu [9, 23]. U HD ložísk je zase nevyhnutnou podmienkou pre správnu funkciu prevádzka za vysokých rýchlostí [24]. U HS uložení je možné vytvárať uloženia extrémnych rozmerov presahujúcich desiatky metrov [1], s pomerne vysokou presnosťou pohybu, bez nežiadúceho stick-slip efektu, a schopnosťou pracovať i pri nulových rýchlostiach. Je však nutné zdôrazniť, že u ložísk rozmerných konštrukcií sa v porovnaní s malými HS ložiskami vyskytujú značné problémy s geometrickou presnosťou klzných povrchov, ktoré môžu vznikať pri výrobe a pri montáži [25].

Na stabilitu mazacej vrstvy má nezanedbateľný vplyv práve geometrická presnosť klzných plôch [26]. Ďalší problém súvisí s nutnosťou transportu na miesto určenia, kvôli čomu je nevyhnutné veľké diely rozdeliť na menšie časti – segmenty. Problematická môže byť aj manipulácia dielov počas montáže, keďže rozmerné uloženia môžu byť umiestnené aj v ťažko prístupných miestach a v suterénoch budov. Pri montáži môže byť veľkou výzvou nastavenie káps, prípadne segmentov bežca/otočného stolu, do roviny pre dosiahnutie správnej funkcie HS uloženia a udržiavanie rovnomernej mazacej vrstvy. Výskum zameraný na výrobné chyby a presnosť klzných povrchov hydrostatických uložení [26, 27] doposiaľ nepriniesol poznatky o maximálnych prípustných výrobných toleranciách a topografií povrchu vo vzťahu výšky mazacej vrstvy a presnosti výroby klzných povrchov, poprípade aj drsnosti povrchu klzných plôch. Z týchto dôvodov sa naskytá veľkou výzvou objasniť aké výrobné a montážne chyby sú prípustné pre správnu funkciu hydrostatického uloženia.

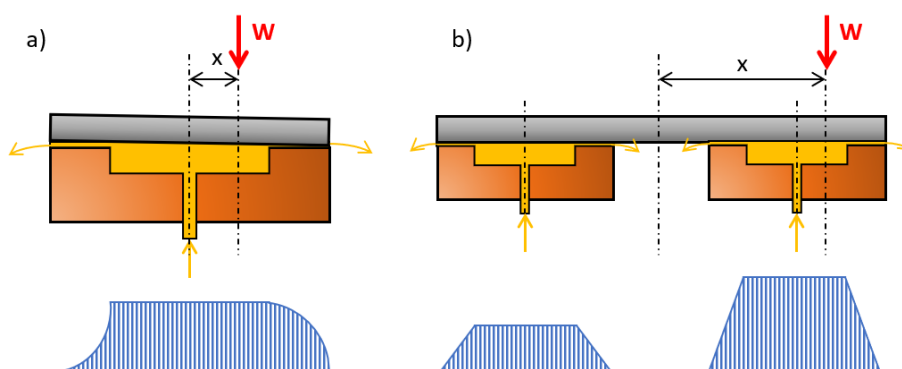
U HS ložísk má všeobecne veľký vplyv tvar geometrie kapsy a bunky, ktorý úzko súvisí s prevádzkovými parametrami hydraulického obvodu. Jednoduché tvary bolo možné odvodiť analyticky pomocou Reynoldsovej rovnice [4], avšak u zložitejších tvarov, ktoré by mohli priniesť lepšie podporné vlastnosti podľa spôsobu zaťažovania a pôsobenia síl, je to veľmi zložité až v niektorých prípadoch analytickým prístupom nerealizovateľné. Z tohto dôvodu v posledných boli použité numerické simulácie s využitím výpočtovej mechaniky tekutín (CFD – computational fluid dynamics), vďaka ktorým sa dajú okrem hlavných parametrov HS uloženia vyšetrovať aj tepelné účinky, prípadne interakcia tekutiny a tuhého telesa (FSI – Fluid Structure Interaction). Doposiaľ sa viaceré štúdie zameriavali na hľadanie optimálnej geometrie HS kapsy [17, 28, 29], čo bolo opäť poväčšine realizované iba pre uloženia malých rozmerov. U HS ložísk veľkých rozmerov má však omnoho väčší dopad na energetickú náročnosť hydraulického agregátu.

V prípade zlyhania hydraulického okruhu počas pohybu HS uloženia môže dôjsť ku kolízií klzných plôch, prípadne až k ich poškodeniu. U rozmerných HS uložení tak môže byť rozsah škôd omnoho väčší. Z tohto dôvodu je vhodné aplikovať bezpečnostné opatrenia, ako napr. uvažovanie hydraulického akumulátoru, ktorý by bol schopný po určitú dobu počas výpadku zásobovať ložisko tlakovým olejom. Ďalšou možnosťou je modifikácia klzných povrchov – napr. povlaky, textúry a kombinácia materiálov [30–32]. V tejto oblasti bol v minulosti zaznamenaný obrovský pokrok, avšak doposiaľ neboli aplikované tieto ochranné opatrenia práve pre tento kritický stav u HS uložení.

Priebežným cieľom dizertačnej práce je vytvorenie metodiky návrhu veľkorozmerných HS uložení, na základe čoho by bolo možné vyvíjať HS uloženia o priemeroch presahujúcich i desiatky metrov. Ide o pomerne komplexný problém zasahujúci do širokého spektra oblastí. Avšak jednotlivé časti na seba nadväzujú a pre dosiahnutie čo najvyššej efektivity a bezpečnosti HS uloženia je nevyhnutný celkový nadhľad na danú problematiku. Cieľ práce sa bude konkretizovať na základe rešerše a bude zohľadňovať zameranie výskumného pracoviska na Ústave konstruování (FSI VUT v Brně) a potreby priemyslového partnera Bosch Rexroth (Brno - Slatina), s ktorým prebieha spolupráca na projekte zameranom na vývoj HS točne veľkých rozmerov.

3 ZHRNUTIE SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Veľkorozmerné HS uloženia poskytujú oproti valivým uloženiám mnohé výhody. Je však nutné podotknúť, že ich návrh je pomerne komplikovanejší, keďže je nutné brať o úvahy nielen geometriu kapsy, ale aj nastavenie a reguláciu hydraulického okruhu. Predpokladom pre správnu funkciu HS mazania je rovnobežnosť klzných plôch [33], čo nemusí byť u jednoduchých ložísk významný problém pokiaľ sú zaťažované rovnomerne. Pokiaľ je jednobunkové ložisko zaťažované excentricky (Obr. 3-1 a), dochádza k znižovaniu nosnosti a tuhosti uloženia [4]. Aby sa zamedzilo strate nosnej schopnosti je vhodné používať **systém viac-kapsového HS uloženia** (Obr. 3-1 b), kedy dochádza k zmene tlakov v jednotlivých bunkách a kompenzácií reakčných síl pre dosiahnutie rovnováhy.



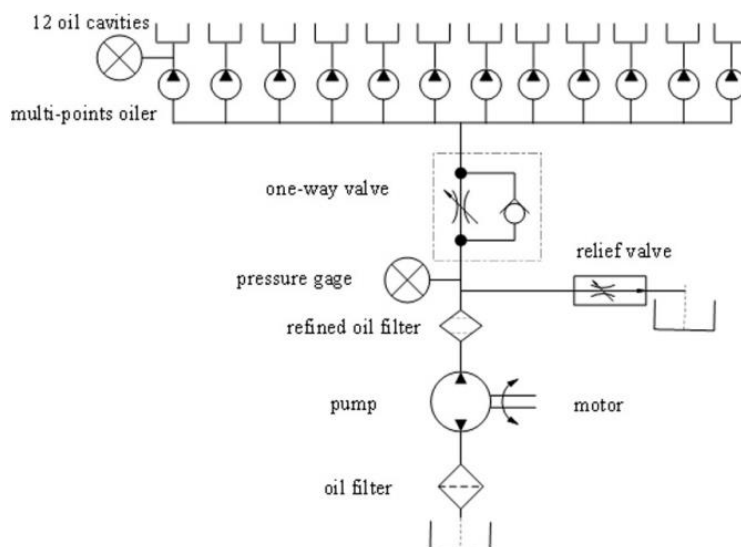
Obr. 3-1 Schematické znázornenie excentrického zaťaženia a) 1-kapsového ložiska, b) viac-kapsového ložiska otvoreného typu.

Viac-kapsové HS uloženia

Viac-kapsové HS ložiská vykazujú nižšiu náchylnosť na výrobné a montážne nepresnosti, je možné presnejšie diagnostikovať stav ložiska monitorovaním tlaku v bunkách a pokryť veľkú plochu manipulovanej konštrukcie, vďaka čomu nachádzajú HS ložiská významné uplatnenie u obrovských antén a teleskopov s priermi točne presahujúcimi 20 m [34, 35]. Viac-kapsové HS ložiská majú aj určité **nevýhody**, ktoré je nutné zdôrazniť:

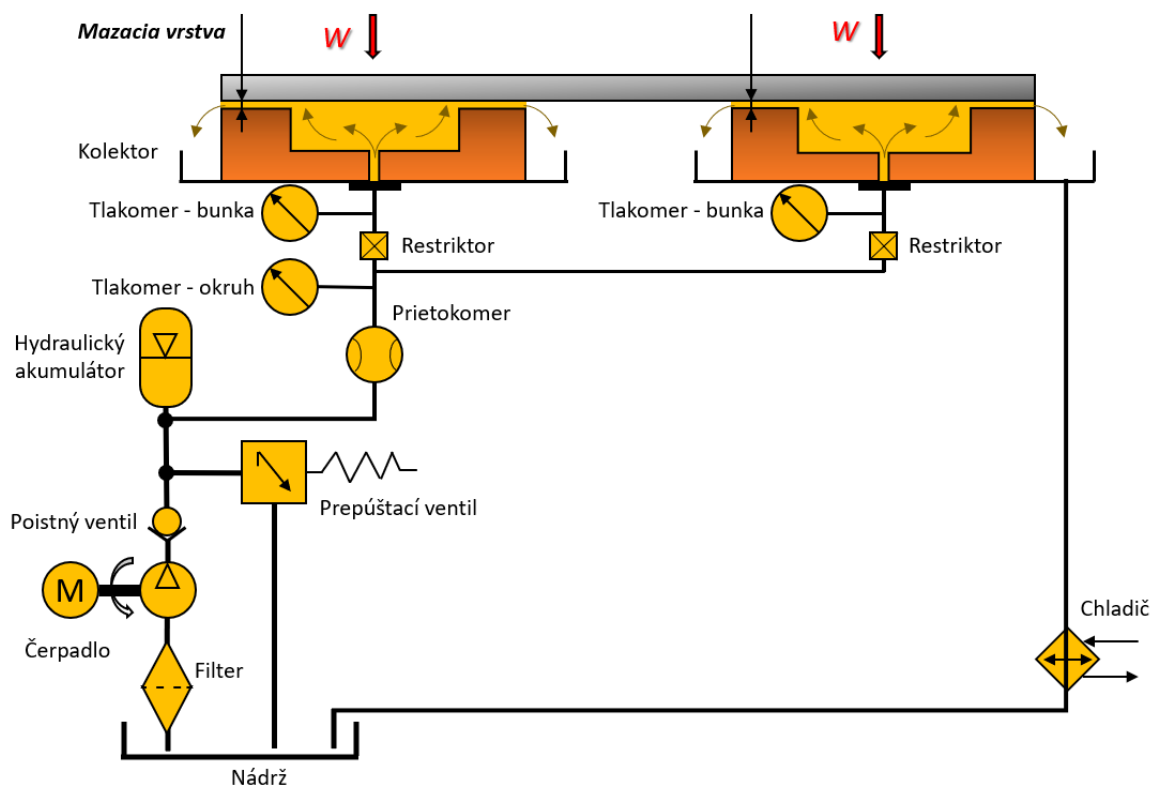
- zložitejší hydraulický obvod (nutnosť napájať každú kapsu tlakovou kvapalinou),
- komplikovanejšie nastavovanie vzájomnej rovinnosti klzných plôch káps,
- presnejšia ale hardvérovo a softvérovo omnoho náročnejšia diagnostika stavu.

Viac-kapsové HS ložiská môžu byť napájané buď každé svojím čerpadlom zvlášť (tzv. **systém s konštantným prietokom**), alebo jedným zdrojom tlakovej kvapaliny (tzv. **systém s konštantným tlakom**) [4]. Systém s konštantným prietokom (Obr. 3-2) je jednoduchší pre numerické modelovanie [12] a je vhodnejší pre dynamicky namáhané uloženia vyžadujúce vyššiu presnosť. Systém konštantného tlaku je však menej nákladnejší a u veľkého počtu káps je jednoznačne vhodnejším riešením práve napájanie jedným zdrojom.



Obr. 3-2 Hydraulická schéma viac-kapsového HS ložiska s konštantným prietokom [12].

Aby však nedochádzalo k zlyhaniu káps pri lokálnom preťažení, kvôli nesprávnemu nastaveniu rovinnosti klzných plôch káps alebo otočného stolu (prípadne tzv. bežca u lineárnych uložení), je nutné zaradiť do hydraulického okruhu aj tzv. **obmedzovače (restriktory)**. Ide o škrtiace prvky, ktoré zabránia úniku kvapaliny cestou menšieho odporu pri naklopení kapsy alebo lokálnom preťažení niektorej, alebo niektorých z káps. Zjednodušená schéma hydraulického okruhu viac-kapsového 1-bunkového HS ložiska je zobrazená na Obr. 3-3. V prípade viac-kapsového viac-bunkového uloženia je nutné každú bunku vybaviť restriktorom, aby nedošlo k lokálnemu zlyhávaniu mazacej vrstvy a vzájomnému ovplyvňovaniu HS buniek.



Obr. 3-3 Schéma hydraulického obvodu viac-kapsového HS uloženia otvoreného typu.

HS uloženia môžu pasívne fungovať aj bez nutnosti napájania tlakovou kvapalinou, ale počas tohto režimu sa nesmie s uložením pohybovať. To je možné iba počas prevádzkového (normálneho) režimu. Stavy HS ložiska je možné rozdeliť na:

- I. **Pokojoyvý stav** – ložisko sa nesmie uvádzať do pohybu, klzné plochy sú dosadnuté.
- II. **Uvedenie do prevádzky** – ložisko sa nesmie uvádzať do pohybu, olej sa hromadí v bunke a po dosiahnutí zdvíhacieho tlaku dochádza k oddeľovaniu klzných povrchov.
- III. **Prevádzkový stav** – ložisko je pripravené na prevádzku, mazací film medzi klznými plochami otočného stola a kapsy je plne vytvorený.
- IV. **Kritické stavy prevádzky** – pri extrémnych podmienkach môže dôjsť k nestabilite mazacieho filmu (napr. počas operácie pri veľmi vysokých otáčkach, pri excentrickom zaťažení, lokálnom preťažení, chybnému nataveniu rovinnosti klzných plôch apod.), prípadne zníženiu nosnosti ložiska z dôvodu prehrievania oleja.
- V. **Havarijný stav** – dochádza k nežiadúcemu dosadnutiu klzných plôch z dôsledku prerušenia dodávky tlakového oleja. Telesá môžu byť vo vzájomnom pohybe, čím môže dôjsť k poškodeniu klzných plôch až k zadreniu ložiska.

Veľkej časti kritických stavov HS uloženia je možné zamedziť už vo fáze návrhu geometrie ložiska a uloženia kaps, správnym nastavením rovinnosti klzných povrchov kaps, nastavením hydraulického okruhu, prípadne adaptívnou reguláciou dodávanej tlakovej kvapaliny. Pre dlhodobú životnosť a minimalizáciu servisného času a nákladov

je nutné vyhýbať sa havarijnému stavu. Treba však dbať aj na núdzové opatrenia, ktoré môžu zabrániť rozsiahlym škodám, ku ktorým by počas havarijného stavu mohlo dôjsť, napr. pri zlyhaní hydraulického okruhu z dôvodu výpadku elektriny apod.

3.1 Výpočet a parametre

Pre návrh geometrie a pre dosiahnutie optimálnych parametrov HS uloženia je nevyhnutné realizovať výpočet kľúčových parametrov. Výpočet hydrostatických uložení je možné realizovať pre jednoduchú geometriu hydrostatických ložísk na základe analytických vzťahov. Pre minimalizáciu tlakových strát, tepelné analýzy alebo zložitejšie geometrie je nutné využiť numerický prístup.

3.1.1 Analytický prístup

Problematika hydrostatických ložísk spadá do oblasti mechaniky tekutín. Teória dynamiky tekutín je základom analýzy hydrostatických systémov. Riešenie rovníc popisujúcich správanie kvapalín sú odvodené z Navier-Stokesových rovníc, ktorých riešenie je pomerne komplexné a náročné, a preto sa využíva určitých zjednodušení na základe predpokladov [19], ktoré redukujú náročnosť výpočtu. Praktický model na výpočet rozloženia tlakov v mazacom filme poskytuje Reynoldsova rovnica. Energetická rovnica umožňuje termálne analýzy prúdenia a v prípade potreby je možné použiť aj ne-Newtonske modely tekutín v HS ložisku. Základné tvary týchto rovníc sú uvedené v Tab.1.

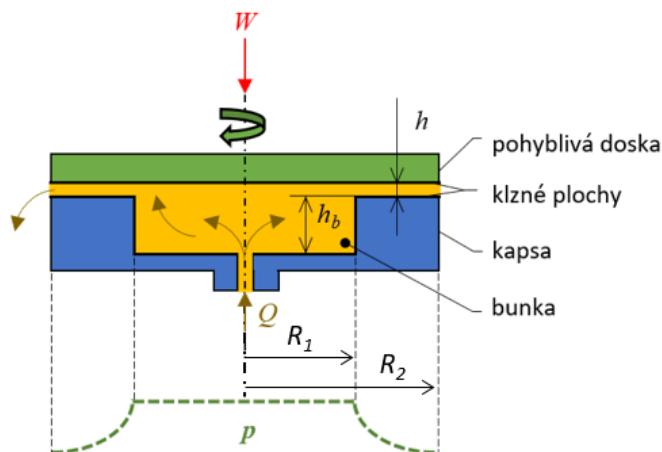
Tab. 1 Súhrn základných rovníc pre hydrostatické ložisko

Rovnica	Význam	Všeobecná forma
Reynoldsova rovnica	Popisuje rozloženie tlaku v mazacom filme; všeobecný výraz pre všetky aplikácie.	$\nabla \left(\frac{h^3}{\mu} \cdot \nabla \vec{p} \right) = 6 \nabla (\vec{U} \cdot h) + 12 \frac{\partial h}{\partial t}$
Zjednodušený tlakový vzorec	Tlakový gradient spojený s prietokom v rovine pre rotačne-symetrické úlohy.	$\frac{dp}{dx} = f(x, Q, h, \mu, \dots)$
Energetická rovnica	Popisuje rozloženie teploty toku kvapaliny; základný vzťah pre riešenie prenosu a tvorby tepla.	$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \left(\frac{k_c}{c_p} \cdot \nabla T \right) + S_T$

Výpočet základných parametrov hydrostatického ložiska

Pri dosadnutí klzných plôch, je nutné skontrolovať **kontaktný tlak** vyvíjaný na klzné plochy, ktorý nesmie presiahnuť prípustnú hodnotu. Pre nadvihnutie zaťaženia je potrebná vtokový otvor – hydrostatická bunka, do ktorej prúdi tlakový olej dvíhajúci záťaž. **Hĺbka bunky** h_b by mala byť aspoň päťkrát väčšia ako je hrúbka mazacieho filmu h (Obr. 3-4). Za optimálnu hodnotu je považovaná hĺbka bunky $h_b=20 \cdot h$ [36], iné zdroje odporúčajú rozsah $h_b=(50-100) \cdot h$ [37]. Pre výpočet **minimálneho obsahu bunky** potrebnej pre nadvihnutie celkovej záťaže sa využíva vzťah: $A_{min}=W/P_r$, kde W je celková prenášaná záťaž a P_r je tlak oleja v bunke.

Tlak je primárna veličina závislá na veľkosti zaťaženia, a geometrii kapsy a bunky. Únosnosť ložiska sa zvyšuje so zvyšujúcim sa obsahom hydrostatických buniek. Tlak v bunke má konštantné rozloženie, pričom na výtoku z klzných plôch dosahuje atmosférický tlak okolia (Obr. 3-4).



Obr. 3-4 Schematické rozloženie tlaku v bunke

Pre výpočet parametrov je možné vychádzať z viacerých zdrojov, ktoré vedú k rovnakému riešeniu základných tvarov hydrostatických buniek a kaps [20, 38–40], a uvádzajú podobný postup riešenia danej problematiky. Nasledujúce výpočtové vzťahy vychádzajú z ref. [20]. Na základe rozloženia tlakov pre kruhovú kapsu platí:

$$P = p_r \frac{\ln(r/R_2)}{\ln(R_1/R_2)} \quad (1)$$

Celkovú nosnú kapacitu kruhového hydrostatického ložiska je možné vyjadriť ako:

$$W = A_{min} \cdot p_r + \int_{R_2}^{R_1} 2\pi r P dr = \frac{\pi p_r (R_2^2 - R_1^2)}{2 \ln(R_2/R_1)} \quad (2)$$

Prietok potrebný pre zásobovanie ložiska:

$$Q = (2\pi r) - \frac{h^3}{12\mu} \frac{dP}{dr} = \frac{\pi h^3 p_r}{6\mu \ln(R_2/R_1)} \quad (3)$$

Po vyjadrení zo vzťahu (2) a (3):

$$W = \frac{3\mu Q (R_2^2 - R_1^2)}{h^3} \quad (4)$$

Celkovú nosnosť je možné taktiež vyjadriť vzťahom:

$$W = C_1 \frac{Q}{h^3} \quad (5)$$

kde C_1 je výraz zahrňujúci **dynamickú viskozitu maziva (μ)** a geometriu klznej plochy a bunky. Z výrazu vyplýva, že pre špecifický tvar ložiska a vlastnosťami mazacieho média sa nosná kapacita mení s prietokom a hrúbkou mazacej vrstvy. Pre kruhovú kapsu s kruhovou bunkou platí vzťah:

$$C_1 = 3\mu(R_2^2 - R_1^2) \quad (6)$$

Hrúbka mazacej vrstvy reprezentuje vôľu medzi klznými plochami, ktorá je vytvorená silovým pôsobením tlakového oleja dodávaného do káps. Hrúbka mazacej vrstvy sa pohybuje v rozsahu 1-100 μm v závislosti na aplikácii, veľkosti, požadovaných vlastnostiach a dosiahnuteľnej presnosti klzných plôch. Po vyjadrení hrúbky mazacej vrstvy vychádza vzťah:

$$h = \sqrt[3]{\frac{C_1 Q}{W}} \quad (7)$$

z ktorého vyplýva, že pokiaľ je **prietok udržiavaný na konštantnej hodnote, dôjde pri zdvojnásobení zaťaženia iba k 38% poklesu hrúbky mazacej vrstvy**. Pri navýšení zaťaženia systém automaticky prispôsobí hrúbku mazacej vrstvy pre dosiahnutie rovnováhy. So zväčšujúcim sa rozmerom kapsy rastie aj celková únosnosť a dynamické vlastnosti hydrostatického ložiska, ako napríklad **tuhosť** mazacej vrstvy, pričom záporné znamienko naznačuje, že tuhosť sa znižuje s rastúcou hrúbkou mazacej vrstvy:

$$K = -\frac{dW}{dh} \quad (8)$$

Energetická náročnosť systému dané trecími silami v kvapaline (E_f), výkonom agregátu (E_p) a hydraulickými stratami na hydraulických prvkoch (E_h) (napr. restriktory, potrubie atď.) je možno vyjadriť rovnicou:

$$E_{celk} = E_f + E_p + E_h \quad (9)$$

Pričom E_f je možné vyjadriť ako $E_f = \omega T$, kde ω je uhlová rýchlosť a T je trecí moment vyvolaný šmykovým napätím mazacieho média: $T = \int_A Fr dA$. Pumpovacie straty sú dané vzťahom $E_p = \frac{pQ}{\eta}$, kde η je účinnosť pumpy.

Súradnicové systémy

Vyššie uvedené výpočtové vzťahy sú po prevode do vhodného súradného systému platné pre rôzne tvary HS ložísk [19]. Hydrostatické uloženia môžeme podľa zmyslu zaťažovania rozdeliť do troch hlavných kategórii:

- a) radiálne (cylindrické súradnice) – vretená, podporné puzdra apod.
- b) axiálne (pravouhlé súradnice) – axiálne ložiská, lineárne vedenia, apod.
- c) kombinované (sférické súradnice) – sférické čapy, kužeľové uloženia, apod.

Zovšeobecnenie výpočtových vzťahov

Pre zjednodušenie výpočtu sa zavádzajú **zjednodušené výpočtové vzťahy** celkovej nosnej kapacity, tuhosti, prietoku, a energetických strát systému, ktoré sú platné pre **všetky typy a tvary káps**. Pre výpočet celkovej nosnosti hydrostatických ložísk všeobecne platí vzťah:

$$W = A_{eff} \cdot p_r \quad (10)$$

pričom **efektívna plocha** A_{eff} je závislá na geometrii kapsy a bunky, ako je napríklad zrejme z rovnice (2), kde prvá časť súčtu reprezentuje únosnosť bunky a druhá časť súčtu zahŕňa priebeh tlaku a geometriu klznej plochy obklopujúcej hydrostatickú bunku. Vzhľadom k tomu, že pri zložitejších konfiguráciách je veľmi komplikované, v niektorých prípadoch až nemožné, vyjadriť analytické výpočty efektívnej plochy, zavádzajú sa **bezrozmerné výpočtové koeficienty**. Pre celkovú únosnosť potom platí:

$$W = \frac{A_p \cdot p_r}{P_f} \quad (11)$$

kde A_p je **celková plocha ložiska** a P_f je **tlakový faktor**. Prietok je možné vyjadriť pomocou **prietokového faktoru** q_f :

$$Q = q_f \frac{W}{A_p} \frac{h^3}{12\mu} \quad (12)$$

Energetické straty je možné vyjadriť pomocou **stratového faktoru** H_f :

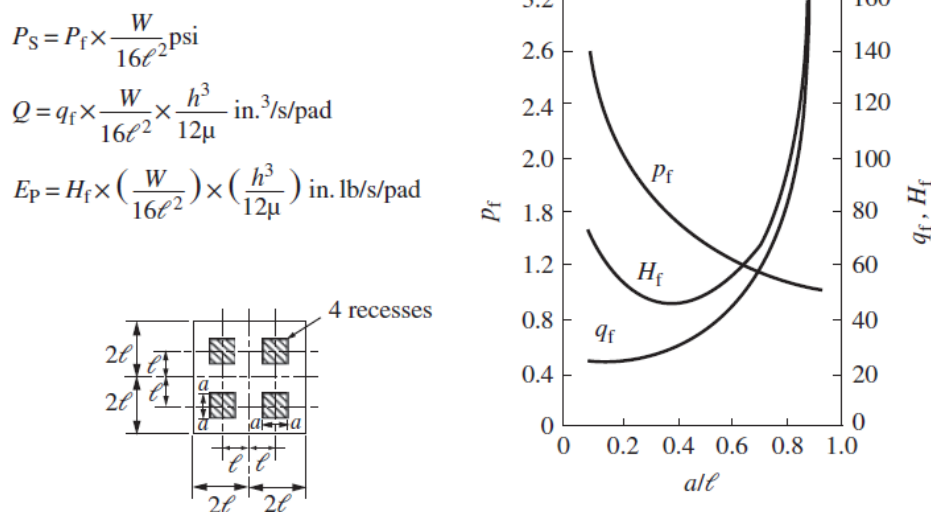
$$E_p = H_f \left(\frac{W}{A_p} \right)^2 \frac{h^3}{12\mu} \quad (13)$$

Pre kruhové ložisko sú výpočtové koeficienty:

$$P_f = \frac{2 \ln(R_2/R_1)}{[1 - (R_1/R_2)^2]} \quad q_f = \frac{4\pi}{[1 - (R_1/R_2)^2]} \quad H_f = \frac{8\pi \ln(R_2/R_1)}{[1 - (R_1/R_2)^2]^2} \quad (14 - 16)$$

Ďalšie konfigurácie hydrostatickej kapsy

V prípade zložitejších konfigurácií je možné využiť nomogramy, alebo výpočtové koeficienty odčítať z grafov pre niektoré základné konfigurácie (Obr. 3-5) na základe ktorých je možné napríklad navrhnúť rozmery bunky pre optimálne prevádzkové parametre a minimalizáciu energetických strát [20].



Obr. 3-5 Graf pre výpočet štvorbunkovej konfigurácie hydrostatickej kapsy pomocou výpočtových koeficientov

Optimalizácia prevádzkových parametrov

Za účelom minimalizácie disipovanej energie sa vykonáva optimalizácia parametrov. Pri návrhu geometrie hydrostatickej kapsy je možné vychádzať z grafov pre bezrozmerné výpočtové koeficienty a z postupov uvedených v ref. [36], a to pre tri prípady, kedy je daný konštantný: a) prietok, b) tlak, alebo c) záťaž. Najčastejším prípadom návrhu

hydrostatického ložiska je práve podľa zadanej záťaže. Na základe daných veličín sa hľadajú optimálne parametre geometrie, charakteristiky maziva a v prípade zadanej záťaže primárne parametre hydraulického obvodu – tlak a prietok. Zhrnutie kľúčových parametrov HS ložísk je uvedené v Tab. 2.

Tab. 2 Zhrnutie kľúčových parametrov HS ložísk

Výška mazacej vrstvy (h)	Volená s ohľadom na výrobné presnosti klzných povrchov a požadovanú tuhosť ložiska. Pre veľmi presné aplikácie môže byť mazacia vrstva v jednotkách μm , u veľkorozmerných aplikácií sa pohybuje v rozsahu 10-100 μm .
Zaťaženie/nosnosť (W)	Dané súčtom silových účinkov na otočný stôl a gravitačných síl nesených telies mazacím filmom. HS ložiská dokážu zvládnuť aj zaťaženia presahujúce tisíceky ton.
Geometria kapsy (A_k, R, L)	Plocha kapsy/káps (A_k) volená s ohľadom na optimálny pomer nosnosti k prietoku. Minimálna plocha bunky/buniek volená pre nadvihnutie záťaže počas pokojového stavu podľa vzťahu: $A_b = W/P_{LIFT}$.
Zdvíhací tlak (P_{LIFT})	Tlak, ktorý musí byť agregát schopný zvládnuť pre nadvihnutie záťaže. Obvykle sa pohybuje v rozsahu 30-80 bar.
Tlak v bunke (P_r)	Závisí od geometrie kapsy a zaťaženia. Tlak v bunke po nadvihnutí poklesne na normálnu hodnotu. Obvykle sa pohybuje v rozsahu 20-50 bar v závislosti od aplikácie.
Dodávaný tlak (P_s)	Závisí od tlakových strát, ktoré vznikajú medzi kapsou a agregátom. Obvykle sa pohybuje v rozsahu 50-100 bar.
Dodávaný prietok (Q)	Volený podľa požadovanej výšky mazacej vrstvy a tvaru kapsy a buniek. Závisí od veľkosti ložiska a záťaže. Pre malé ložiská postačuje približne 0.1-5 l/min podľa aplikácie, pre veľké ložiská presahuje prietok 50 l/min.
Viskozita maziva (μ)	volí sa podľa predpokladanej teploty okolia, prevádzkovej teploty a pre optimálny pomer prietoku a nosnosti. Obvykle používaná viskozitná trieda ISO VG 46 dosahuje približne 0,12 Pa·s pri 20 °C.
Tuhosť mazacej vrstvy (k)	Volí sa podľa požiadavku presnosti aplikácie a prispôbujú sa jej ostatné veličiny / je výsledkom volených prevádzkových veličín. Obvykle sa pohybuje v rozsahu 100-300 kN/mm.
Energetická náročnosť systému (E)	Je daná potrebným výkonom a účinnosťou agregátu (E_p), trením kvapaliny (E_f) a hydraulickými stratami (E_h).

3.1.2 Numerický prístup

U zložitejšej geometrie káps, alebo konfigurácií buniek, pre ktoré nie sú dostupné nomogramy alebo grafy bezrozmerných výpočtových koeficientov, nie je možné využiť analytický prístup pre výpočet hydrostatického uloženia. V takomto prípade sa aplikujú numerické výpočtové prístupy. Numerické modelovanie HS ložísk spadá pod výpočtovú dynamiku tekutín (Computational Fluid Dynamics – CFD). Pomocou CFD analýzy možné stanoviť výsledné sily pôsobiace na klznú plochu, z čoho sa dajú vyjadriť **výpočtové súčinitele** pre výpočet **efektívnej plochy rôznych konfigurácií a tvarov hydrostatických buniek** [29]. Existujú rôzne diskretizačné metódy, ktoré je možné použiť:

- a) metóda konečných objemov (Finite Volume Method – FVM),
- b) metóda konečných prvkov (Finite Element Method – FEM),
- c) metóda konečných diferencií (Finite Differential Method – FDM)

Zrovnanie vhodnosti uvedených metód pre problematiku modelovania HS ložísk je uvedený v Tab. 3.

Tab. 3 Porovnanie diskretizačných metód CFD.

