



ÚSTAV  
KONSTRUOVÁNÍ

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

### **VÝVOJ HYDROSTATICKÉHO ULOŽENIA ROZMERNÝCH KONŠTRUKCIÍ**

DEVELOPMENT OF HYDROSTATIC BEARING FOR LARGE CONSTRUCTIONS

#### **Projekt dizertačnej práce**

AUTOR PRÁCE

Ing. Michal Michalec

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

SUPERVISOR

BRNO 2020

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

Hydrostatické mazanie, kvapalinové trenie, hydraulický okruh, stabilita mazacej vrstvy, geometrické chyby

## KEY WORDS

Hydrostatic lubrication, fluid friction, hydraulic circuit, lubricant layer stability, geometric errors

## ANOTÁCIA

Rozvoj v oblasti hydrostatického mazania v posledných rokoch priniesol radu zlepšení a nových poznatkov. Aplikáciou princípu hydrostatického mazania pre pohyblivé uloženia je možné docieľiť lepších dynamických vlastností, zníženia trenia a opotrebenia, a minimalizáciu hlukových emisií. Aby bolo možné efektívne a presne navrhovať veľkorozmerné hydrostatické uloženia, je nutné poznať všetky hľadiská, ktoré musia byť pri návrhu uvažované, vrátane geometrických presností klzných povrchov hydrostatických ložísk, a prevencie poškodenia klzných plôch vhodnou modifikáciou povrchov. Táto práca je zameraná na vymedzenie maximálnych prípustných geometrických nepresností klzných povrchov pomocou simulácie a experimentálneho zariadenia v mierke 1:10. Cieľom práce je vyvinutie metodiky návrhu rozmerných hydrostatických uložení o veľkosti až 20 m a nosnosťou 400 t. Metodika povedie k zjednodušeniu návrhu rozmerných hydrostatických uložení s optimálnymi prevádzkovými parametrami.

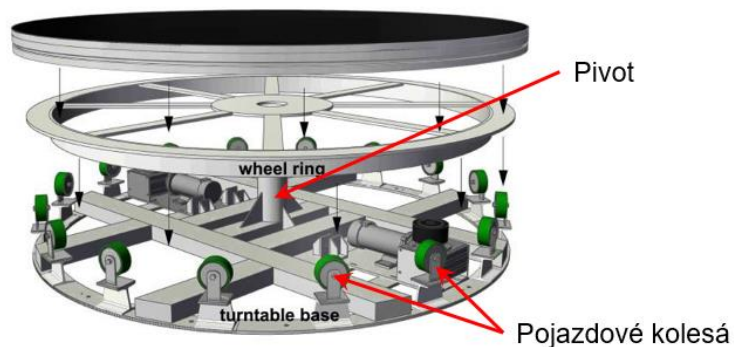
# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>PREHLAD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA</b>	<b>5</b>
2.1	Veľkorozmerné axiálne hydrostatické uloženie	8
2.1.1	Veľkorozmerné aplikácie	8
2.2	Prevádzkové stavy hydrostatického ložiska	11
2.2.1	Hraničné stavy prevádzky	12
2.3	Výpočet a optimalizácia	13
2.3.1	Analytický prístup	13
2.3.2	Numerický prístup	18
2.4	Kompenzačné členy	20
2.5	Geometrická presnosť	22
2.6	Mazacie médium	23
2.7	Kľúčové štúdie	24
2.7.1	Mazací film	24
2.7.2	Nesymetrické zaťaženie a tepelné účinky	27
2.7.3	Optimalizácia geometrie	32
2.7.4	Kompenzačné členy	36
<b>3</b>	<b>ANALÝZA, INTERPRETÁCIA A ZHODNOTENIE POZNATKOV ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADE KRITICKEJ REŠERŠE</b>	<b>37</b>
3.1	Stabilita mazacej vrstvy	37
3.2	Geometrická presnosť	38
3.3	Prevenia kritických stavov	38
3.4	Nezmapovaná oblasť poznania	39
<b>4</b>	<b>PODSTATA, CIELE A PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE</b>	<b>40</b>
4.1	Podstata a prínos dizertačnej práce	40
4.2	Ciele práce	41
<b>5</b>	<b>VEDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÉ HYPOTÉZY</b>	<b>42</b>
<b>6</b>	<b>SPÔSOB RIEŠENIA A POUŽITÉ VEDECKÉ METÓDY SKÚMANIA</b>	<b>44</b>
6.1	Stabilita hydrostatického mazacieho filmu	44

6.2	Kritický stav beztlakového dojazdu ložiska	47
6.3	Možné problémy počas riešenia	47
<b>7</b>	<b>ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY RIEŠENIA</b>	<b>49</b>
<b>8</b>	<b>ODÔVODNENIE NUTNOSTI A POTREBNOSTI RIEŠENIA DANEJ PROBLEMATIKY V DANOM ČASE</b>	<b>50</b>
<b>9</b>	<b>SPOLUPRÁCA S INÝMI INŠTITÚCIAMI</b>	<b>51</b>
<b>10</b>	<b>PREDPOKLADANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S RIEŠENÍM A ICH ZDROJE</b>	<b>52</b>
10.1	Predpokladané náklady	52
10.2	Financovanie výskumu	52
<b>11</b>	<b>CHARAKTERISTIKA PREDPOKLADANÉHO VÝSLEDKU RIEŠENIA DIZERTAČNEJ PRÁCE</b>	<b>53</b>
<b>12</b>	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>55</b>
<b>13</b>	<b>VEDECKÝ ŽIVOTOPIS</b>	<b>60</b>

# 1 ÚVOD

Točne sú zariadenia zaisťujúce otáčanie ťažkých predmetov okolo vertikálnej osy. Svoje využitie nachádzajú pre uloženia teleskopov, obrábacích zariadení rozmerných súčastí a ďalších veľkých konštrukcií, ako je napríklad javisková a železničná manipulačná technika. V súčasnej dobe sa pre uloženia točníc rozmerných konštrukcií v drvivej väčšine používa pojazdovo-vodiaci systém tvorený vstavanými stolmi s koľajnicou a pojazdrovými kolesami (Obr. 1-1).



Obr. 1-1 Príklad použitia pojazdovo-vodiaceho systému v manipulačnej technike

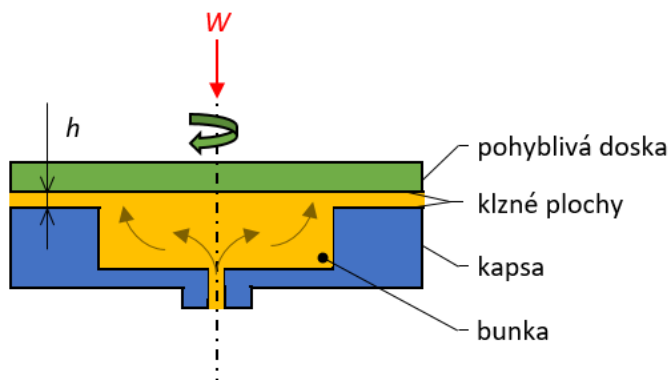
Tento systém sa vyznačuje viacerými nevýhodami, ktorými sú najmä vysoké trenie kontaktu kola a koľajnice a s tým spojené veľké sily potrebné na pre otočenie mechanizmu, ktoré je sprevádzané vibráciami a hlukovými emisiami. Súčasným cieľom základného orientovaného výskumu, experimentálneho vývoja a inovácií je znižovanie spotreby energie a vytváranie zdravšieho životného prostredia, s čím úzko súvisí predkladaný problém.

Alternatívnou možnosťou pre uloženia rozmerných konštrukcií je hydrostatické uloženie, ktoré sa vyznačuje viacerými výhodami v porovnaní s pojazdovo-vodiacími systémami. Vzhľadom k tomu, že u hydrostatického uloženia sú klzné povrchy úplne oddelené súvislou mazacou vrstvou, nedochádza takmer k žiadnemu opotrebeniu a odpor proti otáčaniu mechanizmu je spôsobovaný iba kvapalinovým trením. Mazacia vrstva má navyše schopnosť tlmenia vibrácií a vyžaruje minimálne hlukové emisie. Limitáciou rozmerných hydrostatických uložení je geometrická presnosť klzných plôch a deformácia spôsobená tepelnými účinkami, príp. aj vlastnou tiažou konštrukcie. Vzhľadom k veľkosti konštrukcie je nutné rozdelenie do menších celkov, čím môžu pri montáži vzniknúť ďalšie nepresnosti. Vymedzenie kritických hľadísk a parametrov návrhu vyústi k zefektívneniu vývojového procesu veľkorozmerných hydrostatických uložení.

Poznatky získané v tejto oblasti môžu viesť k zjednodušeniu a spresneniu návrhu hydrostatických uložení, ktoré by viedli k efektívnejším a trvanlivejším uloženiám rozmerných konštrukcií s dopadom na presnosť výroby a manipulácie, úsporu nákladov na pravidelnú údržbu, a v neposlednom rade aj na zvýšenie životného komfortu.

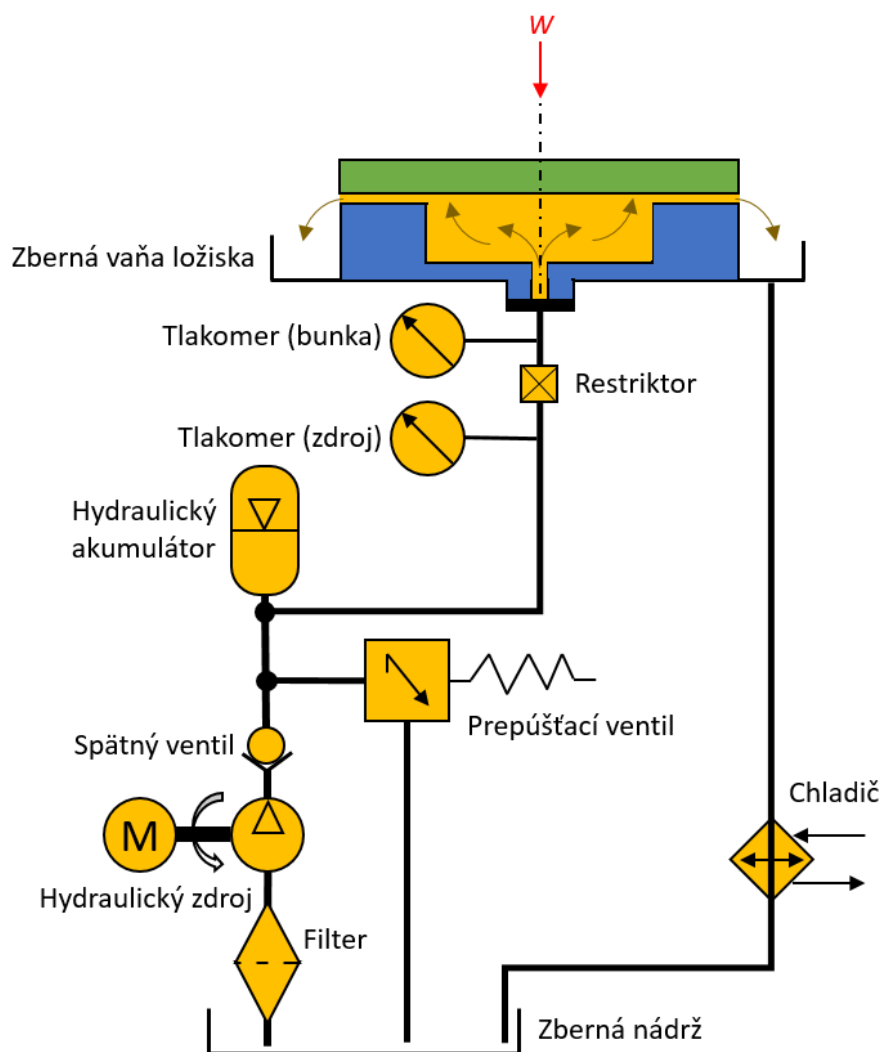
## 2 PREHL'AD SÚČASNÉHO STAVU POZNANIA

Aj napriek tomu, že hydrostatické ložisko bolo vynájdené v roku 1851 L. D. Girardom, je v súčasnej dobe výskum v oblasti hydrostatických uložení stále aktuálnym predmetom riešenia [1]. Hydrostatické uloženie pracuje na princípe hydrostatického mazania, kedy dochádza k oddeleniu klzných povrchov súvislou vrstvou tlakovej kvapaliny (mazacím filmom o hrúbke  $h$ ) dodávanej medzi klzné plochy externým hydraulickým zariadením (Obr. 2-1). Jedna časť hydrostatického ložiska sa pohybuje – pohyblivá doska, ktorá môže byť rotačná, prípadne koná priamočiary pohyb - u hydrostatických vedení (tzv. bežec). Druhá časť je stacionárna (kapsa), do ktorej prúdi tlaková kvapalina. V kapse je vytvorená drážka (bunka) alebo aj tzv. tlaková komora, z ktorej sa rozteká mazivo medzi klzné plochy.



Obr. 2-1 Schéma princípu funkcie hydrostatického ložiska

Na Obr. 2-2 je schematicky zobrazený zjednodušený hydraulický okruh hydrostatického ložiska. Hydraulický zdroj dodáva tlakovú kvapalinu do hydrostatickej bunky ložiska. Spätný ventil zabezpečuje ochranu zdroja proti rázom a prípadnému preťaženiu. Prepúšťacím ventilom je regulovaný tlak kvapaliny. Restriktory slúžia pre riadenie prietoku tlakovej kvapaliny. Kvapalina vytekajúca spomedzi klzných povrchov je zachytávaná v zbernej vane ložiska, a ďalej putuje do zbernej nádrže, odkiaľ je opätovne prečerpávaná do hydraulického okruhu cez filtračný systém. Hydraulický akumulátor slúži na zásobovanie hydrostatickej kapsy tlakovou kvapalinou po určitý čas v prípade výpadku alebo poruchy hydraulického zdroja. Doba zásobovania je daná typom akumulátoru a jeho kapacitou. V prípade nadmerného ohrevu kvapaliny sa zvyčajne používa chladič, ktorý schladí kvapalinu na požadovanú teplotu, a zapája sa do odtoku zo zbernej vane ložiska. Pre špecifické potreby a podmienky uloženia je hydraulický okruh prispôbený danej aplikácii.



Obr. 2-2 Schéma hydraulického obvodu pre hydrostatické ložisko

Hlavnými výhodami hydrostatických uložení sú:

- veľmi nízke trenie (spôsobené kvapalinovým trením),
- zanedbateľné opotrebenie (úplne oddelené klzné povrchy),
- schopnosť tlmenia vibrácií a vysoká tuhosť,
- vysoká presnosť polohovania,
- a manipulácia aj za nízkych otáčok (v porovnaní s hydrodynamickými ložiskami).

Tento typ uložení má aj určité **nevýhody**, a tými sú najmä energetická náročnosť spojená s dodávkou tlakového oleja hydraulickým okruhom, a vyššie finančné náklady na výrobu.

Pre vyššie uvedené výhody sa hydrostatické uloženia sa používajú:

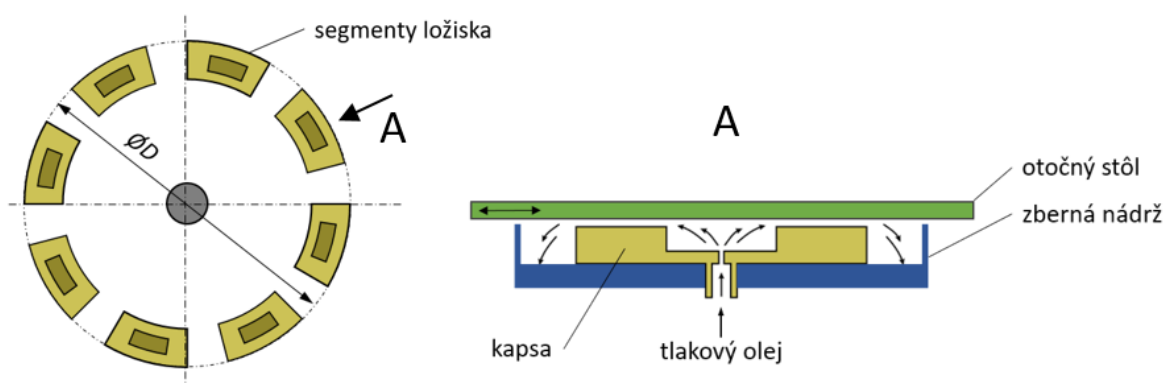
- v ťažkých obrábacích strojoch (otočné stoly a vodiace lišty),
- na podporu ťažkých rotorov počas rozbehu/dojazdu (hybridné ložiská),
- v uloženiach veľkorozmerných teleskopov
- a na vodiace skrutky vysoko presných posuvov (hydrostatické skrutky).

Hydrostatické otočné uloženia sa podľa smeru zaťažovania rozdeľujú na:

- a) **axiálne**, na ktoré je primárne zameraná táto práca,
- b) radiálne a
- c) kombinované.

## 2.1 Veľkorozmerné axiálne hydrostatické uloženie

Na základe vyššie uvedených poznatkov a výhod sa hydrostatické uloženia používajú pre uloženia rozmerných konštrukcií. U veľkorozmerných hydrostatických uloženiach sa statická časť sa zvyčajne rozdeľuje na segmenty z dôvodu úspory materiálu, zjednodušenia manipulácie a montáže (Obr. 2-3). Počet segmentov sa líši podľa celkového priemeru hydrostatického uloženia  $D$ , pričom všetky segmenty sú zvyčajne rovnaké a skladajú sa z kapsy, do ktorej prúdi tlakový olej z hydraulického okruhu, zbernej nádrže, a otočného stolu (pohyblivej dosky), nadľahčovaného hydrostatickým mazacím filmom.



