

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**TEZE  
DISERTAČNÍ  
PRÁCE**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV Konstruování a částí strojů

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Využití povrchových akustických vln pro monitorování  
mazací vrstvy mezi valivými elementy a dráhou  
ložiska

*Ing. Jakub Chmelář*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Konstrukční a procesní inženýrství

Školitel: *Prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Prosinec 2019

Název anglicky:

*Utilization of the Surface Acoustic Waves for the Monitoring of the Lubrication Film Between the Rolling Elements and the Race of the Bearing*

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu konstruování a částí strojů Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: *Ing. Jakub Chmelař*

Ústav konstruování a částí strojů, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
*Technická 4, 166 07 Praha 6*

Školitel: *Prof. Ing. Vojtěch Dinybyl, Ph.D.*

Katedra strojírenství a elektrotechniky,  
ŠKODA AUTO VYSOKÁ ŠKOLA o.p.s.,  
*Na Karmeli 1457 293 01 Mladá Boleslav*

Školitel specialista: *Ing. Karel Petr, Ph.D.*

Ústav konstruování a částí strojů, Fakulta strojní ČVUT v Praze  
*Technická 4, 166 07 Praha 6*

Oponenti:

Prof. Ing. Ladislav Ševčík, CSc.

Prof. Dr. Ing. Miloš Němček

Doc. Ing. Václav Vaněk, Ph.D.

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze,  
Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Konstrukční a procesní inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

Prof. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

předseda oborové rady oboru Konstrukční a procesní inženýrství  
Fakulta strojní ČVUT v Praze

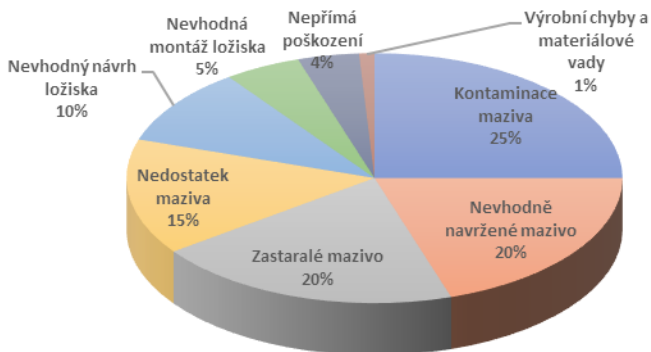
## **Obsah:**

1. Úvod a motivace .....	1
2. Současný stav problematiky.....	2
3. Cíle práce .....	3
4. Matematický model ložiska a mazací vrstvy .....	4
5. Návrh experimentu s využitím matematických modelů .....	10
6. Testovací zařízení .....	14
7. Experimentální snímání mazací vrstvy prostřednictvím povrchových akustických vln .....	15
8. Experimentální měření a interpretace výsledků .....	19
9. Závěr: .....	24
Publikace související s tématem disertace .....	26
Seznam použité literatury v tezích .....	27
Anotace .....	29
Summary.....	30

# 1. Úvod a motivace

Ložiska jsou důležitou součástí strojních zařízení. S využitím principu valení, umožňují přenášet zatížení mezi vzájemně pohyblivými se komponentami s minimálními energetickými ztrátami. Návrh jejich aplikace je obvykle řízen kritériem životnosti za daných provozních podmínek.

V současnosti využívaná a standardizovaná metodika stanovení životnosti ložisek je popsána v normě ISO 281 [5]. Jedním z jejích základních předpokladů je prakticky dokonale mazané ložisko – tedy pouze normálové zatížení dráhy. Pokud tento předpoklad není v splnění, dochází ke zvýšení rizika předčasného selhání. Z toho důvodu řeší norma ISO 281 [5] redukcii životnosti ložiska, vlivem nepříznivých mazacích podmínek, formou série tzv. životnost upravujících koeficientů. Ty společně tvoří tzv. faktor modifikované životnosti. Jednotlivé koeficienty tohoto faktoru obvykle pocházejí z laboratorních měření a numerických simulací. Ne vždy tak reflektují skutečné provozní podmínky. To ukazuje statistika indikující, že až za 75% selhání ložisek jsou problémy s mazáním.