	FVM	FEM	FDM
Vhodnosť	rozloženie tlaku, prenos tepla, turbulentné prúdenie	Zmiešané formulácie a multifyzikálne úlohy	rozloženie tlaku, prenos tepla
Rýchlosť	stredná	pomalšia	rýchlejšia
Geometria	pravidelná geometria	ľubovoľná (aj zakrivená)	jednoduché a pravidelné domény (vyžaduje karteziánske siete)

Tepelné účinky

U hydrostatických ložísk je potrebné uvažovať analýzu prenosu tepla z dôvodu pomerne veľkých povrchov, u ktorých by mohlo tepelnými účinkami dôjsť k deformácií zrovnateľnou s hrúbkou mazacej vrstvy, čím by mohlo dôjsť k zhoršeniu efektivity hydrostatického uloženia znížením tuhosti [41], prípadne až ku kolízií a poškodeniu klzných povrchov. Pomocou analýzy je možné odhaliť kritické miesta. Významnú rolu hrajú analýzy u hydrostatických vedení, kedy je najmä u obrábacích strojov nutné dosiahnuť čo najvyšších presností [42]. Aby bola zaistená správna funkcia hydrostatického mazania, je nutné kontrolovať teplotu oleja, aby nedošlo k výrazným rozdielom viskozity maziva, ktorá je jedným z hlavných parametrov ovplyvňujúcich správnu funkciu. U zariadení, ktoré sú

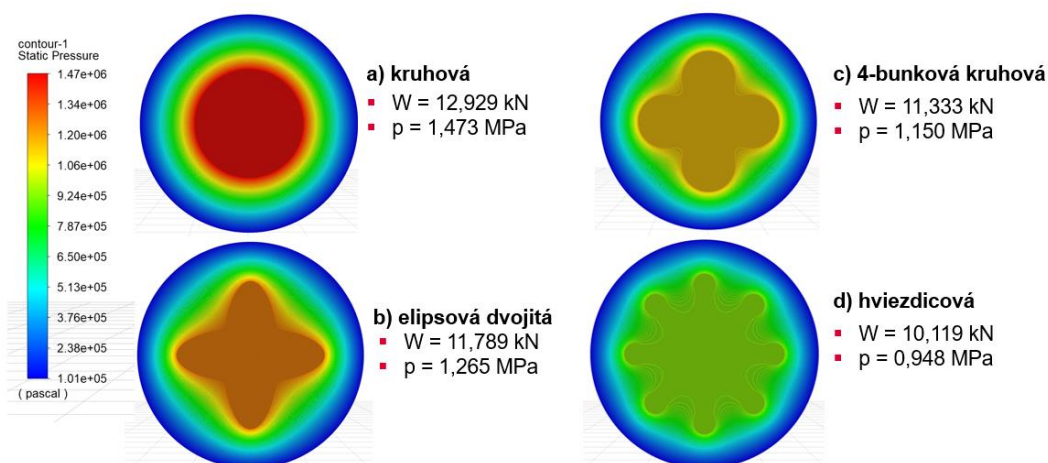
v prevádzke po dlhú dobu [43] je nutné uvažovať s postupným zahrievaním maziva, ktoré znižuje mazaciu vrstvu, pričom pokles je ešte výraznejší s navyšujúcimi otáčkami [44].

3.2 Kapsa

Kapsa je súčasne s hydraulickým okruhom neoddeliteľnou časťou HS ložiska. Návrhu a optimalizácii geometrie kapsy musí byť venovaná značná pozornosť, pretože priamo ovplyvňuje výkonnostné charakteristiky HS ložiska. Okrem geometrie je nutné dbať aj na voľbu kompatibilných materiálov a prihliadať na modifikáciu povrchov pre zamedzenie poškodenia klzných plôch pri poruche dodávky tlakového oleja. V neposlednom rade je nevyhnutné venovať značnú pozornosť aj presnosti výroby a montáže, pretože rovinnosť a rovnobežnosť klzných plôch je jedným z hlavných predpokladov správnej funkcie HS mazania a rovnomernej distribúcie mazacieho filmu.

3.2.1 Tvar kapsy a bunky

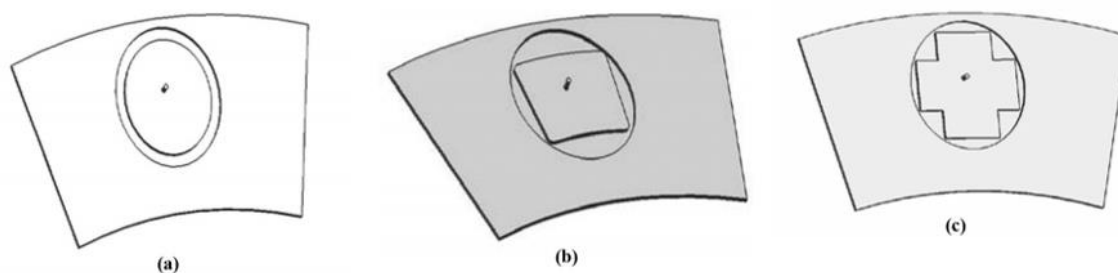
HS ložiská môžu byť radiálne, axiálne i kombinované a nemusia byť iba kruhového tvaru a často sa používajú tvary kruhových výsekov u veľkorozmerných kruhových ložísk, štvorcové a obdĺžnikové tvary na vedenia posuvov, prípadne rôzne kombinácie, tvarov kapsy a bunky, prípadne buniek. Vzhľadom k tomu, že nosnosť je možné vyjadriť ako funkciu tlaku v bunke a geometrie kapsy (rovnica 10) má tvar bunky vplyv na výslednú nosnosť a tým aj tlakové pole [45] ako je možno vidieť na Obr. 3-6. Z toho plynie, že aj pri zachovaní obsahu bunky bude u niektorých tvarov celková nosnosť nižšia. Oproti tomu však môže zmena tvaru a rozloženia buniek prispieť k lepšej stabilite, kompenzácií excentrického zaťaženia, prípadne k iným priaznivým efektom na správanie HS uloženia.



Obr. 3-6 Porovnanie nosnosti a tlaku v bunke rôznych tvarov geometrie bunky kruhového HS ložiska [45].

[46] YU, M., X. YU, X. ZHENG, H. QU, T. YUAN, a D. LI. *Influence of recess shape on comprehensive lubrication performance of high speed and heavy load hydrostatic thrust bearing*, 2019.

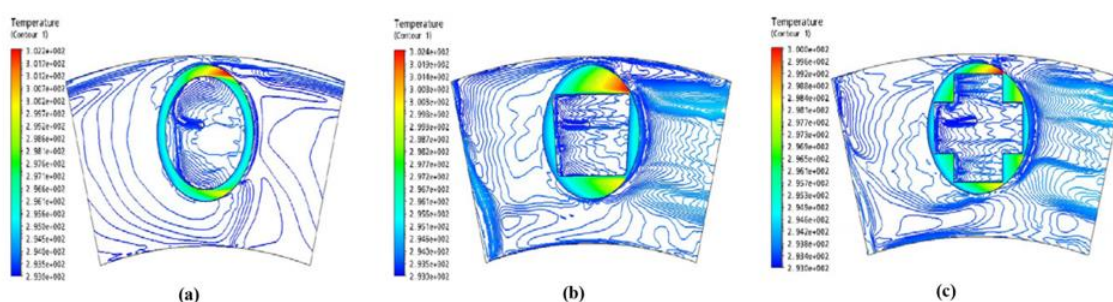
Článok sa zaoberá porovnaním tvarov buniek kapsy veľkého HS ložiska o vonkajšom priemere 3,1 m za podmienok konštantnej dodávky maziva a v práci je porovnávaná 1 kapsa z celkových 12. Okolitý tlak bol nastavený na 0,1 MPa viskozita oleja 28,8 mPa·s, mazacia vrstva s výškou 0,1 mm a rotáciou v rozmedzí 10-80 ot·min⁻¹. Hodnota prietoku na vstupe je rovná rovnomernému rozedeleniu do každej kapsy ale nie je uvedená. V prvej časti článku je pozornosť venovaná modelovaniu s využitím CFD v softvéri ANSYS ICEM. V druhej časti sú výsledky získané zo simulácií porovnávané s experimentálnymi hodnotami.



Obr. 3-7 Skúmané tvary buniek kapsy HS ložiska: a) kruh, b) kruhový výsek a c) kríž [46].

Výsledky

Pre dosiahnutie stability HS uloženia počas dlhodobej prevádzky je nutné, aby bol teplotný prírastok v oblasti bunky čo najnižší. Najvyšší nárast teploty bol zaznamenaný na vonkajšej strane kapsy na vonkajšej strane klznej plochy. Z vyšetovaných tvarov (Obr. 3-8) mal najvyšší teplotný nárast tvar kruhového výseku, zrejme z dôvodu, že sa tu nachádza dlhá kolmá hrana na smer pohybu. Najlepšie výsledky vykazoval kruhový tvar.



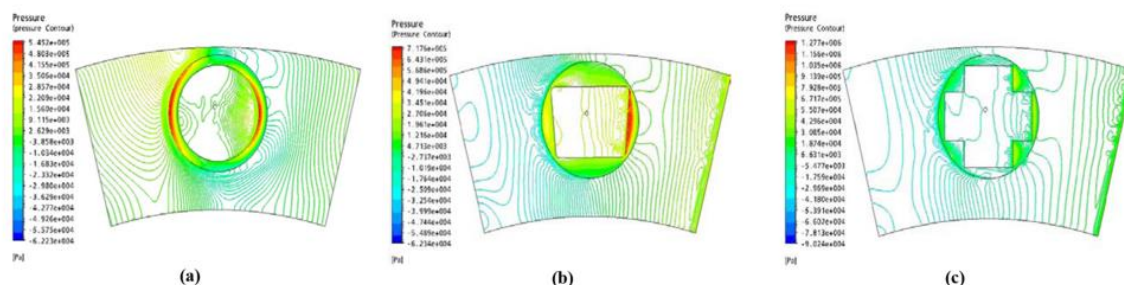
Obr. 3-8 Teplotné pole výsledkov z simulácií pre bunku: a) kruhovú, b) kruhový výsek a c) krížovú [46].

Výsledky experimentov boli zaznamenávané raz za 20 minút pre každú rýchlosť otáčania. Získané hodnoty teplôt v bunke z CFD simulácií a experimentu sú uvedené v Tab. 4.

Tab. 4 Porovnanie výsledkov z CFD simulácie a experimentov [46]

Rýchlosť otáčania ($\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$)	10	20	30	40	50	60	70	80
teplota ($^{\circ}\text{C}$) CFD	27,3	27,5	28,3	28,4	29,1	29,2	30,0	31,3
teplota ($^{\circ}\text{C}$) EXPERIMENT	27,6	27,8	28,1	28,4	28,9	29,5	30,2	31,1

Výsledky z tlakových polí ukazujú rozloženie pri pohybe, pričom kruhová bunka vykazuje najrovnomernejšie rozloženie. Najvyšší tlak bol pozorovaný u krížovej bunky (0,827 MPa), ďalej u kruhovej (0,751 MPa) a najnižší tlak u kruhového výseku (0,724 MPa).



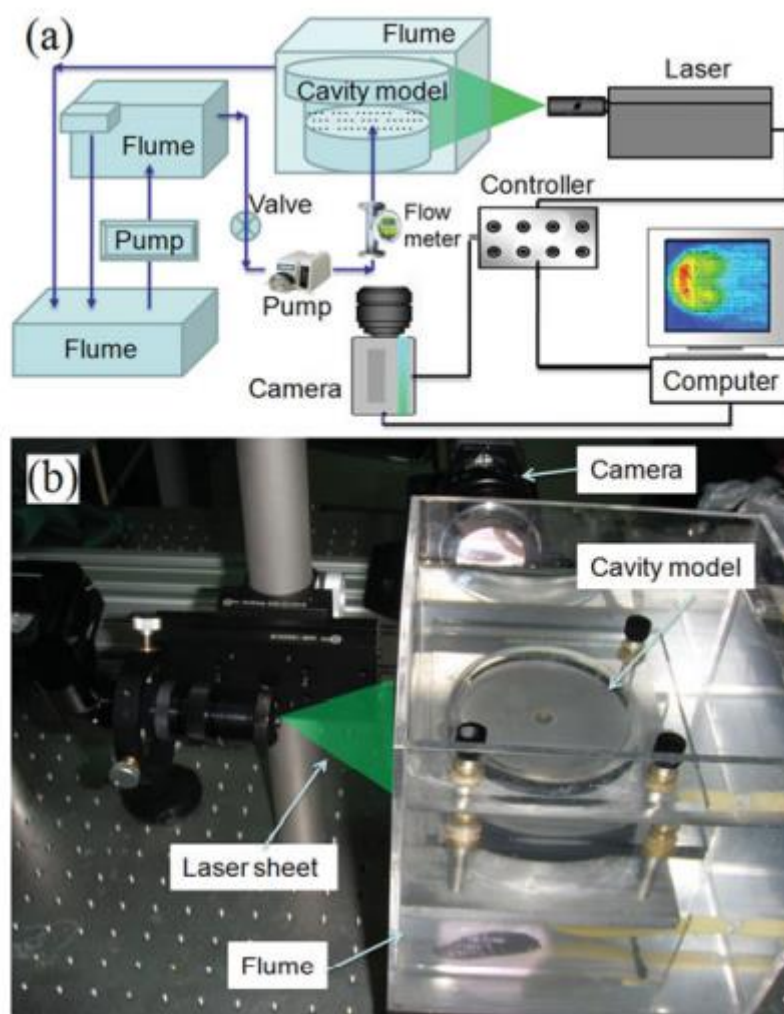
Obr. 3-9 Tlakové pole výsledkov z simulácií pre bunku: a) kruhovú, b) kruhový výsek a c) krížovú [46].

Záver

Výsledky simulácií a experimentov ukazujú, že z navrhnutých tvarov má s ohľadom na výkonnostné charakteristiky optimálny tvar práve kruhová bunka – z dôvodu absencie hrán kolmých na smer pohybu, čím je možné docieľiť rovnomernejšie rozloženie tlakov a teplôt. Výsledok potvrdzuje tvar tlakového poľa pri vysokých otáčkach podľa predpokladu a vytyčuje, že najväčší teplotný nárast je na výtoku z kontaktnej oblasti. S uvážením veľkosti ložiska, odporu hydraulických prvkov a absencií chladiča na hydraulickej schéme v článku je veľmi nepravdepodobné, že by výsledky mohli mať tak vysokú zhodu so simuláciou, a preto vzbudzuje určité pochybnosti. Aj napriek tomu je zrejmé, že tvar bunky má významný vplyv na výkonnostné charakteristiky ložiska.

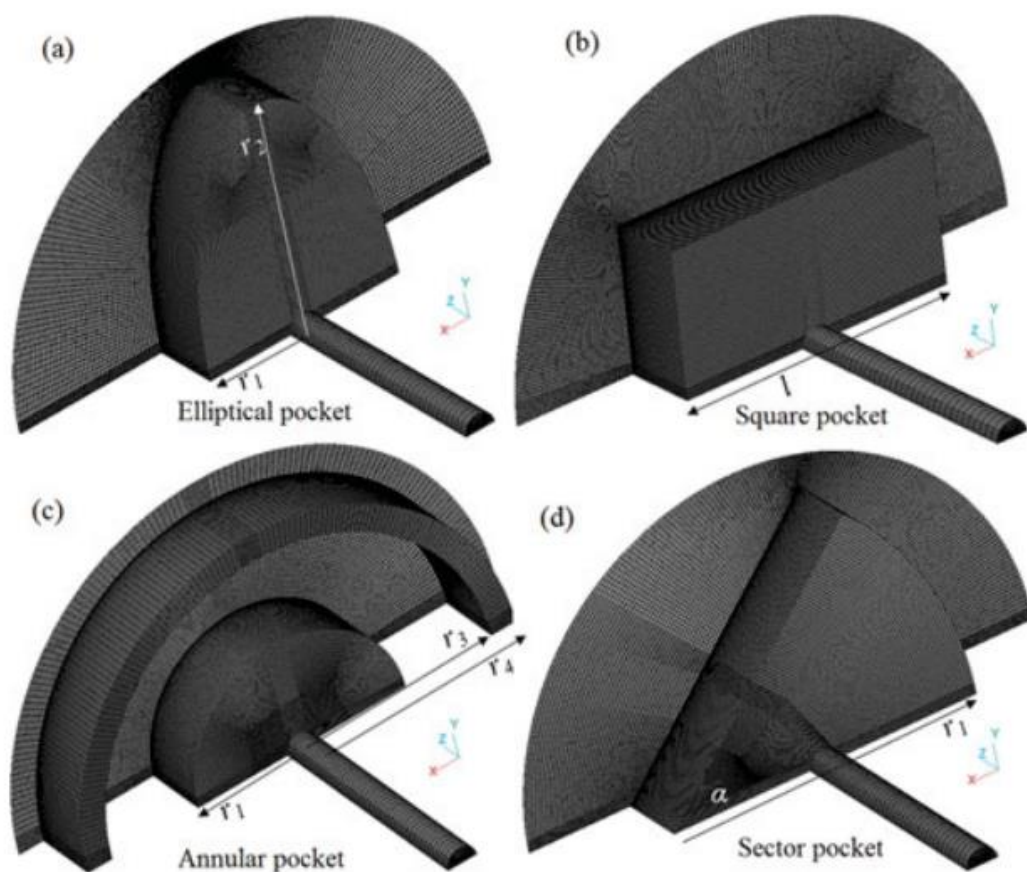
[47] SHEN, F., C. L. CHEN, a Z. M. LIU. *Effect of Pocket Geometry on the Performance of a Circular Thrust Pad Hydrostatic Bearing in Machine Tools*, 2014.

Článok pojednáva o numerickom modelovaní vplyvu tvaru bunky pomocou CFD nástroja ACE+ na výkonnostné charakteristiky HS ložiska s experimentálnym overením výsledkov (Obr. 3-10).



Obr. 3-10 Schéma experimentálnej zostavy pre štúdium prúdenia v HS ložisku s využitím transparentných telies [47].

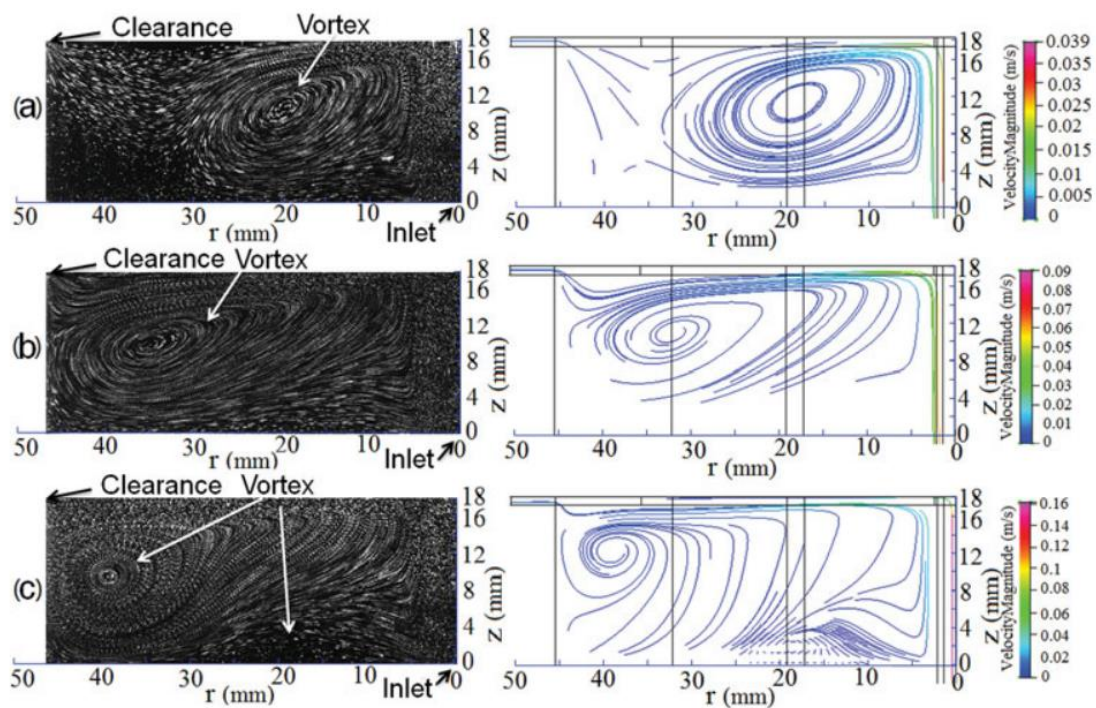
V práci je uvažovaná výška mazacej vrstvy $60\text{ }\mu\text{m}$ a z porovnaní simulácie a prvotných výsledkov zariadenia vyplynula najlepšia zhoda pri okrajovej podmienky vstupného tlaku 7 bar. Tlak na výstupe bol nastavený na atmosférický a pozorované boli rôzne hodnoty Reynoldsovho čísla na vstupe a v bunke. Model bol riešený pomocou symetrie a vrchná stena bola uvažovaná ako pohyblivá. Vyšetrovaných bolo celkovo päť tvarov buniek – kruhová bunka a štyri ďalšie konfigurácie, ktoré sú zobrazené na Obr. 3-11. U uvedených konfigurácií bol dodržiavaný pomer plochy kapsy k ploche bunky.



Obr. 3-11 CAD modely vyšetovaných tvarov buniek: a) eliptická, b) štvorcová, c) medzikruhová a d) kruhový výsek [47].

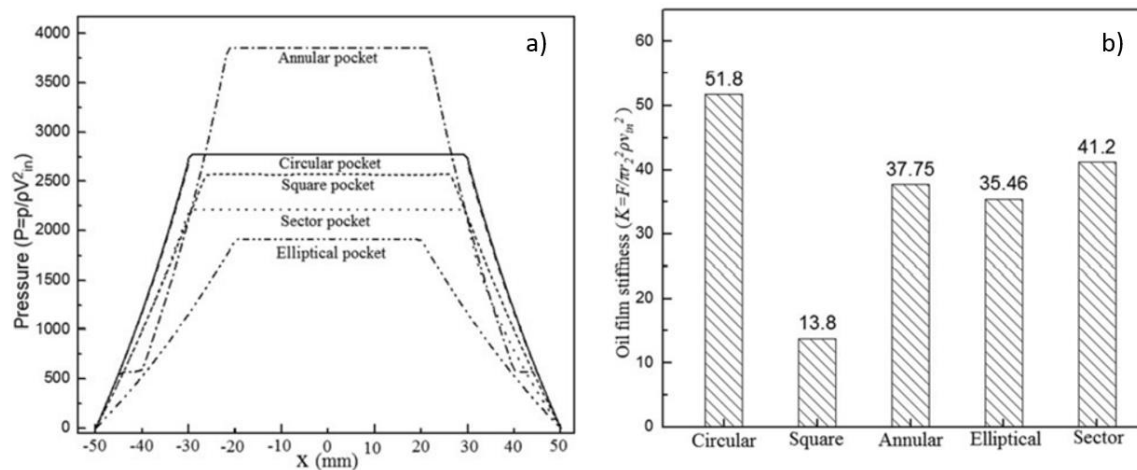
Výsledky

Porovnanie výsledkov CFD simulácie a experimentu ukazuje pomerne dobrú zhodu v zobrazení zavírenia v oblasti bunky (Obr. 3-12), čím sa potvrdzuje vhodnosť zvolených okrajových podmienok a nastavenia simulácie.



Obr. 3-12 Porovnanie vizualizácie zavírenia v bunke HS ložiska z experimentov a výsledkov CFD simulácií [47].

Výsledky rôznych tvarových konfigurácií sú vykreslené v Obr. 3-13. V práci sú využívané bezrozmerné parametre, ktoré zvýrazňujú vplyv rýchlosti prúdenia. Pri stanovených okrajových podmienkach výsledky ukazujú, že medzikruhový tvar bunky vykazuje najvyšší tlak v bunke (Obr. 3-13 a). Z porovnávaných tvarov buniek vykazoval najvyššiu tuhosť kruhová bunka (Obr. 3-13 b) a najnižšiu štvorcová bunka.



Obr. 3-13 Výsledky rôznych konfigurácií tvarov buniek a) bezrozmerných tlakov a b) bezrozmerných tuhostí [47].

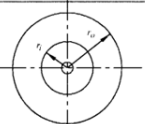
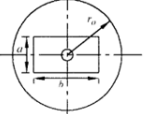
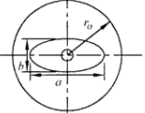
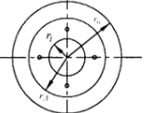
Záver

Detailný popis nastavenia simulácie, ako aj experimentálne overenie výsledkov CFD simulácie výrazne navyšuje dôveryhodnosť výsledkov. Pozorovanie povahy prúdenia v bunke s využitím optických metód potvrdzuje výsledky zo simulácií s dobrou zhodou. Ukazuje sa, že bezrozmerné parametre zohľadňujúce charakter prúdenia majú významný vplyv na výkonnostné charakteristiky. So zvyšujúcou sa hodnotou Reynoldsovho čísla na vtoku tlak v bunke stúpa, avšak s rastúcou hodnotou Reynoldsovho čísla v bunke naopak klesá. Z porovnávaných tvarov vykazuje celkovo najlepšie kombinované výsledky práve kruhový tvar bunky. Štvorcový tvar s ohľadom na tuhosť dosahoval najhorších výsledkov.

[48] SHARMA, S. C., S. C. JAIN, a D. K. BHARUKA. *Influence of recess shape on the performance of a capillary compensated circular thrust pad hydrostatic bearing*, 2002.

[49] NICODEMUS E. R. a S. C. SHARMA. *Orifice compensated multirecess hydrostatic/hybrid journal bearing system of various geometric shapes of recess operating with micropolar lubricant*, 2011.

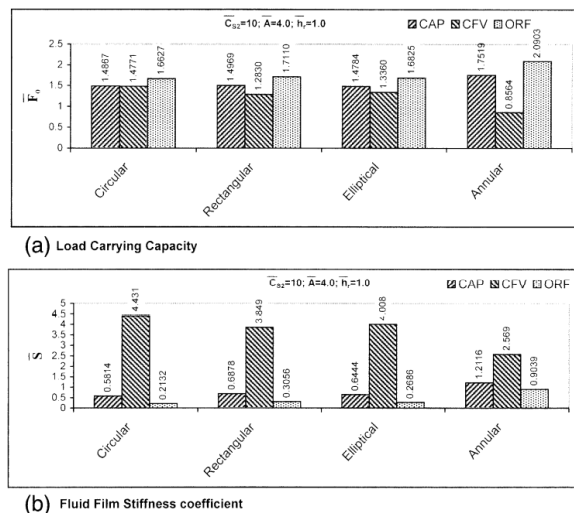
Články sú zamerané na porovnanie rôznych tvarov buniek axiálneho [48] a radiálneho [49] HS ložiska s využitím numerického prístupu. Obe práce pre výpočet využívajú modifikovanú Reynoldsovu rovnicu a formuláciu konečných prvkov. Principiálne je prístup obdobný, avšak sa využíva iný typ súradnicového systému. V štúdií [48] boli porovnávané 4 tvary buniek pri rešpektovaní rovnakého pomeru plochy bunky k ploche ložiska (Obr. 3-14). Sú tu porovnávané aj rôzne typy kompenzačných prvkov (kapilára = CAP, konštantný prietok = CFV, clona = CRF). V článku [49] bol vyšetrovaný naviac trojuholníkový tvar a namiesto obdĺžnikového bol uvažovaný štvorcový.

POCKET GEOMETRY	BEARING AREA (A_b)	POCKET AREA (A_c)
CIRCULAR 	$A_b = \pi r_o^2$ $= \pi (1)^2$ $= 3.142$	$A_c = \pi r_i^2$ $= \pi (0.5)^2$ $= 0.785$
RECTANGULAR 	$A_b = \pi r_o^2$ $= \pi (1)^2$ $= 3.142$	$A_c = a.b$ $= (0.6266 * 1.253)$ $= 0.785$
ELLIPTICAL 	$A_b = \pi r_o^2$ $= \pi (1)^2$ $= 3.142$	$A_c = \frac{\pi}{4} ab$ $= \frac{\pi}{4} (0.7071 * 0.3535)$ $= 0.785$
ANNULAR 	$A_b = \pi r_o^2$ $= \pi (1)^2$ $= 3.142$	$A_c = \pi (r_o^2 - r_i^2)$ $= \pi (0.5^2 - 0.7071^2)$ $= 0.785$

Obr. 3-14 Vyšetrované tvary buniek kapsy HS ložiska: 1. kruhová, 2. obdĺžniková, 3. eliptická a 4. medzikruhová [48].

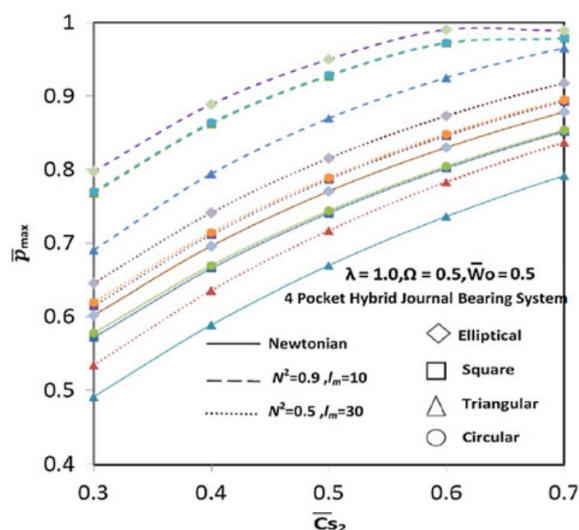
Výsledky

S ohľadom na nosnú schopnosť je najmenej citlivá na spôsob kompenzácie kruhová bunka (Obr. 3.15). V prípade kompenzácie clonou a kapilárou má však omnoho lepšie výsledky medzikruhový tvar bunky a to pre nosnosť aj pre tuhosť. U kompenzácie konštantným prietokom je kruhová bunka jednoznačne najvhodnejšia.



Obr. 3-15 Porovnanie a) nosnej kapacity a b) tuhosti mazacieho filmu pre rôzne tvarové konfigurácie a kompenzačné prvky [48].

Výsledky druhej štúdie ukazujú rovnaký trend, pričom kruhový tvar bunky vykazuje najlepšie celkové vlastnosti z porovnávaných tvarov. Výsledné parametre sú závislé na nastavení restriktoru ako je možné vidieť na Obr. 3-16.



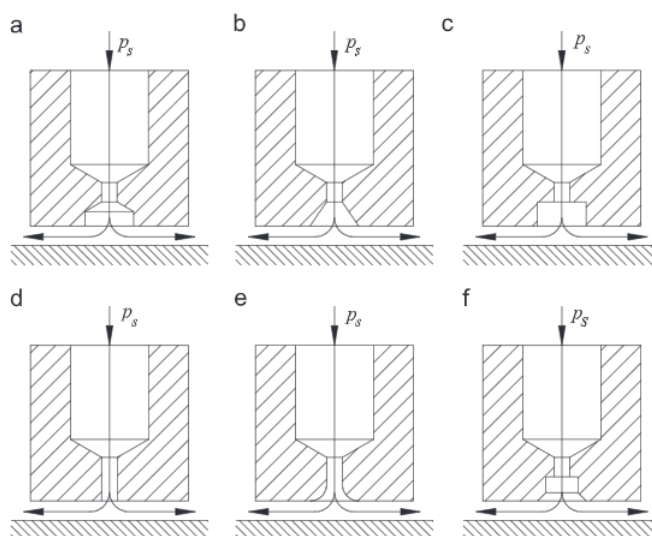
Obr. 3-16 Vykreslenie závislosti tlaku v bunke na návrhovom súčiniteli restriktoru pre vyšetrované tvary buniek [49].

Záver

Rôzne tvary buniek majú mierne odlišný vplyv na výkonnostné charakteristiky. Na základe výsledkov z oboch štúdií je zrejmé, že celkovo najlepšie výkonnostné charakteristiky vykazuje kruhový tvar bunky. Je nutné zdôrazniť, že návrhové parametre sa pre rôzne typy restriktorov líšia, a preto je pre dosiahnutie optimálnych výkonnostných charakteristík zvoliť vhodný typ a nastavenie restriktoru.

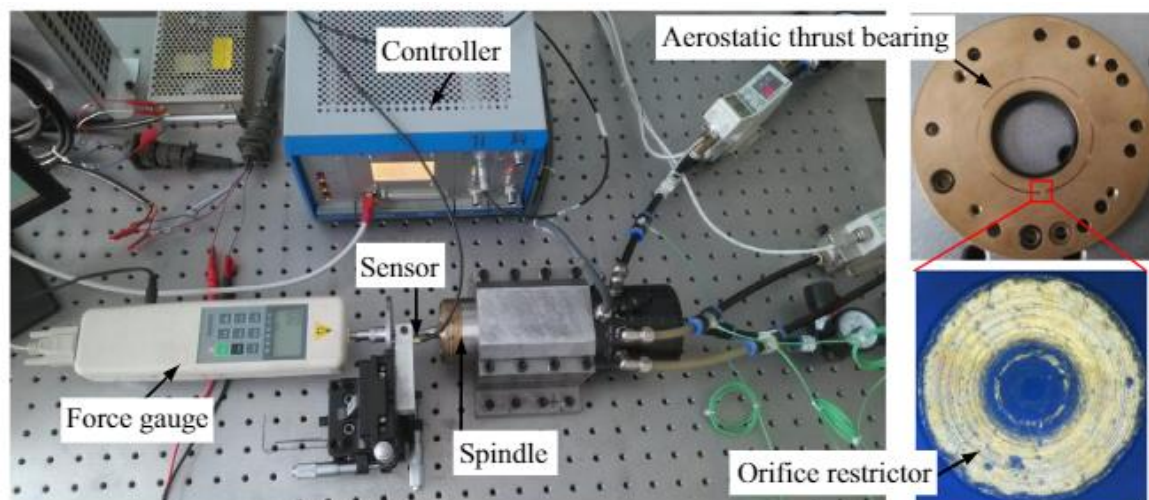
[50] GAO, Siyu, Kai CHENG, Shijin CHEN, Hui DING a Hongya FU. *CFD based investigation on influence of orifice chamber shapes for the design of aerostatic thrust bearings at ultra-high speed spindles*, 2015.

Článok sa zameraíva na porovnanie rôznych tvarov buniek aerostatického ložiska s využitím CFD simulácie. Veľkým prínosom práce je jeho zameranie na porovnanie rôznych konfigurácií (Obr. 3-17), ktoré by mohli byť použité aj pre HS uloženia. Hlavnou nevýhodou je práve aplikácia pre aerostatické ložiská, ktoré síce fungujú na rovnakom princípe, ale majú odlišné charakteristiky, pretože vzduch je považovaný za stlačiteľné médium, zatiaľ čo u HS ložísk je mazacie médium považované za nestlačiteľné a veľkorozmerné aplikácie sa skôr zameriavajú na nižšie otáčky ako sú obvykle používané aerostatické ložiska pri extrémne vysokých otáčkach. CFD simulácie boli realizované v prostredí ANSYS Fluent s využitím turbulentných schém a prispôbení modelu podľa výsledkov predchádzajúcej štúdie.



Obr. 3-17 Vyšetrované tvary buniek: a) s kužeľovou hlavou, b) s kužeľovou bunkou, c) s valcovou bunkou, d) iba s vtokovou drážkou, e) iba s vtokovou drážkou so zaoblením a f) s valcovou bunkou a kužeľovou päťou [50].