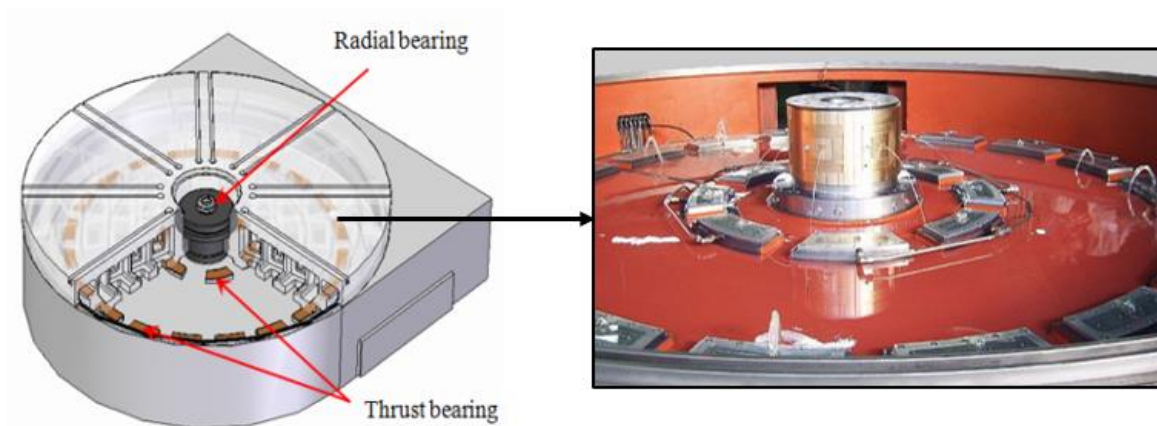
Obr. 2-3 Schéma rozloženia kaps veľkorozmerného hydrostatického uloženia

### 2.1.1 Veľkorozmerné aplikácie

Hydrostatické uloženia rozmerných konštrukcií sa primárne používajú v aplikáciách, kde je nutné zaistiť veľkú nosnú kapacitu a dostatočnú tuhosť (obrábacie zariadenia). Svoje využitie nachádzajú aj ako nosné prvky konštrukcií vyžadujúcich aj minimálne vibrácie a presné polohovanie (teleskopy). V poslednej dobe sa začína tento typ uloženia objavovať aj u scénografických točníc, kde sú požadované minimálne hlukové emisie (napr. pódia, točne pre showroomy apod.).

## Obrábacie zariadenia

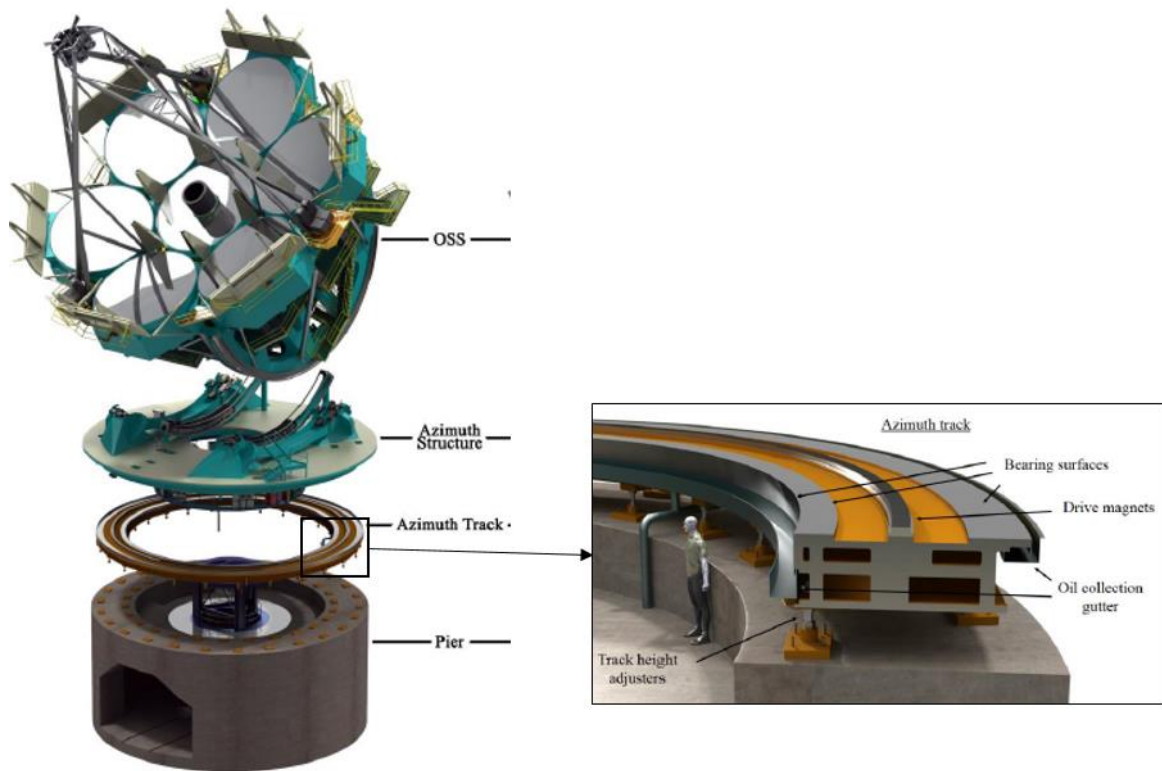
Otočný stôl vertikálneho sústruhu z ref. [2] má celkový priemer stola 4 m (Obr. 2-4). Hydrostatické mazanie bolo navrhované v rozsahu od rovnovážnej nosnosti v pokoji 20 ton až po max. hmotnosť obrobku 100 t. Hydrostatické axiálne uloženie je tvorené dvomi radami hydrostatických káps: 20 vonkajších káps na priemere 3 m, a 8 vnútorných káps na priemere 1 m. Projektovaný tlak v bunkách je v rozsahu 3-40 bar a prietok 0,2-0,5 l/min. Mazacia vrstva má 130  $\mu\text{m}$  a tuhosť 5,8 kN/ $\mu\text{m}$  pri minimálnom zaťažení a 102,6  $\mu\text{m}$  s tuhosťou 15 kN/ $\mu\text{m}$  pri maximálnom zaťažení, pričom je u takýchto obrábacích zariadení požadovaná min. tuhosť 3 kN/ $\mu\text{m}$ . Maximálne otáčky vertikálneho sústruhu sú 130 ot/min.



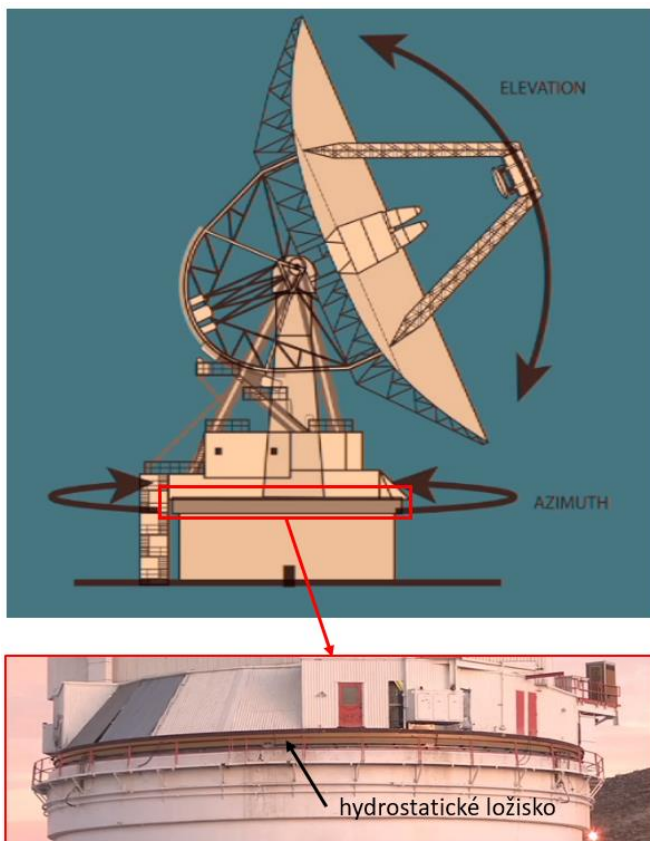
Obr. 2-4 Schéma hydrostatického uloženia vertikálneho sústruhu [2]

## Vesmírna technika - teleskopy

- a) **Optické** – Uloženie celej konštrukcie veľkého Magellanského teleskopu pre pohyb v azimute (Obr. 2-5) v Chile [3] má byť do roku 2025 realizované pomocou prstencového hydrostatického ložiska o priemere 22 m a celkovej nosnosti 2100 ton. Projektovaná hrúbka mazacej vrstvy by mala byť 50  $\mu\text{m}$ .
  
- b) **Rádiové** – Rádioastronomické observatórium Goldstone v Kalifornii, ktorého polohovanie v azimute realizované prostredníctvom hydrostatického uloženia o priemere 24 m (Obr. 2-6) zabezpečuje otáčanie okolo vlastnej osi, vyžaduje presný a najmä stabilný pohyb. Z dôvodu výroby, prepravy, montáže a údržby je bežec hydrostatického uloženia zložený z 11 segmentov.



Obr. 2-5 Hydrostatické uloženie Magellanského teleskopu [3]



Obr. 2-6 Hydrostatické uloženie rádioteleskopu goldstone (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA13321>)

## Vodárenská energetika - hydrogenerátory

Hydrostatické ložiská sa používajú aj v kombinácii s hydrodynamickým princípom mazania. Takýto typ uloženia sa nazýva hybridným. Hybridné ložiská majú veľký význam vo vodárenskej energetike, kde sú počas rozbehu alebo dobehu zásobované externou tlakovou kvapalinou oddeľujúcou plochy naklápacích segmentov (Obr. 2-7), aby sa predišlo poškodeniu klzných plôch [4] v periódach, keď uloženie rotuje nedostatočnou rýchlosťou k tvorbe súvislého mazacieho filmu hydrodynamickým efektom v klinovej medzere naklápacieho segmentu.



Obr. 2-7 Hybridné ložisko hydrogenerátoru

## 2.2 Prevádzkové stavy hydrostatického ložiska

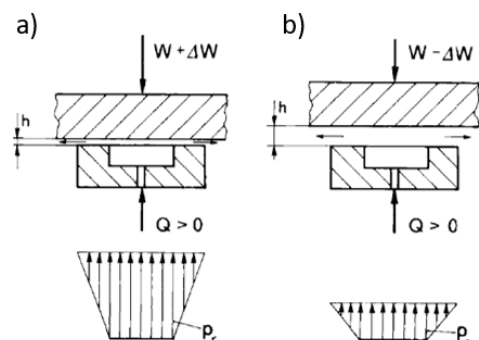
Pri návrhu ložiska je potrebné uvažovať prevádzkové stavy ložiska, ktoré môžu nastať:

- a) **Pokojoový stav** – do ložiska neprúdi tlaková kvapalina a klzné povrchy sú v kontakte.
- b) **Uvedenie do prevádzkového stavu ložiska** – do ložiska prúdi tlaková kvapalina, dochádza k oddeleniu klzných povrchov.
- c) **Rozbeh a dobeh ložiska** – deje sa počas stavu, kedy je ložisko schopné plniť funkciu.
- d) **Normálna prevádzka** – ložisko plní svoju funkciu podľa požadovaných vlastností.
- e) **Kritické stavy prevádzky** – pri extrémnych podmienkach môže dôjsť k nestabilite mazacieho filmu.
- f) **Havarijný stav** – dochádza takmer k okamžitému dosadnutiu klzných plôch dôsledkom prerušenia dodávky tlakového oleja. Telesá môžu byť vo vzájomnom pohybe, čím môže dôjsť k poškodeniu klzných plôch až k zadreniu ložiska. Tomuto stavu je nutné zamedziť, napríklad modifikáciu klzných plôch [5, 6], alebo pridaním hydraulického akumulátoru do hydraulického okruhu.

## 2.2.1 Kritické stavy prevádzky

### Náhla zmena zaťaženia

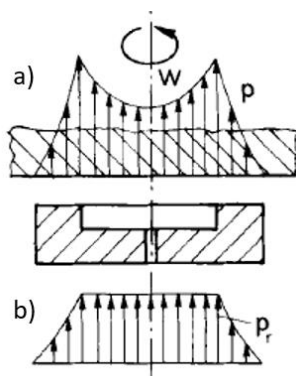
V prípade, že dochádza k zmene zaťaženia, mení sa aj priebeh tlaku oleja v kapse. Prietok zostáva konštantný, mení sa iba hodnota tlaku. Pokiaľ dochádza k nárastu záťaže, zníži sa hrúbka mazacej vrstvy a tlak v bunke narastie. Navýšenie tlaku pôsobí väčšou silou proti záťaži, čím zamedzuje prerušeniu mazacej vrstvy a dosadnutiu klzných plôch (Obr. 2-8a). V opačnom prípade tlak klesá a hrúbka mazacieho filmu sa navyšuje (Obr. 2-8b).



Obr. 2-8 Tlakový profil hydrostatickej kapsy pri zmene zaťaženia

### Prevádzka pri vysokých otáčkach

Pri návrhu hydrostatických ložísk je nutné uvažovať aj prevádzkové podmienky. V prípade vysokých otáčok otočného stolu (Obr. 2-9a) sa tlakový profil mení podľa účinkov otáčania. Môže tak dôjsť k zníženiu hrúbky mazacej vrstvy [7]. Pri nízkych otáčkach je tento vplyv zanedbateľný (Obr. 2-9b).

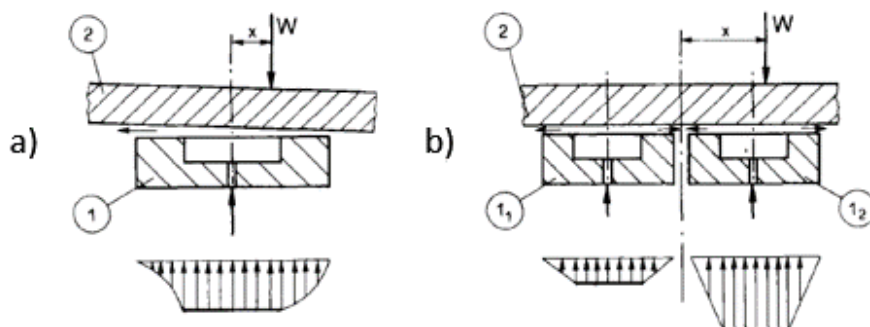


Obr. 2-9 Tlakový profil hydrostatickej kapsy pri a) vysokých otáčkach b) nízkych otáčkach

### Nesymetrické zaťaženie

V prípade nerovnomerného zaťaženia môže dochádzať k nakloneniu pohyblivej dosky a tým k nerovnomernému rozloženiu tlaku v bunke (Obr. 2-10a), dôsledkom čoho môže byť

znížená celková účinnosť ložiska, prípadne aj lokálne zahrievané mazivo [8]. V prípade viacbunkovej kapsy alebo ložiska s viacerými kapsami dochádza ku zmene tlakov a hrúbka mazacej vrstvy zostáva konštantná (Obr. 2-10b).



Obr. 2-10 Tlakový profil hydrostatického ložiska pri excentrickom zaťažení a) s jednou bunkou b) s dvoma bunkami

## 2.3 Výpočet a optimalizácia

Pre návrh geometrie hydrostatického ložiska alebo pre dosiahnutie optimálnych parametrov hydrostatického systému je nevyhnutné realizovať výpočet kľúčových parametrov. Výpočet hydrostatických uložení je možné realizovať pre jednoduchú geometriu hydrostatických ložísk na základe analytických vzťahov. Pre tepelné analýzy alebo zložitejšie geometrie je nutné využiť numerické výpočty.

### 2.3.1 Analytický prístup

Problematika hydrostatických ložísk spadá do oblasti mechaniky tekutín. Teória dynamiky tekutín je základom analýzy hydrostatických systémov. Riešenie rovníc popisujúcich správanie kvapalín sú prispôbené pre danú aplikáciu. Základné rovnice sú uvedené v Tab.1.

Tab. 1 Súhrn základných rovníc pre hydrostatické ložisko

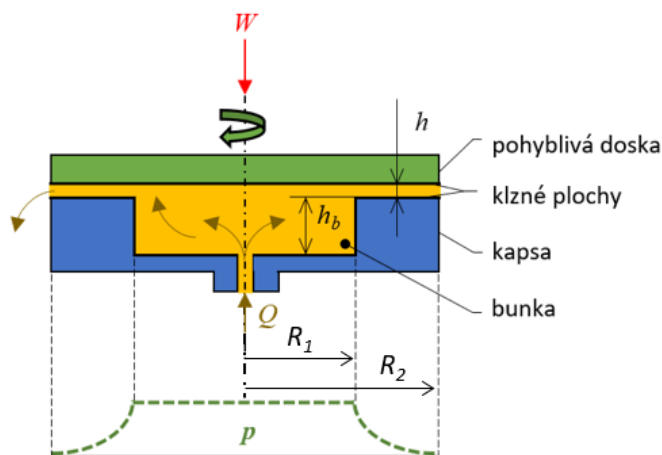
Rovnica	Význam	Všeobecná forma
Reynoldsova rovnica	Popisuje rozloženie tlaku v mazacom filme; všeobecný výraz pre všetky aplikácie.	$\nabla \left( \frac{h^3}{\mu} \cdot \nabla \vec{p} \right) = 6\nabla(\vec{U} \cdot h) + 12 \frac{\partial h}{\partial t}$

Zjednodušený tlakový vzorec	Tlakový gradient spojený s prietokom v rovine pre rotačne-symetrické úlohy.	$\frac{dp}{dx} = f(x, Q, h, \mu, \dots)$
Energetický rovnica	Popisuje rozloženie teploty toku kvapaliny; základný vzťah pre riešenie prenosu a tvorby tepla.	$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \left( \frac{k_c}{c_p} \cdot \nabla T \right) + S_T$
Ne-Newtonský model	Potrebný pre zavádzanie a riešenie modelov nových mazív.	$\mu = f(\tau)$

### 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 vtoková drážka – 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. 2-11). Za optimálnu hodnotu je považovaná hĺbka bunky  $h_b=20h$  [9]. 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, ktorá priamo ovplyvňuje únosnosť ložiska. 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. 2-11).