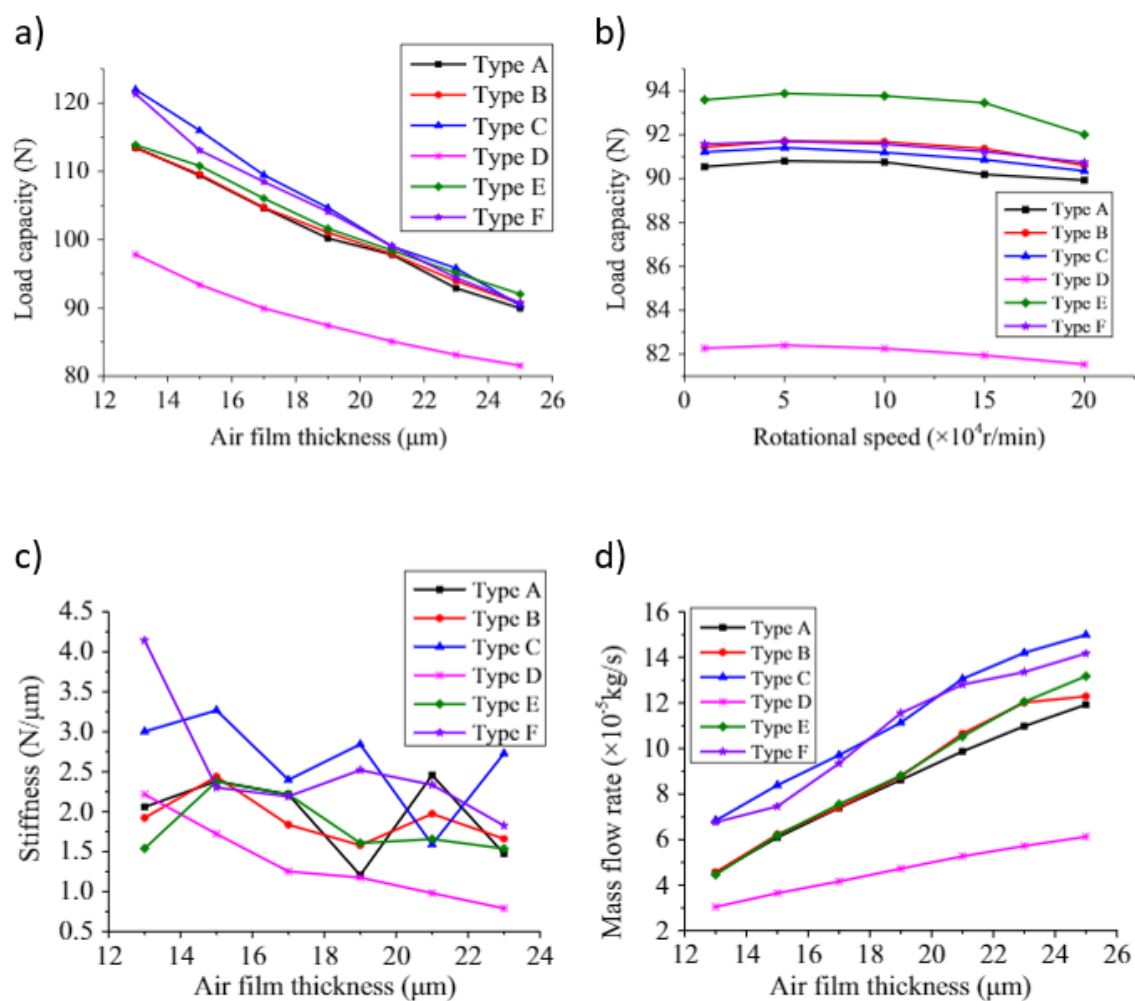
Výsledky získané pomocou CFD simulácií boli porovnávané s experimentálnym meraním, kde bola vyhodnocovaná pôsobiaca sila, resp. nosnosť uloženia a tuhosť uloženia pomocou snímača sily a vzdialenosti.



Obr. 3-18 Experimentálna zostava pre porovnanie výsledkov CFD simulácie [50].

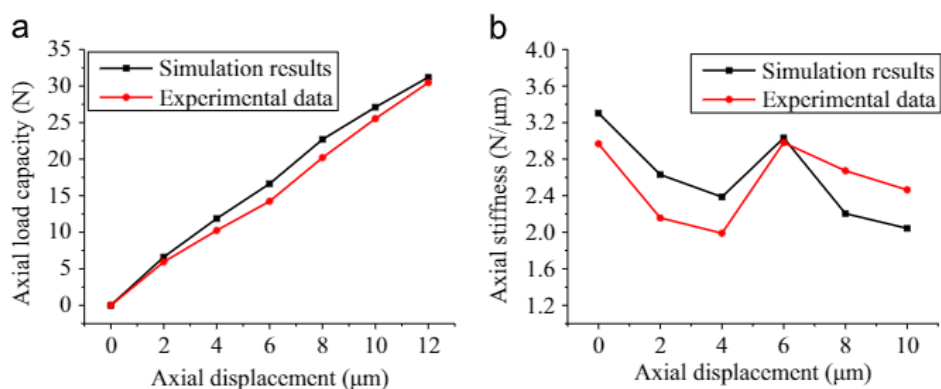
Výsledky

Výsledky sa zameriavajú nielen na porovnanie jednotlivých výkonnostných charakteristík uloženia, ale aj na charakter prúdenia na vstupe do bunky i v samotnej bunke. Z výsledkov pre nosnú kapacitu je zrejmé, že všetky tvary buniek majú veľmi podobnú nosnosť v závislosti na výške aerofilmu (Obr. 3-19a) okrem tvaru D, ktorý má iba vtokový otvor bez bunky. S rýchlosťou sa nosnosť aerofilmu významne nemení (Obr. 3-19b), ale z výsledkov vyplýva, že tvar D má opäť najnižšiu nosnosť a tvar E naopak najvyššiu. Tuhosť sa mení výraznejšie so zmenou (Obr. 3-19c) výšky aerofilmu. Je však možné usúdiť, že tvary C a F vykazujú o niečo vyššiu tuhosť v porovnaní s ostatnými. Tvar D je na tom opäť najhoršie. Z hľadiska energetickej náročnosti vychádza najlepšie tvar D a najhoršie tvary C a F, takže pre optimálny pomer nosnosti/tuhosti a prietoku sa javí ako najvhodnejší tvar E.



Obr. 3-19 Výsledky CFD simulácií pre vyššie uvedené tvary: a) nosnej kapacity vo vzťahu k výške aerofilmu, b) nosnej kapacity v závislosti na otáčkach, c) tuhosti v závislosti na výške aerofilmu a d) dodávaného prietoku na výške aerofilmu [50].

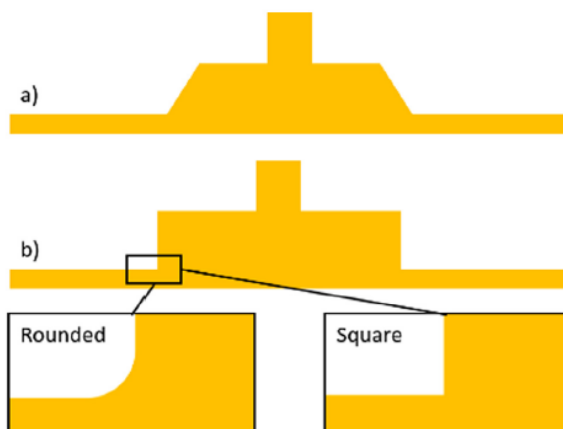
Výsledky práce podporuje porovnanie výsledkov získaných za pomoci CFD simulácie s výsledkami z experimentálnych meraní (Obr. 3-20), pričom tvar oboch kriviek ukazuje veľmi podobný trend.



Obr. 3-20 Porovnanie výsledkov CFD simulácie s experimentom pre závislosť výšky odsadenia (výšky aerofilmu) a a) nosnej kapacity a b) tuhosti [50].

Záver

Kónický/šikmý tvar bunky (Obr. 3-21a) vykazuje vyššiu nosnú schopnosť u aerostatických ložísk pri vysokých otáčkach [50]. Naproti tomu valcový/priamy (Obr. 3-21b) tvar bunky má vyššiu nosnú schopnosť aj pri vyšších mazacích vrstvách v porovnaní s kónickým tvarom bunky a vykazuje vyššiu tuhosť [50]. U priameho tvaru s ostrými rohmi bol pozorovaný vyšší tlak v bunke, zatiaľ čo u zaobleného tvaru bol tlak nižší, ale aj menší teplotný nárast [51].



Obr. 3-21 Tvar bunky HS ložiska s a) kónickým/šikmým výbehom, b) s valcovým/priamym výbehom (zaoblený/hranatý) [1].

3.2.2 Hĺbka bunky

Vplyv hĺbky na teplotu maziva v kapse

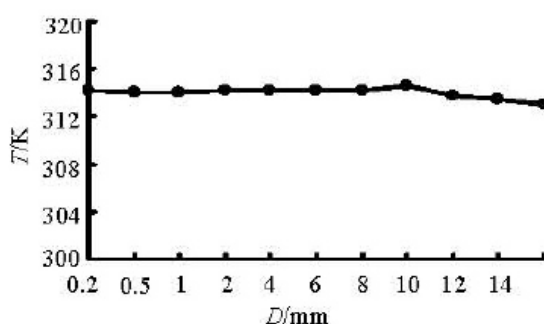
[52] SHAO, Jun Peng, Chun Xi DAI, Yan Qin ZHANG, Xiao Dong YU, Xiao Qiu XU a Yun Fei WANG. *The effect of oil cavity depth on temperature field in heavy hydrostatic thrust bearing*, 2011.

[12] SHAO, Jun Peng, Guang Dong LIU, Xiao Dong YU, Yan Qin ZHANG, Xiu Li MENG a Hui JIANG. *Effect of recess depth on lubrication performance of annular recess hydrostatic thrust bearing by constant rate flow*, 2018.

Článok [52] sa zaoberá skúmaním teplotných účinkov veľkého rotujúceho HS ložiska s využitím numerickej simulácie za pomoci ANSYS Fluent CFD s využitím FVM. Model ložiska je zjednodušený na jednu 1-bunkovú kapsu. Práca berie to úvahy aj viskozitne-teplotnú závislosť maziva. Článok [12] využíva softvér CFX, avšak neberie do úvahy viskozitne-teplotnú závislosť a využíva konštantnú viskozitu 28,8 mPa·s. V článku [12] je okrem vplyvu hĺbky na teplotu maziva v bunke vyšetované aj tlakové pole. Ani v jednej z prác nie je uvedený údaj výšky mazacej vrstvy, takže nie je možné určiť pomer hĺbky bunky k výške mazacej vrstvy (h_b/h).

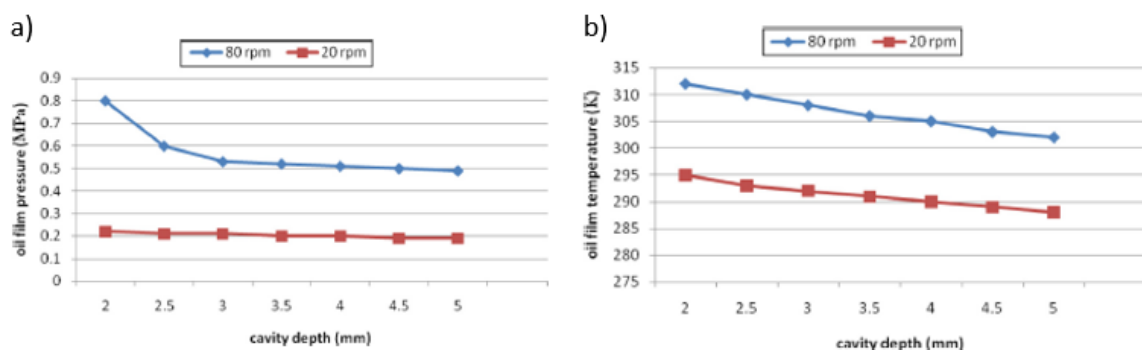
Výsledky

Výsledky z článku [52] boli dosiahnuté po 800 iteráciách, pričom je vidno, že pozorované veličiny sa už v polovine výpočtu pomerne dobre ustálili. Z grafu na Obr. 3-22 vyplýva, že hĺbka bunky nemá výrazný vplyv na teplotu maziva v kontaktnej oblasti.



Obr. 3-22 Závislosť teploty maziva v bunke na hĺbke bunky [52].

Druhá práca naopak prináša opačný záver, že hĺbka bunky vplýva na teplotu maziva v kontaktnej oblasti (Obr. 3-23a). Z výsledkov ďalej plyní, že hĺbka bunky výrazne ovplyvňuje aj tlak (Obr. 3-23b), aj keď z popisu a tlakových polí kapsy nie je úplne zrejmé odkiaľ boli hodnoty brané a diskutované.



Obr. 3-23 Závislosť tlaku (a) a teploty (b) oleja v kapse na hĺbke bunky pri rôznych rýchlostiach [12].

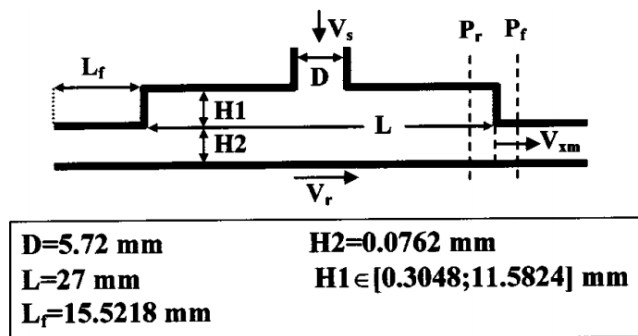
Záver

Z článku [52] vyplýva, že hĺbka bunky nemá výrazný vplyv na teplotu maziva v bunke. Tento záver vyvracia neskorší článok [12] od rovnakého autora kde je vidieť, že aj pri nižších otáčkach je u 2 mm hlbkej bunke viac ako 5 °C nárast oproti 5 mm hlbkej bunke. Pri vyšších otáčkach je tento rozdiel už viac ako 10 °C, čo môže mať pri dlhodobej prevádzke výrazný účinok na výkonnostné charakteristiky HS ložiska. Uvedené články si v niektorých tvrdeniach rozporujú a chýba u nich detailnejší popis nastavenia CFD simulácií a u publikácie [52] experimentálne overenie výsledkov. Z dôvodu absencie mnohých informácií, najmä o výške mazacej vrstvy je takmer nemožné nájsť optimálny pomer výšky mazacej vrstvy k hĺbke bunky. Problémom oboch prác je absencia niektorých okrajových podmienok a najmä informácií o nastavení simulácie.

Vplyv rýchlosti otáčania

[53] HELENE, M., M. ARGHIR, a J. FRENE. *Numerical study of the pressure pattern in a two-dimensional hybrid journal bearing recess, laminar, and turbulent flow results*, 2003.

Článok je zameraný na porovnanie tlakových polí pre plytké ($H/h = 4$) a hlboké ($H/h = 152$) bunky HS ložísk s uvažovaním účinkov zotrvačnosti a vplyvu rýchlosti otáčania na povahu prúdenia v bunke. V článku sú skúmané podmienky laminárneho a turbulentného prúdenia pri rozličných pomeroch Reynoldsovo čísla v oblasti bežca (Rer) a na vtoku (Res).



Obr. 3-24 Nákres okrajových podmienok a geometrie [53].

V článku sa využíva funkcie adaptívneho zjemňovania domény (adaptively refined mesh), vďaka čomu je oblasť mazacej vrstvy zjemňovaná pretože je v porovnaní s výškou mazacej vrstvy (0,0762 mm) násobne väčšia. Numerická analýza je založená na riešení Navier-Sotkesových rovníc. Modelovanie turbulencie je realizované za pomoci k-ε modelu s logaritmickejšími stenovými funkciami.

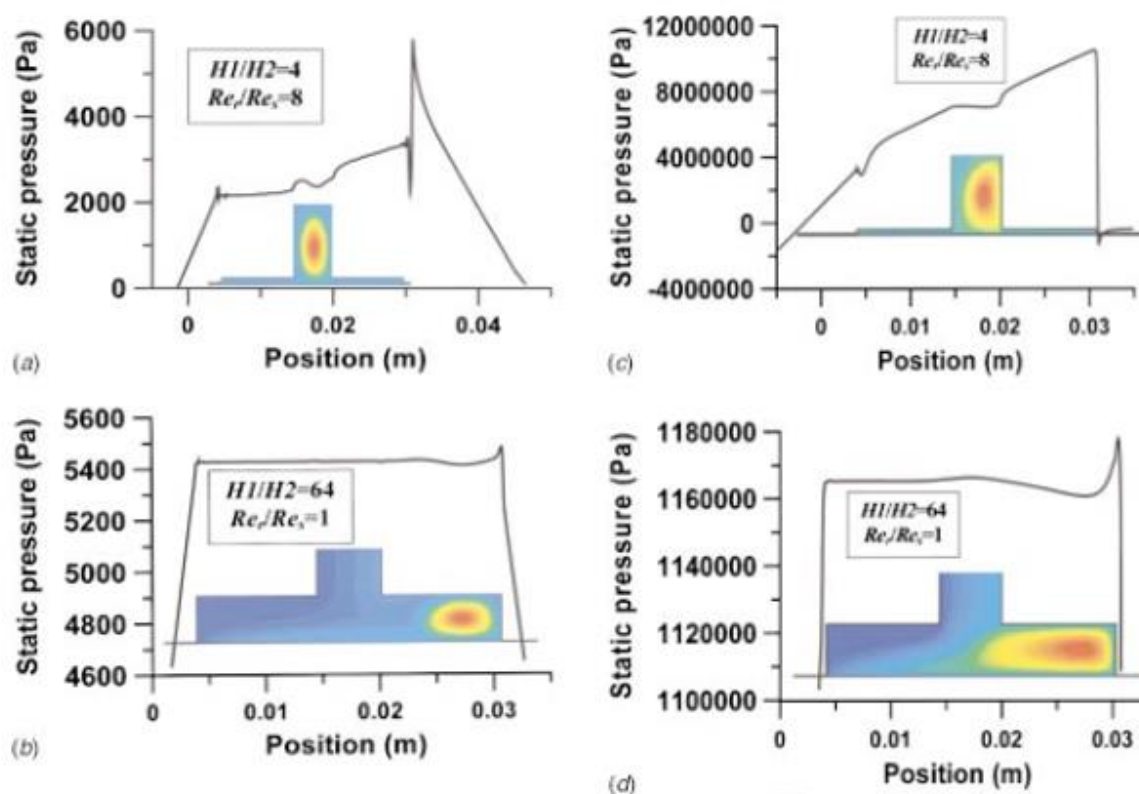
Výsledky

Pre bunky s pomerom H/h v rozsahu 16-32 je tlak v oblasti bunky približne konštantný a obežníkového tvaru s minimálnym zakrivením na prechode medzi klznými povrchmi. Zakrivenie tvaru tlakovej krivky je najvýraznejšie po prúde, resp. po smere otáčania. Tento fenomén sa vyskytuje u oboch typov prúdenia, avšak u laminárneho prúdenia je zmena prudšia. Zakrivenie je vysvetľované ako dôsledok prítomnosti recirkulačných zón v rohu bunky na prechode medzi klznými plochami (Obr. 3-25). Je tu popisovaná podobnosť s Rayleighovým schodovým ložiskom kde schod vytvára visko-zotrvačný efekt a nadľahčuje záťaž. Nárast, resp. pokles tlaku je potom charakterizovaný pozitívnym alebo negatívnym charakteristickým číslom pre tlakový nárast/pokles z rovnice:

$$\xi = \frac{(P_r - P_f)}{0,5 \cdot \rho \cdot V_{xm}^2} \quad (16)$$

kde P_r a P_f sú priemerovaný tlak pozdĺž mazacej vrstvy v bunke a v mazacom filme, ρ je hustota a V_{xm}^2 je priemerovaná rýchlosť pohybu v oblasti mazacej vrstvy. Prechod medzi tlakovou stratou a nárastom nastáva pre približne $Re_r/Re_s = 4$. V prípade turbulentného režimu dochádza iba k nárastu a výsledný tlak je omnoho vyšší. Výsledky práce ukazujú, že turbulentný režim je menej ovplyvňovaný recirkulačnými zónami ale vplyv pomeru H/h

nesmie byť zanedbaný. Na rozdiel od toho výsledky ukazujú, že pomer H/h nemá u laminárneho typu prúdenia výrazný vplyv.



Obr. 3-25 Porovnanie tlakových vzorov pre laminárny režim a pomer a) $H/h = 4$, b) $H/h = 64$, turbulentný režim pre pomer c) $H/h = 4$ a d) $H/h = 64$ [53].

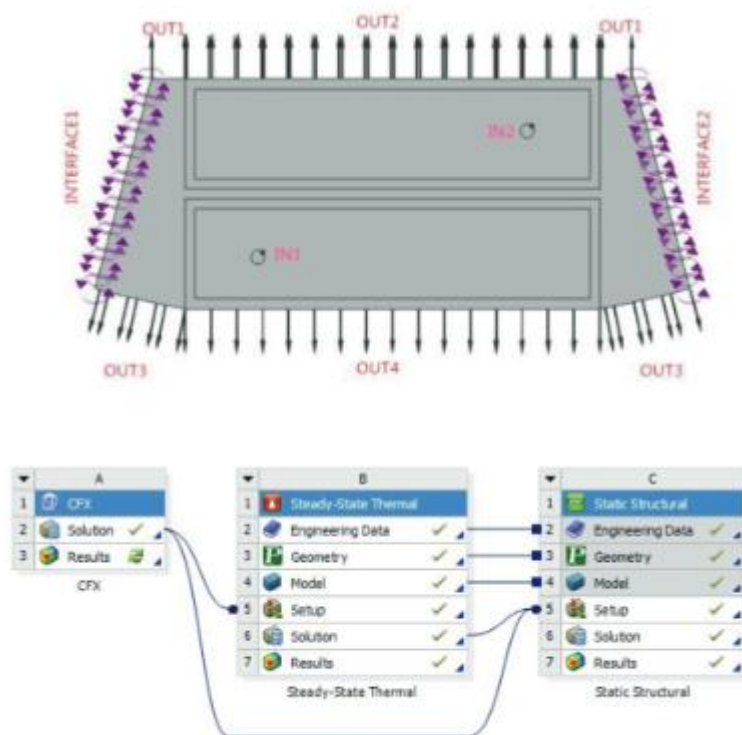
Záver

Pomer H/h je možné u laminárneho typu prúdenia zanedbať. V prípade turbulentného prúdenia je vplyv hĺbky bunky na výkonnostné parametre naopak výrazný. V práci sú porovnávané výsledky simulácií s dátami iného článku, kde ukazujú pomerné dobrú zhodu. Pre vyššiu dôveryhodnosť a presnosť výsledkov by bolo vhodné dané veličiny, ako je tlak v bunke, prípadne nárast teploty apod., vhodné porovnávať s experimentom. Práca má pomerne dobrý popis nastavenia simulácie a niektoré informácie je možné použiť na ďalší výskum v tejto oblasti. Z práce však priamo nevyplýva optimálny pomer H/h vzhľadom na prevádzkové parametre ložiska.

[54] YU, X. D., X. ZUO, C. LIU, X. H. ZHENG, H. QU, a T. F. YUAN. *Oil film shape prediction of hydrostatic thrust bearing under the condition of high speed and heavy load*, 2017.

Článok sa zaoberá modelovaním deformácie mazacej vrstvy o výške 0,11 mm pri vysokých otáčkach a zaťažení za pomoci softvéru ANSYS CFX využívajúci CFD. Z popisu plynie, že

bol využitý prepojený systém so štruktúrnou analýzou v prostredí ANSYS Workbench. Článok popisuje nastavenie simulácie v rámci softvéru CFX, nastavenie okrajových podmienok (Obr. 3-26) a taktiež aj vstupné hodnoty. Nachádzajú sa tu aj základné rovnice využívané v rámci numerických simulácií. Nejde o typický príklad modelovania interakcie kvapaliny a tuhých telies (fluid-structure interaction, FSI), ale o spojenie termálnej analýzy a deformácie tuhého telesa obdobným spôsobom.



Obr. 3-26 Okrajové podmienky numerickej simulácie s využitím symetrie a schematickým zobrazením pracovného postupu [54].

Konvergencia bola nastavená na 10^{-4} a výpočet bol ukončený po dosiahnutí tohto kritéria. Takýmto spôsobom chceli autori v článku predikovať tvar mazacej vrstvy pri vysokom zaťažení a vysokých otáčkach veľkého HS ložiska. Výsledky získané za pomoci numerických simulácií boli porovnávané s experimentálnym meraním na 12-kapsovom HS ložisku (Obr. 3-27) o priemere 3,5 m, zaťažení 35 t pri otáčkach 200 RPM.



Obr. 3-27 HS ložisko využívané pre experimentálne overenie výsledkov numerických simulácií [54].

Výsledky

Výsledky numerických simulácií slúžia pre získanie informácií o lokálnom zahrievaní maziva a zmeny teploty. Pomocou napojeného systému sú následne vyhodnocované deformácie klznej plochy, resp. ako autori uvádzajú tvar mazacej vrstvy. Získané výsledky z numerických simulácií a meraní sú uvedené v Tab. 5. Výsledky vykazujú prekvapivo veľmi vysokú zhodu, čím je podporené natavenie a spôsob prevedenia simulácie. Pri popise experimentálnej výbavy však nie je uvedený žiaden popis presnosti snímačov, kalibrácia, a miesta a spôsob vyhodnocovania, čo naopak výrazne uberá na dôveryhodnosti prezentovaných výsledkov.

Tab. 5 Porovnanie výšky mazacej vrstvy z výsledkov získaných za pomoci simulácií a meraní

Rýchlosť otáčania (RPM)	20	40	60	80	100	120	140	160
Výsledky simulácie	0,091	0,09	0,089	0,088	0,087	0,085	0,084	0,084
Výsledky experimentov	0,093	0,093	0,092	0,092	0,091	0,091	0,089	0,088

Záver

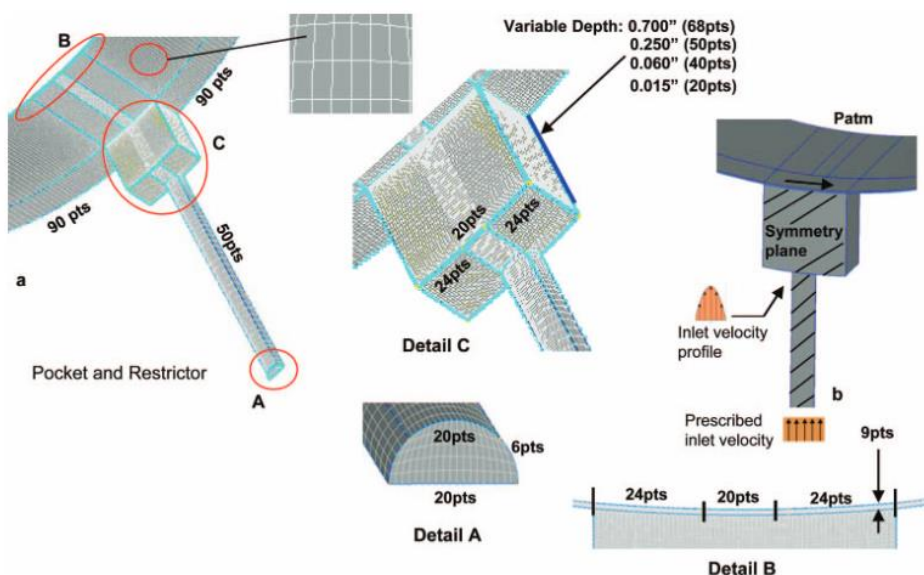
Uvažovanie tepelných účinkov a zotrvačných účinkov je nevyhnutné pre dosiahnutie optimálnych prevádzkových parametrov HS uloženia. Práca načrtáva možný postup analýzy

deformácií a ich vplyvu na výšku a tvar mazacej vrstvy. Výsledky simulácií ukazujú veľmi dobrú zhodu s experimentom. Veľkým negatívom je naopak nízka dôveryhodnosť výsledkov z experimentálnych meraní, pretože chyba ich bližší a detailnejší popis.

[28] HORVAT, F. E. a M. J. BRAUN. *Comparative experimental and numerical analysis of flow and pressure fields inside deep and shallow pockets for a hydrostatic bearing*, 2011.

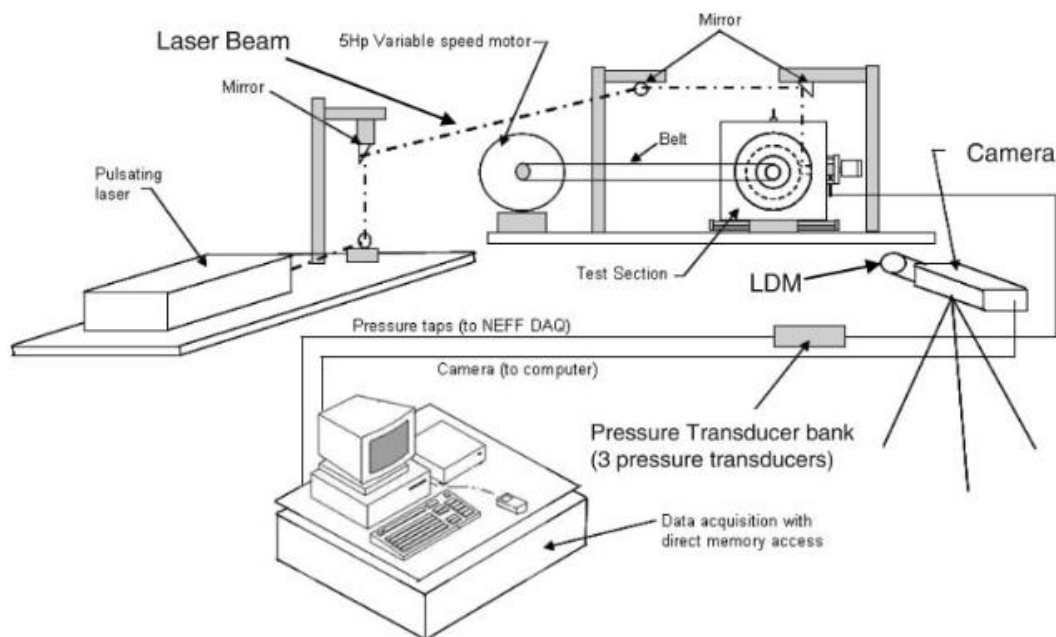
[47] SHEN, F., C. L. CHEN, a Z. M. LIU. *Effect of Pocket Geometry on the Performance of a Circular Thrust Pad Hydrostatic Bearing in Machine Tools*, 2014.

Vyššie uvedené články sa zaoberajú vplyvom hĺbky bunky HS ložiska na povahu prúdenia v bunke s využitím CFD a experimentálneho overenia získaných výsledkov. Oba články využívajú softvér CFD-ACE+, schémy druhého rádu pre rovnice hybnosti a schému SIMPLEC pre výpočet tlakov. Diskretizácia domény využívanej v [28] je zobrazovaná na Obr. 3-28. Obe práce využívajú diskretizáciu FVM a simulujú ustálený stav (steady state).



Obr. 3-28 Detail diskretizovanej oblasti bunky a kapsy so znázornením okrajových podmienok simulácie [28].

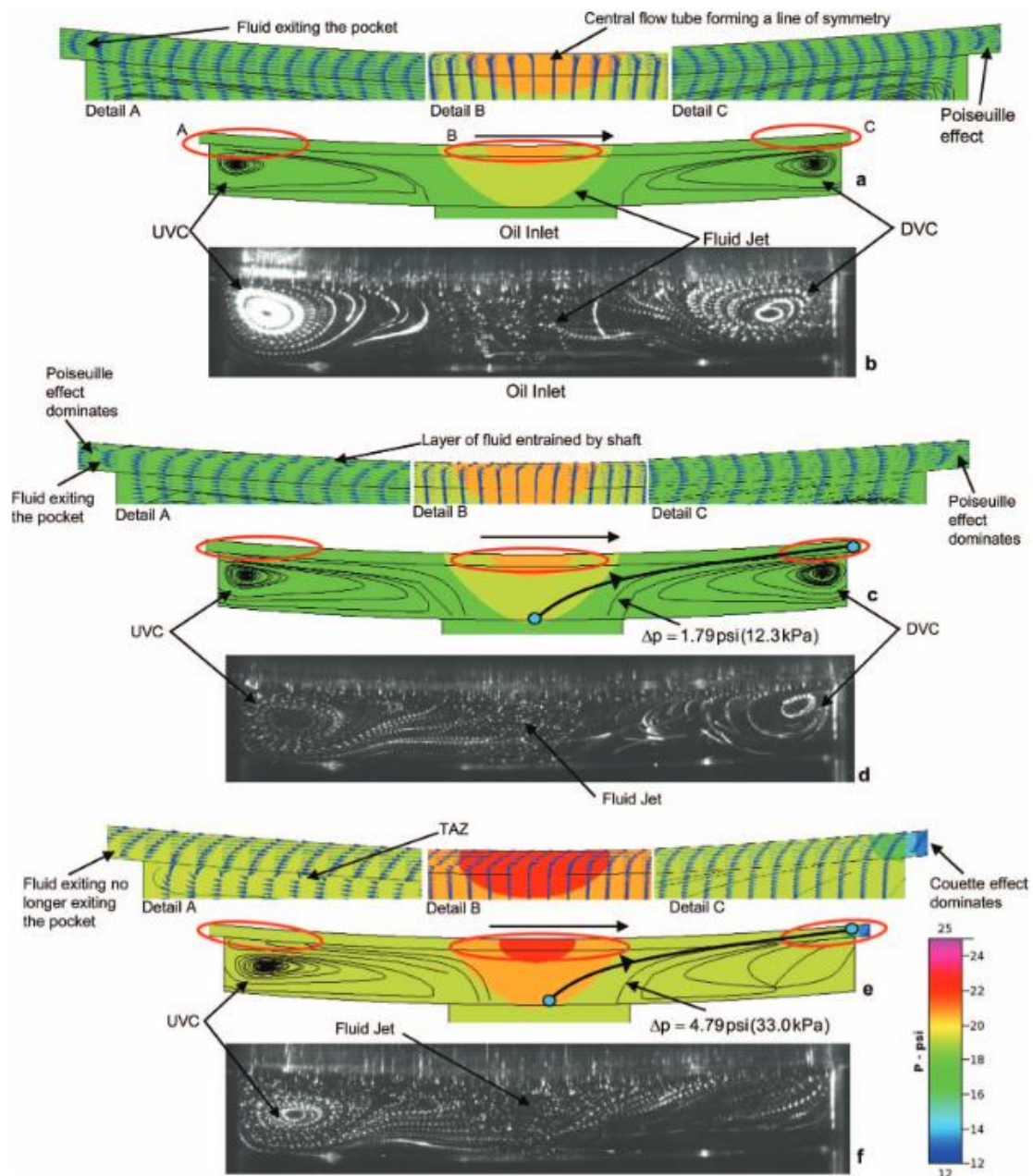
Publikácia [28] sa zameriava na mazací film syntetického oleja o hrúbke 0,33 mm a zameriava sa na porovnanie správania prúdenia zo simulácií a vizualizácie za pomoci laserového lúča (Obr. 3-29). Článok [47] uvažuje 60 μm hrubý mazací film a publikácia porovnáva výsledky simulácií podobným spôsobom. Pomer hĺbky bunky k hrúbke mazacej vrstvy (H/h) je 4,6-54 [28], resp. 4-152 [47]. Publikácia [28] sa zameriava aj na pomer hĺbky bunky k charakteristickému rozmeru (šírke bunky). Ďalším vyšetrovaným parametrom u oboch prác je aj povaha prúdenia vyjadrená Reynoldsovým číslom na vtoku (Re_{in}) a v bunke (Re_s resp. Re_{jet}).



Obr. 3-29 Schéma experimentálnej aparatury pre overenie výsledkov simulácií [28].

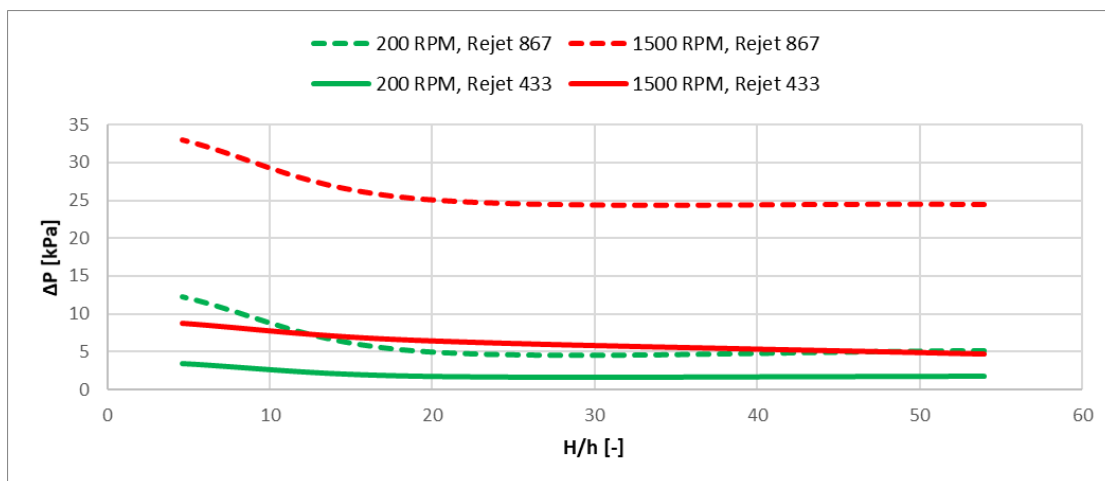
Výsledky

Výsledky numerických simulácií práce [28] sú porovnávané s vizualizáciou prúdenia za pomoci experimentálneho zariadenia s využitím laserového lúča. Štúdia [47] využíva obdobný systém pre zaznamenávanie povahy prúdenia za pomoci častíc rozptýlených v kvapaline (particle tracking system). Z porovnaní je vidieť pomerne dobrú zhodu tvarov prúdnic z numerických simulácií a z experimentov. S využitím numerických simulácií je zároveň možné vyhodnocovať tlakové straty spôsobené intenzitou zavírenia v oblasti rohu bunky HS ložiska. Podľa výsledkov [28] pri nízkych otáčkach dominuje na výstupe Poiseuillov efekt, kdežto pri vysokých otáčkach už jednoznačne prevláda Couettov efekt a podľa zmyslu otáčania môže v krajnom prípade dôjsť až k stavu, kedy jednou stranou neprúdi mazivo von z bunky. Pri vysokých otáčkach sa v niektorých prípadoch stráca vír po smere zmyslu rotácie (DVC).



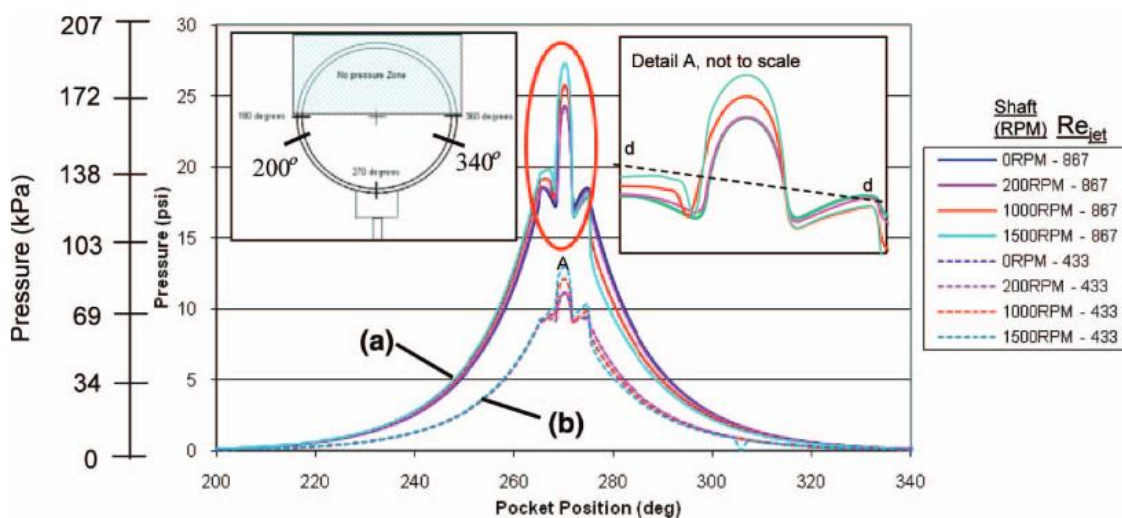
Obr. 3-30 Porovnanie výsledkov vizualizácie prúdenia numerickej simulácie a experimentu pre 1,52 mm hĺbokú bunku pri pokoji, stredných otáčkach (200 RPM) vysokých otáčkach (1500 RPM) [28].

Pri porovnaní výsledkov z [28] rôznych pomerov H/h (hĺbka bunky k výške mazacej vrstvy) z Obr. 3-31 je možné usúdiť, že zmena hĺbky bunky v rozsahu pomerov H/h 4,6-19 má minimálny vplyv na tlakové straty a v rozsahu pomerov H/h 20-50 má variácia hĺbky bunky takmer zanedbateľný vplyv. Je zrejmé, že na veľkosť tlakovej straty najviac vplýva rýchlosť otáčania a v druhom rade majú vplyv na veľkosť tlakových strát parametre dodávanej tlakovej kvapaliny. Percentuálny rozdiel max. tlakovej straty je max 5 %.



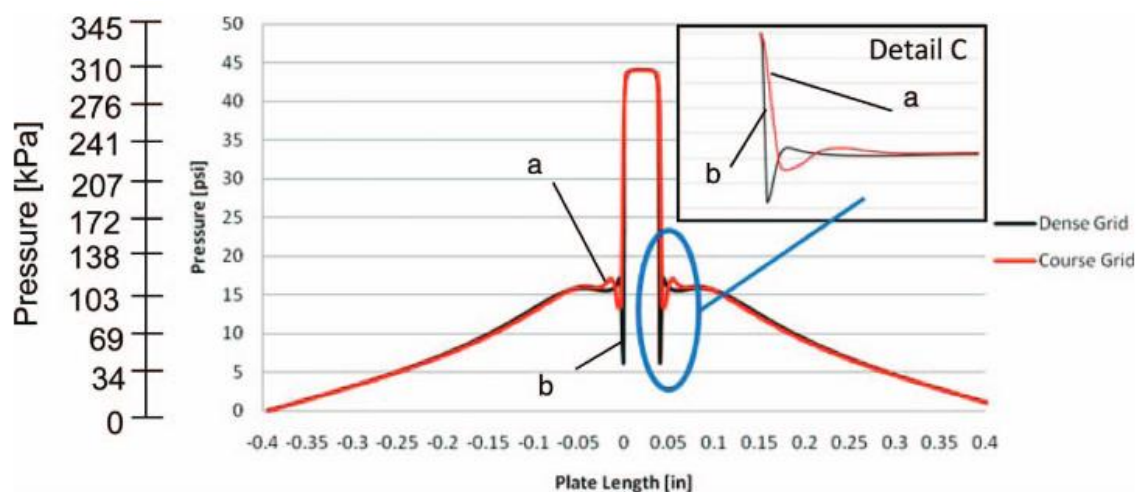
Obr. 3-31 Porovnanie tlakovej straty pre rôzne pomery H/h pri nízkych (200 RPM) a vysokých otáčkach (1500 RPM) s rôznymi vstupnými parametrami prúdenia (vizualizácia dát z [28]).

Na Obr. 3-32 je vidieť že v prípade bunky s hĺbkou blízkou výške mazacej vrstvy sa mierne mení rozloženie tlakov v bunke. Pri zmene charakteristiky vstupnej kvapaliny je však rozdiel omnoho výraznejší.



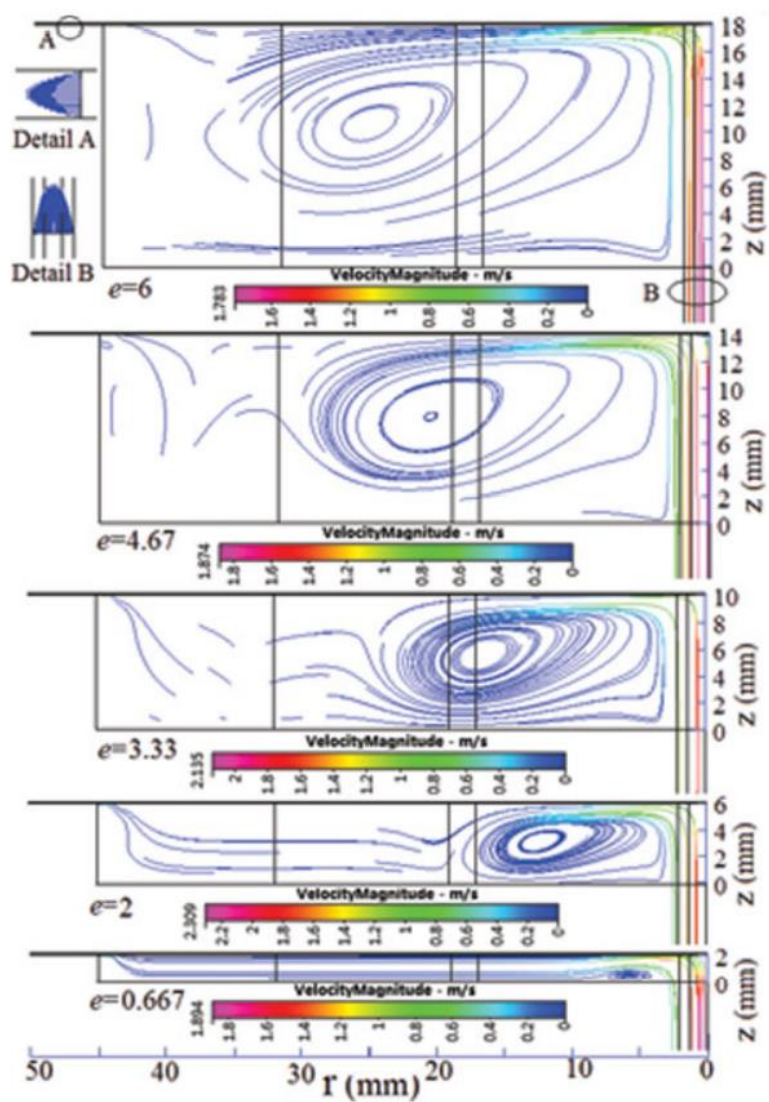
Obr. 3-32 Porovnanie rozloženia tlakov pre hĺbku bunky 0,38 mm a výšku mazacej vrstvy 0,33 mm pri rôznych otáčkach a charakteroch prúdenia na vstupe do bunky [28].

V prípade numerických simulácií má rozhodujúci vplyv na presnosť výsledkov kvalita výpočtovej siete. Z Obr. 3-33 je zrejmé, že výsledky s využitím hrubej (coarse grid) a hustej (dense grid) siete sa dá dosiahnuť veľmi podobných výsledkov, ale zanedbávajú sa drobné zmeny, ktoré môžu mať výrazný vplyv na prevádzkové parametre. Ako je vidieť na detaile C, s využitím hustej siete je možné zachytiť aj vplyv hrán, prípadne drobné zmeny geometrie.



Obr. 3-33 Porovnanie vplyvu kvality výpočtovej siete na výsledky numerických analýz [28].

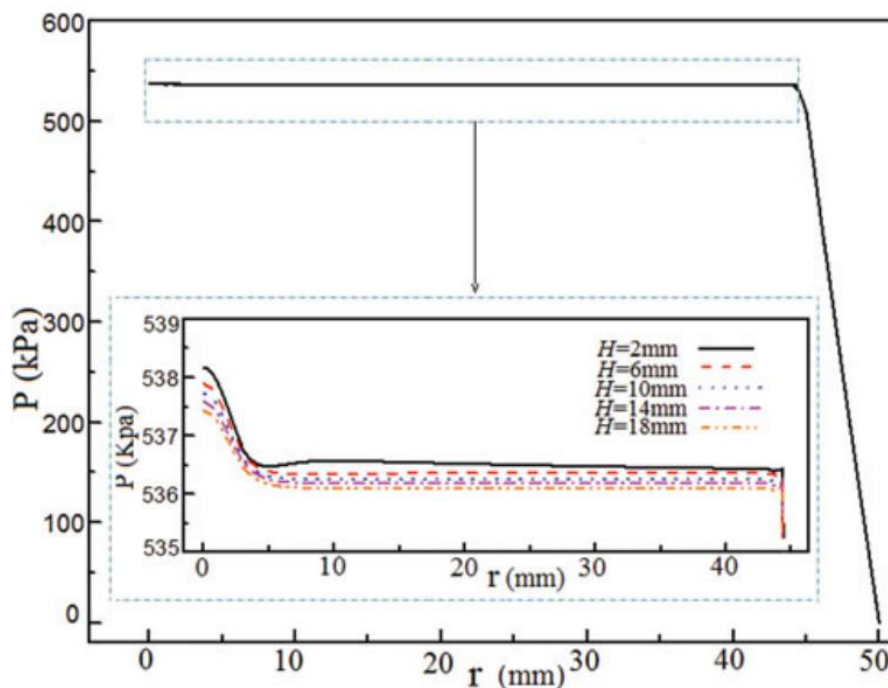
Výsledky práce [47] vykazujú podobne dobrú zhodu experimentálnych meraní a numerických simulácií. Na Obr. 3-34 sú zobrazené rezy bunkou s vykreslením rýchlostných profilov pre výšku mazacej vrstvy $60\text{ }\mu\text{m}$, čím vzniká pomer H/h v rozsahu od 33,33 (pre $H = 2\text{ mm}$) do 296,67 (pre $H = 17,8\text{ mm}$).



Obr. 3-34 Vizualizácia prúdenia v bunke HS ložiska s výškou mazacej vrstvy 60 mm a variáciu hĺbok bunky od 17,8 po 2 mm [47].

Výsledky [47] ukazujú, že hĺbka bunky má len veľmi malý vplyv na rozloženie tlakov v bunke (Obr. 3-35). Najväčší rozdiel tlakov medzi jednotlivými hĺbkami buniek je menej

ako 0,3 kPa, čo je v porovnaní so vstupným tlakom 700 kPa (7 bar), čo vytvára zanedbateľný rozdiel menší ako 1 %.



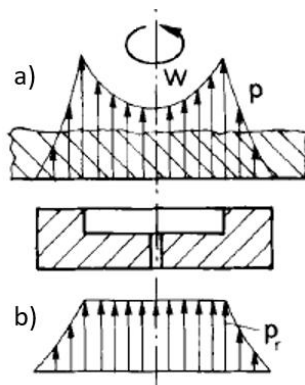
Obr. 3-35 Závislosť hĺbky bunky na rozloženie tlaku v bunke pri $60 \text{ Re}_{in} = 270$ a $\text{Re}_s = 0$ [47].

Záver

Podľa výsledkov vyššie uvedených prác by sa optimálny pomer H/h (hĺbky bunky k výške mazacej vrstvy) mal nachádzať v oblasti 20-50. Limitáciou je, že v publikácii [28] je vyšetrovaná pomerne vysoká mazacia vrstva (0,33 mm) a obe práce uvažujú relatívne nízky tlak (7 bar) v porovnaní s obvykle používaným pracovným tlakom v teleskopoch a anténach veľkých rozmerov (obvyklý rozsah 20-40 bar) [34]. Z výsledkov prác vyplýva, že dominantný vplyv na charakter prúdenia v bunke má rýchlosť otáčania a menej výrazný vplyv parametre vtekajúcej tlakovej kvapaliny do bunky. Vplyv zmeny hĺbky má minimálny až zanedbateľný vplyv na veľkosť tlakových strát. Tie sa pohybujú podľa výsledkov numerických simulácií v rozsahu 1-5 %, čo by nemalo zapríčiniť výrazný rozdiel v správaní HS uloženia. V práci [28] bolo realizované aj porovnanie vplyvu kvality siete na výsledky, ale chýba podrobnejšia citlivostná analýza, ktorá by uvažovala viac ako 2 nastavenia výpočtovej siete. Výsledky však neboli overené experimentálne a presnosť numerických modelov bola overovaná iba podľa tvarov prúdnic v bunke.

[37] BAKKER, O. J. a R. A. J. van OSTAYEN. *Recess depth optimization for rotating, annular, and circular recess hydrostatic thrust bearings*, 2010.

Článok [37] pojednáva o optimalizácii výšky mazacej vrstvy v oblasti bunky s uvažovaním odstredivých síl. Pri výpočte sa obvykle uvažuje, že prúdenie je čisto laminárne a zanedbávajú sa zotrvačné účinky. Autori sa však domnievajú, že odstredivé zrýchlenie má pri vysokých rýchlostiach prevládajúci vplyv na povahu prúdenia, čo podporuje predpoklad z [54] a zhodnotenie vplyvu zotrvačných účinkov z knihy [19].



Obr. 3-36 Rozloženie tlaku v kapse HS ložiska a) pri vysokých otáčkach b) pri nízkych otáčkach/v pokoji [19].

V práci je predstavený spôsob návrhu optimálnej hĺbky bunky s využitím Ekmanovho čísla:

$$Ek = \frac{\mu}{\rho \Omega H_0^2} \quad (17)$$

kde μ je dynamická viskozita, ρ hustota kvapaliny, Ω uhlová rýchlosť a H_0^2 je hrúbka mazacej vrstvy. Na základe čoho je vyjadrený vzťah pre optimálnu hĺbku bunky :

$$\hat{H}_{opt} = \sqrt[4]{\frac{700}{3} Ek^2} \quad (18)$$

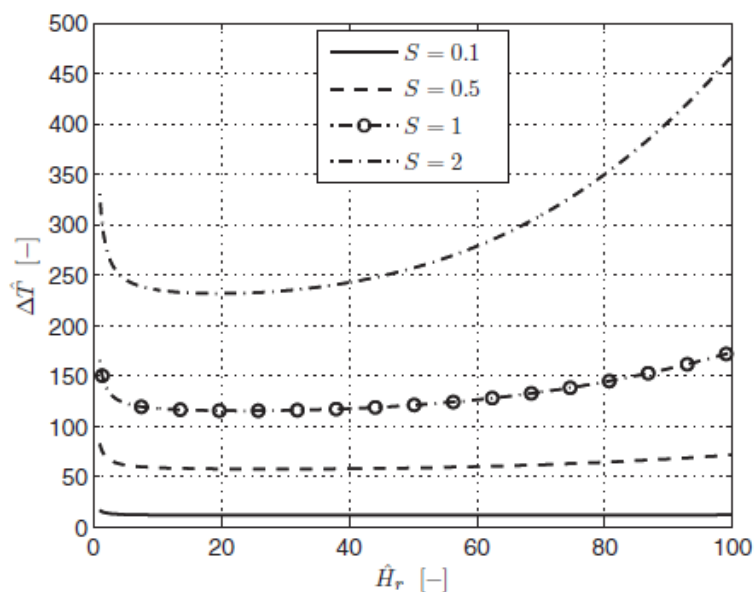
Ďalej je uvedený aj výpočtový vzťah pre získanie optimálnej návrhovej veličiny hĺbky mazacej vrstvy:

$$C_r = H_0 \left(\sqrt[4]{\frac{700}{3} Ek^2} - 1 \right) \quad (19)$$

V práci je uvedený aj príklad pre výpočet kruhovej a medzikruhovej bunky v závislosti na rôznych prevádzkových parametroch pre dosiahnutie minimálneho nárastu teploty.

Výsledky

Z výsledkov je zrejmé, že pri zanedbaní účinkov zotrvačnosti kvapaliny pri vysokých otáčkach nemá hĺbka bunky pozorovateľný vplyv na nárast teploty (Obr. 3-37). V prípade, že tieto účinky sú brané do úvahy tak pri rôznych podmienkach (zmena parametru S) dochádza k výraznej zmene teploty kvapaliny v bunke a tým aj k zmene výkonnostných parametrov – pri ohrievaní teda priamo k znižovaniu nosnosti. V oblasti hodnôt na vodorovnej ose 5-25 je vidieť, že zmena je minimálna. Mimo týchto oblastí je zmena teploty maziva výrazná, z čoho vyplýva, že by hĺbka bunky nemala byť menšia, alebo väčšia ako tento rozsah násobku výšky mazacej vrstvy.



Obr. 3-37 Závislosť bezrozmernej zmeny teploty na bezrozmernej hĺbke bunky pre rôzne parametre zotrvačnosti [37].

Záver

Práca prináša analytický prístup k získaniu optimálnej hodnoty hĺbky bunky HS ložiska so zameraním na minimalizáciu disipácie tepla pri vysokých otáčkach vplyvom zotrvačných účinkov. V článku je uvedený aj príklad aplikácie výpočtových vzťahov. Jedinou negatívnou stránkou článku je, že ide čisto o analytický prístup, a preto by bolo vhodné danú metodiku návrhu hĺbky bunky overiť experimentálne.

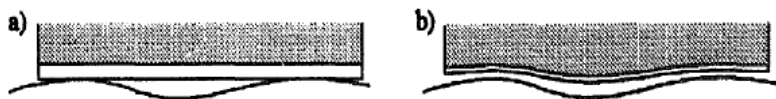
3.2.3 Podstava kapsy

[55] VAN BEEK, Antoon a Lubor LEPIC. *Rubber supported hydrostatic thrust bearings with elastic bearing surfaces of infinite length*, 1996.

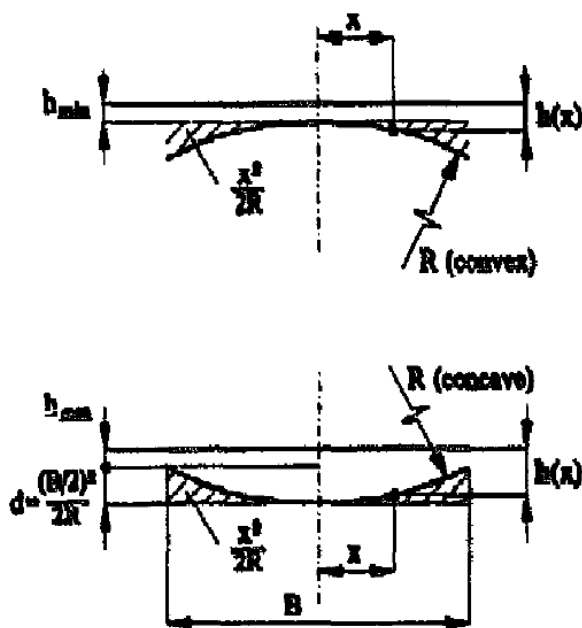
[56] VAN BEEK, A. a A. SEGAL. *Rubber supported hydrostatic thrust bearings with rigid bearing surfaces*, 1997.

[57] LIANG, Xingxin, Xinping YAN, Wu OUYANG, Robert J.K. WOOD, Fuming KUANG, Zhenglin LIU a Xincong ZHOU. *Comparison of measured and calculated water film thickness of a water-lubricated elastically supported tilting pad thrust bearing*. 2019.

Článok [55] sa zameriava na vhodnosť použitia elastických vložiek klzných povrchov u HS ložísk (Obr. 3-38). Práca predstavuje numerický príklad a porovnanie tvarov vložiek – s konkávnym a konvexným tvarom (Obr. 3-39). Výsledky práce [55] ukazujú, že konvexný tvar nie je vhodný na použitie u danej aplikácie.

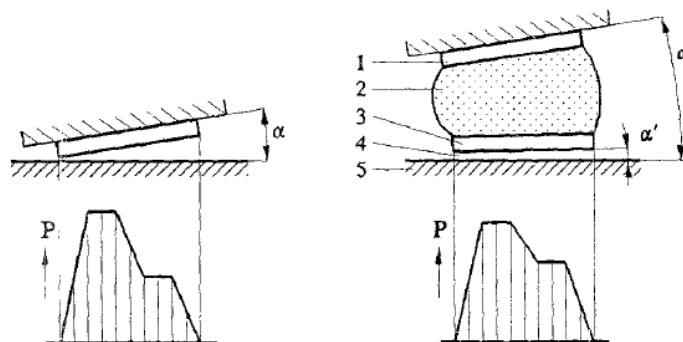


Obr. 3-38 Nerovnosti klzných povrchov protikusu s a) tuhým povrchom a b) s elastickým klzným povrchom [55].



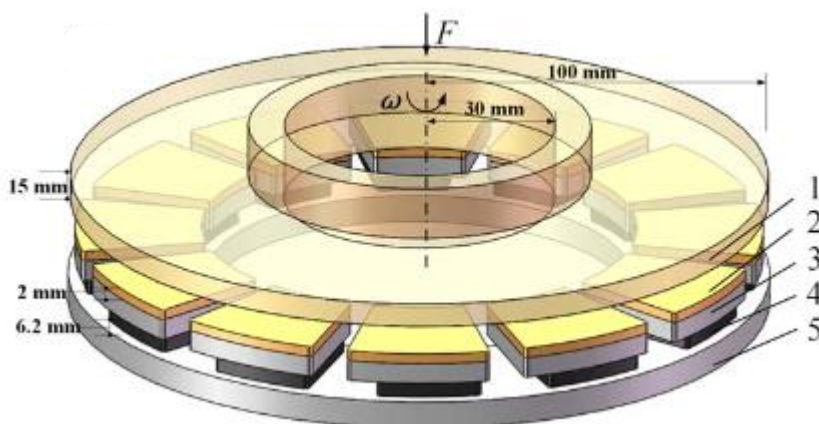
Obr. 3-39 Tvary elastickej vložky konvexný (hore) a konkávny (dole) spolu so znázornením pôsobenia excentrického zaťaženia (x) a minimálnej výšky mazacej vrstvy (h_{min}) [55].

Publikácia [56] predstavila numerický prístup k analýze deformácie gumového bloku pre hydrostatické axiálne ložiská s cieľom doceliť rovnomennejšiu mazaciu vrstvu. V práci je rozoberaný prípad excentrického zaťaženia.



Obr. 3-40 Rozloženie tlakov u tuhej podstavy (vľavo) a elastickej podstavy (vpravo): 1-podstava, 2-gumový blok, 3-klzná plocha, 4-mazacia vrstva, 5-klzná plocha protikusu [56].

Článok [57] prináša možnosť použitia gumovej podstavy u HD ložisku mazanom vodou. Numerické simulácie sú podporené experimentálnym meraním, pričom získané výsledky dosahujú dobrú zhodu. Práca je zameraná na iný typ ložiska, ale zakladá sa na podobných predpokladoch.



Obr. 3-41 Schéma experimentálneho HD ložiska zložená z častí: 1-rotačná platforma, 2-polymérový kompozit, 3-kovová vložka, 4-gumová podstava a 5-podstava ložiska [57].

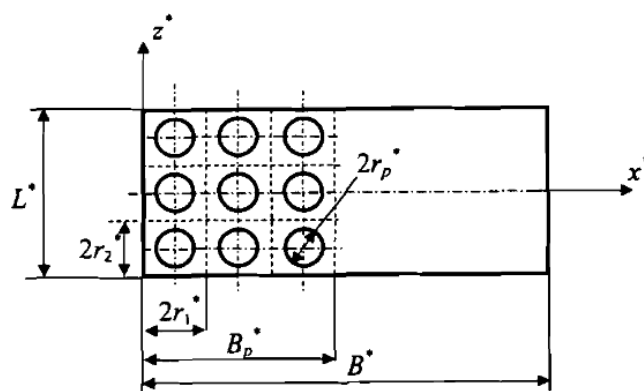
Záver

Výsledky vyššie rozobraných článkov ukazujú, že poddajná podstava umožňuje rovnomernejšie rozloženie tlakov v mazacej vrstve a tým vytvára rovnomernejší mazací film. Pri využití poddajných vložiek pre klzné plochy je možné doceliť podobného účinku, ale je nutné zohľadniť aj pevnosť materiálov v kontakte. Pri návrhu ložísk však musí byť zohľadňovaná poddajnosť týchto telies, ktorá môže negatívne ovplyvniť presnosť zariadenia.

3.2.4 Modifikácia klzných plôch

[58] BRIZMER, V., Y. KLIGERMAN a I. ETSION. *A laser surface textured parallel thrust bearing*, 2003.

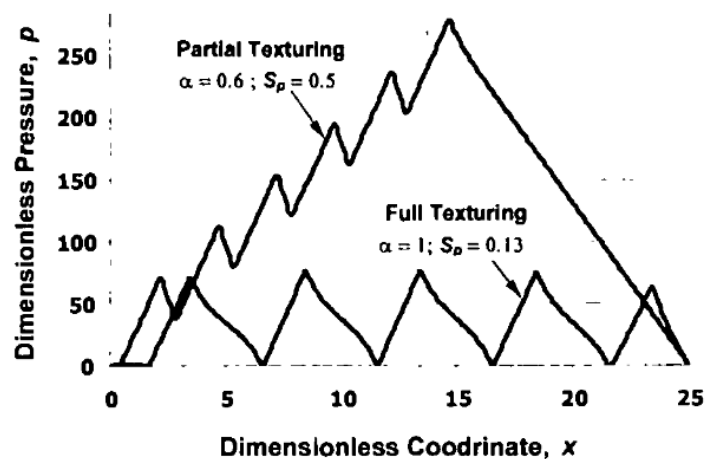
Článok sa zameriava na hľadanie optimálnych rozmerov jamiek textúry povrchov a porovnanie plne a čiastočne textúrovaných povrchov. Autori využívajú analytický model zohľadňujúci geometriu jamiek s využitím Reynoldsovej rovnice, ktorá bola prevedená do bezrozmernej formy. Následne bola vykonaná parametrická analýza a numerické simulácie rôznych variant rozmerov geometrie.



Obr. 3-42 model čiastočne textúrovaného bežca [58].

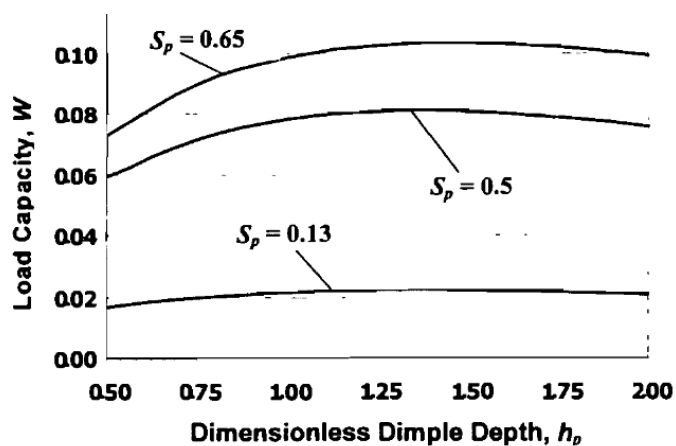
Výsledky

Čiastočné textúrovanie povrchu prispieva k kumulatívne nárastu tlaku o schodovitom tvare ako je na Obr. 3-43. Úplné textúrovanie nevykazuje kolektívny kumulatívny efekt, pričom dokonca na rozdiel od čiastočného textúrovania ani tento efekt nevzniká. Rozloženie tlakov má periodický lokálne stúpajúci a klesajúci trend v oblasti prejazdu cez jamky. Optimálna hustota jamiek pre dosiahnutie maximálneho tlaku a nosnosti je uvádzaná ako $S_p = 0,13$.



Obr. 3-43 Porovnanie bezrozmerných tlakov plne (full) textúrovaného a čiastočne (partial) textúrovaných povrchov bežca [58].

Výsledky ďalej naznačujú, že v prípade hustoty jamôk $S_p = 0,13$ má hĺbka jamky minimálny vplyv na nosnosť. U iných pomerov Obr. 3-44 je už pri zmene hĺbky pozorovateľná zmena nosnosti.



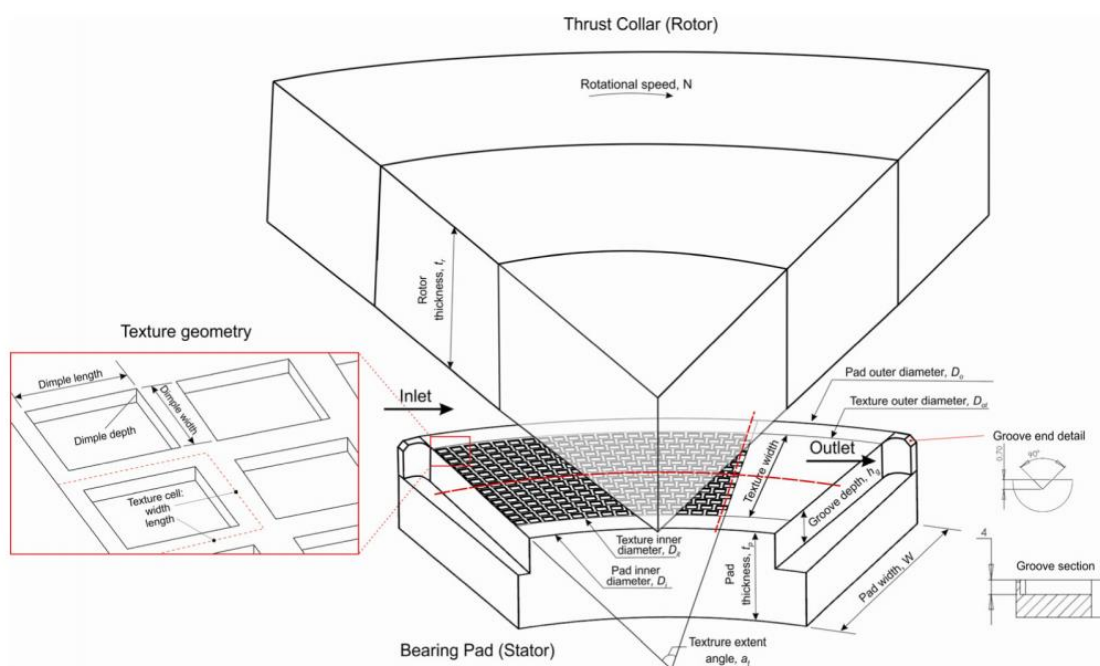
Obr. 3-44 Vplyv bezrozmerných parametrov hĺbky jamky na nosnosť [58].