Obr. 2-11 Schematické rozloženie tlaku v bunke

Pre výpočet parametrov je možné vychádzať z viacerých zdrojov, ktoré vedú k rovnakému riešeniu základných tvarov hydrostatických buniek a káps [10–13], a uvádzajú podobný postup riešenia danej problematiky. Nasledujúce výpočtové vzťahy vychádzajú z ref. [10]. Na základe rozloženia tlakov pre kruhovú kapsu platí:

$$P = p_r \frac{\ln(r/R_2)}{\ln(R_1/R_2)} \quad (2.1)$$

**Celkovú nosnú kapacitu** kruhového hydrostatického ložiska je možné vyjadriť ako:

$$W = A_{min} \cdot p_r + \int_{R_2}^{R_1} 2\pi r P dr = \frac{\pi p_r (R_2^2 - R_1^2)}{2 \ln(R_2/R_1)} \quad (2.2)$$

**Prietok** potrebný pre zásobovanie ložiska:

$$Q = (2\pi r) - \frac{h^3}{12\mu} \frac{dP}{dr} = \frac{\pi h^3 p_r}{6\mu \ln(R_2/R_1)} \quad (2.3)$$

Po vyjadrení zo vzťahu (2.2) a (2.3):

$$W = \frac{3\mu Q (R_2^2 - R_1^2)}{h^3} \quad (2.4)$$

Celkovú nosnosť je možné taktiež vyjadriť vzťahom:

$$W = C_1 \frac{Q}{h^3} \quad (2.5)$$

kde  $C_1$  je výraz zahrňujúci **dynamickú viskozitu maziva ( $\mu$ )** 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:

$$C_1 = 3\mu(R_2^2 - R_1^2) \quad (2.6)$$

**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 0,05 – 5 mm v závislosti na aplikácii, veľkosti, požadovaných vlastnostiach a dosiahnuteľnej presnosti klzných plôch. Po vyjadrení hrúbky mazacej vrstvy vychádza vzťah:

$$h = \sqrt[3]{\frac{C_1 Q}{W}} \quad (2.7)$$

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:

$$K = -\frac{dW}{dh} \quad (2.8)$$

**Celkové energetické straty systému** spôsobené trecími silami v kvapaline ( $E_f$ ) a pumpovaním do hydrostatickej kapsy ( $E_p$ ) je možno vyjadriť rovnicou:

$$E_{celk} = E_f + E_p \quad (2.9)$$

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

### 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:

$$W = A_{eff} \cdot p_r \quad (2.10)$$

pričom **efektívna plocha**  $A_{eff}$  je závislá na geometrii kapsy a bunky, ako je napríklad zrejme z rovnice (2.2.), 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:

$$W = \frac{A_p \cdot p_r}{P_f} \quad (2.11)$$

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

$$Q = q_f \frac{W h^3}{A_p 12\mu} \quad (2.12)$$

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

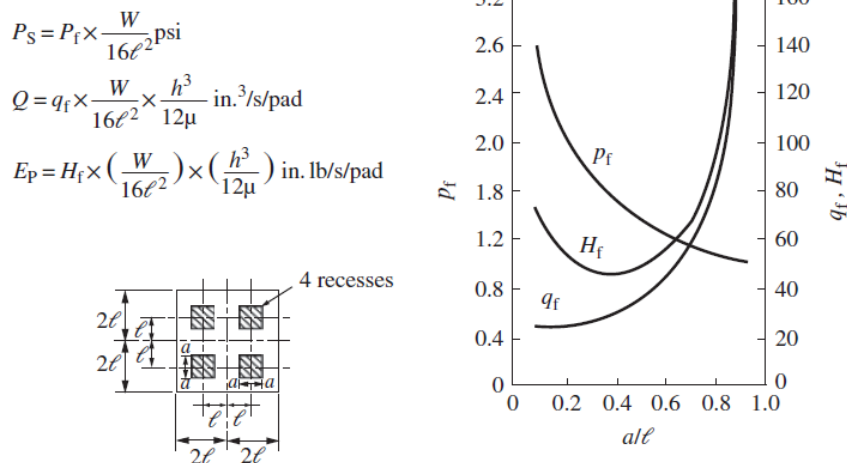
$$E_p = H_f \left( \frac{W}{A_p} \right)^2 \frac{h^3}{12\mu} \quad (2.13)$$

Pre kruhovú ložisko sú výpočtové koeficienty:

$$P_f = \frac{2 \ln(R_2/R_1)}{[1 - (R_1/R_2)^2]} \quad q_f = \frac{4\pi}{[1 - (R_1/R_2)^2]} \quad H_f = \frac{8\pi \ln(R_2/R_1)}{[1 - (R_1/R_2)^2]^2} \quad (2.14 - 2.16)$$

### Ďalšie konfigurácie hydrostatickej kapsy

V prípade zložitejších konfigurácií je možné využiť nomogramy, alebo výpočtové koeficienty odčítať z grafov pre niektoré základné konfigurácie (Obr. 2-12) na základe ktorých je možné napríklad navrhnuť rozmery bunky pre optimálne prevádzkové parametre a minimalizáciu energetických strát [10].



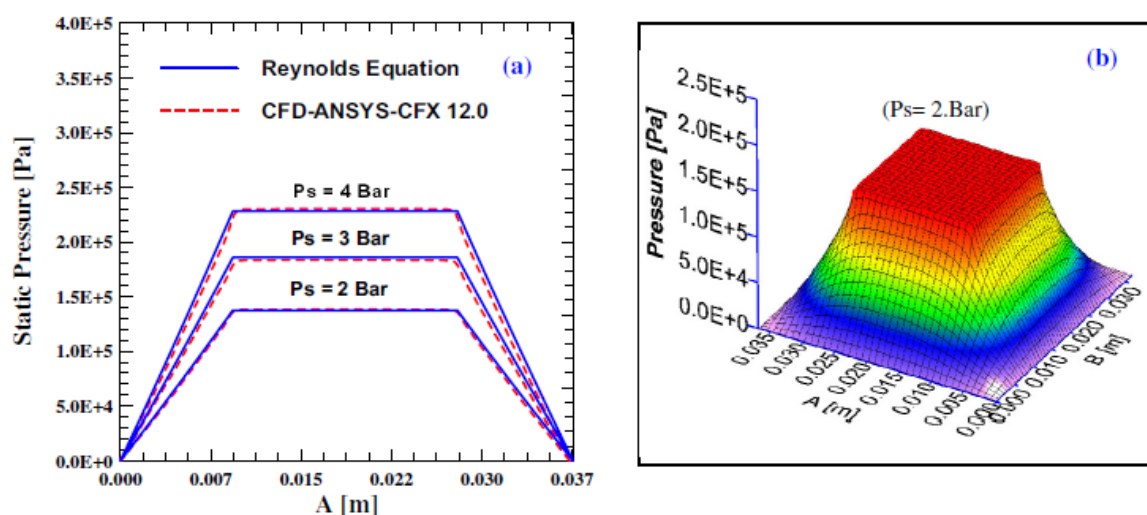
Obr. 2-12 Graf pre výpočet štvorbunkovej konfigurácie hydrostatickej kapsy pomocou výpočtových koeficientov

### Optimalizácia prevádzkových parametrov

Za účelom minimalizácie dissipovanej 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. [9], 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.

## 2.3.2 Numerický prístup

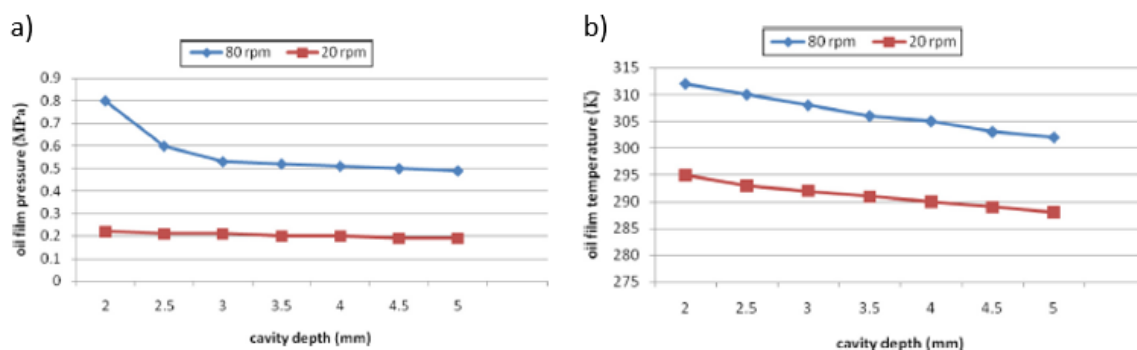
U zložitejšej geometrie káps, alebo konfigurácií buniek, pre ktoré nie sú dostupné nomogramy alebo grafy bezrozmerných výpočtových koeficientov, nie je možné využiť analytický prístup pre výpočet hydrostatického uloženia. V takomto prípade sa aplikujú numerické výpočtové prístupy. Najčastejšie ide o computational fluid dynamics (CFD) analýzu, alebo výpočet založený na numerických metódach. Simulačný softvér rieši Navier-Stokesovu rovnicu použitím metódy konečných prvkov (MKP) pre vyšetovanie rýchlosti prúdenia, rozloženia tlaku a prestupu tepla kvapaliny, a deformácie telies. Zároveň je 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** [14]. V ref. [15] bolo realizované porovnanie výsledkov Reynoldsovej rovnice a CFD analýzy v softvéri ANSYS CFX (Obr. 2-13), čím sa potvrdzuje zhoda výsledkov numerických a analytických výpočtov.



Obr. 2-13 Porovnanie výsledkov Reynoldsovej rovnice a CFD simulácie (a). Predikcia tlakového profilu v hydrostatickej kapse.

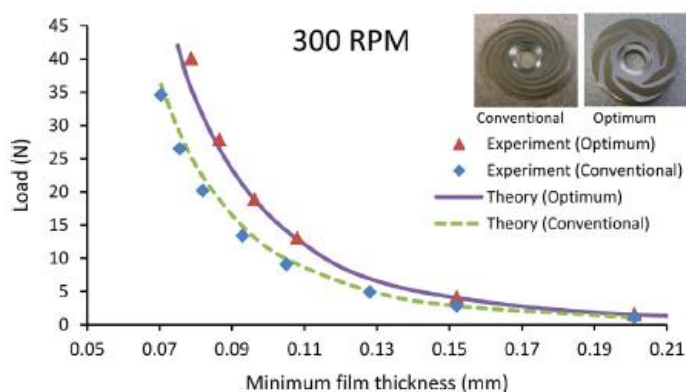
### Optimalizácia geometrie

Pomocou CFD simulácií bolo možné hľadať optimálnu hĺbku bunky s ohľadom na tlak a teplotu [16, 17]. Na základe výsledkov je možné usúdiť, že pri nízkych otáčkach nemá hĺbka bunky vplyv na distribúciu tlaku, avšak pri vyšších rýchlostiach dochádza v plytkých bunkách k navýšeniu tlaku (Obr. 2-14). V prípade teploty má hĺbka bunky výraznejší vplyv. U veľmi plytkých buniek však dochádza aj k zmene tlaku, pretože sa bunka správa ako škrtiaci prvok [17].



Obr. 2-14 Závislosť tlaku (a) a teploty (b) oleja v kapse na hĺbke bunky pri rôznych rýchlostiach.

Napriek tomu, že tvar bunky nemá vplyv na celkovú nosnosť hydrostatického ložiska, môžu byť zmenou tvaru docielené lepšie vlastnosti hydrostatického uloženia. Pomocou metódy konečných prvkov (MKP) boli porovnávané aj rôzne tvary hydrostatických buniek (kruhová, štvorcová, eliptická a prstencová) pri zachovaní obsahu klzných plôch a buniek [18], pričom bolo zistené, že kruhová bunka vykazuje najlepšie celkové vlastnosti. Na základe analýz boli hľadané aj optimálne tvary pre uloženia vysokorýchlostných aplikácií [19], kde sa pri experimentálnom overení sa ukázalo, že výberom optimálneho tvaru z analýz boli dosiahnuté lepšie výsledky (Obr. 2-15).



Obr. 2-15 Závislosť zaťaženia na hrúbke mazacej vrstvy pre bežný a optimalizovaný tvar klzných plôch.

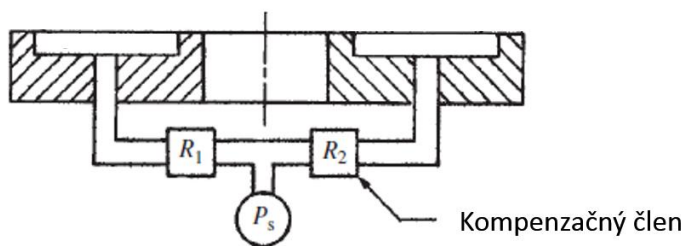
### Tepelné účinky

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 [20], 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 [21].

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 [22] je nutné uvažovať s postupným zahrievaním maziva, ktoré znižuje mazaciu vrstvu, pričom pokles je ešte výraznejší s vyššími otáčkami [23]. U veľmi vysokých otáčkach (2000 - 6000 ot·min<sup>-1</sup>) dochádza k postupnému poklesu únosnosti mazacej vrstvy [24].

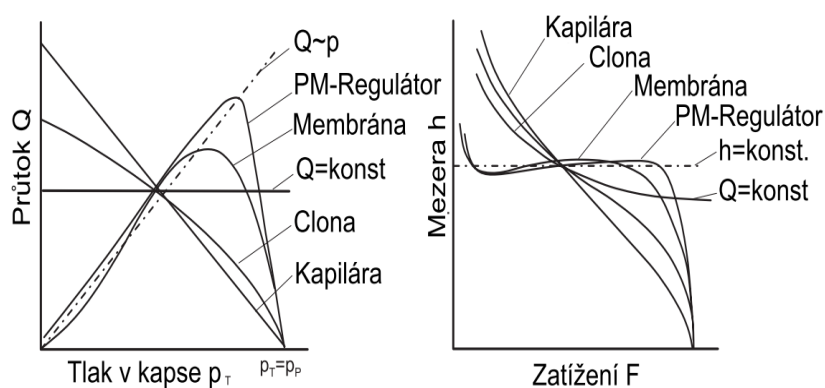
## 2.4 Kompenzačné členy

Pre správnu funkciu ložiska je potrebné zaistiť rovnomernú a nezávislú distribúciu kvapaliny do všetkých káps a buniek, aby bola **zachovaná konštantná medzera** medzi klznými povrchmi. Pri nesymetrickom zaťažení (Obr. 2-10) je možné udržiavať konštantnú medzeru dvomi spôsobmi: a) použitím samostatného čerpadla pre každú bunku, b) zavedením kompenzačných členov do hydraulického obvodu (Obr. 2-16).



Obr. 2-16 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 členu je čo najviac sa priblížiť ideálnemu stavu, ktorý je znázornený čiarkovanou čiarou (Obr. 2-17).



Obr. 2-17 Charakteristiky hydrostatických systémov

Systémy regulácie tlaku sú bližšie špecifikované v Tab. 2.

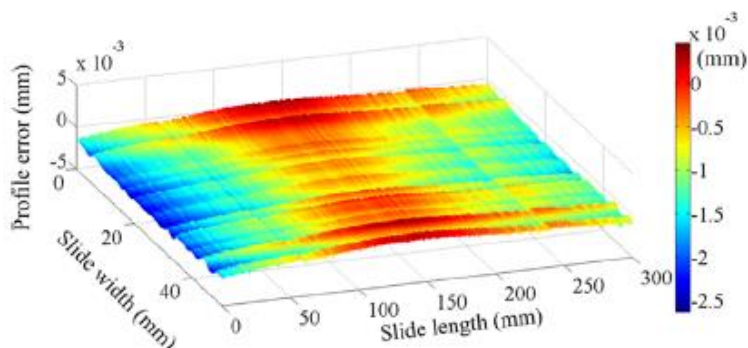
Tab. 2 Systémy regulácie tlaku pre hydrostatické ložisko

Regulačný systém	Charakteristika	Vhodnosť	Cena
<b>S pevnou geometriou (kapilára, clona)</b>	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
<b>Konštantný prietok</b>	Rovnomerná distribúcia, strata závislá na zaťažení  U viacerých buniek môžu byť čerpadlá na spoločnej hriadeľ poháňané jedným motorom.	Hydrostatické uloženia s malým počtom buniek. Presné polohovacie zariadenia. Väčší rozsah zaťažení s nerovnomerným zaťažovaním.	Stredná
<b>Membránový</b>	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 zaťažení [24].	Vysoká
<b>PM-regulátor (progresívny regulátor)</b>	Rovnomerné udržiavanie konštantnej medzery.  Rovnomerná distribúcia a regulácia konštantnej medzery.  Premena stratového tlaku na teplo, ktorý je závislý na zaťažení.	Obrábacie zariadenia vyžadujúce vyššie presnosti. Pre veľký rozsah zaťažení s nerovnomerným zaťažovaním.	Vysoká

<b>Samoregulačné jednotky</b>	Nepotrebujú distribučný systém a regulujú hrúbku mazacej vrstvy samé.	Možnosť aplikácie iba na uzavreté vedenia.	Vysoká
<b>Servostatická regulácia</b>	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

## 2.5 Geometrická presnosť

V prípade veľkorozmerných hydrostatických uložení je nutné prihliadať aj na dosiahnuteľnú geometrickú presnosť pri výrobe. Geometrické odchýlky majú výrazný vplyv na celkovú presnosť hydrostatických vedení [25]. Obrobený povrch nesie vždy určité geometrické chyby v profile, vlnitosti a odchýlkach drsnosti povrchu (Obr. 2-18). Pre dosiahnutie vysokej presnosti obrábacích zariadení bola vyvíjaná metóda na predikciu chýb na základe trojdimenzionálneho profilu povrchu [26], ktorou bola dosiahnutá pomerne dobrá zhoda s reálnym meraním.