Záver

Z výsledkov článku vyplývajú dôležité informácie pre návrh textúry konformných povrchov klzných plôch. Ukazuje sa, že čiastočným textúrovaním je možné doceliť vyššej nosnej schopnosti/tlaku ako s plnou textúrou. Nosná schopnosť je minimálne ovplyvnená zmenou hĺbky jamky v prípade optimálnej hustoty jamiek.

[59] CHARITOPOULOS, A., D. FOUFLIAS, C. I. PAPADOPOULOS, L. KAIKTSIS a M. FILLON. *Thermohydrodynamic analysis of a textured sector-pad thrust bearing: Effects on mechanical deformations*, 2014.

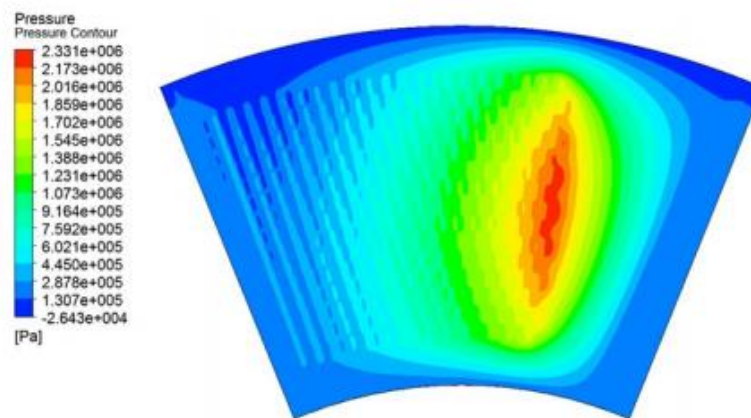
Článok sa zameriava na numerické modelovanie termohydrodynamického (THD) účinku a štrukturálnych deformácií rotoru (otočného stola) s textúrovaným statorom (kapsami) axiálneho HD ložiska (Obr. 3-45) s využitím CFD a FSI v prostredí ANSYS CFX. Článok sa zameriava na porovnanie rôznych hrúbok mazacej vrstvy v rozmedzí 5-20 μm a vplyv teplotných účinkov na výkonnostné charakteristiky ložiska.



Obr. 3-45 Geometria výpočtového modelu pre numerickú simuláciu [59].

Výsledky

Tepelné účinky hrajú významnú rolu pri prevádzke HD uložení. Ukazuje sa, že vplyvom tepelných účinkov dochádza k znižovaniu nosnosti z dôvodu zahrievania maziva a znižovania viskozity. Štrukturálne deformácie približne kopírujú trend tlakového poľa, pričom v mieste maximálneho tlaku dochádza analogicky k maximálnej deformácii rotoru.



Obr. 3-46 Tlakové pole textúrovanej kapsy axiálneho ložiska pri 4000 RPM, 15 μm mazacom filme a 2934 N zaťažení [59].

Záver

Vplyv tepelných účinkov má významný vplyv na výkonnostné charakteristiky uloženia a mal by byť obzvlášť dôkladne uvažovaný pri návrhu a vývoji rozmerných uložení. Vplyv pôsobenia tlakovej kvapaliny a tepelných účinkov môže byť použitý princíp FSI, podobne ako bol predstavený aj v tejto publikácii. Ukazuje sa, že čiastočné textúrovanie má pozitívny vplyv na tvorbu tlaku a nosnej schopnosti uloženia, čím sa potvrdzujú výsledky štúdie [58]. Je nutné podotknúť, že čiastočný tvar textúry by mal byť v prípade obojsmernej prevádzky uvažovaný pre obe strany kapsy.

3.2.5 Geometrická presnosť klzných povrchov

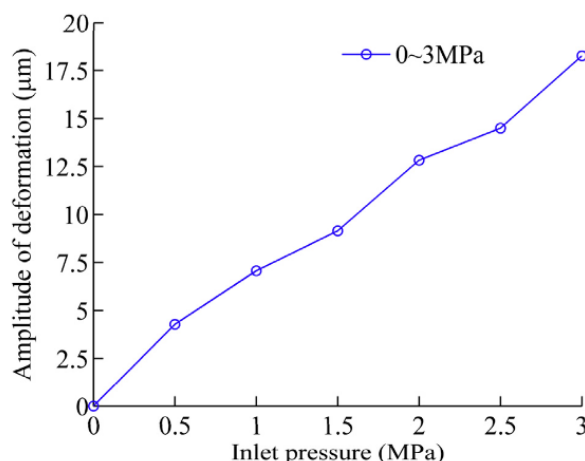
[60] WANG, Zhiwei, Wanhua ZHAO, Yaolong CHEN a Bingheng LU. *Prediction of the effect of speed on motion errors in hydrostatic guideways*, 2013.

[61] ZHANG, Penghai, Yaolong CHEN, Chengyong ZHANG, Jun ZHA a Tao WANG. *Influence of geometric errors of guide rails and table on motion errors of hydrostatic guideways under quasi-static condition*, 2018.

Články pojednávajú o prediktívnom modeli pre vyhodnocovanie odchýlky pohybu u HS vedení s využitím matematického modelu a experimentálneho overenia. Autori článku [61] predstavujú možnosť výpočtu s využitím tretej mocniny mazacieho filmu, ktorý sa vyskytuje aj v základných výpočtových vzťahoch HS uložení. V práci [61] je predstavený koncept predikcie s využitím priemerovacieho súčiniteľa chýb, ktorý môže prispieť k návrhu výrobných tolerancií.

Výsledky

Teoretická analýza naznačuje, že odchýlky pochybu sú primárne spôsobované geometrickými chybami klzných povrchov. Výsledky simulácií ukazujú, že s navyšujúcim dodávaným tlakom rozsah deformácií úmerne rastie (Obr. 3-47). Autori navrhujú, že pri vyššom počte kotviacich skrutiek podstavy je možné doceliť mierne vyšších presností.



Obr. 3-47 Závislosť amplitúdy deformácie na dodávanom tlaku do HS ložiska [61].

Záver

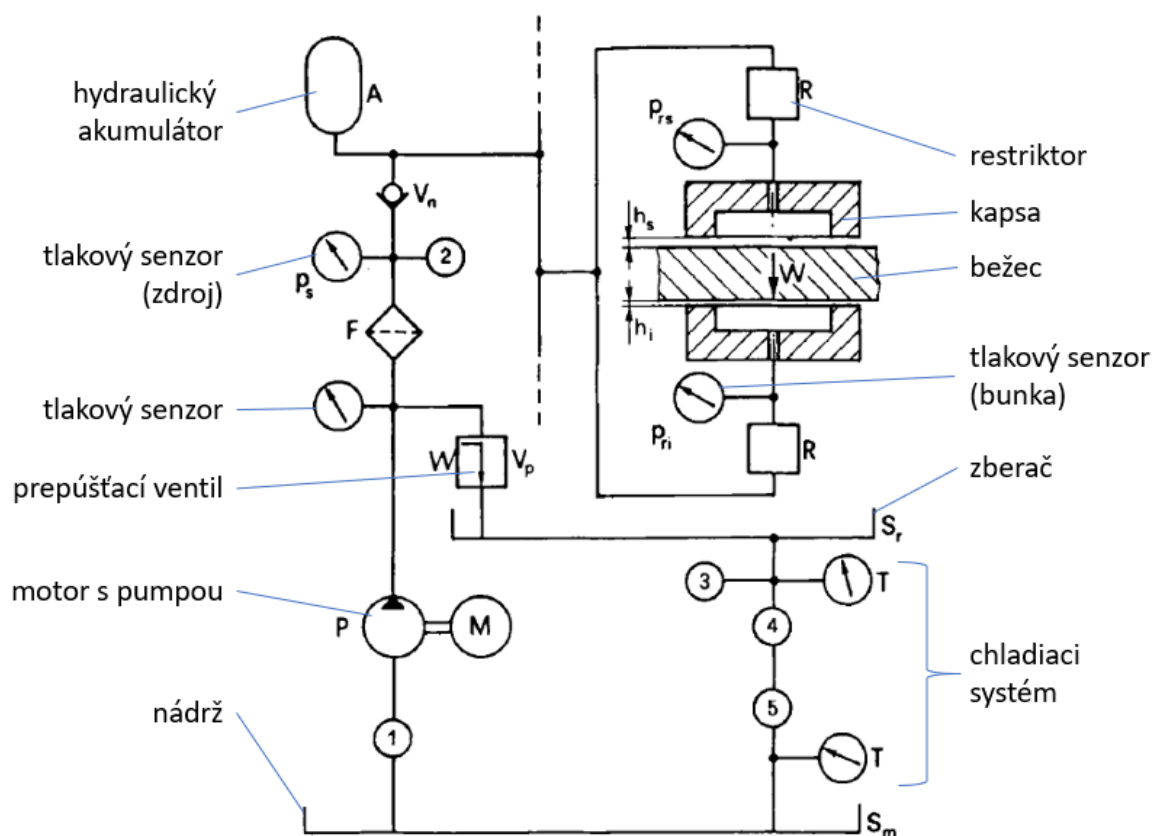
Články ponúkajú koncept pre predikciu odchýlky pohybu pre presné aplikácie HS vedení. Teoretické výsledky sú podporené experimentálnymi meraniami, s ktorými ukazujú pomerne dobrú zhodu. Výstupom článku je viacero odporúčaní pre dosiahnutie vyššej presnosti vedenia. Články neponúkajú odpovede na to, aké geometrické chyby sú prípustné pre dosiahnutie určitej presnosti pohybu.

3.3 Hydraulický okruh

Hydraulický okruh (Obr. 3-48) sa skladá z nádrže s dostatočným množstvom maziva pre zásobovanie celého okruhu a všetkých káps HS uloženia. Filter býva obvykle umiestnený už na pozícii (1) aby sa prípadné nečistoty nedostávali do pumpy a hydraulických komponentov. Ďalej nasleduje prepúšťací ventil pre reguláciu tlaku a meracie prvky pre získanie informácie o dodávanom tlaku (P_s) a prietoku (Q). Súčasťou sú aj bezpečnostné prvky pre zamedzenie poškodenia hydraulického okruhu. Do okruhu býva obvykle zaradený aj hydraulický akumulátor pre prípad, že by mohlo dôjsť k zlyhaniu hydraulického agregátu, napr. pri náhlemu výpadku elektrickej energie apod. Následne je okruh rozdelený do vetiev kadiaľ je distribuovaná tlaková kvapalina do všetkých káps/buniek prostredníctvom hydraulických hadíc, prípadne trubiek. Pred vstupom do bunky býva obvykle zaradený restriktor (škrtiaci ventil / clona / iný typ restriktora), ktorý slúži ako bezpečnostný prvok zamedzujúci zlyhaniu mazacej vrstvy v prípade nerovnomerného zaťažovania, montážnych

chýb, prípadne ďalších stavov, ktoré môžu počas prevádzky nastať. Olej vytekajúci z káps je zberaný a odvádzaný späť do nádrže cez chladiaci systém (pokiaľ je nutný). Na odtoku obvykle nebýva filtračný prvok pokiaľ ide o systém s voľným odtokom.

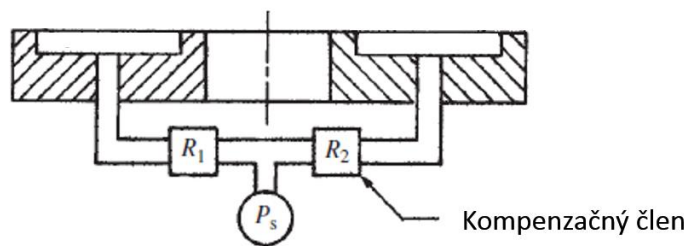
Hydraulický systém býva obvykle prispôbovaný požadovaným parametrom HS uloženia. Návrh parametrov hydraulického akumulátora by mal odrážať predpokladanú dobu zastavenia z plnej rýchlosti do zastavenia. Obvykle dokáže držať dodávaný tlak rádovo v jednotkách sekúnd, pričom závisí na type náplne a veľkosti [62–64]. Zvolený typ a parametre restriktora výrazne ovplyvňujú prevádzkové vlastnosti HS ložiska, a preto bola značná pozornosť výskumu a vývoja z oblasti HS mazania zameraná práve na tieto prvky. V nasledujúcich kapitolách budú tieto dôležité bezpečnostné prvky rozobrané detailnejšie.



Obr. 3-48 Hydraulická schéma protichodného viac-kapsového HS uloženia [4].

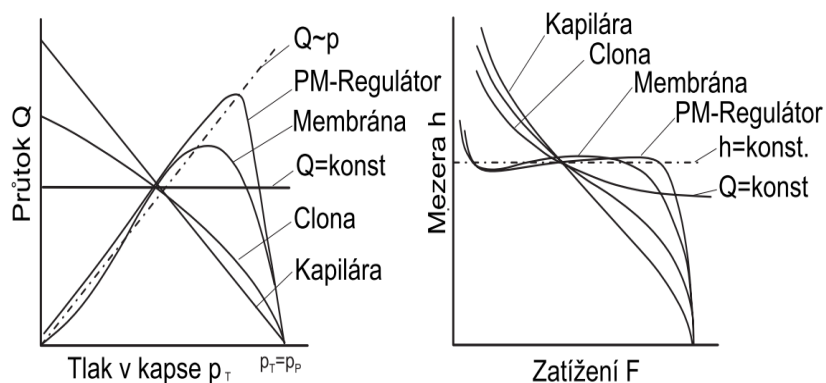
3.3.1 Kompenzačné členy

Pre správnu funkciu ložiska je potrebné zaistiť rovnomernú a nezávislú distribúciu kvapaliny do všetkých káps a buniek, aby bola **zachovaná konštantná výška mazacej vrstvy** medzi klznými povrchmi. Pri nesymetrickom zaťažení (Obr. 3-1) je možné udržiavať konštantnú medzeru dvomi spôsobmi: a) použitím samostatného čerpadla pre každú bunku, b) zavedením kompenzačných členov do hydraulického obvodu (Obr. 3-49).



Obr. 3-49 Schéma hydrostatického uloženia s kompenzačnými členmi

Pri navýšení zaťaženia hydrostatického ložiska musí dôjsť k navýšeniu tlaku v bunkách, čo je možné zaistiť pomocou regulačných prvkov, alebo aj tzv. kompenzačných členov, prípadne restriktorov, ktoré zvyšujú tuhosť uloženia. Cieľom pri voľbe vhodného kompenzačného člena je čo najviac sa priblížiť ideálnemu stavu, ktorý je znázornený čiarkovanou čiarou (Obr. 3-50).



Obr. 3-50 Charakteristiky hydrostatických systémov

Systémy regulácie tlaku sú bližšie špecifikované v Tab. 6. Okrem uvedených restriktorov je možné považovať za určitý typ restriktoru aj vtokový otvor, ktorého charakteristický súčiniteľ sa mení s hrúbkou mazacej vrstvy [4].

Tab. 6 Systémy regulácie tlaku pre hydrostatické ložisko

Regulačný systém	Charakteristika	Vhodnosť	Cena
S pevnou geometriou (kapilára, clona) [49, 65–67]	Rovnomerná distribúcia za konštantných strát tlaku, ktoré sa premieňajú na teplo.	Hydrostatické uloženia s vyšším počtom buniek. Zariadenia nevyžadujúce vysokú presnosť a variabilitu. Pre rovnomerne zaťažované zariadenia.	Nízka

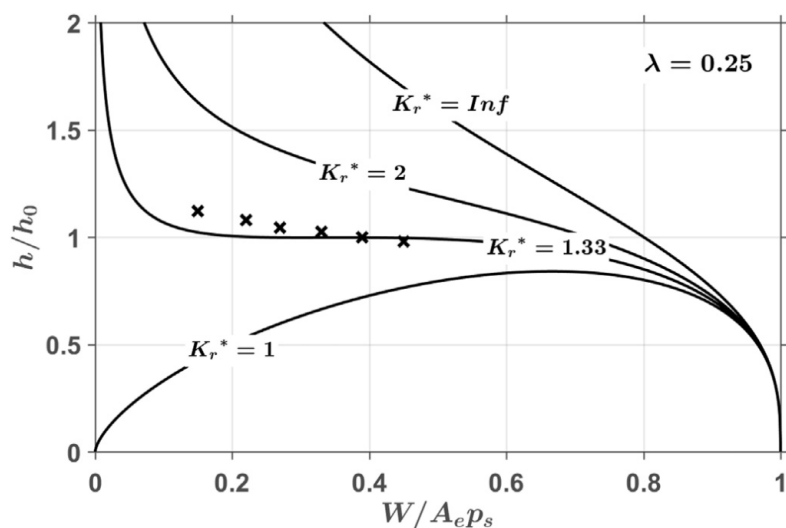
Konštantný prietok [68, 69]	Rovnomerná distribúcia, strata závislá na zaťažení U viacerých buniek môžu byť čerpadlá na spoločnej hriadieli poháňané jedným motorom.	Hydrostatické uloženia s malým počtom buniek. Presné polohovacie zariadenia. Väčší rozsah zaťaženia s nerovnomerným zaťažovaním.	Stredná/ Vysoká
Membránový [14, 15, 70]	Zaisťuje rovnomernú distribúciu a reguláciu konštantnej medzery, straty sú závislé na zaťažení. Vyznačuje sa vysokou tuhosťou a stabilitou dodávaného maziva.	Hydrostatické ložiská s malým počtom buniek (potreba pre každú bunku). Presné obrábacie alebo polohovacie zariadenia. Nerovnomerné zaťažovanie a veľký rozsah zaťaženia [24].	Vysoká
Samoregulačné ložiská [71]	Nepotrebujú distribučný systém a regulujú hrúbku mazacej vrstvy samé.	Možnosť aplikácie iba na uzavreté vedenia.	Stredná
Spätnoväzobné riadenie [72]	Hydraulický odpor bunky pracuje so spätnou polohovou väzbou pre zachovanie konštantnej medzery alebo stálu polohu pohyblivej časti vedenia.	Regulačný systém hydrostatických vedení. Obrábacie stroje s vysokou presnosťou.	Vysoká

[70] LAI, T. H., T Y. CHANG, Y. L. YANG a S. C. LIN. *Parameters design of a membrane-type restrictor with single-pad hydrostatic bearing to achieve high static stiffness*, 2017.

Článok sa zaoberá návrhom a analýzou parametrov membránového restriktoru pre HS uloženie za pomoci dvoch primárnych veličín: bezrozmerná tuhosť a škrtiaci pomer restriktoru.

Výsledky

Pri určitých hodnotách súčiniteľov tuhosti membrány a pomeru regulácie je teoreticky možné dosiahnuť až nekonečnú tuhosť pre široký rozsah hodnôt prenášanej záťaže hydrostatickým ložiskom. V praxi je tuhosť limitovaná podmienkami a materiálovými vlastnosťami membrány. Experimentálne dáta ukazujú pomerne dobrú zhodu so simuláciou v meranej oblasti (Obr. 3-51).



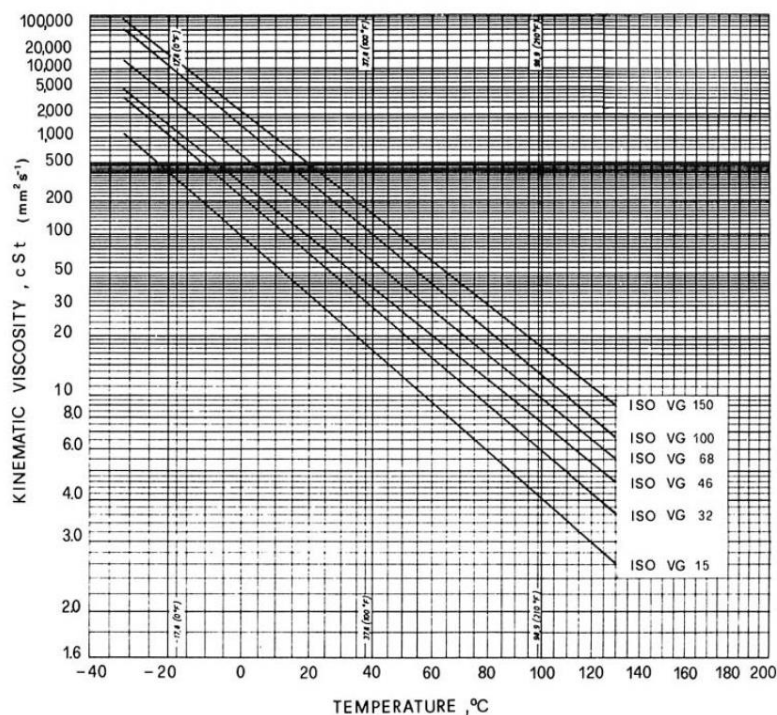
Obr. 3-51 Porovnanie vypočítaných kriviek tuhosti s experimentálnymi dátami (krížik) pre membránový restriktor [70].

Záver

S využitím membránových restriktorov je možné dosiahnuť vysokej tuhosti uloženia. Pri správne zvolených parametroch membrány by v praxi pri určitom pracovnom rozsahu malo byť možné dosiahnuť konštantnú tuhosť uloženia. Je nutné podotknúť, že membránový restriktor musí byť súčasťou každej kapsy, resp. bunky v prípade viac-bunkových káps, čím sa značne komplikuje nielen návrh membránového restriktora, ale taktiež sa výrazne navyšujú vstupné náklady. V prípade uložení vyžadujúcich vysokú tuhosť a presnosť pohybu však takýto typ uloženia môže priniesť výrazne lepšie výsledky ako iné typy restriktorov.

3.3.2 Mazacie médium

Ako mazacie médium hydrostatických ložísk sa primárne volia oleje s vysokým **viskozitným indexom** (VI) [73, 74], nízkou oxidáciou a dobrými mazacími vlastnosťami sú primárne využívané minerálne oleje. Pre hydraulické sa využívajú oleje klasifikované v súlade s normou ISO, z ktorých sa najbežnejšie používa viskozitná trieda ISO VG 46 (Obr. 3-52). Oleje môžu byť obohatené aditívami pre zlepšenie vlastností (antioxidanty, odpeňovače, stabilizátory, modifikátory VI, apod.) podľa aplikácie a prevádzkových podmienok [75].



Obr. 3-52 Závislosť kinematickej viskozity na teplote pre mazivá viskozitnej triedy ISO VG 15 – 150

V extrémnych podmienkach (vysoký tlak alebo teplota) vykazujú lepšie vlastnosti syntetické oleje, ktoré sú však omnoho drahšie. **Dynamická viskozita** (μ) je podstatnou veličinou, ktorá figuruje vo výpočte hydrostatického ložiska. Prepočtový vzťah pre vyjadrenie dynamickej viskozity je daný súčinom hustoty (ρ) a kinematickej viskozity: $\mu = \rho \cdot \nu$.

Dynamická viskozita je závislá teploty a dá sa zapísať za pomoci vzťahu:

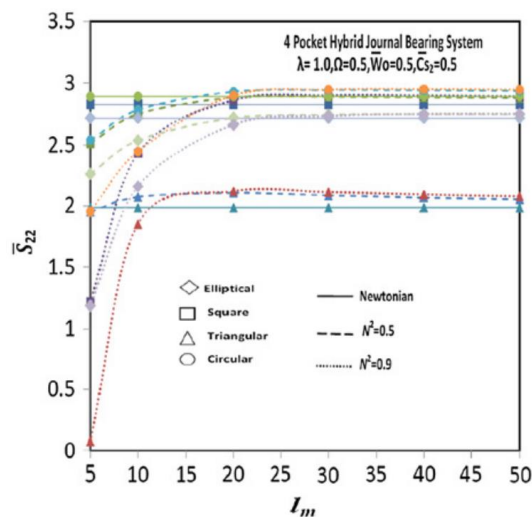
$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} \quad (20)$$

Taktiež je závislá na tlaku, pričom pri hydrostatickom tlaku sa viskozita aj pri zmene tlaku môže považovať za konštantnú:

$$\mu = \mu_0 e^{\gamma p} \quad (21)$$

Iné mazacie médiá

Pre hydrostatické ložiská bola študovaná výkonnosť ne-Newtonskejších kvapalín na základe matematického Rainowitsch modelu, popisujúci kvapalinu vytvorených aditívami s cieľom navýšenia viskozitného indexu. Výsledky však ukazujú, že pre dodávanie ne-Newtonskejších kvapalín do bunky sú potrebné vyššie výkony, čím narastajú energetické straty [67]. Výsledky však ukazujú, že vhodnou voľbou typu ne-Newtonskej kvapaliny je možné dosiahnuť vyššie tuhosti mazacej vrstvy [49].



Obr. 3-53 Závislosť tuhosti Newtonskej a mikropolárnej kvapaliny na zmenu budiacich parametrov [49].

S cieľom dosiahnutia maximálnej výkonnosti a aktívnej regulácie dynamických vlastností mazacej vrstvy boli testované aj magnetoreologické (MR) kvapaliny pre hydrostatické ložiská [76, 77], ktorých aplikáciou sa výrazne navýšila únosnosť a tlmiaca schopnosť. Vzhľadom k tomu, že sú MR kvapaliny tvorené formou suspenzií [78], kedy sú mikroskopické feromagnetické častice rozptýlené v oleji, môže dochádzať k nežiaducemu opotrebovávaniu komponentov hydrostatického ložiska a hydraulického okruhu mikročasticami [79]. Ďalšou nevýhodou MR kvapalín a celkovo iných mazacích médií ako sú bežne používané hydraulické oleje je neporovnateľne vyššia nákupná cena.

4 ANALÝZA, INTERPRETÁCIA A ZHODNOTENIE POZNATKOV ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADE KRITICKEJ REŠERŠE

Výskum v oblasti HS ložísk sa rozvíja rôznymi smermi – optimalizácia geometrie kapsy a bunky, materiálové kombinácie a geometrická presnosť klzných povrchov. Neoddeliteľnou časťou HS uložení je hydraulický okruh, kde sa pozornosť zameriava primárne na reguláciu dodávanej tlakovej kvapaliny a diagnostiku stavu ložiska, prípadne na použiteľnosť iných typov mazív ako sú najbežnejšie používané hydraulické oleje. Riešená problematika siaha od teoretických prác využívajúcich analytické a numerické prístupy, cez experimenty, až po kombináciu rôznych prístupov. Poznatky z vyššie uvedených oblastí sú rovnako rozdelené do dvoch hlavných oblastí – HS kapsa a hydraulický okruh.

4.1 Zhodnotenie poznatkov o kapse HS ložiska

Geometria kapsy a bunky

Tvar kapsy a bunky má rozhodujúci vplyv na výkonnostné charakteristiky uloženia a energetickú náročnosť hydraulického agregátu. Pri výbere tvaru plochy bunky je možné vychádzať z odvodených vzťahov [20], prípadne voliť tvar s ohľadom na funkciu a spôsob zaťažovania [45]. Efektívnejším spôsobom je výpočet za pomoci efektívnej plochy a súčiniteľov [19, 20], kde je možné nájsť odvodené tvary plochy bunky. Pre zefektívnenie návrhu však chýba metodika stanovenia výkonnostných súčiniteľov s využitím numerického prístupu, nakoľko komplexné tvary buniek je zložité až pre niektoré tvary nemožné.

Okrem tvaru plochy bunky hrá rolu aj profil bunky. U aerostatických ložísk boli porovnávané rôzne tvary profilov buniek [50], ktoré môžu v prípade HS ložísk vykazovať odlišný vplyv na výkonnostné parametre uloženia.

Ďalším dôležitým parametrom tvaru bunky je jej hĺbka, ktorá sa označuje aj ako výška mazacej vrstvy v oblasti bunky [37]. V analytických výpočtoch je zanedbávaná, aj keď sa ukazuje, že má vplyv na výkonnostné charakteristiky HS ložiska [12, 37, 80], a preto by návrh optimálnej hĺbky bunky pre danú aplikáciu nemal byť zanedbaný, najmä kvôli minimalizácii tlakových strát a zmeny teploty maziva v kapse. Z rešerše vyplýva, že optimálny pomer hĺbky bunky k výške mazacej vrstvy (H/h), ktorý sa obvykle volí v rozsahu 50-100, by sa mal skôr pohybovať v rozsahu 20-50 [28, 47, 53].

Pri návrhu geometrie kapsy by sa nemalo zabúdať aj na veľkosť a polohu vtokového otvoru. Veľkosť má vplyv na tlakové straty a prietok dodávaný do bunky, zatiaľ čo poloha nemá vplyv v prípade rovnomerného zaťaženia. Doposiaľ bolo vyšetrované naklopenie

otočného stola iba pre jednobunkovú kapsu [81] s centrálnym vtokovým otvorom, avšak v takomto prípade by mohla mať poloha otvoru rozhodujúci vplyv na stabilitu mazacieho filmu.

Podstava kapsy

Pre veľkorozmerné aplikácie vyžadujúce vysokú presnosť sa obvykle používajú kapsy s výškovým nastavením pre možnosť nastavenia rovnobežnosti klzných plôch [34, 35]. Pre kompenzáciu montážnych chýb a nerovnomerného zaťažovania boli uvažované kapsy s poddajnou podstavou a poddajným klzným povrchom [55–57]. Výskum v oblasti HS ložísk sa touto problematikou nezaoberal, aj napriek tomu, že u aplikácií, kde sa nevyžaduje vysoká presnosť (primárne tuhosť) by poddajná podstava mohla dokázať kompenzovať prípadné montážne chyby a pomohli by udržiavať rovnomernú distribúciu mazacej vrstvy a tým aj tlakov v bunkách. Je nutné zdôrazniť, že poddajné telesá znižujú celkovú tuhosť a presnosť uloženia, a preto je potrebné zvážiť čo je primárnym cieľom návrhu HS uloženia.

Geometrická presnosť klzných povrchov

Na stabilitu mazacej vrstvy má nezanedbateľný vplyv aj geometrická presnosť klzných plôch [26], ktorá súvisí s výrobnými chybami. V publikáciách [26, 82, 83] bol predstavený koncept predikcie chýb pohybu HS vedení, ktoré ponúkli prístupy k vyhodnocovaniu presnosti uložení za pomoci numerického prístupu s experimentálnym overením. V prípade veľkorozmerných HS uložení je pre vývojárov veľkou neznámou aká by mala byť geometrická presnosť klzných povrchov HS ložiska, pričom takýto popis stále chýba. Môže ísť o výrobné, ale aj montážne nepresnosti. Ďalším otáznikom je voľba drsnosti povrchu klzných plôch. Niektoré práce uvádzajú, že smer drsnosti povrchu môže mať vplyv na tlak v bunke [84, 85], ale praktický popis použiteľného rozsahu drsností klzných plôch HS ložiska doposiaľ nebol prestavený.

Modifikácia klzných plôch kapsy

Kritický stav, ktorý môže nastať pri výpadku tlakového oleja, je nedostatočné mazanie pri dobehu. Náhlemu prerušeniu dodávky tlakového maziva sa dá zamedziť implementáciou hydraulického akumulátoru do obvodu [62, 86, 87], z ktorého bude ložisko v prípade poruchy hydraulického agregátu ešte určitý čas zásobované. Prítomnosť hydraulického akumulátoru však nemusí zaručiť, že nemôže dôjsť k dosadnutiu klzných plôch bez prívodu tlakového oleja počas dobehu. Z tohto dôvodu je nutné pri návrhu hydrostatických uložení uvažovať aj preventívne opatrenia poškodenia klzných plôch, akými môžu byť voľba vhodnej kombinácie materiálov alebo povlaky klzných plôch [88].

Ďalšou možnosťou, ktorá sa často využíva u hydrodynamických ložísk [58, 89] je textúrovanie povrchov [30]. V tejto oblasti bol doposiaľ zaznamenaný značný pokrok, pričom geometria textúry a javy s ňou spojené sú podrobne preskúmané. Komplexné zhrnutie predstavili vo svojej publikácii Gachot a kol. [90], na základe čoho je možné voliť vhodný spôsob textúrovania. Chýba však popis priamo zameraný na modifikáciu klzných povrchov HS ložísk za podmienok, ktoré nastávajú pri popisovanom kritickom stave.

4.2 Zhodnotenie poznatkov o hydraulickom okruhu HS ložiska

Návrh hydraulického agregátu je úzko spätý s požadovanými výkonnostnými parametrami HS ložiska. Pre napájanie kapsy tlakovým olejom sa u HS uložení používajú dva typy okruhov: s konštantným prietokom a tlakom. Súčasťou hydraulického okruhu sú prvky na reguláciu prietoku, filtre a senzory pre monitorovanie stavu agregátu a tlakového oleja. U HS uložení sa používajú okrem iného aj bezpečnostné prvky: restriktory a hydraulické akumulátory.

Restriktory slúžia ako ochranný prvok pre prípad nerovnomerného zaťažovania, lokálneho preťažovania, či na kompenzáciu výrobných a montážnych chýb. Existuje viacero typov restriktorov [48, 67, 72, 91, 92] a líšia sa výkonnostnými parametrami, náročnosťou návrhu, a nákladmi na nákup a údržbu. Typ restriktoru sa volí na základe predpokladaného spôsobu zaťažovania, požadovaných presností a ceny, pričom u veľkorozmerných ložísk môže byť cena jedným z rozhodujúcich faktorov. Parametre sa prispôbujú aplikácií, avšak doposiaľ nebol popísaný rozsah kompenzácie restriktoru vo vzťahu k montážnym chybám a nerovnomernému zaťaženiu.