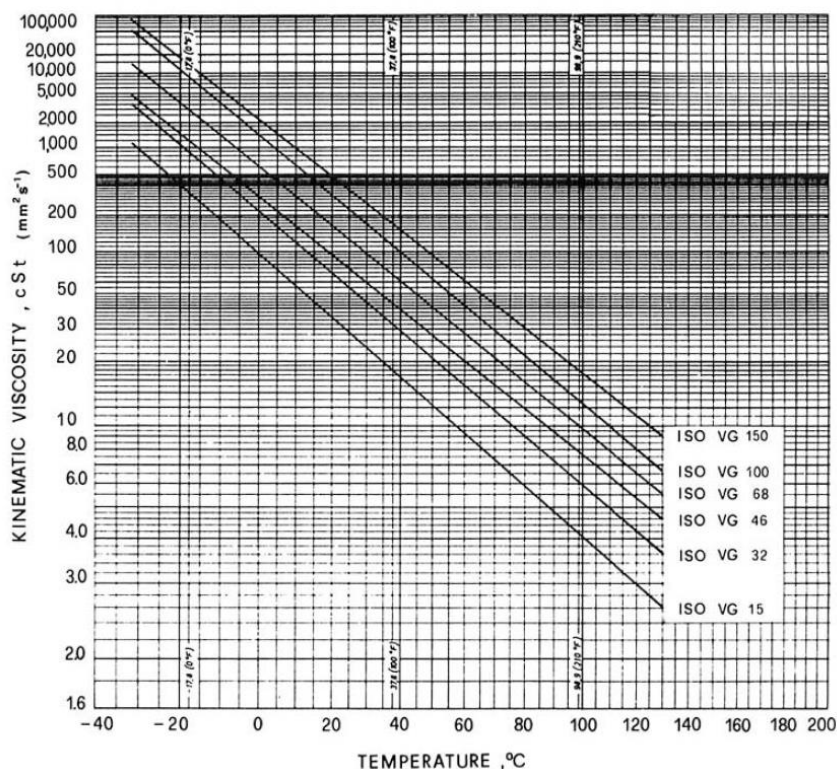


Obr. 2-18 Profil časti obrobeného povrchu hydrostatického vedenia

Do určitej miery je mazacia vrstva schopná kompenzovať nerovnosti povrchu, ktoré však nesmú presahovať jej výšku. Pre zasietenie samonivelačnej schopnosti povrchov boli testované aj gumové silentbloky [27].

## 2.6 Mazacie médium

Ako mazacie médium hydrostatických ložísk sa primárne volia oleje s vysokým **viskozitným indexom**, nízkou oxidáciou a dobrými mazacím vlastnostiam 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. 2-19).



Obr. 2-19 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** ( $\mu$ ) je podstatnou veličinou, ktorá figuruje vo výpočte hydrostatického ložiska. Prepočtový vzťah pre vyjadrenie dynamickej viskozity je daný súčinom hustoty ( $\rho$ ) a kinematickej viskozity:  $\mu = \rho \cdot \nu$ .

Dynamická viskozita je závislá teplote (2.17):

$$\mu = \mu_0 e^{-\beta(T-T_0)} \quad (2.17)$$

A tlaku (2.18), pričom pri hydrostatickom tlaku sa viskozita aj pri zmene tlaku môže považovať za konštantnú:

$$\mu = \mu_0 e^{\gamma p} \quad (2.18)$$

## **Iné mazacie médiá**

Pre hydrostatické ložiská bola študovaná výkonnosť ne-Newtonských kvapalín na základe matematického Rainbowitsch modelu, popisujúci kvapalinu vytvorených aditívami s cieľom navýšenia viskozitného indexu. Výsledky však ukazujú, že pre dodávanie ne-Newtonských kvapalín do bunky sú potrebné vyššie výkony, čím narastajú energetické straty [28]. Výsledky však ukazujú, že vhodnou voľbou typu ne-Newtonskej kvapaliny je možné dosiahnuť vyššie tuhosti mazacej vrstvy.

S cieľom dosiahnutia maximálnej výkonnosti a aktívnej regulácie dynamických vlastností mazacej vrstvy boli testované aj magnetoreologické (MR) kvapaliny pre hydrostatické ložiská [29, 30], ktorých aplikáciou sa výrazne navýšila únosnosť a tlmiača schopnosť. Vzhľadom k tomu, že sú MR kvapaliny tvorené formou suspenzií, kedy sú mikroskopické feromagnetické častice rozptýlené v oleji, môže dochádzať k nežiaducemu opotrebovaniu komponentov hydrostatického ložiska a hydraulického okruhu [31]. Ďalšou nevýhodou MR kvapalín a celkovo iných mazacích médií ako sú bežne používané hydraulické oleje je neporovnateľne vyššia nákupná cena.

## **2.7 Kľúčové štúdie**

### **2.7.1 Mazací film**

*Analysis on Influence of Oil Film Thickness on Temperature Field of Heavy Hydrostatic Bearing in Variable Viscosity Condition* [32]

#### **Cieľ:**

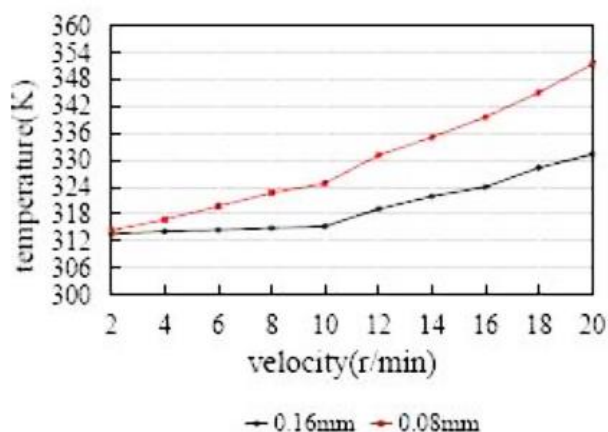
Tepelná analýza olejovej vrstvy hydrostatického ložiska pre rôzne hrúbky mazacieho filmu počas otáčania pomocou výpočtového modelu metódy konečných objemov.

#### **Testované hypotézy:**

Hrúbka mazacej vrstvy má vplyv na teplotu tlakového oleja ťažkých hydrostatických ložísk počas operácie.

#### **Získané poznatky:**

Teplotný nárast maziva je primárne spôsobený šmykovým trením maziva počas rotácie stola hydrostatického uloženia. V pokojovom stave nedochádza k rozdielom v teplote tlakového oleja. Na rozdiel od pokojového stavu je pri rotácií pozorovaná výrazná zmena teploty maziva. Nižšia hrúbka mazacej vrstvy medzi klznými povrchmi má za následok vyšší teplotný nárast tlakového oleja (Obr. 2-20), pričom rozdiel sa zväčšuje so zvyšujúcou sa rýchlosťou otáčania.



Obr. 2-20 Závislosť teploty na rýchlosti otáčania pre dve rôzne hrúbky mazacej vrstvy

### Význam a užitočnosť:

Uvedená práca sa zaoberá numerickou analýzou hrúbky mazacej vrstvy ťažkých hydrostatických ložísk a skúmala jeden z kľúčových parametrov hydrostatického mazania – hrúbku mazacieho filmu a jej vplyv na teplotu tlakového oleja. Vzhľadom k tomu, že nosnosť hydrostatického ložiska závisí na aktuálnej viskozite tlakového oleja a viskozita je výrazne závislá na teplote, môže pri prudkom náraste teploty dôjsť až k porušeniu mazacej vrstvy. Na základe získaných poznatkov je zrejmé, že pri vysokých rýchlostiach otáčania stolu je nutné analyzovať prípadný teplotný nárast a zamedziť tak havárii hydrostatického uloženia. Získané výsledky je možné aplikovať v inžinierskej praxi pri návrhu hrúbky mazacej vrstvy na základe uvedeného matematického modelu, a tým prispieť k stabilite a presnosti hydrostatického uloženia. Pomocou uvedenej metodiky je zjednodušený návrh výšky mazacej vrstvy, čím sa znižujú náklady na návrh a vývoj hydrostatických uložení.

### *Oil Film Shape Prediction of Hydrostatic Thrust Bearing Under the Condition of High Speed and Heavy Load [7]*

#### Cieľ:

Predikcia tvaru olejového filmu pomocou deformácie klzných povrchov ťažkých ložísk na základe výsledkov termodynamického analýzy.

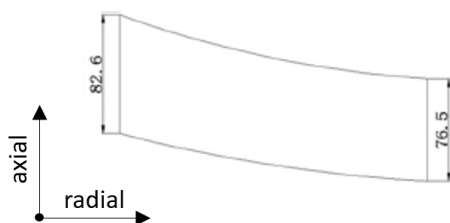
#### Testované hypotézy:

1. Mazací film hydrostatického ložiska sa so zvyšujúcou rýchlosťou otáčania deformuje v radiálnom smere.
2. Hrúbka mazacieho filmu sa znižuje s rastúcou rýchlosťou otáčania.

#### Získané poznatky:

Na základe termodynamického analýzy v modeli CFX softvéru ANSYS Workbench bol z výsledkov deformácií určený profil olejového filmu medzi klznými povrchmi. Počas

rotácie pri rýchlostiach dochádza k deformácií otočného stolu. V centrálnej oblasti sa stôl deformuje smerom nahor a na okraji dochádza naopak k deformácií smerom nadol (Obr. 2-21). Tým, ako sa deformuje otočný stôl vplyvom zotrvačných síl, je zároveň deformovaný aj profil olejovej vrstvy.



**Obr. 2-21** Interpretácia tvaru mazacej vrstvy pri vysokých otáčkach

Experimentálne porovnanie výsledkov analýz ukazuje veľmi presnú zhodu v hrúbke olejového filmu (Tab. 3). So zvyšujúcou sa rýchlosťou bol zaznamenaný mierny pokles v hrúbke mazacej vrstvy.

**Tab. 3** Porovnanie hrúbky mazacích filmov z výsledkov simulácie a experimentálnych meraní pri záťaži 35 t

Rotating speed	20 r/min	40 r/min	60 r/min	80 r/min	100 r/min	120 r/min	140 r/min	160 r/min
Simulation results	0.091	0.09	0.089	0.088	0.087	0.085	0.084	0.084
Experimental results	0.093	0.093	0.092	0.092	0.091	0.091	0.089	0.088

### **Význam výsledkov:**

V prípade rozmerných konštrukcií je zložité dosiahnuť vysokých presností výroby a montáže, a preto je deformácia povrchov u veľkorozmerných uložení je jedným z dôležitých faktorov, ktorý je nutné pri návrhu uvažovať. Experimentálne zrovnanie potvrdzuje presnosť výsledkov simulácií, čím prispieva aj ich dôveryhodnosti a pomáha ušetriť čas a náklady na vývoj takýchto uložení.

### **Užitočnosť pre dizertačnú prácu:**

V prípade ťažkých stolov s hydrostatickým uložením je nutné uvažovať aj vplyv rýchlosti otáčania a samotnú deformáciu otočného stola. Z výsledkov je zrejmé, že deformácia spôsobená zotrvačnými účinkami alebo prípadne aj vlastnou váhou ovplyvňuje hrúbku, resp. profil olejového filmu v radiálnom smere, a preto je nutné uvažovať aj tieto faktory spolu s výrobnými a montážnymi nepresnosťami, aby nedošlo k porušeniu olejovej mazacej vrstvy, čo by mohlo viesť k poškodeniu klzných povrchov.

### ***Viscosity Influence Research on Load Capacity of Heavy Hydrostatic Bearing [33]***

#### **Cieľ:**

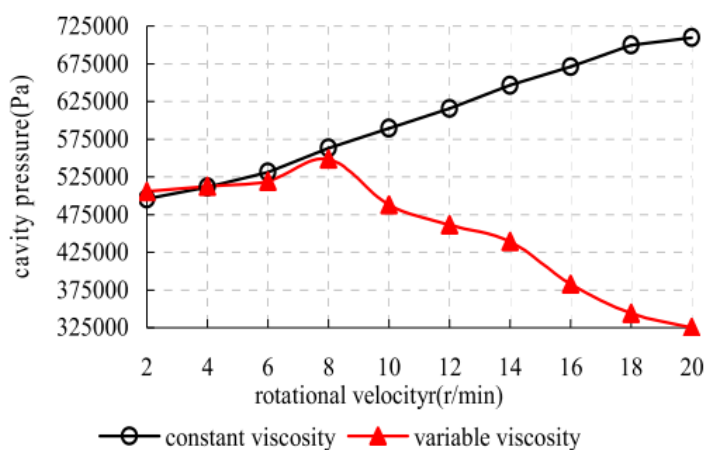
Získanie závislosti medzi viskozitou, rýchlosťou a nosnosťou.

#### **Testované hypotézy:**

Rýchlosť otáčania ovplyvňuje nosnú kapacitu ťažkých hydrostatických ložísk.

### Získané poznatky:

Rýchlosť otáčania výrazne ovplyvňuje tlak vo výtoku bunky a to najmä u veľkých ťažkých hydrostatických axiálnych ložísk, u ktorých je nutné pri výpočte prihliadať na zmenu viskozity pri vysokých rýchlostiach otáčania. K zmene tlaku vo výtoku bunky, ktorá je priamoúmerná nosnosti hydrostatického ložiska dochádza za podmienok konštantnej aj premennej viskozity (Obr. 2-22).



Obr. 2-22 Závislosť tlaku v bunke na rýchlosti pre mazivo s konštantnou a premennou viskozitou

### Význam a užitočnosť:

Uvedená štúdia slúži ako nástroj pre návrh optimálnych parametrov a analýzu ťažkých hydrostatických ložísk. Získané poznatky ukazujú závislosť tlaku oleja vo vtoku hydrostatického ložiska na rýchlosti otáčania. Vzhľadom k tomu, že tlak oleja je jednou z primárnych veličín, ktoré ovplyvňujú nosnosť a správnu funkciu ložiska, je nutné uvažovať aj zmenu viskozity s rýchlosťou otáčania. V prípade konštantnej viskozity sa nosnosť, resp. tlak rastie so zvyšujúcou sa rýchlosťou, avšak pri uvažovaní premennej viskozity tlak vo vtoku mierne rastie a pri rýchlosti vyššej ako 8 ot·min<sup>-1</sup> tlak výrazne klesá, čo by mohlo viesť k poklesu tuhosti až ku kolízií klzných povrchov a tým by mohlo zapríčiniť ich poškodenie. U veľkorozmerných ťažkých ložísk by porušenie mazacieho filmu tvoreného tlakovým olejom mohlo zapríčiniť rozsiahle škody, ktorých oprava by bola nákladná a časovo náročná.

## 2.7.2 Nesymetrické zaťaženie a tepelné účinky

*Thermal-fluid-solid coupling deformation of hydrostatic thrust bearing friction pairs* [22]

**Cieľ:**

Štúdium tepelnej deformácie klzných povrchov hydrostatického ložiska pomocou CFD analýzy a experimentálnych meraní.

### Testované hypotézy:

1. S rastúcou rýchlosťou otáčania klesá hrúbka mazacieho filmu tlakového oleja medzi klznými povrchmi.
2. Pri vyššej rýchlosti otáčania dochádza k výraznejšej deformácii otočného stola hydrostatického ložiska.

### Získané poznatky:

Ako vyplýva z výsledkov experimentálnych meraní, s rastúcou rýchlosťou klesá hrúbka mazacieho filmu. Ukazuje sa, že hrúbka mazacej vrstvy výrazne klesá po dobu 2 hodín od spustenia prevádzky. Následne systém prechádza do rovnováhy a hrúbka mazacej vrstvy tlakového oleja sa ustáli. Tento trend bol pozorovaný pri všetkých rýchlostiach otáčania.

Ďalšie výsledky meraní ukazujú, že pri vyššej rýchlosti sa deformácia otočného stola znižuje, avšak deformácia po dosiahnutí rovnovážneho stavu pri rýchlostiach v celom pozorovanom rozmedzí 10-50 ot $\square$ min<sup>-1</sup> je približne rovnaká, čo mohlo byť spôsobené nedostatočným ochladením systému medzi jednotlivými meraniami, alebo rýchlejšim prechodom do rovnovážneho stavu pri vyšších rýchlostiach (Tab. 4).

**Tab. 4** Hrúbka mazacej vrstvy a deformácia pre rôzne doby prevádzky a rýchlosti otáčania

Running time (h)	Clearance of hydrostatic bearing (mm)					Deformation of workbench (mm)				
	10 rpm	20 rpm	30 rpm	40 rpm	50 rpm	10 rpm	20 rpm	30 rpm	40 rpm	50 rpm
0	0.135	0.134	0.12	0.12	0.12	0.132	0.133	0.115	0.120	0.119
1.0	0.125	0.14	0.125	0.12	0.11	0.112	0.114	0.100	0.103	0.102
2.0	0.122	0.128	0.12	0.12	0.11	0.106	0.105	0.101	0.096	0.099
3.0	0.124	0.13	0.13	0.118	0.11	0.103	0.101	0.98	0.094	0.092
4.0	0.125	0.12	0.12	0.11	0.11	0.100	0.098	0.96	0.092	0.093
5.0	0.125	0.123	0.125	0.106	0.104	0.098	0.094	0.972	0.093	0.094
6.0	0.120	0.12	0.12	0.105	0.09	0.097	0.092	0.98	0.093	0.095

### Význam a užitočnosť:

Táto štúdia potvrdzuje presnosť CFD analýzy pomocou výsledkov z experimentálnych meraní, čím pridáva na dôveryhodnosti a presnosti výsledkov simulácií. Zároveň je popisovaný vplyv rýchlosti na hrúbku mazacej vrstvy v rozmedzí hodín, čo bolo postačujúce pre dosiahnutie tepelnej rovnováhy hydrostatického uloženia, ako vyplýva z výsledkov meraní. Hydrostatické uloženia sa používajú aj pre ťažké a rozmerné obrábacie stroje, ktoré vyžadujú vysokú presnosť. Príkladom sú vertikálne sústruhy, ktoré sú prevádzkované okrem veľkého zaťaženia aj pri vysokých rýchlostiach, a preto je potrebné analyzovať aj tepelné vlastnosti klzných povrchov pre všetky prevádzkové podmienky. Najmä pri návrhu veľkorozmerných uložení je nutné správne navrhnúť a analyzovať všetky možné prevádzkové stavy, pretože každá prípadná nerovnosť spôsobená nepresnosťou výroby alebo montáže by mohla zapríčiniť narušenie olejovej tlakovej vrstvy a tým spôsobiť kolíziu klzných povrchov. S tým súvisí aj predpokladaná prevádzková rýchlosť otáčania, ktorá má

vplyv na tepelné vlastnosti systému a hrúbku mazacej vrstvy. Tepelná analýza je teda najmä u veľkorozmerných uložení jedným z významných aspektov návrhu konštrukcie, s ktorým je nutné pri návrhu uvažovať.