Akumulátory slúžia na vyrovňovanie tlakových špičiek hydraulického okruhu a taktiež ako zásobník tlakovej kvapaliny v prípade výpadku hydraulického agregátu počas prevádzky [62, 63, 86, 87], čo môže viesť ku kolízií klzných plôch, ktoré sú v relatívnom pohybe, prípadne až k poškodeniu uloženia. Doposiaľ sa nikto nevenoval návrhu a optimalizácii hydraulického akumulátora a časovej odozvy pre aplikácie rozmerých HS uložení.

4.3 Vyvodenie záverov získaných na základe rešerše

V predchádzajúcich kapitolách boli rozobrané všetky dôležité časti súvisiace s návrhom HS ložísk a analyzované odborné publikácie zamerané na ich návrh a optimalizáciu.

Najpodstatnejšie informácie boli diskutované a kriticky hodnotené s ohľadom na ich význam a prínos v tejto oblasti. **Na základe získaných poznatkov z rešerše v oblasti HS ložísk boli vytýčené nasledujúce dôležité závery:**

- Na základe predpokladov pre správnu funkciu mazacej vrstvy je možné konštatovať, že rovnomerný tlak v bunkách kapsy signalizuje rovnomerný mazací film a môže byť použitý na **niveláciu klzných plôch** [4], a preto sú vhodnejšie viac-bunkové kapsy, napr. 4-bunkové, ktoré poskytujú informáciu v 4 bodoch.
- **Tvar a veľkosť kapsy** ovplyvňujú rozloženie tlaku pozdĺž kontaktnej oblasti a veľkosť efektívnej plochy. Je možné nájsť optimálny pomer pre odvodené kombinácie tvarov kapsy a bunky [20], prípadne odvodiť výkonnostné súčinitele pre netypické tvary pomocou všeobecných vzťahov [19] a numerických metód, prípadne experimentálnych metód za pomoci analógie s elektrickým poľom [93].
- **Veľkosť bunky** sa stanovuje primárne podľa záťaže, prípadne iných parametrov dôležitých pre danú aplikáciu [1]. Optimálny **pomer charakteristických rozmerov** kapsy a bunky (r/R ; a/L) sa dá určiť pre odvodené geometrie pomocou nomogramov [19, 20]. U zložitejších a neodvodených tvarov by bolo pri návrhu efektívnejšie stanovovať veľkosť kapsy z pomeru plochy bunky k ploche kapsy (A_k/A_b).
- **Efektívna plocha** kapsy sa dá určiť analyticky pre jednoduché odvodené geometrie [19, 20]. Pre iné tvary kapsy a rozloženie buniek je možné využiť experimentálny [19, 93] alebo numerický prístup (CFD) [29].
- **Tvar bunky** má vplyv na výkonnostné charakteristiky HS uloženia: nosnosť, tuhosť, výšku mazacej vrstvy a prietok. Sú však citlivé na spôsob a nastavenie kompenzačného členu [48, 49]. Z porovnávaných tvarov vychádza najlepšie **kruhovú bunku** [46, 47], ktorá je zároveň najmenej citlivá na typ restriktoru.
- Hĺbka bunky má vplyv na teplotu maziva, tlakové pole a charakter prúdenia.
- **Hĺbka bunky** by mala byť aspoň **5-krát** väčšia ako výška mazacej vrstvy, pričom optimálna hĺbka je približne **20-násobok** výšky mazacej vrstvy [4, 94].
- **Čiastočná textúra** povrchu vytvára väčší tlak pri relatívnom pohybe konformných telies ako plná textúra. Pri **optimálnej hustote** jamôk má zmena hĺbky jamky len nepatrný vplyv na tlak/nosnú schopnosť mazacej vrstvy.
- **Drsnosť povrchu** klzných plôch má zanedbateľný vplyv na výkonnostné charakteristiky HS ložiska, obzvlášť u uložení veľkých rozmerov. Kruhovitý tvar drsnosti u axiálneho kruhového ložiska môže nepatrne navýšiť tlak v bunke [84].
- **Restriktory** slúžia ako bezpečnostný prvok pre viac-kapsové, prípadne viac-bunkové HS uloženia napájaných spoločným zdrojom tlakovej kvapaliny. Vznikajúci tlakový spád zamedzuje úniku tlakovej kvapaliny miestami s menším odporom, čím sa zabráňuje zlyhaniu mazacej vrstvy v prípade nerovnomerného zaťažovania a chybného nastavenia rovinnosti kapsy.

- **Hydraulický akumulátor** je významný bezpečnostný prvok, ktorý dokáže zachovať dodávku tlakového oleja po dobu nevyhnutnú do zastavenia pohybu HS ložiska. Výdrž býva obvykle rádovo v jednotkách sekúnd, pričom závisí od typu náplne a veľkosti [62–64]. Okrem toho môže priaznivo pôsobiť na tlmenie vibrácií a prispievať k stabilnejšej prevádzke ložiska [62].
- **Smart kvapaliny** sa javia ako nevhodné mazacie médiu pre veľkorozmerné HS uloženia z dôvodu neporovnateľne vyššej ceny [78, 95] s bežnými hydraulickými olejmi a nežiadúcemu abrazívnemu účinku kvapaliny na klzné povrchy [79, 96, 97]. Pre malé HS ložiská však môžu prinášať viaceré benefity [67, 98, 99].
- **Najvhodnejšie mazacie médiá** pre veľké HS systémy sú s ohľadom na životnosť a správnu funkciu hydraulického systému hydraulické oleje, ktoré môžu byť obohatené o rôzne aditíva podľa vhodnosti a potreby [31, 100–102].
- Pri návrhu HS uloženia je nutné brať do úvahy nárast teploty maziva v bunke počas prevádzky [103, 104], čo vedie k znižovaniu nosnej schopnosti mazacej vrstvy. Z tohto dôvodu by sa malo uvažovať **teplotné okno** kedy je HS uloženie schopné prevádzky s požadovanými parametrami.
- **Viskozitná trieda** je volená s ohľadom na požadované výkonnostné parametre HS ložiska, energetickú náročnosť systému, pracovné teploty a teploty okolia. V Strednej Európe je obvykle využívaná trieda ISO VG 46.

5 VYMEDZENIE CIEĽA DIZERATČNEJ PRÁCE A NÁVRH SPÔSOBU JEJ RIEŠENIA

Podstatou dizertačnej práce je vytvorenie metodiky návrhu veľkorozmerných hydrostatických ložísk pre dosiahnutie maximálnej efektivity a bezpečnosti hydrostatického uloženia.

5.1 Zameranie dizertačnej práce

Výskum a vývoj v oblasti veľkorozmerných HS ložísk bol z veľkej časti venovaný na optimalizáciu geometrie HS kapsy, vplyv drsnosti povrchov na výkonnostné parametre ložiska a optimalizáciu restriktorov pre určité aplikácie. V oblasti HS ložísk nebola venovaná dostatočná pozornosť prípustnej presnosti montáže a výroby, pričom chýba prehľadné zhrnutie podporené experimentom, ktoré by zodpovedalo na otázky, ktoré si kladú inžinieri pri návrhu HS uložení. V uplynulých rokoch bol zaznamenaný veľký pokrok v oblasti textúrovania konformných povrchov, ale štúdium vplyvu textúry u HS ložísk pre prevenciu poškodenia pri dosadení klzných plôch nebolo ešte realizované. Doposiaľ nevznikla komplexná štúdia zameraná na návrh a optimalizáciu návrhu veľkorozmerných HS uložení, na čo sa zameriava práve táto práca.

5.2 Cieľ dizertačnej práce

Hlavným cieľom dizertačnej práce je spracovanie metodiky návrhu veľkorozmerných hydrostatických uložení.

Čiastkové ciele:

- vytvoriť a odladiť testovacie zariadenie,
- navrhnúť parametre experimentu a overiť presnosť analytického výpočtu s meraním,
- stanoviť prípustné nepresnosti výroby a montáže pre správnu funkciu HS uloženia,
- zhodnotiť vplyv a možnosti použitia poddajnej podstavy u HS uložení,
- zhodnotiť vplyv modifikácie klzných plôch na trenie a opotrebenie v prípade zlyhania dodávky tlakového oleja do kapsy HS ložiska,
- a stanoviť vplyv hĺbky bunky HS ložiska na výkonnostné parametre HS ložiska.

Pracovná hypotéza 1 – kompenzácia chýb poddajnou podstavou

U veľkorozmerných súčastí je komplikované dosiahnuť vysokú rozmerovú a geometrickú presnosť, najmä rovinnosť klzných povrchov. V takomto prípade môže dôjsť k vzniku montážnych nepresností, ktoré by mohli spôsobiť porušenie mazacieho filmu tlakového oleja hydrostatického uloženia. Doposiaľ boli skúmané iba určité koncepty poddajnej podstavy [56] a elastických klzných povrchov [105], avšak rozsah kompenzácie a návrh tuhosti poddajnej podstavy nebol predstavený. Vzhľadom k tomu, že tieto problémy neboli doposiaľ študované a popísané, bola stanovená nasledovná **pracovná hypotéza**:

„Poddajná podstava hydrostatického ložiska dokáže kompenzovať montážne chyby hydrostatického uloženia prispôsobením sa otočnému stolu/bežcu, a zaistiť tak rovnomernú distribúciu tlakovej kvapaliny, čím sa predíde strate nosnej schopnosti a kolízií klzných povrchov.“

Uvedená hypotéza vedie k **vedeckej otázke**:

„Do akej miery je možné kompenzovať chyby montáže hydrostatických káps poddajnou podstavou pre bezpečnú a bezporuchovú prevádzku hydrostatického uloženia?“

Pracovná hypotéza 2 – tvar a hĺbka bunky

Jedným z hlavných parametrov bunky je hĺbka, ktorá sa obvykle volí v rozsahu 50-100-násobok výšky mazacej vrstvy (H/h) [19, 20]. Niektoré zdroje uvádzajú, že optimálna hĺbka by mala byť viac ako 5 násobok a menej ako 25 násobok [37] výšky mazacej vrstvy. Iné práce zase ukazujú optimálny rozsah pomeru H/h v rozmedzí 20-50 [28]. Optimálny pomer však závisí na viacerých parametroch, medzi ktoré patrí zaťaženie, veľkosť klzných plôch [28], ale aj rýchlosť otáčania [37]. V niektorých prípadoch nemá vplyv hĺbky výrazný vplyv [47], čo bolo vyšetrované však iba u malých ložísk a u veľkých HS uložení môže mať výrazný vplyv na energetickú náročnosť hydraulického systému. Zo všeobecných odporúčaní vyplýva, že poloha vtokovej drážky nemá vplyv na výkonnostné charakteristiky ložiska [19], avšak doposiaľ nebol študovaný vplyv polohy vtokovej drážky pri naklopení bežca/otočného stolu, iba naklopenie 1-bunkovej kapsy s centrálnym vtokovým otvorom [106]. Po zhodnotení vyššie uvedených informácií boli stanovené nasledujúce **pracovné hypotézy**:

„Hĺbka bunky má vplyv na veľkosť tlakových strát z dôvodu prítomnosti recirkulačných oblastí v bunke ložiska. U malých ložísk hĺbka nemá zásadný vplyv, ale u veľkých uložení môže dochádzať k výraznému znižovaniu efektivity systému. Príliš nízka hĺbka bunky môže navyšovať teplotu maziva v nosnej oblasti kapsy čo môže ústiť k znižovaniu nosnosti. Naopak u príliš hlbkej bunky vzniká výrazné zavírenie čo speje k nárastu tlakových strát. Hĺbka bunky má rovnako vplyv aj na trenie, ktoré sa u malých hĺbok približuje treniu v oblasti klzných plôch. U väčších hĺbok naopak trenie v oblasti bunky klesá.“

Na základe vyššie uvedenej hypotézy sa naskytuje **vedecká otázka**:

„Aká je závislosť hĺbky bunky a výkonnostných charakteristík hydrostatického ložiska?“

„Poloha vtokovej drážky nemá vplyv na výkonnostné parametre HS uloženia pri rovnomernom zaťažení. Pri nesymetrickom zaťažení viac-bunkovej kapsy ložiska sa predpokladá, že tento vplyv je rovnako zanedbateľný. U excentricky zaťaženej 1-bunkovej kapsy však môže poloha vtokovej drážky výrazne ovplyvniť nosnú schopnosť a stabilitu kapsy.“

Z čoho vyplýva nasledujúca **vedecká otázka**:

„Môže vtokový otvor umiestnená na kraji bunky zapríčiniť zlyhanie nosnej schopnosti mazacej vrstvy pri excentrickom zaťažení?“

Pracovná hypotéza 3 – modifikácia klzných povrchov

Počas pokojového stavu sú klzné povrchy v kontakte a pôsobia na seba pomerne veľkým zaťažením. Z tohto dôvodu sa odporúča voliť vhodnú kombináciu materiálov [107] s dobrou kompatibilitu a vysokou chemickou odolnosťou. Ďalšou s možnosťou je naniesenie povlakov na klzné povrchy [31]. Poslednou dobou narastá na popularite textúrovanie povrchov. V princípe, zahĺbenia v klznej ploche by mali slúžiť ako rezervoáre maziva, z ktorých bude vyťahované mazivo v prípade dosadnutia bežca na klznú plochu kapsy [108], pričom jamky môžu slúžiť aj na hromadenie nečistôt [109]. Výskum v oblasti konformných textúrovaných povrchov bol primárne zameraný na hydrodynamické ložiská prípadne mechanické tesnenia, [30, 58, 110, 111]. Veľký otáznik predstavuje aj vhodnosť použitia elastických materiálov na výrobu klzných povrchov [105], čím by bolo možné znížiť náklady na výrobu a údržbu, kompenzovať nepresnosti výroby a montáže, prípadne docieľiť nižších škôd pri kolízií povrchov. Doposiaľ bol výskum textúrovaných klzných povrchov zameraný na HD ložiská [30, 58]. Textúry u HS ložísk by mohli slúžiť ako prevencia v prípade poruchy hydraulického okruhu, čo by mohlo viesť k poškodeniu klzných povrchov, na základe čoho bola stanovená nasledujúca **pracovná hypotéza**:

„V prípade prerušenia dodávky tlakového oleja počas pohybu otočného stola/bežca je možné redukovať trenie a znížiť opotrebenie cielenou modifikáciou klzných povrchov. Povlaky dokážu znížiť trenie a redukovať škody, zatiaľ čo textúry by mali byť pôsobiť ako mikro-zásobníky oleja a zachytávať častice do rezervoárov.“

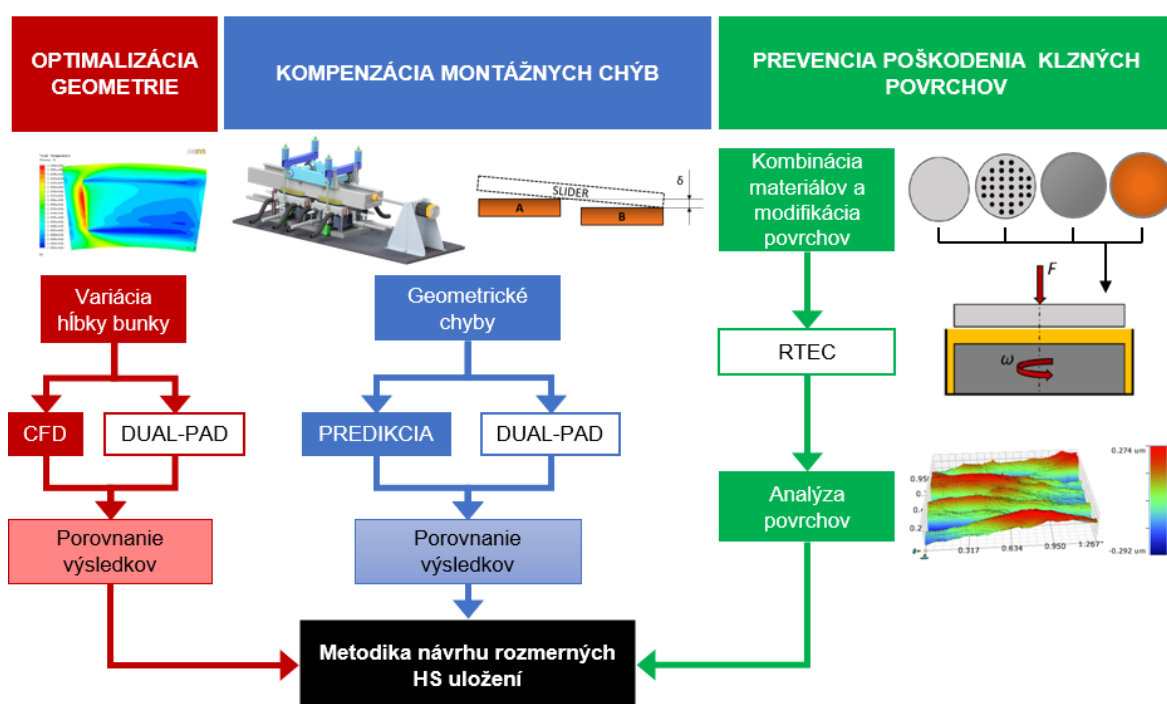
Na základe hypotézy vzniká **vedecká otázka**:

„Do akej miery je možné zamedziť poškodeniu klzných povrchov v prípade poruchy dodávky tlakového maziva počas prevádzky textúrovaním klznej plochy povrchu kapsy HS ložiska?“

5.3 Spôsob riešenia a použité metódy

Na základe nadobudnutých poznatkov z literatúry v problematike vývoja veľkorozmerných hydrostatických uložení bol zostavený približný postup, podľa ktorého bude možné vyplniť vytýčené biele miesta. Riešenie problematiky bude spočívať z troch hlavných línií (Obr. 5-1):

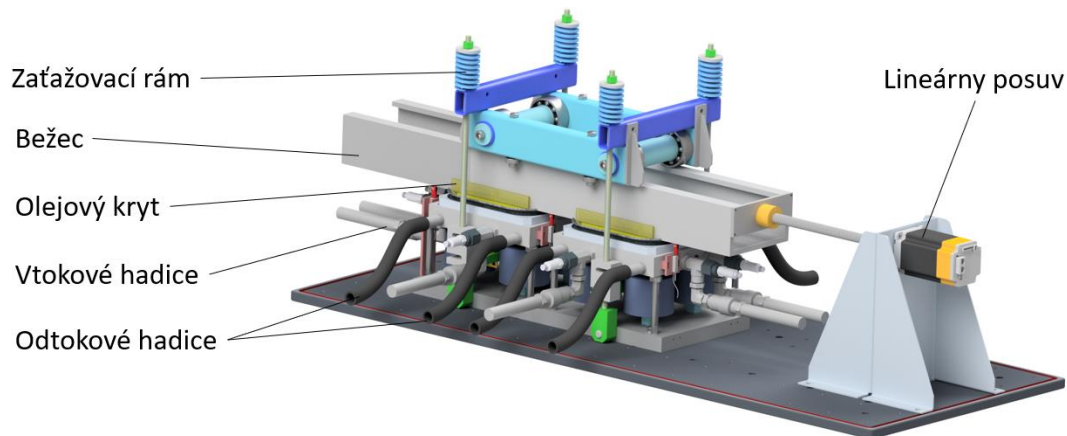
- Porovnanie vplyvu rôznej hĺbky bunky kapsy HS ložiska na základe CFD simulácie a experimentálneho zariadenia hydrostatického ložiska (DUAL-PAD).
- Štúdium vplyvu poddajnej podstavy kapsy HS ložiska na stabilitu mazacieho filmu s uvažovaním montážnych nepresností.
- Kritický stav beztlakového dojazdu ložiska, ktorý môže nastať pri prerušení dodávky tlakového oleja počas pohybu otočného stolu/bežca.



Obr. 5-1 Schéma postupu riešenia dizertačnej práce

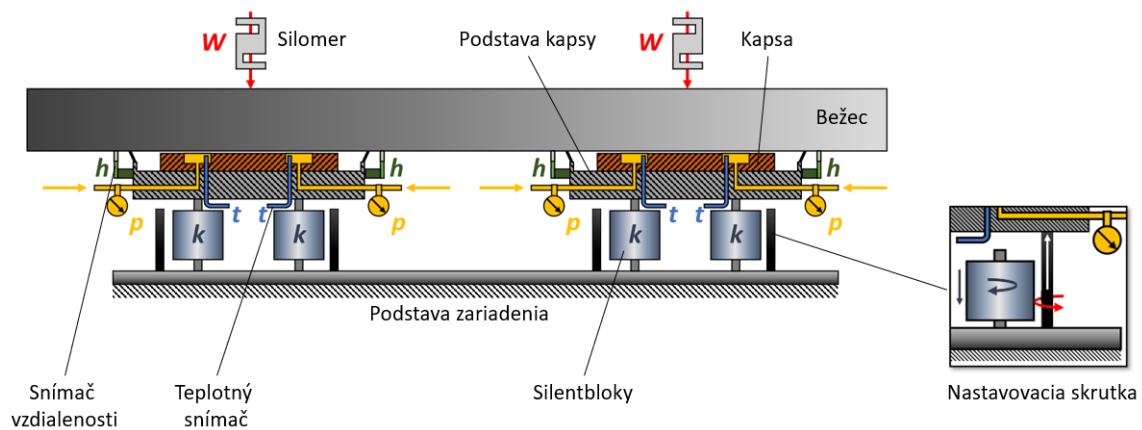
5.3.1 Kompenzácia montážnych chýb poddajnou podstavou

Merania budú realizované na **dvoj-kapsovom testeri HS ložiska (DUAL-PAD)**, ktoré bolo vyrobené v rámci projektu: *Vývoj stendu hydrostatického uložení rozmerných konštrukcií v oblasti špeciálnych zariadení*. Zariadenie DUAL-PAD (Obr. 5-2) sa skladá z dvoch vymeniteľných hydrostatických káps s rôznymi konfiguráciami hydrostatických buniek (1-bunkové a 4-bunkové), bežca, zaťažovacej konštrukcie, hydraulického okruhu, a lineárneho recipročného posuvu pre možnosti testovania dynamických javov.



Obr. 5-2 Schéma experimentálneho zariadenia pre hydrostatické ložisko

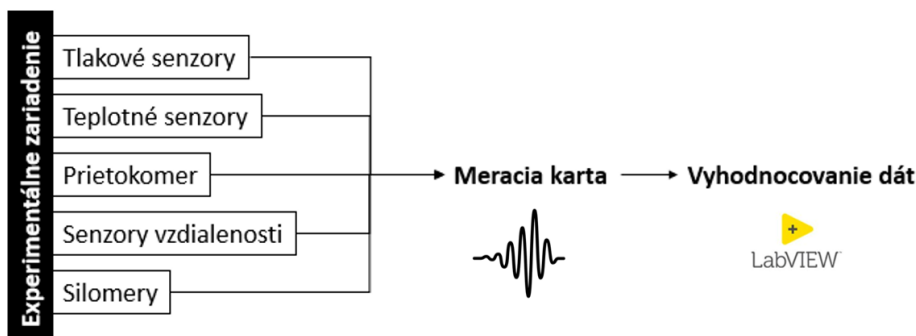
Hydrostatické kapsy môžu byť pripevnené k základni alebo je možné využiť gumové silentbloky s rôznymi charakteristikami (o tuhosti k a súčiniteli tlmenia b) pre testovanie rôznych variant uloženia káps (Obr. 5-3). Zaťažovanie bude realizované prostredníctvom pojazďových kolies, pričom každé bude vybavené silomerom..



Obr. 5-3 Schéma a vybavenie experimentálneho dvoj-kapsového zariadenia DUAL-PAD

Experimentálne zariadenie je vybavené senzormi pre vyhodnocovanie všetkých veličín vstupujúcich do analytického výpočtu. Merané veličiny sú schematicky uvedené na Obr. 5-4. Prietokomer a tlakové senzory budú súčasťou hydraulického okruhu. Prostredníctvom senzorov vzdialenosti bude vyhodnocovaná hrúbka mazacej vrstvy medzi bežcom a klznou plochou s presnosťou približne 0,01 mm, čo by malo byť pre navrhovanú hrúbku mazacej vrstvy v rozsahu 0,1-0,2 mm postačujúce. Tlak a teplota budú vyhodnocované priamo v bunke, aby na základe teploty bolo možné čo najpresnejšie vyjadriť aktuálnu dynamickú viskozitu, ktorá vystupuje vo výpočte pre hrúbku mazacieho filmu. Snímače tlaku s rozsahom 160 bar a rozlíšiteľnosťou 0,8 bar sú umiestnené na vstupe do každej bunky. Všetky vyššie uvedené veličiny sú logované v prostredí LabVIEW, odkiaľ je možné exportovať získané dáta pre vyhodnocovanie. Viskozitne-teplotná závislosť

zvoleného maziva bola zmeraná pomocou zariadenia Thermo Scientific HAAKE RotoVisco 1.



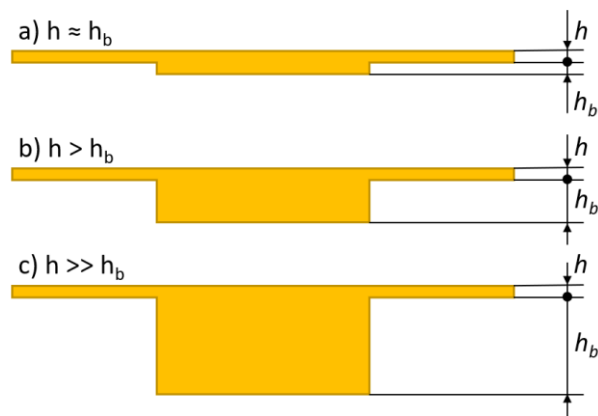
Obr. 5-4 Schéma meracieho uzlu experimentálneho zariadenia

Získané parametre z experimentálneho zariadenia budú použité pre porovnanie vypočítanej hodnoty hrúbky mazacieho filmu na základe vzťahu (2.2) s dátami zo senzorov vzdialenosti. Namerané hodnoty z DUAL-PAD budú porovnávané s vyhodnotením výsledkov výpočtového modelu. Po overení presnosti analytického výpočtu budú následne študované stavy s montážnymi nepresnosťami kapsy.

5.3.2 Optimalizácia hĺbky a tvaru bunky

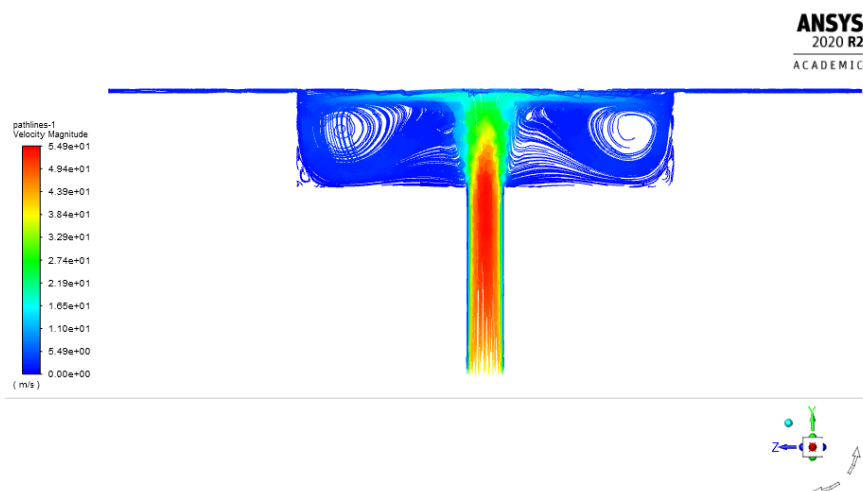
Optimalizácia hĺbky bunky bude prebiehať v prostredí ANSYS Fluent s parametrickým nastavením simulácie pre určitý rozsah hĺbok buniek HS kapsy. Nastavenie simulácie sa bude v maximálnej možnej miere približovať experimentálnym podmienkam na zariadení DUAL-PAD. Na základe výsledkov CFD simulácií budú zvolené hĺbky, podľa ktorých budú vyrobené sady vložiek do buniek pre HS kapsy DUAL-PAD. Predpokladané budú minimálne 3 variácie hĺbok bunky kapsy HS ložiska (Obr. 5-5):

- a) veľmi malé hĺbky blízke sa predpokladanej/požadovanej výške mazacej vrstvy,
- b) obvykle používané hĺbky mazacej vrstvy podľa odporúčaní (cca 50-násobok predpokladanej/požadovanej výšky mazacej vrstvy).
- c) veľmi veľké hĺbky bunky HS ložiska.



Obr. 5-5 Variácia hĺbky bunky kapsy HS ložiska: a) malé hĺbky, b) obvyklé hĺbky a c) veľmi veľké hĺbky.

Namerané hodnoty tlaku v bunke a na agregáte, výšky mazacej vrstvy, teploty v bunke a budú porovnávané s CFD simuláciou. Ilustrácia výsledkov z prostredia ANSYS Fluent je zobrazená na Obr. 5-6. Výsledkom by mala byť závislosť tvaru a hĺbky bunky na výške mazacej vrstvy, podľa čoho by bolo možné jednoducho navrhovať optimálnu hĺbku bunky pre určitú aplikáciu. Ďalšou časťou vyšetřovania tvaru pomocou CFD bude zrovnanie tvarov buniek podobne ako v štúdií, ktorá sa zaoberala aerostatickými ložiskami [50], ale pre HS ložiská mazané kvapalinou, prípadne aj vplyv polohy vtokového otvoru pri nerovnomernom mazacom filme.



Obr. 5-6 Rýchlostné pole prúdenia tlakového oleja v bunke kapsy HS ložiska.

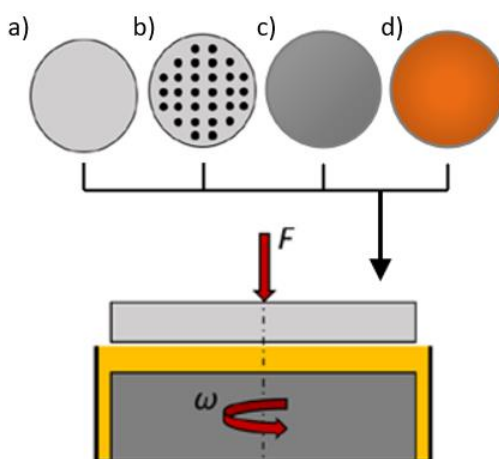
5.3.3 Kritický stav beztlakového dojazdu ložiska

Štúdium kritického stavu, ktorý môže nastať pri dosadnutí klzných plôch za nestacionárnych podmienok, napríklad keď je ešte bežec v pohybe a dôjde k náhlemu výpadku dodávky tlakového oleja bude porovnávané s dvomi vzorkami povrchov:

- a) hladké klzné plochy,
- b) textúrované klzné plochy,
- c) klzné plochy s povlakom a
- d) rôzne kombinácie materiálov klzných plôch.

V prvej fáze bude vyvíjané optimálne rozloženie, tvar a spôsob výroby textúry s ohľadom na výrobu rozmerných klzných povrchov v spolupráci s výskumným tímom tribologickej skupiny z TU Wien, ktorá bola naviazaná v rámci stáže. Pracovisko na TU Wien má dlhoročné skúsenosti v oblasti textúrovania povrchov a aktívne v tejto oblasti publikuje. Výsledky budú s odborníkmi z TU Wien priebežne konzultované a povedú na spoločný článok.

V druhej fáze bude zároveň navrhované a vytvorené experimentálne zariadenie pre tribometer Rtec MFT-5000. Experimentálne zariadenie bude spočívať z plne zaplaveného rotačného telesa a prítlačného ramena s vymeniteľnými vzorkami (Obr. 5-7). Počas meraní bude vyhodnocovaný súčiniteľ trenia a následné vyhodnocovanie opotrebenia klzných povrchov bude realizované na profilometri Bruker Contour GT-X, ktorý využíva svetelnú interferometriu bieleho svetla.



Obr. 5-7 Schéma testovacieho zariadenia pre a) hladké, b) textúrované, c) povlakované a d) rôzne kombinácie materiálov klzných povrchov.

5.4 Plán publikácií

Publikácie budú rozdelené podľa troch hlavných oblastí tejto dizertačnej práce. Prvá časť bude venovaná popisu kompenzácie montážnych chýb poddajnou podstavou. Druhou časťou bude optimalizácia hĺbky bunky s využitím CFD simulácie. Tretia časť bude zameraná na vplyv textúry povrchov na opotrebenie klzných povrchov pri dosadnutí počas pohybu. Vyššie uvedeným častiam predchádza prehľadový článok zhrňujúci aspekty návrhu a vývoja

veľkorozmerných HS uložení a vytyčuje biele miesta, ktorých pokrytie by mohlo prispieť k navýšeniu životnosti a k zlepšeniu efektivity prevádzky HS uložení

Publikácia 1 – prehľadový článok

Cieľom publikácie je zhrnúť všetky podstatné aspekty návrhu, optimalizácie a vývoja veľkorozmerných hydrostatických uložení, od výpočtu, cez optimalizáciu, až po modifikácie klzných plôch a prehľad bezpečnostných prvkov hydraulického okruhu. Publikácia je založená na viac ako 200 odborných publikáciách a v závere vytyčuje možné budúce trendy vývoja v tejto oblasti. Článok vyšiel v priebehu prvého štvrťroku 2021 v časopise *Engineering Science and Technology, an International Journal* (IF = 3,219):

MICHALEC, M., P. SVOBODA, I. KŘUPKA, a M. HARTL. A review of the design and optimization of large-scale hydrostatic bearing systems. (2021)

Publikácia 2 – kompenzácia montážnych chýb

Cieľom druhej publikácie je predstaviť metodiku návrhu tuhosti poddajnej podstavy kapsy HS uloženia a zistiť do akej miery dokáže takýto typ podstavy kompenzovať chyby montáže. Publikácia je zameraná na možné chyby ustavenia káps, ako je výškový rozdiel káps, ich vzájomné natočenie a naklopenie. Cieľovým vydavateľom je *Tribology International* (IF = 4,271). Publikácia je vo fáze finalizácie a predpokladaný termín odoslania je tretí štvrťrok 2021.

Publikácia 3 – optimalizácia geometrie bunky

Ďalšia publikácia bude zameraná na skúmanie vplyvu hĺbky bunky HS ložiska na výkonnostné charakteristiky, ako napr. výška mazacej vrstvy, tlak v bunke, prietok, teplotná stabilita, apod., s využitím výpočtovej dynamiky tekutín (CFD) a experimentálneho overenia výsledkov na zariadení DUAL-PAD. Preferované vydavateľstvo je *International Journal of Experimental Heat Transfer, Thermodynamics, and Fluid Mechanics* (IF = 3,444) a predpokladaný termín odoslania je tretí štvrťrok 2022.