***Thermal and tilt effects on bearing characteristics of hydrostatic oil pad in rotary table***  
[34]

**Cieľ:**

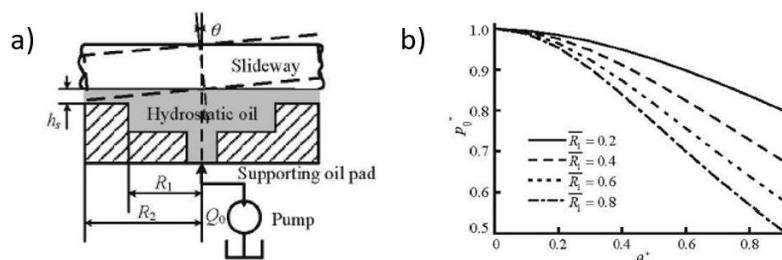
Analýza vplyvu naklonenia otočného stolu na nosnú schopnosť hydrostatického uloženia.

**Testované hypotézy:**

1. Naklonenie otočného stolu znižuje nosnú schopnosť hydrostatického ložiska.
2. Počas prevádzky s nakloneným otočným stolom dochádza k lokálnemu nárastu teploty tlakového oleja v mieste s najmenšou hrúbkou olejového filmu.

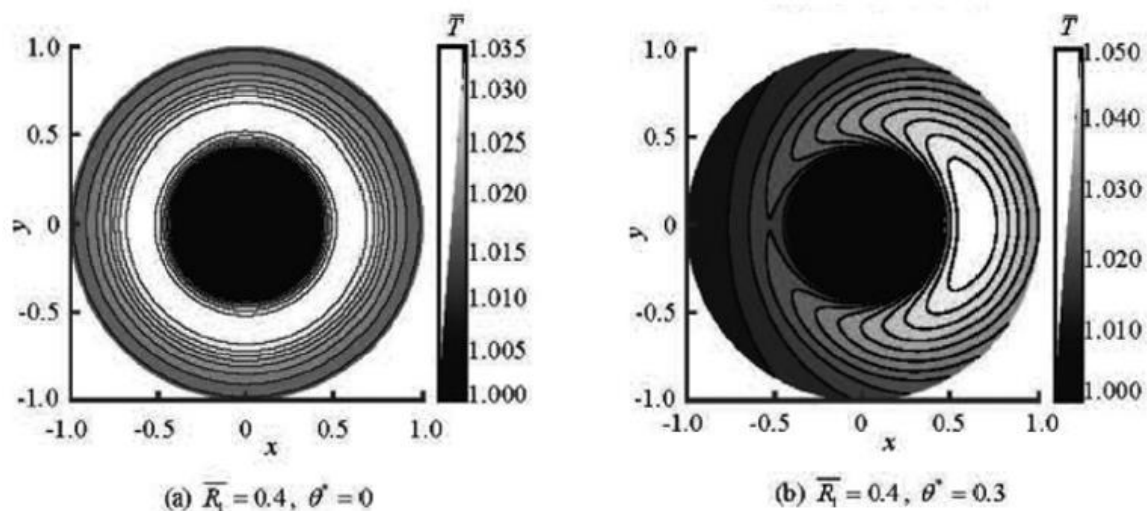
**Získané poznatky:**

Vyšetrovanie vplyvu naklonenia otočného stolu na prevádzkové parametre hydrostatického uloženia, z ktorých najvýznamnejším je tlak v bunke ukázalo, že naklonenie spôsobuje pokles tlaku v bunke, ktorý je výraznejší s väčším náklonom otočného stolu (Obr. 2-23). Naklonenie má väčší vplyv na pokles tlaku v prípade menšej klznej plochy, resp. v prípade bunky s väčším priemerom.



**Obr. 2-23** Znáročenie naklonenia pohyblivej dosky (a) a priebeh tlakov pri rôznom uhle natočenia (b)

Výsledky metódy konečných diferencií ukazujú, že distribúcia teploty olejového filmu bez náklonu otočného stolu je po celej šírke ložiska rovnomerná (Obr. 2-24a). V prípade, kedy je otočný stôl naklonený, dochádza k lokálnemu navýšeniu teploty v mieste s najnižšou hrúbkou olejového tlakového filmu zapríčineného väčším odporom proti tečeniu kvapaliny cez užšiu výtokovú škáru (Obr. 2-24b).



Obr. 2-24 Teplotné kontúry pohyblivej dosky a) s rovnobežnými plochami b) s naklonenou pohyblivou doskou

Presnosť výsledkov bola overená experimentálne, pričom výsledky meraní a výpočtov ukazujú veľmi dobrú zhodu, čím sa overila dôveryhodnosť použitého matematického modelu.

#### Význam a užitočnosť:

Štúdia pojednáva o vplyvu naklonenia otočného stola na nosnú schopnosť hydrostatického uloženia. Nerovnomerné zaťaženie má nezanedbateľný vplyv najmä u veľkorozmerných uloženiach, kde sú prítomné vysoké zaťaženia. V reálnych aplikáciách je nutné uvažovať vplyv výrobných nepresností a nerovnomerného zaťaženia, aby nedošlo k strate nosnej schopnosti niektorej z hydrostatických segmentov uloženia, čo by mohlo viesť ku kolíziám až k poškodeniu klzných plôch. Získané výsledky ukazujú výrazný vplyv naklonenia otočného stola na nosnú kapacitu hydrostatického uloženia. Zistený bol aj nárast teploty olejového filmu v mieste s užšou výtokovou škárou vzniknutou naklonením otočného stola, čo je nutné brať pri návrhu hydrostatického ložiska do úvahy, aby sa predišlo v takýchto miestach kritickému zmenšeniu olejového filmu spôsobeného poklesom viskozity, čo by mohlo viesť až k nežiaducemu priamemu kontaktu klzných plôch. Presnosť výsledkov matematického modelu bola overená na experimentálnom zariadení, čím sa potvrdila presnosť a dôveryhodnosť výpočtu, a preto je možné uvedené výpočtové vzťahy použiť pri návrhu a kontrole funkčnosti hydrostatického ložiska.

#### *Heat Transfer Characteristics of High Speed and Heavy Load Hydrostatic Bearing* [35]

##### Cieľ:

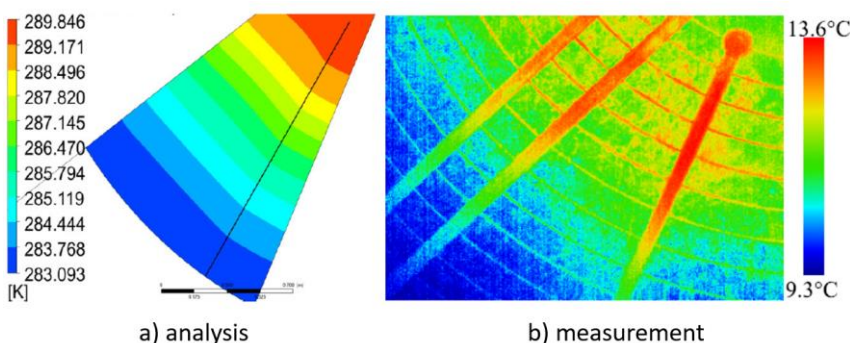
Štúdium prenosu tepla hydrostatického ložiska vertikálneho sústruhu s priemerom 5 m za vysokých rýchlostí pomocou CFD analýzy a experimentálnych meraní.

### Testované hypotézy:

Odvod tepla z povrchov hydrostatického ložiska je intenzívnejší pri vyšších rýchlostiach otáčania.

### Získané poznatky:

Na základe meraní a analýzy bolo zistené, že záťaž má minimálny vplyv na prenos tepla a hlavným faktorom ovplyvňujúcim prenos tepla je rýchlosť otáčania. Zo získaných výsledkov ďalej vyplýva, že teplota na vonkajších bočných a vrchných povrchoch pracovného stolu s hydrostatickým uložením klesá so zvyšujúcou sa rýchlosťou otáčania, pričom zmena je najvýraznejšia do  $60 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ . Teplota klznej plochy, v okolí vtokovej drážky však s vyššou rýchlosťou rastie, čo môže byť zapríčinené kombináciou faktorov – nárastom šmykového trenia pri vyšších rýchlostiach a nedostatočným chladením oleja pred vstupom späť do hydraulického obvodu. Výsledky CFD analýzy a meraní na experimentálnom zariadení ukazujú pomerne dobrú zhodu s rozdielom do  $1 \text{ }^\circ\text{C}$ , čím sa potvrdila presnosť modelu a navrhovanej metodiky štúdia tepelných vlastností povrchov hydrostatických ložísk (Obr. 2-25).



Obr. 2-25 Porovnanie teploty pohyblivej dosky a) výsledkov tepelnej analýzy b) meraní pomocou termokamery

### Význam užitočnosť:

Vzhľadom k tomu, že viskozita je jedným z hlavných parametrov definujúci hrúbku mazacieho filmu za konštantných podmienok, je nevyhnutné navrhovať hydrostatické ložiská tak, aby nedochádzalo k výrazným zmenám v teplote mazacej vrstvy, čo by mohlo zapríčiniť zníženie nosnosti, až kolíziu klzných povrchov hydrostatického ložiska. Ako vyplýva z výsledkov, presnosť CFD analýzy bola overená experimentálnym meraním, čím sa zvyšuje presnosť a dôveryhodnosť získaných výsledkov simulácií. Práca môže zároveň slúžiť ako metodika pre rozbor tepelných vlastností hydrostatického uloženia a odvodu tepla, aby nedochádzalo k znižovaniu efektivity až k zlyhaniu mazacieho filmu hydrostatického ložiska z dôvodu prehrievania.

*A Method for Predicting Hydrostatic Guide Error Averaging Effects Based on Three-Dimensional Profile Error* [26]

### Cieľ:

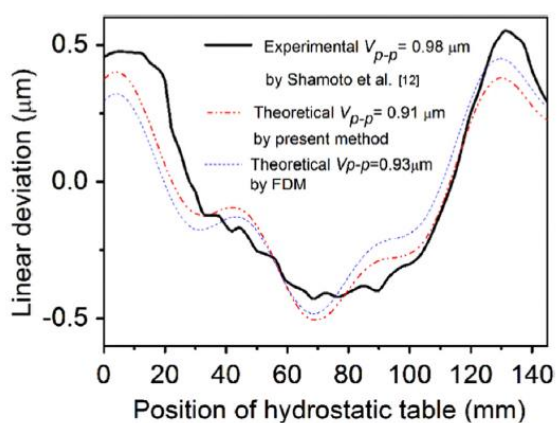
Zavedenie analytického modelu pre predikciu geometrických nepresností uvažujúceho výrobné tolerancie v oboch smeroch hydrostatického vedenia.

### Testované hypotézy:

Výrobné nepresnosti v priečnom smere vedenia spôsobujú zmeny v hrúbke mazacej vrstvy tlakového oleja.

### Získané poznatky:

Chyby v smere šírky hydrostatického vedenia ovplyvňujú hrúbku mazacej vrstvy a priamosť. Navýšením amplitúdy nerovností profilu sa zvyšuje priamosť, naopak znížením pomeru šírky vedenia a vlnovej dĺžky odchýlky povrchu v smere šírky ( $B/\lambda_y$ ) sa priamosť znižuje. Odchýlka priamosti je silno závislá na odchýlkach povrchu. Na základe porovnania výsledkov teoretického modelu a experimentálnych meraní je možné usúdiť pomerne dobrú zhodu (Obr. 2-26).



Obr. 2-26 Závislosť odchýlky povrchu na pozícií povrchu otočného stola

### Význam a užitočnosť:

Výrobné nepresnosti sa vyskytujú na všetkých obrábaných komponentoch, a špeciálne v prípade veľmi presných posuvov je nutné minimalizovať možné chyby, ktoré by sa premietli do celkovej presnosti zariadenia. U rozmerných dielov nie je možné dosiahnuť tak vysoké výrobné presnosti. V prípade hydrostatických uložení by veľké nepresnosti povrchov mohli zapríčiniť nežiadúcu fluktuáciu mazacej vrstvy, v horšom prípade až poškodenie klzných povrchov. Pokiaľ by bolo možné na základe matematického modelu predikovať chyby, ktoré vzniknú pri výrobe, bolo by možné s vyššou presnosťou realizovať výpočet hydrostatických uložení.

## 2.7.3 Optimalizácia geometrie

*Influence of Recess Shape on Comprehensive Lubrication Performance of High Speed and Heavy Load Hydrostatic Thrust Bearing* [36]

## Cieľ:

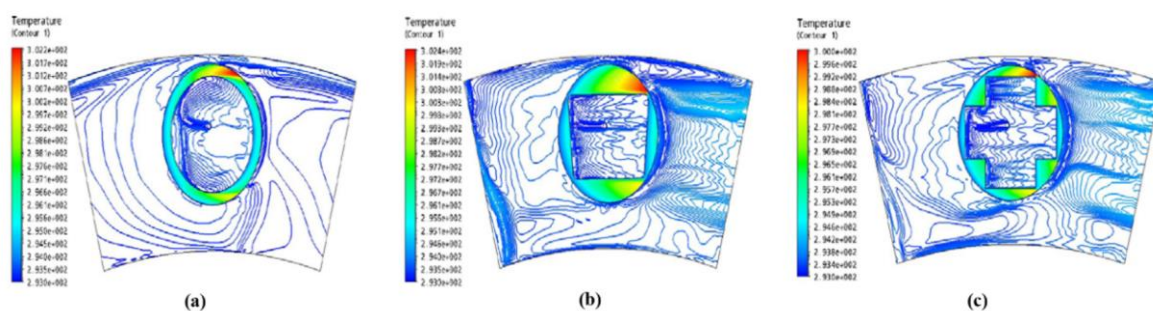
Hľadanie optimálneho tvaru výtoku hydrostatického ložiska na základe CFD analýzy a experimentálneho overenia.

## Testované hypotézy:

Presnosť výsledkov CFD analýz je zrovnateľná s reálnymi meraniami.

## Získané poznatky:

Výsledky CFD analýzy ukazujú, že teplota postupne rastie s rastúcou rýchlosťou otáčania. Testované boli tri rôzne tvary vtokov: a) medzikruhový, b) výrezový a c) krížový (Obr. 2-27). V každom vtoku sa nachádzali teplotné senzory, ktorých hodnoty boli porovnávané s výsledkami kontúr analýzy. Po zrovnaní výsledkov experimentálnych meraní s CFD analýzami bolo zistené, že výsledky sú takmer identické. Z testovaných tvarov vtokových drážok má optimálne vlastnosti pre hydrostatické ložisko práve medzikruhový tvar drážky.



Obr. 2-27 Porovnanie teplotných profilov hydrostatických buniek a) prstencového, b) výrezového a c) krížového tvaru

## Význam a užitočnosť:

Experimentálnym overením výsledkov z CFD analýzy sa potvrdila spoľahlivosť a presnosť získaných výsledkov z analýz. Experimentálne overenie CFD analýzy ukazuje zhodu výsledkov analýz a meraní, vďaka čomu je umožnený presnejší a rýchlejší návrh hydrostatických uložení. Štúdia zároveň načrtla určitú metodiku pre analýzu optimálneho tvaru vtokovej drážky, pričom výsledky sú overené experimentálne, čím sa dosiahlo navýšeniu dôveryhodnosti výsledkov CFD analýz. Aj napriek tomu, že porovnávané tvary nie sú typické pre hydrostatické uloženia, môže štúdia poslúžiť ako opora pri analýzach a návrhu hydrostatických buniek.

## *The Effect of Oil Cavity Depth on Temperature Field in Heavy Hydrostatic Thrust Bearing [17]*

## Cieľ:

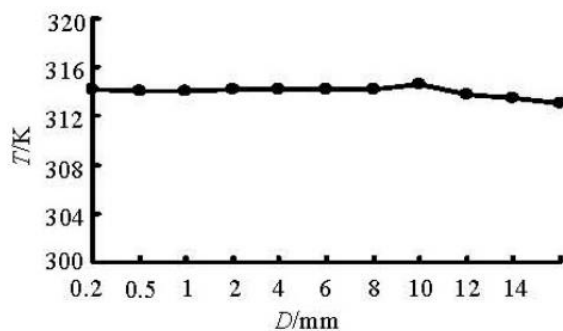
Štúdium vzťahu viskozity a teploty hydrostatického ložiska pri rôznych hĺbkach vtokových drážok.

### Testované hypotézy:

Hĺbka vtokovej drážky má vplyv na teplotný nárast olejovej tlakovej vrstvy hydrostatického ložiska.

### Získané poznatky:

Prostredníctvom CFD analýzy boli vyhodnocované drážky vtokov o hĺbke 0,2-16 mm za podmienok premennej viskozity maziva. Z výsledkov je zrejmé, že hĺbkou vtokovej drážky sa teplota olejovej vrstvy mení iba nepatrne (Obr. 2-28).



Obr. 2-28 závislosť teploty na hĺbke bunky za podmienok premennej viskozity

### Význam a užitočnosť:

Vtokové drážky sú neoddeliteľnou časťou hydrostatických ložísk. Pre oddelenie klzných povrchov je potrebné zabezpečiť, aby plocha vtokovej drážky bola dostatočujúca na nadvihnutie záťaže. Pre získanie optimálnej hĺbky vtokovej drážky sa uvádzajú odporúčania, ktoré hovoria, že hĺbka vtokovej drážky by mala byť približne päťdesiatnásobná ako je plánovaná výška mazacej vrstvy medzi klznými povrchmi. Táto práca porovnáva široký rozsah hĺbok vtokových drážok z hľadiska tepelného nárastu mazacej vrstvy. Vzhľadom k tomu, že pri rôznych hĺbkach nedochádza k výraznej zmene teploty mazacej vrstvy, nie je nutné každé hydrostatické uloženie analyzovať samostatne pre hľadanie optimálnej hĺbky vtokovej drážky. Ako ukazujú výsledky, hĺbka drážky nemá významný vplyv na zmenu teploty tlakového oleja, čím sa zjednodušuje návrh hydrostatických ložísk. Na základe získaných poznatkov je možné urýchliť návrh hydrostatických uložení, resp. hĺbku vtokovej drážky.

*Research on Influence of Cavity Depth on Load Capacity of Heavy Hydrostatic Bearing in Variable Viscosity Condition* [37]

### Cieľ:

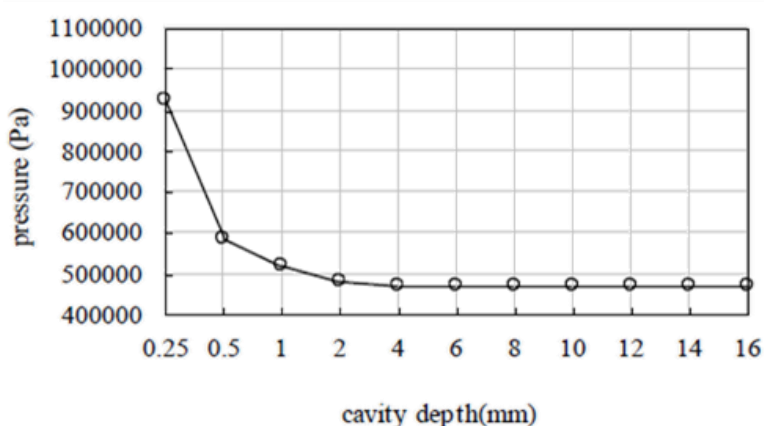
Štúdium závislosti hĺbky vtoku bunky na nosnú kapacitu hydrostatického ložiska za podmienok premennej viskozity.

### Testované hypotézy:

Únosnosť hydrostatického ložiska je závislá na hĺbke vtoku do bunky.

### Získané poznatky:

U drážok vtokov s hĺbkou väčšou ako 2 mm dochádza k negatívnemu účinku na tlak vo vtokovej drážke, pričom dochádza k výraznému poklesu tlaku a tým aj k poklesu nosnosti hydrostatického uloženia (Obr. 2-29). V prípade drážok vtokov menších ako 2 mm je tlaková strata výrazne nižšia. Tieto výsledky platia za podmienok premennej viskozity, ktorá je závislá na teplote a pri rýchlosti otáčania  $6 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ .



Obr. 2-29 Závislosť tlaku oleja na hĺbke bunky

### Význam a užitočnosť:

Štúdia sa zaoberá skúmaním jedného zo základných parametrov geometrie hydrostatického ložiska, resp. bunky – hĺbkou vtokovej drážky. Staršie knihy uvádzajú iba odporúčania pre hĺbky drážok, avšak chýba nástroj, ktorým by bolo možné overiť a jasne stanoviť optimálnu hĺbku vtokovej drážky. Táto štúdia poskytuje vhodný nástroj pre kontrolu a návrh optimálnej hĺbky drážky. Výsledky ukazujú, že pri návrhu hydrostatických ložísk nestačia iba všeobecné odporúčania pre hĺbku vtokovej drážky, ale je potrebné analyzovať nosnosť, resp. tlak v bunke pre danú aplikáciu a okrajové podmienky, aby nedošlo k strate schopnosti prenášania záťaže iba prostredníctvom mazacej vrstvy. Aj napriek tomu, že chýba detailný popis okrajových podmienok a najmä predpokladané hrúbky mazacej vrstvy medzi klznými plochami, záťaž a teplota, je nutné podotknúť, že hĺbka vtokovej drážky má nezanedbateľný vplyv na tlak, resp. únosnosť ložiska, a preto je nutné analyzovať optimálnu hĺbku drážky pre maximálnu bezpečnosť a efektívnosť hydrostatického uloženia.

## 2.7.4 Kompenzačné členy

### *Parameters Design of a Membrane-Type Restrictor with Single-Pad Hydrostatic Bearing to Achieve High Static Stiffness* [38]

#### Cieľ:

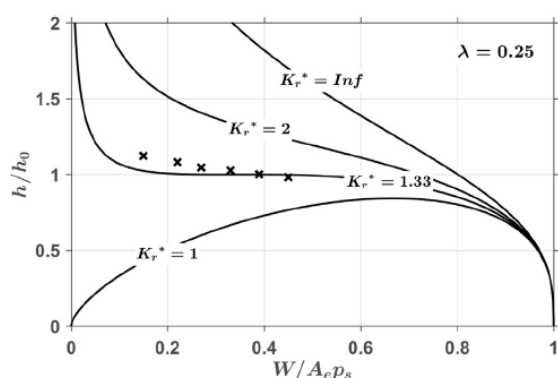
Hľadanie kľúčových parametrov membránového restriktoru pre zjednodušenie návrhu hydrostatických uložení s vysokou statickou tuhosťou.

#### Testované hypotézy:

Voľbou optimálnych prevádzkových parametrov hydrostatického ložiska s membránovým restriktorom je možné dosiahnuť vyššiu statickú tuhosť ako s bežnými restriktormi.

#### Získané poznatky:

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. 2-30).



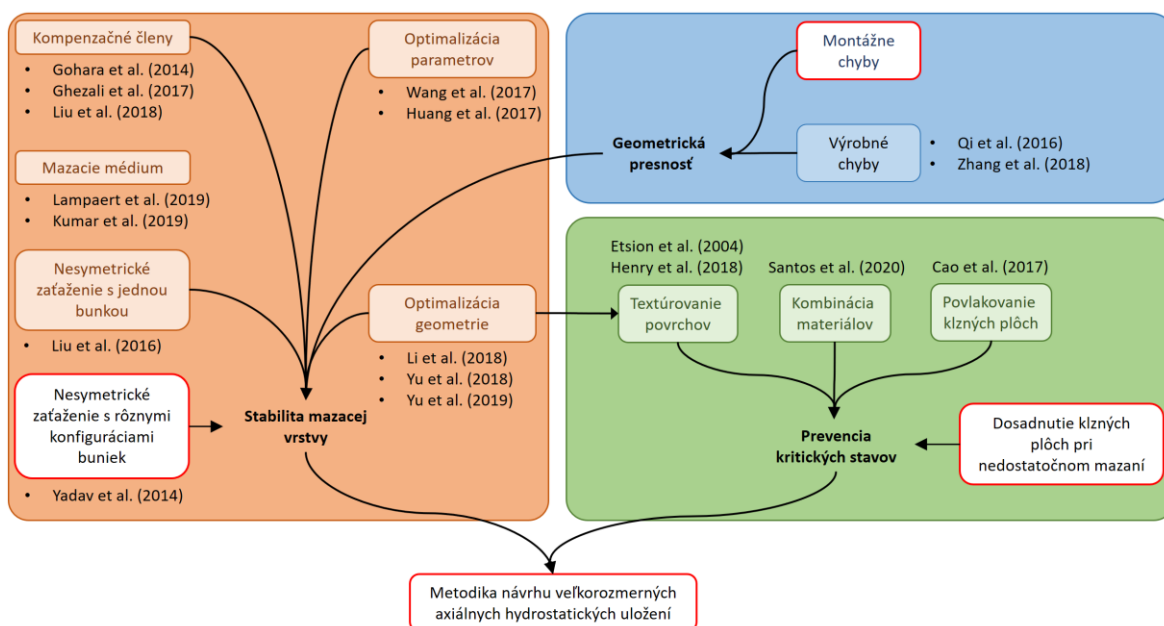
Obr. 2-30 Porovnanie vypočítaných kriviek tuhosti s experimentálnymi dátami (krížik) pre membránový restriktor

#### Význam a užitočnosť:

Vysoká tuhosť je dôležitá najmä u obrábacích zariadení pre dosiahnutie maximálnej presnosti obrábaných súčastí. Pomocou membránového restriktoru je mazací film udržiavaný aj pri širokom rozsahu záťaže, takže nedôjde k jeho porušeniu pri náhlej zmene zaťaženia v určitom rozmedzí. Na základe výsledkov boli stanovené optimálne hodnoty dvoch kľúčových parametrov – návrhový regulačný pomer a bezrozmerná membránová tuhosť. Tieto poznatky prispievajú k zjednodušeniu návrhu membránových kompenzačných členov hydrostatických uložení.

### 3 ANALÝZA, INTERPRETÁCIA A ZHODNOTENIE POZNATKOV ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADE KRITICKEJ REŠERŠE

Na základe rešerše bola vytvorená zjednodušená citačná mapa zvyrazňujúca najdôležitejšie časti návrhu hydrostatického uloženia (Obr. 3-1), kde sú schematicky znázornené biele miesta v červenom ráme. Návrh veľkorozmerných hydrostatických uložení bol rozdelený na tri hlavné oblasti, s ktorými súvisia jednotlivé kroky vývoja. Jednotlivé časti sú bližšie rozobrané v nasledujúcich kapitolách.



Obr. 3-1 Zjednodušená citačná mapa s vyznačením bielych miest v danej problematike

#### 3.1 Stabilita mazacej vrstvy

Mazacia vrstva hydrostatického mazacieho filmu je závislá na prevádzkových parametroch hydraulického okruhu, okolitých podmienkach, a na presnosti vyrobených komponentov hydrostatického uloženia. Pre správnu funkciu hydrostatického ložiska je v prvom rade potrebné podľa zadania realizovať výpočet optimálnych parametrov alebo geometrie. Pre zložitejšie tvary káps už nie je možné použiť analytické vzťahy, a preto sa používajú nomogramy [10] alebo numerické analýzy. Práve pomocou numerických analýz bola hľadaná optimálna geometria hydrostatických káps a buniek [18, 39–41]. Počas prevádzky môže dôjsť k narušeniu stability mazacieho filmu, čo by mohlo ústiť až k havárii hydrostatického uloženia. Jedným z takýchto stavov je nerovnomerné zaťaženie vedúce k nakloneniu pohyblivej dosky, kedy môže u jednobunkovej kapsy [8] dochádzať

k tlakovým stratám a zahrievaniu maziva. Naklonenie otočného stolu je možné eliminovať viacerými kapsami, resp. viacbunkovou kapsou ložiska. Stav nerovnomerného zaťaženia však u viacbunkových káps nebol doposiaľ analyzovaný. Zavedením kompenzačných členov je možné do istej miery predísť nevyváženosti pohyblivej dosky. Voľbou vhodného regulačného člena, ako napr. membránového [42], sa dá doceliť aj vysokých tuhostí a stability systému.

Primárne sa u hydrostatických uložení používajú hydraulické oleje, s vysokým viskozitným indexom. Štúdie zamerané na aplikáciu ne-Newtonských mazív ukázali, že ich aplikáciou je možné do určitej miery vylepšiť dynamické správanie systému, avšak na úkor navýšenia energetickej náročnosti pumpovacieho systému [43, 44]. V prípade MR kvapalín môže dochádzať až k poškodeniu hydraulického systému prítomnými feromagnetickými mikročasticami [31]. V tejto oblasti je priestor na vývoj smart kvapalín, ktoré neobsahujú mikročastice, ale majú prirodzenú citlivosť na externé pôsobenie aktívneho poľa.

## 3.2 Geometrická presnosť

Na stabilitu mazacej vrstvy má nezanedbateľný vplyv aj geometrická presnosť klzných plôch [26], ktorá súvisí s výrobnými chybami. Doposiaľ však nebola realizovaná štúdia so zameraním na montážne chyby. Tepelné účinky spojené so zahrievaním klzných plôch prúdením tlakového oleja [8, 22] a pri vysokých otáčkach [45] hrajú taktiež významnú rolu pri geometrickej presnosti klzných povrchov, čo priamo ovplyvňuje tvar mazacej vrstvy [7]. Pre kompenzáciu nepresností boli použité aj kapsy uložené v gumových silentblokoch [27], avšak výskum v tejto oblasti sa ďalej nerozvíjal.

## 3.3 Prevencia kritických stavov

Kritický stav, ktorý môže nastať pri výpadku tlakového oleja, je nedostatočné mazanie pri dobehu. Náhlému prerušeniu dodávky tlakového maziva sa dá zamedziť implementáciou hydraulického akumulátoru do obvodu, z ktorého bude ložisko v prípade poruchy hydraulického agregátu ešte určitý čas zásobované. Nie je však vždy zaručené, 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 povlakovanie klzných plôch [5]. Ďalšou možnosťou, ktorá sa často využíva u hydrodynamických ložísk je textúrovanie povrchov [46]. Doposiaľ boli z hydrostatických zariadení testované textúrované hydrostatické tesnenia [47]. Chýba však popis priamo zameraný na modifikáciu

klzných povrchov hydrostatických ložísk za podmienok, ktoré nastávajú pri popisovanom kritickom stave.

### 3.4 Nezmapovaná oblasť poznania

Aj napriek uvedeným publikáciám zostáva stále viacero oblastí súvisiacich s problematikou veľkorozmerných hydrostatických uložení, ktoré nie sú úplne popísané. Doposiaľ boli vytvorené zhrňujúce články pojednávajúce o hydrodynamických ložiskách pre vodárenskú energetiku [48], a o trendoch a aplikáciách z oblasti hydrostatických ložísk [1], avšak chýba metodika návrhu veľkorozmerných hydrostatických ložísk pre všeobecné aplikácie, ktorá by zjednodušila a spresnila návrh.

Pri návrhu veľkorozmerných hydrostatických ložísk je významným limitujúcim faktorom presnosť výroby a montáže. Výskum zameraný na výrobné chyby a presnosť klzných povrchov hydrostatických uložení [26, 49], avšak doposiaľ nebol experimentálne testovaný vplyv dôležitých výrobných parametrov, v tomto prípade najmä rovinnosti. Práce zaoberajúce sa geometrickou presnosťou však vôbec neriešili montážne nepresnosti, ktoré sú u veľkorozmerných hydrostatických ložiskách častým problémom vzhľadom k tomu, že sa pohyblivá doska prstencového tvaru skladá z viacerých montovaných dielov, ktorých maximálny možný rozmer je limitovaný výrobnými možnosťami.

U veľkorozmerných ložísk je nemožné dosiahnuť dokonalejšiu rovinnosť, a to z dôvodu výrobných presností, montáže a v neposlednom rade deformáciou telies spôsobenou vlastnou tiažou. Okrem iného môže počas prevádzky dochádzať k nerovnomernému zaťaženiu pohyblivého stolu. Vzhľadom k týmto skutočnostiam je nutné kompenzovať nepresnosti, čo je možné za pomoci gumených silentblokov [27], alebo využitím viacbunkovej kapsy. Výskum zameraný na výkonnosť hydrostatického ložiska s nakloneným pohyblivým stolom sa zaoberal porovnaním rôznych buniek s ne-Newtonským mazivom, avšak v prípade veľkorozmerných ložísk sa primárne používajú hydraulické oleje, ktoré môžu vykazovať iné správanie ako bolo popisované v ref. [28], kde boli testované konfigurácie kapsy typické skôr pre malé ložiská. Pre veľkorozmerné ložiská sa naskytuje použiť skôr rozloženie s viacerými vtokovými drážkami, ktoré by boli schopné kompenzovať nerovnomerné zaťaženie.

Pre minimalizáciu poškodenia sa na klzné plochy aplikujú povlaky alebo sa využíva kombinácia materiálov [5]. U hydrodynamických ložiskách sa používajú textúrované povrchy [46], avšak pre hydrostatické ložiská nebol doposiaľ popísaný kritický stav nedostatočného mazania a jeho možná prevencia počas dosadnutia klzných plôch pri výpadku dodávky tlakového oleja, keď je pohyblivá doska ešte stále v pohybe.

## 4 PODSTATA, CIELE A PRÍNOS DIZERTAČNEJ PRÁCE

### 4.1 Podstata a prínos dizertačnej práce

Podstatou dizertačnej práce je vytvorenie metodiky návrhu veľkorozmerných hydrostatických ložísk, čím by sa zjednodušil a sprehľadnil proces vývoja pri dosiahnutí maximálnej efektivity hydrostatického uloženia. Výskum a vývoj so zameraním na hydrostatické uloženia doposiaľ priniesol nové poznatky, ktoré je pri návrhu možné implementovať. Realizované boli aj prehľadové články, ktoré sumarizovali aktuálne trendy vo vývoji hydrostatických ložísk [50], alebo pojednávali o naklápacích axiálnych ložiskách pre vodárenskú energetiku [48]. Aj napriek tomu chýba súhrnný popis obsahujúci jednotlivé vetvy návrhu veľkorozmerných hydrostatických uložení, ktoré je nutné pri vývoji uvažovať.