Publikácia 4 – textúrovanie klzných povrchov

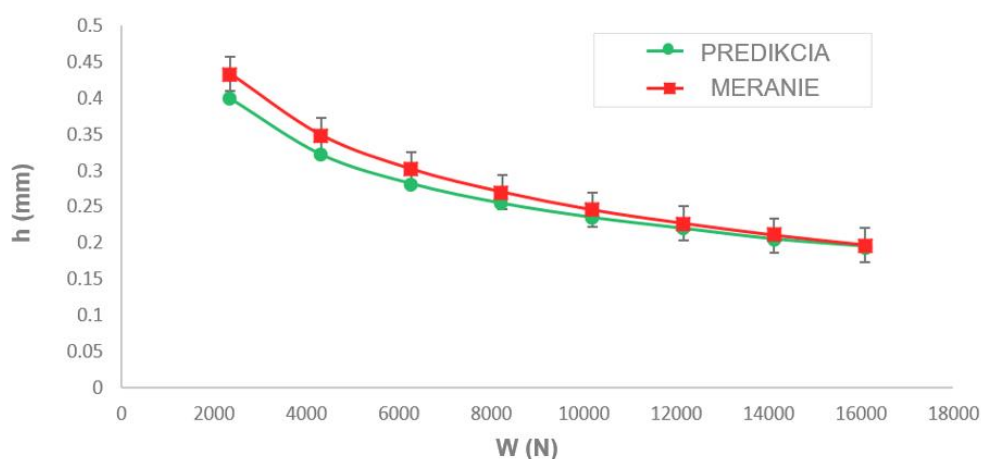
Posledná plánovaná publikácia bude zameraná na skúmanie vplyvu modifikácie klzných povrchov na ich opotrebenie pri dosadnutí počas pohybu. Textúrovanie povrchov by malo byť realizované v spolupráci s tribologickým tímom z TU Wien. Článok sa svojím zameraním hodí do vydavateľstva je *Friction* (IF = 5,290) a zaslanie sa predpokladá na prvý štvrťrok 2023.

6 SÚČASNÝ STAV RIEŠENIA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Dizertačná práca je vo fáze ukončenia experimentálnych meraní zameraných na skúmanie vplyvu poddajnej podstavy na chyby montáže. V nasledujúcej kapitole budú predstavené výsledky zo zariadenia DUAL-PAD. Na tomto zariadení boli realizované merania pre objasnenie vplyvu poddajnej podstavy a taktiež na tomto zariadení budú realizované merania zamerané na optimalizáciu hĺbky. V ďalšej kapitole bude popísaný stav vetvy zameraný na prevenciu poškodenia klzných plôch pri dosadnutí spolu s načrtnutím ďalšieho postupu.

6.1 Experimentálne zariadenie – DUAL-PAD

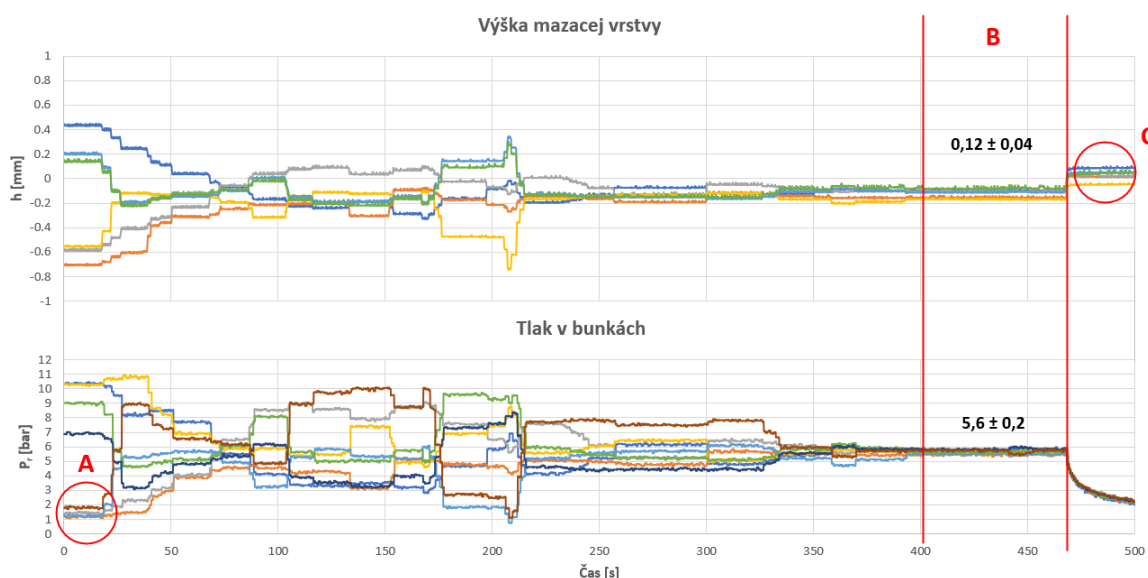
V prvej fáze riešenia práce bola overovaná presnosť zariadenia DUAL-PAD za podmienok rovnomerného zaťaženia a ustálených podmienok. Porovnanie dát z meraní, ktoré boli realizované 4-krát, a predikcie s využitím výpočtových vzťahov (1)-(5) je vykreslené na Obr. 6-1. Dodávaný celkový prietok do ložiska bol udržiavaný na 11 l/min. a teplota v bunkách sa držala v rozmedzí 24-26 °C. Všetky restriktory boli nastavené rovnako, s približnou tlakovou stratou na restriktor 1,5 bar. V oblasti vyšších zaťažení je zhoda výpočtu a nameraných hodnôt takmer identická. Na rozdiel od toho je pozorovateľný rozdiel v oblasti nízkych zaťažení o rozsahu odchýlky dát. Pri nižších zaťaženiach má mazací film pri danom prietoku pomerne nízku tuhosť, a preto je odchýlka väčšia. U vysokých zaťažení je už tuhosť vyššia a mazací film sa neprispôsobuje prípadným chybám výroby a montáže. Z tohto dôvodu boli pri ďalších experimentoch využívané zaťaženia práve z oblasti presnejších výsledkov, okolo 16 kN.



Obr. 6-1 Závislosť výšky mazacej vrstvy na zaťažení pri ustálených podmienkach z meraní a výpočtových vzťahov.

6.1.1 Nivelácia káps HS ložiska podľa tlakov

Základným predpokladom pre rovnomernú výšku mazacej vrstvy je rovnomerné rozloženie tlakov. V prípade viac-bunkovej kapsy je teda možné vykonávať niveláciu pomocou informácie o tlaku v bunkách. Na zariadení DUAL-PAD boli s použitím 4-bunkových káps polohované kapsy pomocou nastavovacích skrutiek podľa tlaku v bunkách. Na Obr. 6-2 je možné vidieť, že na začiatku experimentu bola výška mazacej vrstvy extrémne nerovnomerná a niektoré kapsy ukazovali takmer nulové tlaky (oblasť A). Postupným nastavovaním výšky podľa tlakov v bunkách bolo docielené pomerne dobrej rovnomernosti mazacej vrstvy pozdĺž oboch káps a aj tlakov vo všetkých bunkách (oblasť B). Po odstavení agregátu (oblasť C) je vidieť, že tlaky vykazovali rovnaké hodnoty a na konci experimentu zostali klzné plochy pomerne dobre zarovnané oproti pôvodnému stavu. Týmto sa potvrdzuje význam viac-bunkových káps a to nielen kvôli nivelácii klzných plôch, ale aj pre diagnostiku stavu mazacej vrstvy podľa tlakov v bunkách.



Obr. 6-2 Priebeh výšky mazacej vrstvy a tlakov v bunke počas nivelácie káps pri zaťažení 16 kN a celkovom dodávanom prietoku 11 l/min.

6.1.2 Kompenzácia montážnych chýb káps HS ložiska

Štúdium vplyvu poddajnej podstavy na kompenzáciu montážnych chýb HS kapsy je vo fáze dokončovania publikácie. Počas prvého štvrtroku 2021 boli realizované experimentálne merania na zariadení DUAL-PAD s dvoma 4-bunkovými kapsami pre presnejšiu informáciu o rozložení tlakov v bunkách kapsy. Momentálne prebieha finalizácia manuskriptu a následne jeho zaslanie do vydavateľstva. Článok predstavuje metodiku hodnotenia maximálnych prípustných chýb, medzi ktoré patria: montážne chyby, výrobné chyby, štrukturálne deformácie spôsobené zaťažením, pôsobením tlakového oleja, zmenou teploty okolia a ďalšími účinkami. Kompletný výpočet a výsledky a budú predmetom publikácie.

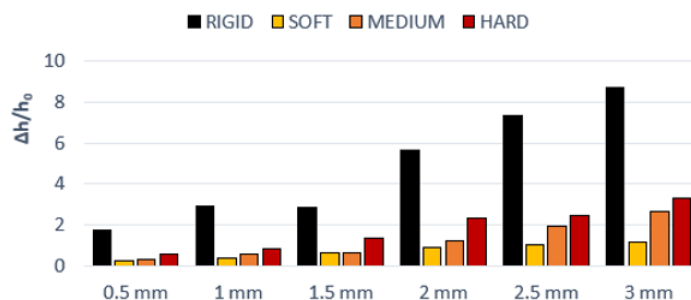
Pre všetky stavy boli dodržiavané rovnaké experimentálne podmienky, ktoré sú uvedené v Tab. 7. Pre experimenty bol uvažovaný spôsob riadenia s konštantným dodávaným tlakom. Priemerný normálny tlak v bunkách sa pohyboval v rozsahu $5,4 \text{ bar} \pm 2,5 \%$, ktorý vychádza z predpokladu, že pri konštantnom zaťažení a geometrii sa tlak v bunke nemení [19], alebo sa mení iba minimálne podľa zmeny efektívnej plochy pri vyvodení montážnych chýb. Tento rozsah priemerného tlaku v bunkách bol prítomný aj u vytvorených montážnych nepresností ako je zobrazené na Obr. 6-5. V prípade, keď pri vyvodení väčších montážnych chýb začal priemerný tlak klesať o viac ako 2,5 %, začalo s najvyššou pravdepodobnosťou dochádzať k zlyhávaniu nosnej schopnosti mazacej vrstvy, čo bolo primárnym hodnotiacim kritériom. Na základe takejto informácie by mohlo byť možné napr. diagnostikovať stav mazacej vrstvy počas prevádzky HS ložiska.

Tab. 7 Okrajové podmienky experimentálnych meraní pre štúdium kompenzácie montážnych chýb pomocou poddajnej podstavy.

Parameter	Hodnota
Iniciálna hrúbka mazacej vrstvy (h_0)	0,15 mm
Dodávaný tlak (P_s)	20 bar
Celkový dodávaný prietok (Q_{tot})	9,5-11 l/min
Zaťaženie (W)	16 kN
Teplota oleja v bunke (T_f)	$25 \pm 3 \text{ }^\circ\text{C}$

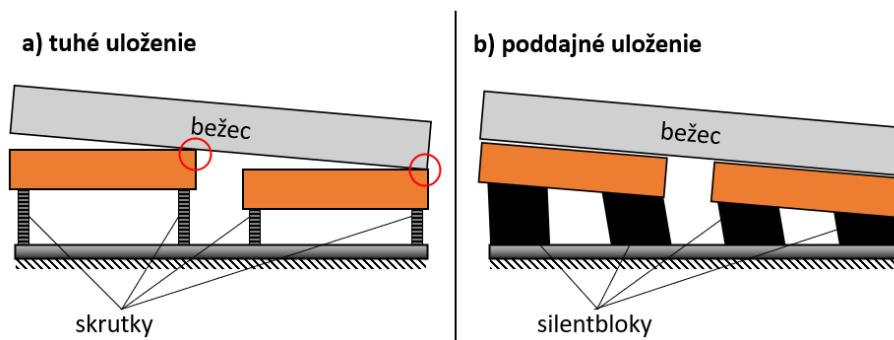
Montážne chyby boli vyvádzané za pomoci 100 mm valčekov s rozmerovou presnosťou $\pm 0,005 \text{ mm}$ a kalibračných podložiek od firmy SKF po 0,5 mm. Rozsah kompenzácie bol študovaný v rozsahu do max 4 mm, kvôli pracovnému rozsahu snímačov vzdialenosti. Výsledky však ukazujú, že vo väčšine prípadov bola prípustná chyba 3 mm.

V prvom kroku bolo porovnávané tuhé (RIGID) uloženie so silentblokmi o 3 rôznych tuhostiach Obr. 6-3: mäkké (SOFT – 850 N/mm), stredné (MEDIUM – 1750 N/mm) a tvrdé (HARD – 3200 N/mm). Z výsledkov je zrejmé, že silentbloky sa prispôbujú i malej montážnej chybe (oblasť 0,5 mm), pričom s nižšou tuhosťou silentbloku je tento účinok ešte výraznejší. Naproti tomu je vidieť kontrast voči tuhému uloženiu, u ktorého sa mazacia vrstva menila vo veľkom rozsahu v porovnaní s poddajným uloženíom.



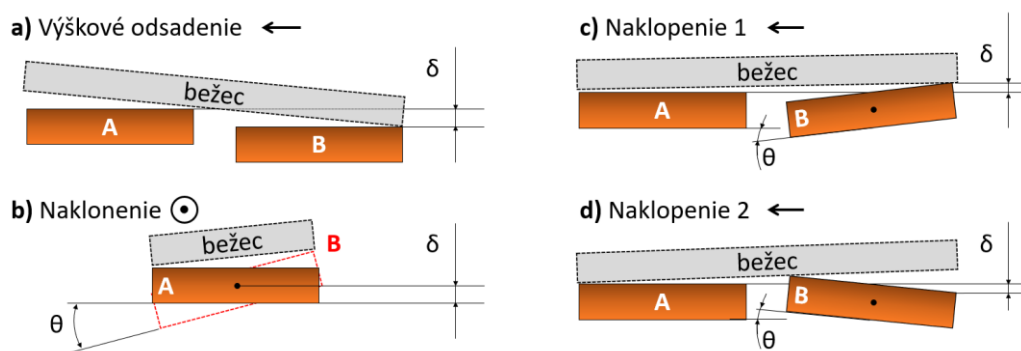
Obr. 6-3 Porovnanie zmeny výšky mazacej vrstvy v porovnaní s rovnomernou vrstvou mazacieho filmu pre variáciu tuhostí silentblokov a tuhého uloženia pre výškové odsadenie 0,5-3 mm.

Dosiahnuté výsledky jasne naznačujú, že poddajné uloženie sa dokáže prispôbiť bežcu, čím sa docieli udržiavanie rovnomernej mazacej vrstvy a zamedzí sa tým zlyhaniu nosnej schopnosti mazacieho filmu. Poddajné uloženie na silentblokoch teda umožňuje deformáciu podstavy a prispôsobenie káps bežcu (Obr. 6-4b). V prípade tuhého uloženia by mohlo pri pohybe bežca dôjsť ku kolízií hrán kapsy a povrchu bežca (Obr. 6-4a), čo by mohlo viesť k značným škodám nielen na klzných plochách, ale aj na nesenom bremene.



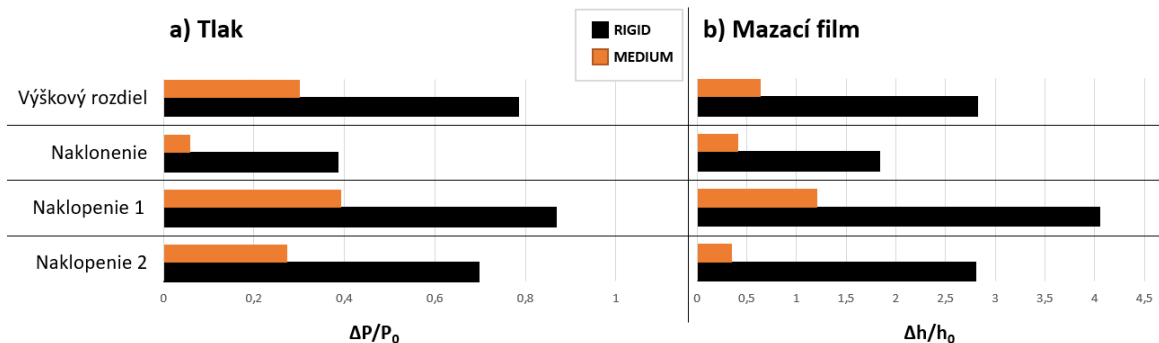
Obr. 6-4 Schematické zobrazenie káps HS ložiska s a) tuhým uložením na skrutkách a b) poddajným uložením na silentblokoch.

V ďalšom kroku boli vyšetrované stavy, ktoré môžu nastať pri montáži - výškové odsadenie, vzájomné natočenie, naklopenie a naklonenie HS káps (Obr. 6-5). Z uvedených montážnych chýb sa javí ako najproblematickejšie práve výškové odsadenie. Naklopenie a naklonenie kapsy je možné do veľkej miery eliminovať separátne, avšak rovinnosť káps musí byť nastavovaná vzájomne.



Obr. 6-5 Schematické zobrazenie montážnych nepresností HS káps s a) výškovým rozdielom, b) vzájomným naklonením, c) a d) vzájomným naklonením v oboch smeroch (šípky znázorňujú smer pohybu bežca).

Výsledky meraní z hľadiska tlakov na Obr. 6-6a naznačujú, že využitím poddajnej podstavy so silentblokami o strednej tuhosti (MEDIUM) je možné dosiahnuť rovnomernejšie rozloženie tlakov o viac ako 50 %. Najmenej náchylný typ na zmenu tlakov v bunke pri montážnej chybe je naklonenie. Zvyšné typy chýb majú omnoho výraznejší vplyv na distribúciu tlakov v bunkách. Z pohľadu mazacieho filmu (Obr. 6-6b) je pozitívny účinok poddajnej vrstvy ešte výraznejší a v prípade naklopie 1 a naklopie 2 je zmena mazacej vrstvy takmer 4-násobne, resp. viac ako 5-násobne nižšia.

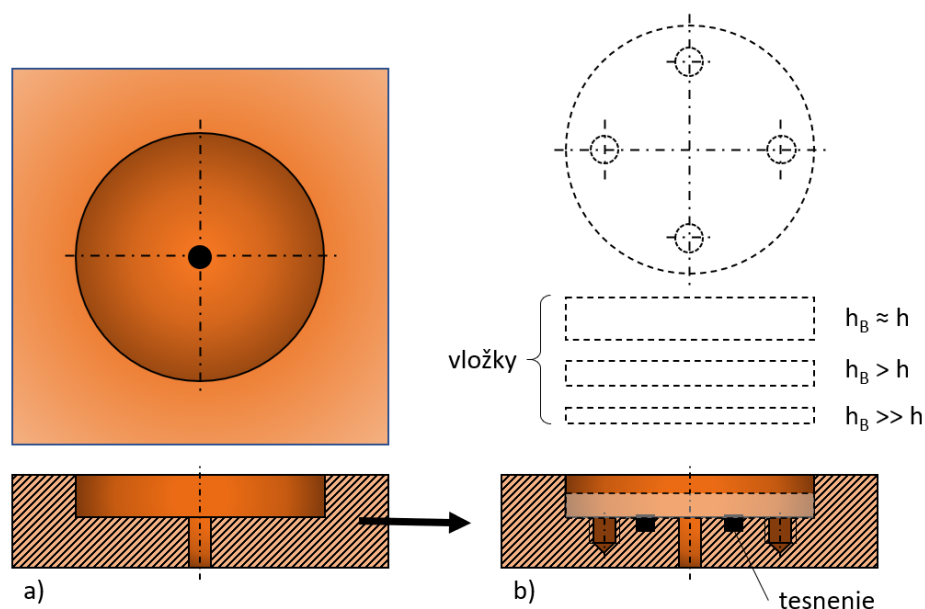


Obr. 6-6 Porovnanie jednotlivých montážnych chýb tuhého (RIGID) a poddajného uloženia o strednej tuhosti (MEDIUM) z hľadiska a) priemerných tlakov v bunke a b) priemernej zmeny mazacej vrstvy pri zaťažení 16 kN a chybe 1,5 mm.

Vyššie uvedené výsledky ukazujú, že poddajná podstava je schopná udržiavať rovnomernejšie rozloženie tlakov v bunkách a taktiež aj rovnomernú mazáciu vrstvy na ploche kapsy HS ložiska v porovnaní tuhým uložením. Je však nutné podotknúť, že poddajné uloženie nemusí byť vhodné pre aplikácie vyžadujúce vysokú tuhosť a presnosť pohybu. Pre menej presné aplikácie môže tento typ podstavy priniesť značnú úľavu nákladov na presnosť výroby a montáže.

6.1.3 Optimalizácia tvaru a hĺbky HS bunky

Stav fáze práce zameraný na optimalizáciu geometrie bunky je aktuálne v stave úpravy vymeniteľných káps pre možnosť zmeny hĺbky bunky s využitím vložiek rôznych výšok (Obr. 6-7). Zároveň prebieha návrh okrajových podmienok pre experimenty a simulácie tak, aby boli čo najviac podobné. Optimalizácia geometrie kapsy HS ložiska bude realizované v prostredí ANSYS Fluent. Následne bude realizované overenie prvotných výsledkov z CFD simulácií na zariadení DUAL-PAD. Pre kontrolu kvality výpočtovej siete bude realizovaná citlivostná analýza. Po overení dôveryhodnosti a presnosti výsledkov CFD simulácie bude pripravená parametrická optimalizácia pre rozličné hĺbky buniek. Získané výsledky budú zrovnané s výsledkami zo zariadenia DUAL-PAD. Predpokladá sa transientný typ analýzy a vyhodnocovanie tlakových strát, zmeny teploty v bunke, prípadne zmena zaťaženia. Podľa dosiahnutých výsledkov bude ďalej spresňované nastavenie simulácie a zrovnávanie výsledkov s experimentom.



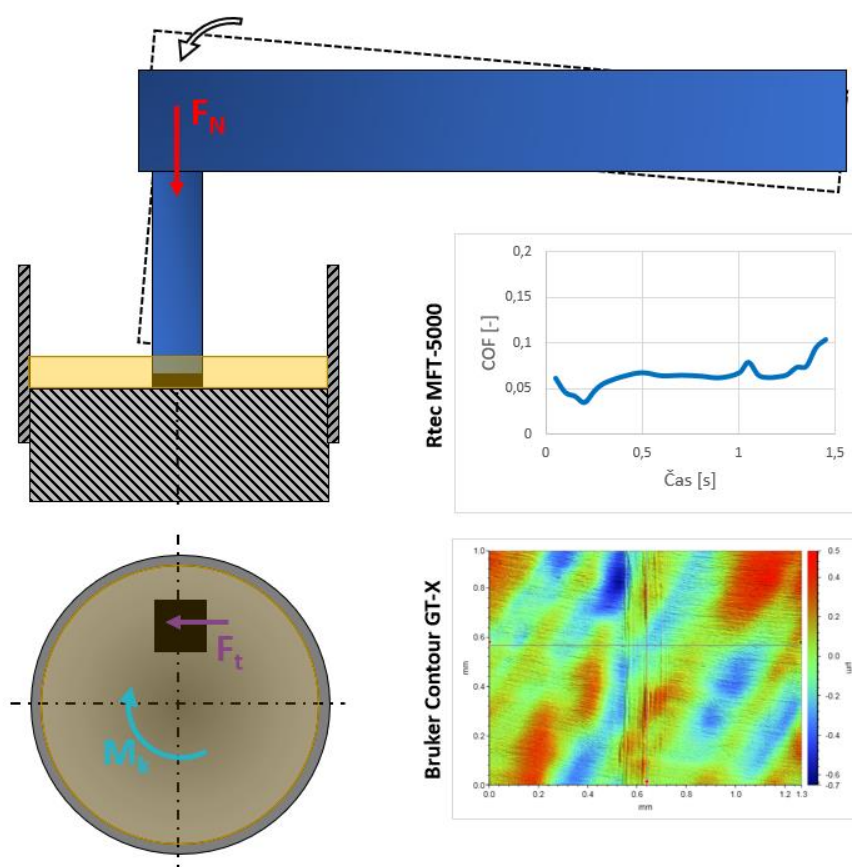
Obr. 6-7 Schéma a) aktuálneho tvaru vymeniteľnej kapsy HS ložiska zariadenia DUAL-PAD a b) kapsa po úprave s variabilnou hĺbkou bunky s využitím vložiek (od hĺbky blízkej výške mazacej vrstvy až po veľmi hlboké).

6.2 Hodnotenie modifikovaných klzných plôch HS ložísk

Štúdium vplyvu modifikácie povrchov klzných plôch kapsy HS ložiska je vo fáze návrhu experimentálneho rotačného modulu pre zariadenie Rtec MFT-5000. Pre udržanie podmienok podobným stavu HS ložiska keď dôjde k prerušeniu dodávky tlakového oleja medzi klzné plochy bude kontakt plne zaplavený olejom vo vaničke (Obr. 6-8). Kritický stav dosadnutia počas rotácie bude simulovaný s postupne klesajúcim ramenom zariadenia

nesúcim vzorku a rotujúcemu disku s vaničkou a olejom, ktorá bude spomaľovať po pritlačení s určitou silou. Počas experimentu bude vyhodnocovaný súčiniteľ trenia (coefficient of friction - COF) pre všetky typy vzoriek (bez modifikácie, povlak, textúra, kombinácia materiálov) a budú následne zrovnávané ich časové priebehy. Rozsah opotrebenia a topografia povrchu budú ďalšími hodnotiacimi kritériami, ktoré budú vyšetrované pomocou optického profilometru Bruker Contour GT-X.

Súčasne prebieha návrh textúry povrchu na základe poznatkov získaných z rešerše a konzultácie s prof. Gachotom z TU Wien, ktorý je špičkou v odbore a súhlasil so spoluprácou formou výroby textúry klzných plôch. V spolupráci s TU Wien budú konzultované tvary textúry a vyrobené vzorky pre experimentálne štúdium textúry klzných povrchov.



Obr. 6-8 Schematické zobrazenie experimentálneho modulu pre zariadenie Rtec MFT-5000 s predpokladanými hodnotiacimi veličinami - súčiniteľ trenia priamo na zariadení a topografia povrchu pred a po experimente na optickom profilometri Bruker Contour GT-X.

7 ZÁVER

Pojednanie k štátnej doktorskej skúške vymedzuje tému dizertačnej práce, ktorou je návrh metodiky veľkorozmerných HS uložení.

Pojednanie obsahuje zhrnutie súčasného stavu poznania, kľúčových parametrov a častí HS ložísk. V pojednaní boli analyzované a rozobrané najpodstatnejšie štúdie z oblastí súvisiacich s dvoma rovnako podstatnými časťami HS ložísk – kapsou ložiska a hydraulického okruhu. Pojednanie pokračuje s analýzou a zhodnotením poznatkov z rešerše, na základe čoho bol formulovaný cieľ práce a vedecké otázky. Postup riešenia a metódy sú volené s ohľadom na vhodnosť interpretácie výsledkov vo vzťahu k veľkorozmerným HS uloženiam.

V súčasnom stave riešenia bol popísaný aktuálny stav jednotlivých etáp, pričom niektoré dlhodobé ciele už boli splnené a predpokladá sa ďalší postup v riešení práce.

8 BIBLIOGRAFIA

- [1] MICHALEC, Michal, Petr SVOBODA, Ivan KŘUPKA a Martin HARTL. A review of the design and optimization of large-scale hydrostatic bearing systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2021, č. February. ISSN 22150986.
- [2] LORD RAYLEIGH O.M. F.R.S. Notes on the theory of lubrication. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*. 1918, roč. 35, č. 205, s. 1–12.
- [3] ROWE, W. B. Advances in hydrostatic and hybrid bearing technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 1989, roč. 203, č. 4, s. 225–242. ISSN 20412983.
- [4] BASSANI, R a B PICCIGALLO. *Hydrostatic Lubrication*. 22. vyd. B.m.: Elsevier B.V., 1992. ISBN 10: 044488498X.
- [5] CHENG, K. a W. B. ROWE. A selection strategy for the design of externally pressurized journal bearings. *Tribology International*. 1995, roč. 28, č. 7, s. 465–474. ISSN 0301679X.
- [6] LI, Xibing, Xun WANG, Ming LI, Yunshi MA a Ying HUANG. The research status and progress of heavy/large hydrostatic thrust bearing. *Advances in Mechanical Engineering*. 2014, roč. 2014. ISSN 16878140.
- [7] LIU, Z F, Y M WANG, L G CAI, Y S ZHAO, Q CHENG a X M DONG. A review of hydrostatic bearing system: Researches and applications. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017, roč. 9, č. 10. ISSN 1687-8132.
- [8] KHONSARI, Michael M. a E. Richard BOOSER. *Applied Tribology: Bearing Design and Lubrication*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2017. ISBN 9781118700280.
- [9] AWREJCEWICZ, Jan a Pawel OLEJNIK. The Occurrence of Stick-Slip Phenomenon. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*. 2007, roč. 45, č. 1, s. 33–40.
- [10] WASILCZUK, Michal, Michal WODTKE a Leszek DABROWSKI. Field tests on hydrodynamic and hybrid operation of a bidirectional thrust bearing of a pump-turbine. *Lubricants*. 2017, roč. 5, č. 4. ISSN 20754442.
- [11] FESANGHARY, M. a M. M. KHONSARI. On the optimum groove shapes for load-carrying capacity enhancement in parallel flat surface bearings: Theory and experiment. *Tribology International*. 2013, roč. 67, s. 254–262. ISSN 0301679X.
- [12] SHAO, Jun Peng, Guang Dong LIU, Xiao Dong YU, Yan Qin ZHANG, Xiu Li MENG a Hui JIANG. Effect of recess depth on lubrication performance of annular recess hydrostatic thrust bearing by constant rate flow. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2018, roč. 70, č. 1, s. 68–75. ISSN 00368792.
- [13] YU, M B, X D YU, X H ZHENG, H QU, T F YUAN a D G LI. Influence of recess shape on comprehensive lubrication performance of high speed and heavy load hydrostatic thrust bearing. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 2, s. 301–308. ISSN 0036-8792.

- [14] SINGH, Narendra, Satish C. SHARMA, S. C. JAIN a S. Sanjeeva REDDY. Performance of membrane compensated multirecess hydrostatic/hybrid flexible journal bearing system considering various recess shapes. *Tribology International*. 2004, roč. 37, č. 1, s. 11–24. ISSN 0301679X.
- [15] CHEN, Dyi Cheng, Ming Fei CHEN, Chih Hsuan PAN a Jun Yan PAN. Study of membrane restrictors in hydrostatic bearing. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, roč. 10, č. 9, s. 1–8. ISSN 16878140.
- [16] GOHARA, M, K SOMAYA, M MIYATAKE a S YOSHIMOTO. Static characteristics of a water-lubricated hydrostatic thrust bearing using a membrane restrictor. *Tribology International*. 2014, roč. 75, s. 111–116. ISSN 0301-679X.
- [17] GHEZALI, F, A BOUZIDANE a M THOMAS. 3D Numerical investigation of pressure field of an orifice compensated hydrostatic bearing. *Mechanics & Industry*. 2017, roč. 18, č. 1. ISSN 2257-7777.
- [18] KHAKSE, P. G., V. M. PHALLE a S. S. MANTHA. Comparative performance of a non-recessed hole-entry hybrid/hydrostatic conical journal bearing compensated with capillary and orifice restrictors. *Tribology in Industry*. 2016, roč. 38, č. 2, s. 133–148. ISSN 03548996.
- [19] BASSANI, R a B PICCIGALLO. *Hydrostatic Lubrication*. 1st vyd. B.m.: Elsevier Science & Technology, 1992. ISBN 978-0-444-88498-5.
- [20] KHONSARI, Michael M. a Richard E. BOOSER. *Applied tribology*. 1970. ISBN 9780470057117.
- [21] CHEN, Guanci a Jianmin WEN. Effects of size and raceway hardness on the fatigue life of large rolling bearing. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015, roč. 29, č. 9, s. 3873–3883. ISSN 1738494X.
- [22] CHEN, Long, Xin Tao XIA, Hao tian ZHENG a Ming QIU. Rework solution method on large size radial roller bearings. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2016, roč. 38, č. 4, s. 1249–1260. ISSN 18063691.
- [23] MAHDI, Rahmani, Krall STEPHAN a Bleicher FRIEDRICH. Experimental investigations on stick-slip phenomenon and friction characteristics of linear guides. *Procedia Engineering*. 2015, roč. 100, č. January, s. 1023–1031. ISSN 18777058.
- [24] LIANG, Peng, Changhou LU, Jie DING a Shujiang CHEN. A method for measuring the hydrodynamic effect on the bearing land. *Tribology International*. 2013, roč. 67, s. 146–153. ISSN 0301679X.
- [25] JANG, Joon a Michael KHONSARI. On the Characteristics of Misaligned Journal Bearings. *Lubricants*. 2015, roč. 3, č. 1, s. 27–53. ISSN 2075-4442.
- [26] QI, Enbing, Zhenyong FANG, Tao SUN, Jianchao CHEN, Changzai LIU a Jian WANG. A method for predicting hydrostatic guide error averaging effects based on three-dimensional profile error. *Tribology International*. 2016, roč. 95, s. 279–289. ISSN 0301679X.
- [27] ZHA, Jun, Fei XUE a Yaolong CHEN. Straightness error modeling and compensation for gantry type open hydrostatic guideways in grinding machine. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2017, roč. 112, č. August 2016, s. 1–6. ISSN 08906955.
- [28] HORVAT, F. E. a M. J. BRAUN. Comparative experimental and numerical analysis

- of flow and pressure fields inside deep and shallow pockets for a hydrostatic bearing. *Tribology Transactions*. 2011, roč. 54, č. 4, s. 548–567. ISSN 10402004.
- [29] KOZDERA, M. a S. DRBÁKOVÁ. Numerical modelling of the flow in the annular multi-recess hydrostatic thrust bearing using CFD methods. *EPJ Web of Conferences*. 2013, roč. 45. ISSN 21016275.
 - [30] GROPPER, Daniel, Ling WANG a Terry J. HARVEY. Hydrodynamic lubrication of textured surfaces: A review of modeling techniques and key findings. *Tribology International*. 2016, roč. 94, s. 509–529. ISSN 0301679X.
 - [31] ZAHID, Rehan, H. H. MASJUKI, Mahendra VARMAN, Riaz Ahmad MUFTI, Md Abul KALAM a Mubashir GULZAR. Effect of lubricant formulations on the tribological performance of self-mated doped DLC contacts: A review. *Tribology Letters*. 2015, roč. 58, č. 2, s. 32. ISSN 10238883.
 - [32] WANG, X. a A. YAMAGUCHI. Characteristics of hydrostatic bearing/seal parts for water hydraulic pumps and motors. Part 1: Experiment and theory. *Tribology International*. 2002, roč. 35, č. 7, s. 425–433. ISSN 0301679X.
 - [33] HAMROCK, Bernard J, Steven R SCHMID a Bo O. JACOBSON. *Fundamentals of Fluid Film Lubrication*. 2nd vyd. B.m.: New York : Marcel Dekker, 2004. ISBN 0824753712.
 - [34] JOHNS, Matt, Charles HULL, Gary MULLER, Ben IRARRAZAVAL, Antonin BOUCHEZ, Tomas CHYLEK, Cary SMITH, Abhijit WADHAVKAR, Bruce BIGELOW, Steven GUNNELS, Brian MCLEOD a Christine BULERI. Design of the Giant Magellan Telescope. *Ground-based and Airborne Telescopes V*. 2014, roč. 9145, s. 91451F. ISSN 1996756X.
 - [35] SHEEHAN, Michael, Steve GUNNELS, Charles HULL, Jonathan KERN, Carey SMITH, Matt JOHNS a Stephen SHECTMAN. Progress on the structural and mechanical design of the Giant Magellan Telescope. *Ground-based and Airborne Telescopes IV*. 2012, roč. 8444, s. 84440N. ISSN 0277786X.
 - [36] BASSANI, R a B PICCIGALLO. HYDROSTATIC LUBRICATION. *Tribology series*. 1992, roč. 22.
 - [37] BAKKER, O. J. a R. A.J. VAN OSTAYEN. Recess depth optimization for rotating, annular, and circular recess hydrostatic thrust bearings. *Journal of Tribology*. 2010, roč. 132, č. 1, s. 1–7. ISSN 07424787.
 - [38] PHILLIPS, Edward H. Hydrostatic bearings. *Production Engineer*. 2010, roč. 44, č. 3, s. 162. ISSN 00329851.
 - [39] HAMROCK, Bernard J. *Fundamental of Fluid Film Lubrication Second Edition*. 2004. ISBN 0824753712.
 - [40] HARNOY, Avraham. *Bearing design in machinery, Engineering tribology and lubrication*. 2003. ISBN 0824707036.
 - [41] LU, Lihua, Hao SU, Yingchun LIANG a Qiang ZHANG. Research on static stiffness of hydrostatic bearing using fluid-structure interaction analysis. *Procedia Engineering*. 2012, roč. 29, s. 1304–1308. ISSN 18777058.
 - [42] LIU, Teng, Weiguo GAO, Yanling TIAN, Ken MAO, Gaoxing PAN a Dawei ZHANG. Thermal simulation modeling of a hydrostatic machine feed platform. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, roč. 79, č. 9–

12, s. 1581–1595. ISSN 14333015.