U veľkorozmerných ložísk sa v porovnaní s malými hydrostatickými ložiskami vyskytujú problémy s geometrickou presnosťou klzných povrchov, ktoré vznikajú pri výrobe a pri montáži, keďže takéto uloženia môžu byť umiestnené v ťažko prístupných miestach a v suterénoch budov, napr. divadiel, alebo aj výletných lodí. Práve pri montáži vznikajú problémy s nastavením jednotlivých segmentov do roviny. Z tohto dôvodu je nutné objasniť ako veľké vznikajúce nepresnosti sú prípustné pre správnu funkciu hydrostatického uloženia. S presnosťou súvisí aj naklápanie bežca, resp. otočného stola spôsobené nesymetrickým zaťažením, ktoré sa v manipulačnej technike môže vyskytnúť. Predošlé štúdie boli zamerané iba na prevádzkové parametre kapsy s jednou vtokovou drážkou [8], aj napriek tomu, že viaceré vtokové drážky môžu mať pozitívny účinok na niveláciu a nastavenie rovnobežnosti klzných povrchov, aby nedochádzalo k strate nosnej kapacity.

Na základe bibliografickej rešerše bude vypracovaná metodika návrhu ťažkých hydrostatických uložení vo forme prehľadového článku, ktorá umožní priemyselnej sfére urýchliť vývoj a výskumnej sfére naznačí budúce vývoj a trendy v tejto oblasti. V priebehu riešenia problému bude overovaná presnosť analytického a numerického výpočtu v porovnaní s experimentálnym meraním. Vplyv montážnych nerovností vyplní chýbajúce znalosti z oblasti veľkorozmerných hydrostatických uložení a zaistí tým navýšenie bezpečnosti a životnosti. Prínosom práce je spresnenie a zjednodušenie návrhu ťažkých hydrostatických uložení rozmerných konštrukcií.

## 4.2 Ciele práce

Hlavným cieľom tejto práce je vytvorenie metodiky návrhu a optimalizácie pre veľkorozmerné hydrostatické uloženie s priemerom 20 m a nosnosťou 400 t na experimentálnom zariadení v mierke 1:10.

### Čiastkové ciele:

- stanovenie parametrov experimentu a overenie presnosti analytického výpočtu s meraním
- zrovnanie výsledkov CFD simulácie a meraní na experimentálnom zariadení
- stanovenie maximálnych prípustných nepresností montáže pre správnu funkciu hydrostatického uloženia
- stanovenie vplyvu rozloženia a počtu buniek na nosnú schopnosť hydrostatického uloženia pri nesymetrickom zaťažovaní
- štúdium vplyvu modifikácie klzných plôch na trenie a opotrebenie v prípade poruchy hydraulického okruhu pri nedostatočnom mazaní

## 5 VEDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÉ HYPOTÉZY

### Vedecká otázka 1:

*„Aké nepresnosti výroby a montáže sú prípustné pre bezpečnú a bezporuchovú prevádzku hydrostatického uloženia?“*

### Pracovná hypotéza 1:

U veľkorozmerných súčastí je komplikované dosiahnuť vysokú rozmerovú a geometrickú presnosť, najmä rovinnosť. Navyše sa z dôvodu veľkých rozmerov delia jednotlivé komponenty na menšie segmenty. V takomto prípade môže dôjsť k vzniku montážnych nepresností, ktoré by mohli spôsobiť porušenie mazacieho filmu tlakového oleja hydrostatického uloženia. Z oblasti hydrostatických uložení bola študovaná topografia povrchov [51] a geometrická presnosť vedení [25, 52], avšak nikto nepopisoval vplyv a rozsah prípustných montážnych a geometrických chýb na správnu funkciu hydrostatického ložiska. Vzhľadom k tomu, že tieto problémy neboli doposiaľ študované a popísané, bola stanovená nasledovná **pracovná hypotéza**:

*„Maximálne prípustné nepresnosti výroby a montáže musia byť nižšie ako projektovaná hrúbka mazacieho filmu tlakového oleja hydrostatického uloženia.“*

### Vedecká otázka 2:

*„Do akej miery je možné zmenou počtu a rozloženia buniek v kapse pri zachovaní celkovej plochy buniek zaistiť rovnobežnosť klzných plôch pri nesymetrickom zaťažení bežca?“*

### Pracovná hypotéza 2:

Nepresnosti vzniknuté nesymetrickým zaťažovaním, alebo preťažovaním určitého miesta otočného stolu môžu viesť k nakloneniu otočného stola, čo by mohlo viesť až k strate nosnej schopnosti hydrostatickej kapsy. Na konštrukciu rozmerných hydrostatických ložísk sa používajú vo väčšine jednobunkové kapsy [2]. Kapsy s viacerými bunkami s restriktormi, ktoré sú napájané rovnakým hydraulickým agregátom by mohli na rozdiel od jednobunkových vykazovať lepšiu schopnosť udržania rovnobežnosti klzných plôch. Doposiaľ bolo vyšetrované naklonenie otočného stola iba pre jednobunkovú kapsu [8], a preto bola stanovená nasledujúca **pracovná hypotéza**:

*„Kapsa s viacerými bunkami je schopná kompenzovať nesymetrické zaťaženie väčšieho rozsahu ako kapsa s jedným vtokovým otvorom s rovnakou plochou ako je celková plocha viacbunkovej kapsy.“*

### **Vedecká otázka 3:**

*„Do akej miery je možné zamedziť poškodeniu klzných povrchov v prípade prerušenia dodávky tlakového maziva počas nestacionárnych podmienok prevádzky vhodnou modifikáciou topografie povrchu?“*

### **Pracovná hypotéza 3:**

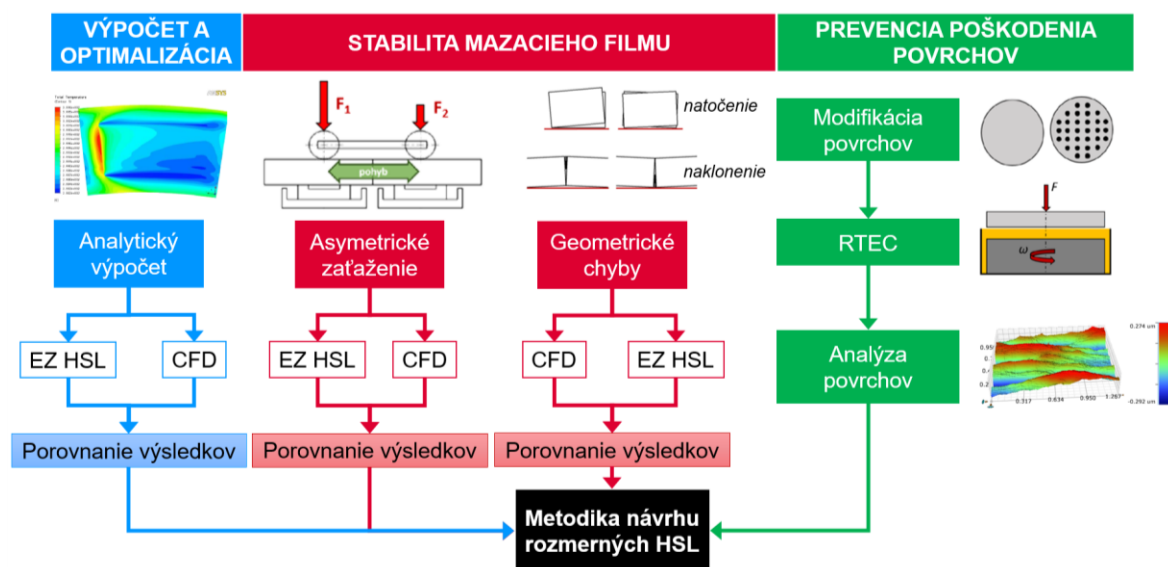
Zahĺbenia v klznej ploche by mali slúžiť ako rezervoáre maziva, z ktorých bude vyťahované mazivo v prípade dosadnutia bežca na klznú plochu kapsy [53]. Bežne používané povlaky môžu mať pri nanosení na veľké plochy problém s adhéziou, a preto sa naskytuje aplikovať iný druh úpravy klzných povrchov, ktorý by nebol náročný na aplikovanie, resp. výrobu a údržbu. Výskum v oblasti konformných textúrovaných povrchov bol primárne zameraný na hydrodynamické ložiská prípadne mechanické tesnenia, [6, 46, 47, 54]. Doposiaľ však nebol študovaný kritický stav dobehu hydrostatického uloženia, ktorý môže nastať 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 nestacionárnych podmienok prevádzky je možné redukovať trenie a znížiť opotrebenie cielenou modifikáciou klzných povrchov.“*

## 6 SPÔSOB RIEŠENIA A POUŽITÉ VEDECKÉ METÓDY SKÚMANIA

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 línii (Obr. 6-1):

- Overenie presnosti výpočtu s nameranými hodnotami z experimentálneho zariadenia hydrostatického ložiska (EZ HSL) a výsledkami z CFD simulácie.
- Stabilita hydrostatického mazacieho filmu s uvážením montážnych nepresností, a pri nerovnomernom zaťažení bežca.
- Kritický stav beztlakového dojazdu ložiska, ktorý môže nastať pri prerušení dodávky tlakového oleja pri nestacionárnych podmienkach.

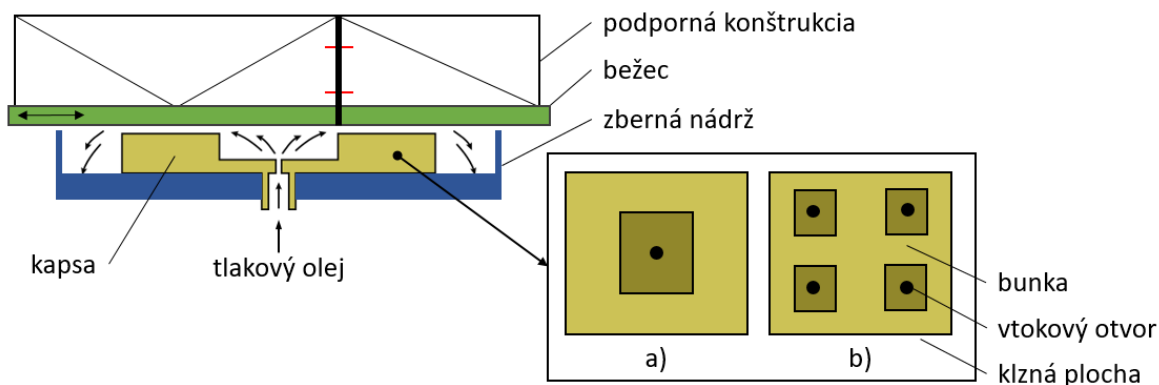


Obr. 6-1 Schéma postupu riešenia dizertačnej práce

### 6.1 Stabilita hydrostatického mazacieho filmu

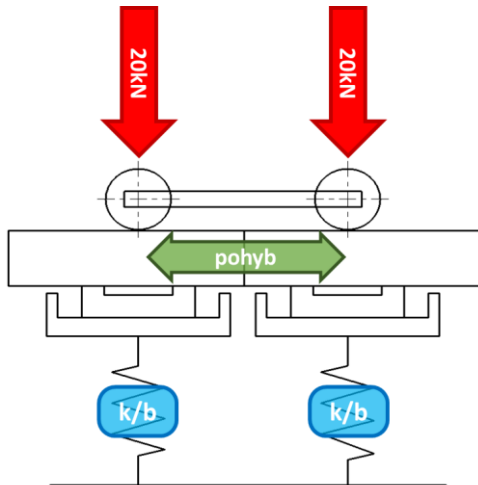
Parametre budú merané na experimentálnom zariadení hydrostatického ložiska (EZ HSL), ktorého vývoj a výroba momentálne prebieha v rámci projektu: *Vývoj stendu hydrostatického uloženia rozmerných konštrukcií v oblasti špeciálnych zariadení*. Ide o modelové zariadenie dvoch segmentov ložiska v mierke 1:10. Rozmery jednotlivých častí zariadenia bolo stanovené na základe vyššie uvedeného analytického výpočtu s optimalizáciou. Zariadenie sa skladá z dvoch vymeniteľných hydrostatických káps s rôznymi konfiguráciami hydrostatických buniek (Obr. 6-2). K dispozícii budú

jednobunkové (a) a štvorbunkové kapsy (b). Bežec s podpornou konštrukciou reprezentujúci otočný stôl je realizovaný podobne, ako konštrukcia v plnej mierke, a preto sa skladá z dvoch dielov, analogicky ako by sa bežec veľkorozmerného ložiska skladal z viacerých segmentov.



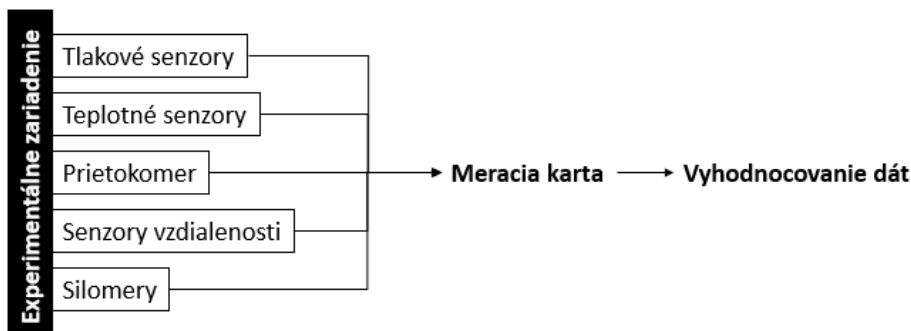
Obr. 6-2 Schéma experimentálneho zariadenia pre hydrostatické ložisko

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. 6-3). Zaťažovanie bude realizované prostredníctvom pojazďových kolies, pričom každé bude vybavené silomerom. Vzhľadom k tomu, že veľkorozmerné ložisko má veľký polomer zakrivenia, ktoré pri testovaní vytýčených vlastností a parametrov nehrá významnú rolu bude experimentálne zariadenie lineárne.



Obr. 6-3 Schéma zaťažovania a uloženia experimentálneho zariadenia

Experimentálne zariadenie bude vybavené senzormi pre vyhodnocovanie všetkých veličín vstupujúcich do analytického výpočtu. Merané veličiny sú schematicky uvedené na Obr. 6-4. 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 0,2 mm postačujúce.

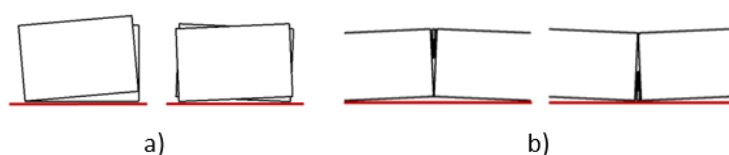


Obr. 6-4 Schéma meracieho uzlu experimentálneho zariadenia

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. Viskozitne-teplotná závislosť zvoleného maziva bude zmeraná pomocou zariadenia RotoVisco 1.

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 EZ HSL budú porovnávané s vyhodnotením výsledkov výpočtového modelu CFD simulácie, na základe čoho bude odľadovaný výpočtový model. Po overení presnosti analytického výpočtu budú následne študované stavy:

- a) s nerovnomerným zaťažením, kedy bude porovnávaná schopnosť samonastavenia rovnobežnosti bežca s kapsami s rôznou konfiguráciou (jednobunkové, štvorbunkové alebo kombinované),
- b) s montážnymi nepresnosťami bežca, ktoré budú umelo vytvorené natočením (Obr. 6-5a) a naklonením (Obr. 6-5b) segmentov bežca voči sebe.



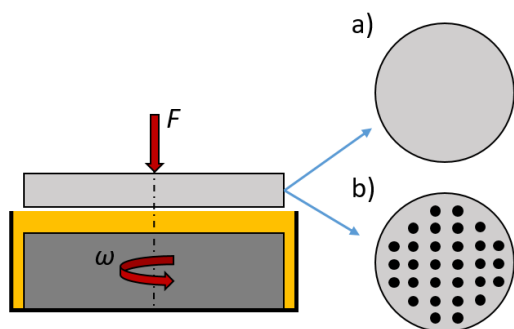
Obr. 6-5 Schematické zobrazenie montážnych nepresností deleného bežca a) natočenie b) naklonenie

## 6.2 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 a
- b) textúrované klzné plochy.

V prvej fáze bude vyvíjané optimálne rozloženie, tvar a spôsob výroby textúry s ohľadom na výrobu rozmerných klzných povrchov. V druhej časti bude vytvorené experimentálne zariadenie pre tribometer RTEC. Experimentálne zariadenie bude spočívať z rotačného telesa s hladkou klznou plochou, ktorá je plne zaplavená mazivom a z prítlačného telesa s hladkou (Obr. 6-6a) alebo textúrovanou (Obr. 6-6b) dotykovou plochou. Vzorky prítlačného telesa môžu byť taktiež z rozličných materiálov pre nájdenie optimálnej kombinácie, prípadne môžu byť testované aj povrchy s povlakmi. **Vyhodnocovanie opotrebenia** klzných povrchov bude realizované na profilometri Bruker Contour GT-X, ktorý využíva svetelnú interferometriu bieleho svetla.



Obr. 6-6 Schéma testovacieho zariadenia pre a) hladké a b) modifikované povrchy

## 6.3 Možné problémy počas riešenia

Počas riešenia sa môžu naskytnúť nasledovné problémy:

1. **Problém:** Nedostatočné financie pre realizáciu testovacieho zariadenia.

**Riešenie:** Podanie projektov, ktoré by zaistili finančnú stránku riešenie, prípadne navrhnutie iného prístupu riešenia danej problematiky.

2. **Problém:** Výsledky CFD simulácie a experimentálnych meraní s montážnymi nepresnosťami sa nebudú zhodovať.

**Riešenie:** Kontrola okrajových podmienok a zmena nastavenia CFD simulácie.

3. **Problém:** Citlivosť snímačov nebude postačujúca pre vyhodnocovanie veličín v požadovanej presnosti.

**Riešenie:** Návrh alternatívneho prístupu vyhodnocovania veličín, alebo vytvorenie finančných prostriedkov z riešenia ďalších projektov.

## 7 ČASOVÝ ROZVRH A ETAPY RIEŠENIA

Podľa vytýčených cieľov a navrhovanej metodike pre riešenie uvedenej problematiky bol vytvorený orientačný časový plán riešenia dizertačnej práce:

Úlohy	2020			2021			2022		
Pedagogická činnosť									
Tvorba prehľadového článku a jeho publikácia									
Zostavenie testovacieho zariadenia									
Experimenty									
Analýza získaných výsledkov									
Príprava CFD simulácie a vyhodnotenie výsledkov									
Tvorba článku a publikácia výsledkov									
Úprava experimentálneho zariadenia a príprava vzoriek									
Experimenty a vyhodnotenie povrchov vzoriek									
Tvorba článku a publikácia výsledkov 2									
Zhodnotenie všetkých dosiahnutých výsledkov									
Spísanie dizertačnej práce									
<b>Obhajoba dizertačnej práce</b>									

* Stabilita mazacieho filmu
* Kritický stav beztlakového dojazdu

## 8 ODÔVODNENIE NUTNOSTI A POTREBNOSTI RIEŠENIA DANEJ PROBLEMATIKY V DANOM ČASE

Bežne používané riešenia uložení rozmerných konštrukcií sú postavené na pojazdovodiacom systéme koľajnic a pojazdových kolies. Operácia techniky s takýmto typom uloženia je sprevádzaná vibráciami, hlukovými emisiami a vyžaduje veľké sily pre polohovanie a otáčanie. Vzhľadom k tomu, že pojazdové kolesá sú v neustálom kontakte s koľajnicou, dochádza postupne k opotrebeniu kontaktných plôch, pričom servis a výmena takýchto ťažkých a rozmerných zariadení je veľmi komplikovaná a finančne náročná. Pri použití hydrostatického uloženia nedochádza ku kontaktu klzných plôch, čím je ich opotrebenie úplne eliminované a nedochádza k vyžarovaniu rušivých hlukových emisií. Navyše dochádza k minimálnemu treniu, ktoré vzniká čisto odporom tlakového oleja, čím sa znižuje energetická náročnosť na polohovanie. Hrubý súvislý mazací film taktiež poskytuje vysokú schopnosť tlmenia. Uloženia pracujúce na princípe hydrostatického mazania by mohli postupne nahrádzať súčasné pojazdovodiacie systémy, ktoré sa používajú v priemysle a koľajovej doprave, zábavnej technike a veľkorozmernej pozorovacej technike.

Doposiaľ realizované štúdie sa zaoberali analýzou a optimalizáciou jednotlivých dielov ťažkých hydrostatických uložení. Prevažne sa publikácie zameriavali na uloženia, ktoré majú otočný stôl vcelku, alebo nedosahovali veľkosti limitované súčasnými možnosťami výroby. U veľkorozmerných uložení je konštrukcia otočného stolu alebo bežca limitovaná výrobnými možnosťami, prepravou alebo montážou. Je nutné poznamenať, že stanovenie maximálnych prípustných nepresností spájaných dielov a nerovností výroby pre správnu funkciu olejovej tlakovej vrstvy môže významne prispieť k spresneniu návrhu rozmerných uložení a hydraulického obvodu. K tomu, aby bol proces vývoja veľkorozmerných hydrostatických uložení presnejší, jednoduchší a dostupnejší, je nutné detailne zhrnúť získané poznatky z výskumu a vývoja v tejto oblasti, vo forme prehľadového článku. Predpokladané výsledky dizertačnej práce by mohli v budúcnosti slúžiť ako opora návrhu veľkorozmerných hydrostatických uložení.

V súčasnej dobe je predkladaná problematika stále aktuálnou témou vzhľadom k neustále prebiehajúcemu výskumu súvisiaceho s hydrostatickými uloženími. Súčasné české národné priority orientovaného výskumu, experimentálneho vývoja a inovácií pre roky 2019-2030, ktorých cieľom je zníženie energetickej náročnosti a vytvorenie zdravšieho prostredia, rovnako podporujú nutnosť riešenia tejto práce.

## 9 SPOLUPRÁCA S INÝMI INŠTITÚCIAMI

V priebehu doktorského štúdia prebieha alebo sa predpokladá spolupráca s nasledujúcimi inštitúciami:

### **Bosch Rexroth**

- Popredný výrobca hydraulických zariadení a javiskových technológií.
- Spoluúčastník projektu zameraného na vývoj experimentálneho zariadenia hydrostatického uloženia.
- Momentálne prebiehajúca spolupráca.

### **VUT FSI**

- Podpora pri tvorbe CFD simulácie.
- Ústav mechaniky telies a biomechaniky / Energetický ústav.

### **TU Wien (Rakúsko)**

- Tribologická výskumná skupina prof. Gachota zaoberajúca sa vplyvom textúry povrchu na mazanie.
- Naplánovaný výmenný pobyt v rámci projektu mobility CEEPUS – júl 2020 s cieľom pre nadviazanie spolupráce pri výrobe textúry trecích plôch hydrostatického ložiska pre kritický stav dojazdu po prerušení dodávky tlakového oleja.

Uvažované inštitúcie pre niekoľkomesačnú zahraničnú stáž, ktoré sa zaoberajú súvisiacou problematikou:

### **Harbin University of Science and Technology (Čína)**

- Dlhoročné skúsenosti s výskumom v oblasti hydrostatických uložení.
- CFD simulácie a experimentálne zariadenia.

### **Shandong University of Science and Technology (Čína)**

- Skúsenosti s vývojom hydrostatických vedení a uložení.
- CFD simulácie, vývoj matematických modelov a experimentálnych zariadení.

### **University of Illinois (USA)**

- Lineárne systémy, numerické simulácie a mechanika kvapalín.

# 10 PREDPOKLADANÉ NÁKLADY SPOJENÉ S RIEŠENÍM A ICH ZDROJE

## 10.1 Predpokladané náklady

Výroba dielov pre testovacie zariadenie	120 000 Kč
Laboratórny materiál	10 000 Kč
Spotrebný materiál	5 000 Kč
Náklady spojené s účasťou na konferenciách	100 000 Kč
Náklady na zahraničnú stáž	200 000 Kč
<b>Celkom</b>	<b>435 000 Kč</b>

+ mzda riešiteľa a ďalšie náklady

## 10.2 Financovanie výskumu

Výskum je aktuálne hrađený z prostriedkov projektu **TN01000071** NCK - Národné centrum kompetencie mechatroniky a chytrých technológií pre strojárstvo, poskytovateľ – TA ČR, 2019-2020, ktorého čiastkovým cieľom je projekt: **TN1000071/2-V19** – Stend hydrostatického uloženia rozmerných konštrukcií v oblasti špeciálnych zariadení. Výstupom čiastkového cieľa bude funkčná vzorka.

**T A** Program  
**Č R** **Národní Centra kompetence**

Pre ďalší výskum a experimentálny vývoj v tejto oblasti bol podaný projekt TA ČR v programe Trend spolu so spoločnosťou Bosch Rexroth, spol. s.r.o., ktorý je zameraný na: „*Výskum a vývoj novej generácie energeticky účinnej hydrostatickej točne s mechatronickými systémami*“ ( **FW01010477**), ktorý v prvom kole dopadol neúspešne a po vykonaní úprav nedostatkov, ktoré sa v projekte vyskytli bude podaný znovu.

**T A**  
**Č R** Program **Trend**

## 11 CHARAKTERISTIKA PREDPOKLADANÉHO VÝSLEDKU RIEŠENIA DIZERTAČNEJ PRÁCE

Pre splnenie požiadaviek Ústavu konštruovania na doktorské štúdium bude vypracovaná dizertačná práca zložená z publikácií v odborných časopisoch. Vyššie popisovaná problematika bude rozdelená na tri publikácie, pričom **aspoň jeden článok musí byť publikovaný v impaktovanom časopise** (výsledok druhu **J<sub>imp</sub>**). Ďalej sú predpokladané články v periodikách evidovaných v databáze SCOPUS (**J<sub>sc</sub>**), prípadne články v recenzovanom časopise (**J<sub>rec</sub>**), alebo v zborníku (**D**). Súčasťou výstupov tejto práce bude aj funkčná vzorka testovacieho zariadenia 1:10 (**G<sub>funk</sub>**).

Zoznam vhodných periodík pre publikáciu výsledkov dizertačnej práce (Tab. 5) bol zostavený s ohľadom na zameranie dizertačnej práce a hodnotiacich kritérií jednotlivých periodík v kategórií MECHANICAL ENGINEERING databáze Web of Science.

Tab. 5 Vybrané periodiká vhodné pre publikáciu výsledkom dizertačnej práce

Názov periodika	IF	5-ročný IF	AIS	kvartál podľa AIS
Journal of Fluids and Structures	3,070	3,254	0,897	Q1
Experimental Thermal and Fluid Science	3,493	3,450	0,802	Q1
Experiments in Fluids	2,443	2,443	0,719	Q1
Wear	2,950	3,315	0,646	Q1
Tribology International	3,517	3,440	0,638	Q1
Journal of Mechanical Design	2,828	3,034	0,619	Q2
Tribology Letters	2,235	2,404	0,563	Q2
Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics	2,163	1,939	0,401	Q2
Tribology Transactions	1,759	1,887	0,387	Q2

V priebehu doktorského štúdia a vypracovania dizertačnej práce sú na základe vytýčených bielych miest a cieľov **predpokladané publikácie:**

- *Design and Optimization of Large Heavy Hydrostatic Bearing Systems – A Review*
- *Optimal Orifice Design for Asymmetrically Loaded Heavy Hydrostatic Bearing with Single/Multi-Recessed Hydrostatic Pad*
- *Case Study: The Influence of Assembly Error on Hydrostatic Bearing Pad Performance*
- *Wear of Hydrostatic Bearing Textured Sliding Surfaces During Hydraulic Circuit Failure*

## 12 BIBLIOGRAFIA

- [1] 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.
- [2] JANG, Sung-Hyun, Young-Hyu CHOI, Soo-Tae KIM, Ho-Sang AN, Hag-Bong CHOI a Jong-Seung HONG. Development of Core Technologies of Multi-tasking Machine Tools for Machining Highly Precision Large Parts. *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*. 2012, roč. 29, č. 2, s. 129–138. ISSN 1225-9071.
- [3] 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.
- [4] WASILCZUK, Michał. Friction and lubrication of large tilting-pad thrust bearings. *Lubricants*. 2015, roč. 3, č. 2, s. 164–180. ISSN 20754442.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] BASSANI, R a B PICCIGALLO. HYDROSTATIC LUBRICATION. *Tribology series*. 1992, roč. 22.
- [10] KHONSARI, Michael M. a Richard E. BOOSER. *Applied tribology*. 1970. ISBN 9780470057117.
- [11] PHILLIPS, Edward H. Hydrostatic bearings. *Production Engineer*. 2010, roč. 44, č. 3, s. 162. ISSN 00329851.
- [12] HAMROCK, Bernard J. *Fundamental of Fluid Film Lubrication Second Edition*. 2004. ISBN 0824753712.
- [13] HARNOY, Avraham. *Bearing design in machinery, Engineering tribology and lubrication*. 2003. ISBN 0824707036.
- [14] 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.

- [15] GHEZALI, Faiza, A. BOUZIDANE a M. THOMAS. 3D Numerical investigation of pressure field of an orifice compensated hydrostatic bearing. *Mechanics and Industry*. 2017, roč. 18, č. 1. ISSN 22577750.
- [16] SHAO, J P, G D LIU, X D YU, Y Q ZHANG, X L MENG a H 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 0036-8792.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [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] 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.

- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] ZHANG, Yanqin, Xiaodong YU, Xiaodong YANG, Guitao SUN, Xiaoyang YU a Zhimin SHI. Viscosity influence research on load capacity of heavy hydrostatic bearing. *Key Engineering Materials*. 2011, roč. 450, s. 63–66. ISSN 10139826.
- [34] 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.
- [35] YU, X D, Y WANG, D F ZHOU, G P WU, W K ZHOU a H W BI. Heat Transfer Characteristics of High Speed and Heavy Load Hydrostatic Bearing. *Ieee Access*. 2019, roč. 7, s. 110770–110780. ISSN 2169-3536.
- [36] 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.
- [37] ZHANG, Yanqin, Xiaodong YANG, Hongmei LI, Hui JIANG, Xiaoyang YU a Zhimin SHI. Research on influence of cavity depth on load capacity of heavy hydrostatic bearing in variable viscosity condition. *Advanced Materials Research*. 2010, roč. 129–131, s. 1181–1185. ISSN 10226680.
- [38] 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.
- [39] YADAV, S K a S C SHARMA. Finite element analysis of tilted thrust pad bearings of various recesses shapes considering thrust pad flexibility. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*. 2016, roč. 230, č. 7, s. 872–893. ISSN 1350-6501.
- [40] 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.

- [41] 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.
- [42] LAI, Ta Hua, Ting Yu CHANG, Ya Lu YANG a Shih Chieh LIN. Parameters design of a membrane-type restrictor with single-pad hydrostatic bearing to achieve high static stiffness. *Tribology International*. 2017, roč. 107, č. September 2016, s. 206–212. ISSN 0301679X.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] WANG, L a S Y JIANG. Centrifugal effects on the dynamic characteristics of high speed hydrostatic thrust bearing lubricated by low viscosity fluid. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part J-Journal of Engineering Tribology*. 2014, roč. 228, č. 8, s. 860–871. ISSN 1350-6501.
- [46] 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.
- [47] ETSION, I. a G. HALPERIN. A laser surface textured hydrostatic mechanical seal. *Tribology Transactions*. 2002, roč. 45, č. 3, s. 430–434. ISSN 10402004.
- [48] LIMING, Zhai, Luo YONGYAO, Wang ZHENGWEI, Liu XIN a Xiao YEXIANG. A review on the large tilting pad thrust bearings in the hydropower units. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, roč. 69, č. September 2016, s. 1182–1198. ISSN 18790690.
- [49] 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.
- [50] LIU, Zhifeng, Yumo WANG, Ligang CAI, Yongsheng ZHAO, Qiang CHENG a Xiangmin DONG. A review of hydrostatic bearing system: Researches and applications. *Advances in Mechanical Engineering*. 2017, roč. 9, č. 10, s. 1–27. ISSN 16878140.
- [51] ZOUPAS, Loukas, Michał WODTKE, Christos I. PAPADOPOULOS a Michał WASILCZUK. Effect of manufacturing errors of the pad sliding surface on the performance of the hydrodynamic thrust bearing. *Tribology International*. 2019, roč. 134, č. January, s. 211–220. ISSN 0301679X.
- [52] ZHA, Jun, Yaolong CHEN a Zhiwei WANG. A tolerance design method for hydrostatic guideways motion accuracy based on error averaging effect. *Procedia CIRP*. 2018, roč. 75, s. 196–201. ISSN 22128271.
- [53] 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.

- [54] 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.

# 13 VEDECKÝ ŽIVOTOPIS

## Osobné informácie

**Ing. Michal Michalec**

- [Michal.Michalec@VUT.cz](mailto:Michal.Michalec@VUT.cz)
- +420 541 143 238
- Technická 2896/2
- 616 69 Brno

## Vzdelanie

- **2019 - súčasnosť**, DSP, FSI, VUT – Konštrukčné a procesné inžinierstvo
- **2017 - 2019**, MSP (Ing.), FSI, VUT – Konštrukčné inžinierstvo
- **2014 - 2017**, BSP (Bc.), FSI, VUT – Základy strojného inžinierstva

## Pracovné skúsenosti

- **2019 - súčasnosť**, Technický pracovník, ÚK OT, FSI, VUT
- **2018**, Pomocný lektor – Konštruovanie a CAD (3CD)
- **2018**, Stáž v technologickom vývojovom centre spoločnosti Adient

## Hlavné oblasti výskumu

- Tribológia a konštruovanie strojov.
- Hydrostatické uloženia.
- Trenie, opotrebenie a tenké mazacie filmy.
- Reológia mazív a chytré kvapaliny.

## Vedecké identifikátory

- h-index (Scopus): 1
- Scopus: <https://www2.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57205496270>
- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8803-9043>

## Projekty

**TN01000071** – TA ČR NCK, 2019-2020. Čiastkový cieľ: TN1000071/2-V19 – Experimentálne zariadenie pre hydrostatické ložisko rozmerných konštrukcií v oblasti špeciálnych zariadení (člen riešiteľského tímu)

## Publikácie

MICHALEC, M., P. SVOBODA, I. KRUPKA M. HARTL, A. VENCL. Investigation of the tribological performance of ionic liquids in non-conformal EHL contacts under electric field activation. *Friction*, 2020, DOI: [10.1007/s40544-019-0342-y](https://doi.org/10.1007/s40544-019-0342-y).

MICHALEC, M., P. SVOBODA, I. KRUPKA, M. HARTL. Tribological Behaviour of Smart Fluids Influenced by Magnetic and Electric Field – A Review. *Tribology in Industry*, 2018, **40**(4), 515-528, DOI: [10.24874/ti.2018.40.04.01](https://doi.org/10.24874/ti.2018.40.04.01)

## Ďalšie relevantné informácie

### Jazyky

- Angličtina – C1
- Nemčina – A2

### Laboratórne zručnosti

- Meranie a vyhodnocovanie topografie povrchu pomocou 3D optického mikroskopu
- Meranie trecích vlastností (PCS Mini Traction Machine, Rtec MFT) a reologických vlastností (RotoVisco1)
- Vyhodnocovanie tenkých mazacích filmov pomocou optickej interferometrie

### Software:

- CAD: AutoCAD, Inventor, Solidworks
- MKP: ANSYS Workbench
- Výpočtový software: Matlab, MathCAD