- [43] YU, M B, X D YU, X H ZHENG a H JIANG. Thermal-fluid-solid coupling deformation of hydrostatic thrust bearing friction pairs. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 3, s. 467–473. ISSN 0036-8792.
- [44] WANG, Shigang, Xianfeng DU, Dongsheng LI a Qingming HU. Characteristic study on temperature field of hydrostatic bearing of hydroforming machine. *Advanced Materials Research*. 2013, roč. 605–607, s. 630–635. ISSN 10226680.
- [45] KOPŘIVA, David. *Optimalizace tvaru buňky hydrostatického ložiska*. B.m., 2021. b.n. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132152>
- [46] YU, Mubing, Xiaodong YU, Xuhang ZHENG, Hang QU, Tengfei YUAN a Daige LI. Influence of recess shape on comprehensive lubrication performance of high speed and heavy load hydrostatic thrust bearing. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 2, s. 301–308. ISSN 00368792.
- [47] SHEN, F, C L CHEN a Z M LIU. Effect of Pocket Geometry on the Performance of a Circular Thrust Pad Hydrostatic Bearing in Machine Tools. *Tribology Transactions*. 2014, roč. 57, č. 4, s. 700–714. ISSN 1040-2004.
- [48] SHARMA, Satish C., S. C. JAIN a D. K. BHARUKA. Influence of recess shape on the performance of a capillary compensated circular thrust pad hydrostatic bearing. *Tribology International*. 2002, roč. 35, č. 6, s. 347–356. ISSN 0301679X.
- [49] RAJASEKHAR NICODEMUS, E. a Satish C. SHARMA. Orifice compensated multirecess hydrostatic/hybrid journal bearing system of various geometric shapes of recess operating with micropolar lubricant. *Tribology International*. 2011, roč. 44, č. 3, s. 284–296. ISSN 0301679X.
- [50] GAO, Siyu, Kai CHENG, Shijin CHEN, Hui DING a Hongya FU. *CFD based investigation on influence of orifice chamber shapes for the design of aerostatic thrust bearings at ultra-high speed spindles*. 2015. ISSN 0301679X. Dostupné z: doi:
- [51] DZODZO, M., M. J. BRAUN a R. C. HENDRICKS. Pressure and flow characteristics in a shallow hydrostatic pocket with rounded pocket/land joints. *Tribology International*. 1996, roč. 29, č. 1, s. 69–76. ISSN 0301679X.
- [52] SHAO, Jun Peng, Chun Xi DAI, Yan Qin ZHANG, Xiao Dong YU, Xiao Qiu XU a Yun Fei WANG. The effect of oil cavity depth on temperature field in heavy hydrostatic thrust bearing. *Journal of Hydrodynamics*. 2011, roč. 23, č. 5, s. 676–680. ISSN 10016058.
- [53] HELENE, Mathieu, Mihai ARGHIR a Jean FRENE. Numerical study of the pressure pattern in a two-dimensional hybrid journal bearing recess, laminar, and turbulent flow results. *Journal of Tribology*. 2003, roč. 125, č. 2, s. 283–290. ISSN 07424787.
- [54] YU, X D, X ZUO, C LIU, X H ZHENG, H QU a T F YUAN. Oil film shape prediction of hydrostatic thrust bearing under the condition of high speed and heavy load. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2018, roč. 70, č. 7, s. 1243–1250. ISSN 0036-8792.
- [55] VAN BEEK, Antoon a Lubor LEPIC. Rubber supported hydrostatic thrust bearings with elastic bearing surfaces of infinite length. 1996, roč. 201, s. 45–50.
- [56] VAN BEEK, A. a A. SEGAL. Rubber supported hydrostatic thrust bearings with rigid bearing surfaces. *Tribology International*. 1997, roč. 30, č. 1, s. 47–52. ISSN

0301679X.

- [57] LIANG, Xingxin, Xinping YAN, Wu OUYANG, Robert J.K. WOOD, Fuming KUANG, Zhenglin LIU a Xincong ZHOU. *Comparison of measured and calculated water film thickness of a water-lubricated elastically supported tilting pad thrust bearing*. 2019. ISSN 2051672X. Dostupné z: doi:
- [58] BRIZMER, V., Y. KLIGERMAN a I. ETSION. A laser surface textured parallel thrust bearing. *Tribology Transactions*. 2003, roč. 46, č. 3, s. 397–403. ISSN 1547397X.
- [59] CHARITOPOULOS, A., D. FOUFLIAS, C. I. PAPADOPOULOS, L. KAIKTSIS a M. FILLON. Thermohydrodynamic analysis of a textured sector-pad thrust bearing: Effects on mechanical deformations. *Mechanics and Industry*. 2014, roč. 15, č. 5, s. 403–411. ISSN 22577750.
- [60] WANG, Zhiwei, Wanhua ZHAO, Yaolong CHEN a Bingheng LU. Prediction of the effect of speed on motion errors in hydrostatic guideways. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013, roč. 64, s. 78–84. ISSN 08906955.
- [61] ZHANG, Penghai, Yaolong CHEN, Chengyong ZHANG, Jun ZHA a Tao WANG. Influence of geometric errors of guide rails and table on motion errors of hydrostatic guideways under quasi-static condition. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2018, roč. 125, č. August 2017, s. 55–67. ISSN 08906955.
- [62] XIAN-TING, Ma. Review of the present status of hydraulic accumulator. *Applied Mechanics and Materials*. 2013, roč. 246–247, s. 629–634. ISSN 16609336.
- [63] RYDBERG, Karl Erik. Hydraulic accumulators as key components in energy efficient mobile systems. *Proceedings of the 6th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, ICFP 2005*. 2005, č. February, s. 124–129.
- [64] MAMČIC, Stanislav a Marijonas BOGDEVIČIUS. Simulation of dynamic processes in hydraulic accumulators. *Transport*. 2010, roč. 25, č. 2. ISSN 16483480.
- [65] REHMAN, W U, G Y JIANG, Y X LUO, Y Q WANG, W KHAN, S U REHMAN a N IQBAL. Control of active lubrication for hydrostatic journal bearing by monitoring bearing clearance. *Advances in Mechanical Engineering*. 2018, roč. 10, č. 4. ISSN 1687-8140.
- [66] SHARMA, Satish C., Vikas M. PHALLE a S. C. JAIN. Performance analysis of a multirecess capillary compensated conical hydrostatic journal bearing. *Tribology International*. 2011, roč. 44, č. 5, s. 617–626. ISSN 0301679X.
- [67] YADAV, S K a S C SHARMA. Performance of hydrostatic tilted thrust pad bearings of various recess shapes operating with non-Newtonian lubricant. *Finite Elements in Analysis and Design*. 2014, roč. 87, s. 43–55. ISSN 0168-874X.
- [68] OKAHATA, Go, Shigeki OKUYAMA a Akinori YUI. Numerical study on constant-flow hydrostatic water bearing for a machine-tool table. *Advanced Materials Research*. 2011, roč. 325, s. 357–362. ISSN 10226680.
- [69] LI, X B, T CHENG, M LI, M J LI, R R WU a Y S WAN. Theoretical research on sector oil-pads' mechanical property in hydrostatic thrust bearing based on constant flow. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2017, roč. 69, č. 4, s. 491–506. ISSN 0036-8792.
- [70] LAI, T H, T Y CHANG, Y L YANG a S C LIN. Parameters design of a membrane-

- type restrictor with single-pad hydrostatic bearing to achieve high static stiffness. *Tribology International*. 2017, roč. 107, s. 206–212. ISSN 0301-679X.
- [71] ZHU, Xiao Chuang, Wei Guo GAO, Teng LIU, Sheng Hui ZHAO, Guan Wei ZHANG a Da Wei ZHANG. Analysis on dynamic characteristics of closed hydrostatic guideway throttled by capillary. *Applied Mechanics and Materials*. 2014, roč. 607, s. 594–599. ISSN 16627482.
 - [72] REHMAN, W U R, Y X LUO, Y Q WANG, G Y JIANG, N IQBAL, S U R REHMAN a S BIBI. Fuzzy logic-based intelligent control for hydrostatic journal bearing. *Measurement & Control*. 2019, roč. 52, č. 3–4, s. 229–243. ISSN 0020-2940.
 - [73] VERDIER, Sylvain, Joao A.P. COUTINHO, Artur M.S. SILVA, Ole F. ALKILDE a Jens A. HANSEN. A critical approach to viscosity index. *Fuel*. 2009, roč. 88, č. 11, s. 2199–2206. ISSN 00162361.
 - [74] JORDAN, Edmund F., Steven SMITH, Ronald E. KOOS, Winfred E. PARKER, Bohdan ARTYMYSHYN a A. N. WRIGLEY. Viscosity index. I. Evaluation of selected copolymers incorporating n-octadecyl acrylate as viscosity index improvers. *Journal of Applied Polymer Science*. 1978, roč. 22, č. 6, s. 1509–1528. ISSN 10974628.
 - [75] SRIVYAS, Pranav Dev a M. S. CHAROO. Effect of lubricants additive: Use and benefit. *Materials Today: Proceedings*. 2019, roč. 18, s. 4773–4781. ISSN 22147853.
 - [76] HESSELBACH, J. a C. ABEL-KEILHACK. Active hydrostatic bearing with magnetorheological fluid. *Journal of Applied Physics*. 2003, roč. 93, č. 10 3, s. 8441–8443. ISSN 00218979.
 - [77] KUMAR, V a S C SHARMA. Magneto-hydrostatic lubrication of thrust bearings considering different configurations of recess. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 7, s. 915–923. ISSN 0036-8792.
 - [78] MICHALEC, M, P SVOBODA, I KRUPKA a M HARTL. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry*. 2018, roč. 40, č. 4, s. 515–528.
 - [79] VENCL, Aleksandar, Mara KANDEVA, Elena ZADOROZHNYAYA, Petr SVOBODA, Michal MICHALEC, Aleksandar MILIVOJEVIĆ a Uroš TRDAN. Studies on structural, mechanical and erosive wear properties of ZA-27 alloy-based micro-nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2021, s. 1–12. ISSN 20413076.
 - [80] YU, Xiaodong, Dan LIU, Xiuli MENG, Xv FU, Zhiqiang WANG, Qihui ZHOU, Bo WU, Yanqin ZHANG, Bai QIN a Xuezhe DONG. Numerical Simulation of the Effects of Recess Depth on Dynamic Effect of Hydrostatic Thrust Bearing. 2013, roč. 31, č. Aen, s. 1–5.
 - [81] LIU, Zhi Feng, Cheng Peng ZHAN, Qiang CHENG, Yong Sheng ZHAO, Xiao Yan LI a Yi Da WANG. Thermal and tilt effects on bearing characteristics of hydrostatic oil pad in rotary table. *Journal of Hydrodynamics*. 2016, roč. 28, č. 4, s. 585–595. ISSN 10016058.
 - [82] ZHANG, Y T, C H LU, H X ZHAO, W J SHI a P LIANG. Error Averaging Effect of Hydrostatic Journal Bearings Considering the Influences of Shaft Rotating Speed and External Load. *Ieee Access*. 2019, roč. 7, s. 106346–106358. ISSN 2169-3536.
 - [83] ZHANG, P H, Y L CHEN a J ZHA. Relationship between geometric errors of thrust

- plates and error motions of hydrostatic thrust bearings under quasi-static condition. *Precision Engineering-Journal of the International Societies For Precision Engineering and Nanotechnology*. 2017, roč. 50, s. 119–131. ISSN 0141-6359.
- [84] YACOUT, A. W., A. S. ISMAEEL a S. Z. KASSAB. The surface roughness effect on the hydrostatic thrust spherical bearing performance (part 2 of 5, clearance type of bearings). *American Society of Mechanical Engineers, Tribology Division, TRIB*. 2006, č. April. ISSN 10716947.
- [85] LIN, Jaw Ren. Surface roughness effect on the dynamic stiffness and damping characteristics of compensated hydrostatic thrust bearings. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2000, roč. 40, č. 11, s. 1671–1689. ISSN 08906955.
- [86] ZHAO, Donglai, Wenjie GE, Xiaojuan MO, Bo LIU a Dianbiao DONG. Design of a new hydraulic accumulator for transient large flow compensation. *Energies*. 2019, roč. 12, č. 16. ISSN 19961073.
- [87] DAI, Minqiang, Shengdun ZHAO a Xiaomei YUAN. The application study of accumulator used in hydraulic system of 20MN fast forging machine. *Applied Mechanics and Materials*. 2011, roč. 80–81, s. 870–874. ISSN 16609336.
- [88] SANTOS, Nathália Duarte Souza Alvarenga, Vínicius Rückert ROSO a Marco Tulio C. FARIA. Review of engine journal bearing tribology in start-stop applications. *Engineering Failure Analysis*. 2020, roč. 108, č. August 2019, s. 104344. ISSN 13506307.
- [89] WODTKE, M., A. SCHUBERT, M. FILLON, M. WASILCZUK a P. PAJACZKOWSKI. Large hydrodynamic thrust bearing: Comparison of the calculations and measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2014, roč. 228, č. 9, s. 974–983. ISSN 2041305X.
- [90] GACHOT, C., A. ROSENKRANZ, S. M. HSU a H. L. COSTA. A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement. *Wear*. 2017, roč. 372–373, s. 21–41. ISSN 00431648.
- [91] KUMAR, V a S C SHARMA. Combined influence of couple stress lubricant, recess geometry and method of compensation on the performance of hydrostatic circular thrust pad bearing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*. 2017, roč. 231, č. 6, s. 716–733. ISSN 1350-6501.
- [92] HSIAO, S T, Y KANG, S M JONG, H H LEE, D X PENG a Y P CHANG. Static analysis of hydrostatic conical bearings using flow resistance network method. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2014, roč. 66, č. 3, s. 411–423. ISSN 0036-8792.
- [93] CHIKUROV, N. G. Modeling of hydrostatic bearings by electrical analogy. *Russian Engineering Research*. 2017, roč. 37, č. 6, s. 517–522. ISSN 19348088.
- [94] DOWSON, Duncan. Inertia effects in hydrostatic thrust bearings. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*. 1961, roč. 83, č. 2, s. 227–234.
- [95] STANWAY, R. Smart fluids: current and future developments. *Materials Science and Technology*. 2004, roč. 20, č. 8, s. 931–939. ISSN 0267-0836.
- [96] SONG, Wan-Li, Seung-Bok CHOI, Jae-Young CHOI a Chul-Hee LEE. Wear and Friction Characteristics of Magnetorheological Fluid under Magnetic Field Activation. *Tribology Transactions*. 2011, roč. 54, č. 4, s. 616–624. ISSN 1040-2004.

- [97] SUN, Huan Wu a Shu Cai YANG. Revolved Surface Finishing with Smart Fluid Abrasives. *Key Engineering Materials*. 2006, roč. 304–305, s. 579–583. ISSN 1662-9795.
- [98] KUMAR, Vivek a Satish C. SHARMA. Magneto-hydrostatic lubrication of thrust bearings considering different configurations of recess. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 7, s. 915–923. ISSN 00368792.
- [99] LAMPAERT, Stefan G.E. a Ron A.J. VAN OSTAYEN. Load and stiffness of a hydrostatic bearing lubricated with a Bingham plastic fluid. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 2019. ISSN 15308138.
- [100] WILSON, R. W. a S. B. LYON. Corrosion in lubricants/fuels. In: *Shreir's Corrosion*. B.m.: Elsevier, 2010, s. 1299–1307. ISBN 9780444527875. Dostupné z: doi:
- [101] MINAMI, Ichiro, Toshihiko ICHIHASHI, Tomoo KUBO, Hidetaka NANAŌ a Shigeyuki MORI. Tribochemical approach toward mechanism for synergism of lubricant additives on antiwear and friction reducing properties. *Tribology and Interface Engineering Series*. 2005, roč. 48, s. 259–268. ISSN 15723364.
- [102] SRIVYAS, Pranav Dev a M. S. CHAROO. Effect of lubricants additive: Use and benefit. In: *Materials Today: Proceedings*. B.m.: Elsevier Ltd, 2019, s. 4773–4781. ISSN 22147853.
- [103] ZHANG, Y Q, P R KONG, Y A FENG a L L GUO. Hot oil carrying characteristic about hydrostatic bearing oil film of heavy vertical lathe in high speed. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019, roč. 71, č. 1, s. 126–132. ISSN 0036-8792.
- [104] ZHANG, Yan Qin, Xiao Qiu XU, Xiao Dong YANG, Hong Mei LI, Hui JIANG, Xiao Yang YU a Zhi Min SHI. Analysis on influence of oil film thickness on temperature field of heavy hydrostatic bearing in variable viscosity condition. *Advanced Materials Research*. 2011, roč. 239–242, s. 1418–1421. ISSN 10226680.
- [105] BECK, Antoon Van a Lubor LEPIC. Rubber supported hydrostatic thrust bearings with elastic bearing surfaces of infinite length. 1996, roč. 201, s. 45–50.
- [106] LIU, Z F, C P ZHAN, Q CHENG, Y S ZHAO, X Y LI a Y D WANG. Thermal and tilt effects on bearing characteristics of hydrostatic oil pad in rotary table. *Journal of Hydrodynamics*. 2016, roč. 28, č. 4, s. 585–595. ISSN 1001-6058.
- [107] BABU, M.V.S., A. Rama KRISHNA a K.N.S. SUMAN. Review of Journal Bearing Materials and Current Trends. *American Journal of Materials Science and Technology*. 2015, č. January.
- [108] KRUPKA, Ivan a Martin HARTL. Effect of surface texturing on very thin film EHD lubricated contacts. *Tribology Transactions*. 2009, roč. 52, č. 1, s. 21–28. ISSN 10402004.
- [109] ZHANG, Yanhu, Hao FU, Xinwei WANG, Hongyu LIANG, Julius Caesar PUOZA, Jinghu JI, Xijun HUA, Xiaojing XU a Yonghong FU. Additional tribological effect of laser surface texturing and diamond-like carbon coating for medium carbon steel at near room temperature. *Coatings*. 2020, roč. 10, č. 10, s. 1–22. ISSN 20796412.
- [110] ETSION, I. a G. HALPERIN. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal. *Tribology Transactions*. 2002, roč. 45, č. 3, s. 430–434. ISSN 10402004.
- [111] ETSION, I., G. HALPERIN, V. BRIZMER a Y. KLIGERMAN. Experimental investigation of laser surface textured parallel thrust bearings. *Tribology Letters*.

2004, roč. 17, č. 2, s. 295–300. ISSN 10238883.

ZOZNAM OBRÁZKOV A GRAFOV

Obr. 1-1 Schéma princípu funkcie HS ložiska.	6
Obr. 3-1 Schematické znázornenie excentrického zaťaženia a) 1-kapsového ložiska, b) viac-kapsového ložiska otvoreného typu.	9
Obr. 3-2 Hydraulická schéma viac-kapsového HS ložiska s konštantným prietokom [12].	10
Obr. 3-3 Schéma hydraulického obvodu viac-kapsového HS uloženia otvoreného typu. .	11
Obr. 3-4 Schematické rozloženie tlaku v bunke	13
Obr. 3-5 Graf pre výpočet štvorbunkovej konfigurácie hydrostatickej kapsy pomocou výpočtových koeficientov	16
Obr. 3-6 Porovnanie nosnosti a tlaku v bunke rôznych tvarov geometrie bunky kruhového HS ložiska [45].	19
Obr. 3-7 Skúmané tvary buniek kapsy HS ložiska: a) kruh, b) kruhový výsek a c) kríž [46].	20
Obr. 3-8 Teplotné pole výsledkov z simulácií pre bunku: a) kruhovú, b) kruhový výsek a c) krížovú [46].	20
Obr. 3-9 Tlakové pole výsledkov z simulácií pre bunku: a) kruhovú, b) kruhový výsek a c) krížovú [46].	21
Obr. 3-10 Schéma experimentálnej zostavy pre štúdium prúdenia v HS ložisku s využitím transparentných telies [47].	22
Obr. 3-11 CAD modely vyšetrovaných tvarov buniek: a) eliptická, b) štvorcová, c) medzikruhová a d) kruhový výsek [47].	23
Obr. 3-12 Porovnanie vizualizácie zavírenia v bunke HS ložiska z experimentov a výsledkov CFD simulácií [47].	24
Obr. 3-13 Výsledky rôznych konfigurácií tvarov buniek a) bezrozmerných tlakov a b) bezrozmerných tuhostí [47].	24
Obr. 3-14 Vyšetrované tvary buniek kapsy HS ložiska: 1. kruhová, 2. obdĺžniková, 3. eliptická a 4. medzikruhová [48].	25
Obr. 3-15 Porovnanie a) nosnej kapacity a b) tuhosti mazacieho filmu pre rôzne tvarové konfigurácie a kompenzačné prvky [48].	26
Obr. 3-16 Vykreslenie závislosti tlaku v bunke na návrhovom súčiniteli restriktoru pre vyšetrované tvary buniek [49].	26

Obr. 3-17 Vyšetrované tvary buniek: a) s kužeľovou hlavou, b) s kužeľovou bunkou, c) s valcovou bunkou, d) iba s vtokovou drážkou, e) iba s vtokovou drážkou so zaoblením a f) s valcovou bunkou a kužeľovou päťou [50].	27
Obr. 3-18 Experimentálna zostava pre porovnanie výsledkov CFD simulácie [50].	28
Obr. 3-19 Výsledky CFD simulácií pre vyššie uvedené tvary: a) nosnej kapacity vo vzťahu k výške aerofilmu, b) nosnej kapacity v závislosti na otáčkach, c) tuhosti v závislosti na výške aerofilmu a d) dodávaného prietoku na výške aerofilmu [50].	29
Obr. 3-20 Porovnanie výsledkov CFD simulácie s experimentom pre závislosť výšky odsadenia (výšky aerofilmu) a a) nosnej kapacity a b) tuhosti [50].	30
Obr. 3-21 Tvar bunky HS ložiska s a) kónickým/šikmým výbehom, b) s valcovým/priamym výbehom (zaoblený/hranatý) [1].	30
Obr. 3-22 Závislosť teploty maziva v bunke na hĺbke bunky [52].	31
Obr. 3-23 Závislosť tlaku (a) a teploty (b) oleja v kapsy na hĺbke bunky pri rôznych rýchlostiach [12].	32
Obr. 3-24 Náskres okrajových podmienok a geometrie [53].	33
Obr. 3-25 Porovnanie tlakových vzorov pre laminárny režim a pomer a) $H/h = 4$, b) $H/h = 64$, turbulentný režim pre pomer c) $H/h = 4$ a d) $H/h = 64$ [53].	34
Obr. 3-26 Okrajové podmienky numerickej simulácie s využitím symetrie a schematickým zobrazením pracovného postupu [54].	35
Obr. 3-27 HS ložisko využívané pre experimentálne overenie výsledkov numerických simulácií [54].	36
Obr. 3-28 Detail diskretizovanej oblasti bunky a kapsy so znázornením okrajových podmienok simulácie [28].	37
Obr. 3-29 Schéma experimentálnej aparatury pre overenie výsledkov simulácií [28].	38
Obr. 3-30 Porovnanie výsledkov vizualizácie prúdenia numerickej simulácie a experimentu pre 1,52 mm hlbokú bunku pri pokoji, stredných otáčkach (200 RPM) vysokých otáčkach (1500 RPM) [28].	39
Obr. 3-31 Porovnanie tlakovej straty pre rôzne pomery H/h pri nízkych (200 RPM) a vysokých otáčkach (1500 RPM) s rôznymi vstupnými parametrami prúdenia (vizualizácia dát z [28]).	40
Obr. 3-32 Porovnanie rozloženia tlakov pre hĺbku bunky 0,38 mm a výšku mazacej vrstvy 0,33 mm pri rôznych otáčkach a charakteroch prúdenia na vstupe do bunky [28].	40
Obr. 3-33 Porovnanie vplyvu kvality výpočtovej siete na výsledky numerických analýz [28].	41

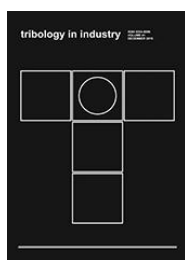
Obr. 3-34 Vizualizácia prúdenia v bunke HS ložiska s výškou mazacej vrstvy 60 mm a variáciu hĺbok bunky od 17,8 po 2 mm [47].	42
Obr. 3-35 Závislosť hĺbky bunky na rozloženie tlaku v bunke pri $60 Re_{in} = 270$ a $Re_s = 0$ [47].	43
Obr. 3-36 Rozloženie tlaku v kapse HS ložiska a) pri vysokých otáčkach b) pri nízkych otáčkach/v pokoji [19].	44
Obr. 3-37 Závislosť bezrozmernej zmeny teploty na bezrozmernej hĺbke bunky pre rôzne parametre zotrvačnosti [37].	45
Obr. 3-38 Nerovnosti klzných povrchov protikusu s a) tuhým povrchom a b) s elastickým klzným povrchom [55].	46
Obr. 3-39 Tvary elastickej vložky konvexný (hore) a konkávny (dole) spolu so znázornením pôsobenia excentrického zaťaženia (x) a minimálnej výšky mazacej vrstvy (h_{min}) [55].	46
Obr. 3-40 Rozloženie tlakov u tuhej podstavy (vľavo) a elastickej podstavy (vpravo): 1- podstava, 2-gumový blok, 3-klzná plocha, 4-mazacia vrstva, 5-klzná plocha protikusu [56].	47
Obr. 3-41 Schéma experimentálneho HD ložiska zložená z častí: 1-rotačná platforma, 2-polymérový kompozit, 3-kovová vložka, 4-gumová podstava a 5-podstava ložiska [57].	47
Obr. 3-42 model čiastočne textúrovaného bežca [58].	48
Obr. 3-43 Porovnanie bezrozmerných tlakov plne (full) textúrovaného a čiastočne (partial) textúrovaných povrchov bežca [58].	49
Obr. 3-44 Vplyv bezrozmerných parametrov hĺbky jamky na nosnosť [58].	49
Obr. 3-45 Geometria výpočtového modelu pre numerickú simuláciu [59].	50
Obr. 3-46 Tlakové pole textúrovanej kapsy axiálneho ložiska pri 4000 RPM, 15 μm mazacom filme a 2934 N zaťažení [59].	51
Obr. 3-47 Závislosť amplitúdy deformácie na dodávanom tlaku do HS ložiska [61].	52
Obr. 3-48 Hydraulická schéma protichodného viac-kapsového HS uloženia [4].	53
Obr. 3-49 Schéma hydrostatického uloženia s kompenzačnými členmi	54
Obr. 3-50 Charakteristiky hydrostatických systémov	54
Obr. 3-51 Porovnanie vypočítaných kriviek tuhosti s experimentálnymi dátami (krížik) pre membránový restriktor [70].	56
Obr. 3-52 Závislosť kinematickej viskozity na teplote pre mazivá viskozitnej triedy ISO VG 15 – 150	57
Obr. 3-53 Závislosť tuhosti Newtonskej a mikropolárnej kvapaliny na zmenu budiacich parametrov [49].	58

Obr. 5-1 Schéma postupu riešenia dizertačnej práce.....	67
Obr. 5-2 Schéma experimentálneho zariadenia pre hydrostatické ložisko	68
Obr. 5-3 Schéma a vybavenie experimentálneho dvoj-kapsového zariadenia DUAL-PAD	68
Obr. 5-4 Schéma meracieho uzlu experimentálneho zariadenia	69
Obr. 5-5 Variácia hĺbky bunky kapsy HS ložiska: a) malé hĺbky, b) obvyklé hĺbky a c) veľmi veľké hĺbky.	70
Obr. 5-6 Rýchlostné pole prúdenia tlakového oleja v bunke kapsy HS ložiska.	70
Obr. 5-7 Schéma testovacieho zariadenia pre a) hladké, b) textúrované, c) povlakované a d) rôzne kombinácie materiálov klzných povrchov.	71
Obr. 6-1 Závislosť výšky mazacej vrstvy na zaťažení pri ustálených podmienkach z meraní a výpočtových vzťahov.....	73
Obr. 6-2 Priebeh výšky mazacej vrstvy a tlakov v bunke počas nivelácie káps pri zaťažení 16 kN a celkovom dodávanom prietoku 1 l/min.....	74
Obr. 6-3 Porovnanie zmeny výšky mazacej vrstvy v porovnaní s rovnomernou vrstvou mazacieho filmu pre variáciu tuhostí silentblokov a tuhého uloženia pre výškové odsadenie 0,5-3 mm.	76
Obr. 6-4 Schematické zobrazenie káps HS ložiska s a) tuhým uložením na skrutkách a b) poddajným uložením na silentblokoch.....	76
Obr. 6-5 Schematické zobrazenie montážnych nepresností HS káps s a) výškovým rozdielom, b) vzájomným naklonením, c) a d) vzájomným naklopením v oboch smeroch (šípky znázorňujú smer pohybu bežca).	77
Obr. 6-6 Porovnanie jednotlivých montážnych chýb tuhého (RIGID) a poddajného uloženia o strednej tuhosti (MEDIUM) z hľadiska a) priemerných tlakov v bunke a b) priemernej zmeny mazacej vrstvy pri zaťažení 16 kN a chybe 1,5 mm.	77
Obr. 6-7 Schéma a) aktuálneho tvaru vymeniteľnej kapsy HS ložiska zariadenia DUAL-PAD a b) kapsa po úprave s variabilnou hĺbkou bunky s využitím vložiek (od hĺbky blízkej výške mazacej vrstvy až po veľmi hlboké).....	78
Obr. 6-8 Schematické zobrazenie experimentálneho modulu pre zariadenie Rtec MFT-5000 s predpokladanými hodnotiacimi veličinami - súčiniteľ trenia priamo na zariadení a topografia povrchu pred a po experimente na optickom profilometri Bruker Contour GT-X.	79

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Súhrn základných rovníc pre hydrostatické ložisko	12
Tab. 2 Zhrnutie kľúčových parametrov HS ložísk	17
Tab. 3 Porovnanie diskretizačných metód CFD.	18
Tab. 4 Porovnanie výsledkov z CFD simulácie a experimentov [46].....	21
Tab. 5 Porovnanie výšky mazacej vrstvy z výsledkov získaných za pomoci simulácií a meraní	36
Tab. 6 Systémy regulácie tlaku pre hydrostatické ložisko	54
Tab. 7 Okrajové podmienky experimentálnych meraní pre štúdium kompenzácie montážnych chýb pomocou poddajnej podstavy.	75

ZOZNAM PUBLIKÁCIÍ



MICHALEC, M.; SVOBODA, P.; KŘUPKA, I.; HARTL, M. Tribological behaviour of smart fluids influenced by magnetic and electric field – A review. *Tribology in Industry*, 2018, roč. 40, č. 4, s. 515-528. ISSN: 0354-8996.



MICHALEC, M., P. SVOBODA, I. KRUPKA, M. HARTL a A. VENCL. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation. *Friction*, 2020, 8(5), 982-994. ISSN 2223-7690. Dostupné z: doi:10.1007/s40544-019-0342-y [IF = 5,52]



MICHALEC, M., P. SVOBODA, I. KŘUPKA, M. HARTL. A Review of the Design and Optimization of Large-scale Hydrostatic Bearing Systems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2021, roč. 24, č. 4, s. 936-958. ISSN: 2215-0986. [IF = 3,22]



VENCL, A., M. KANDEVA, E. ZADOROZHNYAYA, P. SVOBODA, M. MICHALEC, A. MILIVOJEVIĆ a U. TRDAN. Studies on structural, mechanical and erosive wear properties of ZA-27 alloy-based micro-nanocomposites. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2021. <https://doi.org/10.1177/1464420721994870>. [IF = 2,014]



ČERNÁK, M., M. MICHALEC, M. VALENA, M. RANUŠA. Inlet shape optimization of pneumobil engine pneumatic cylinder using CFD analysis. *Journal of Physics: Conference Series* 1935. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021. ISBN: 1742-6588.