Obr.1 Statistika rozdělení původu selhání ložisek (Upraveno z [11])

**Nosným tématem disertační práce je popis nové metody monitorování mazacího filmu valivých ložisek, prostřednictvím využití vlastností povrchových akustických vln. Mazací elastohydrodynamická (EHL) vrstva vzniká za provozu mezi valivými elementy a dráhou ložiska. Její přítomnost je základním předpokladem dosažení návrhové spolehlivosti ložiska. Navržená metoda vychází z již existujícího způsobu monitoringu stavu mazání, tedy např. přítomnosti maziva v ložisku, nebo jeho čistotě, jehož**

**aplikace však dle provedené rešerše dosud nebyla popsána ve vztahu k přímé detekci a sledování EHL filmu.**

Disertační práce se opírá o původní výsledky publikované autorem v časopisech Tribology International [A5] a ACTA Polytechnica [A4]. Experimentální měření byla provedena na patentově chráněném testovací zařízení [A6], které bylo v rámci této disertační práce navrženo a zrealizováno.

## **2. Současný stav problematiky**

Rešerše byla provedena ve 3 tématických oblastech, kterých se tato práce dotýká

- Problematika modelování ložiska a kontaktu mezi valivými elementy a dráhou
- Problematika módů poškození ložiska vyvolané valivým kontaktem.
- Přehled metod, kterými je možné v současné době snímat mazací vrstvu mezi strojnými komponentami.

### **2.1 Shrnutí rešerše**

Z provedené rešerše byly učiněny dílčí závěry uvedené v následujících bodech:

- Trhliny, které jsou způsobeny problémy s mazáním, a které jsou statisticky nejčastější příčinou selhání ložisek, mají typicky iniciaci v povrchové vrstvě materiálu. Mechanismus jejich vzniku je pak spojen s smykovým namáháním povrchu a nebo s identací cizích těles [1],[3]
- **V současné době neexistuje spolehlivá metoda monitoringu mazací vrstvy v ložiskách.** Konvenční metody založené na vyhodnocení vibrací nejsou pro začínající problémy s mazáním dostatečně citlivé a metody přímého sledování mazací vrstvy jsou vhodné pouze pro modelové případy v laboratorním prostředí. [13]
- **Byla nalezena pouze jedna metoda, která je citlivá na přítomnost maziva v ložisku, umožňuje zachytit jeho změny (např. znečištění vodou) a je komerčně dostupná.** Tato metoda je postavena na sledování přenosových charakteristik aktivně buzených povrchových akustických vln. V literatuře však nebyl nalezen popis způsobu vyhodnocení, který by umožnil tuto metodu použít k monitorování tloušťky mazací vrstvy. [2], [8], [9], [10]
- **Díky nedostupnosti druhé metody, není možné měřením nezávisle verifikovat výsledky sledování mazací vrstvy v ložisku výše popsanou metodou.** Potencionálně aplikovatelná metoda měření odporu kontaktu vyžaduje konstrukční řešení, která jsou složitá a její interpretace závisí na zkušenostech. Tedy, není vhodná jako

verifikační metoda. **Ověření zkoumané metody je tedy vhodné provést formou porovnávání výsledků měření s výsledky získanými metodami matematického modelování a simulacemi.** [3], [13]

- **Pro modelování ložiska, tj. především distribuce vnějšího zatížení na jednotlivé valivé elementy, se nabízí využít již zpracovanou metodiku popsanou v normě ISO/TS 16281.** [6]
- **Pro modelování mazaného kontaktu valivého elementu s dráhou se je pak možné použít plný numerický model mazaného elastohydrodynamického kontaktu, který je popsán Reynoldsovou rovnicí.** [12],[14]
- **Předikci mazacích režimů, ve kterých se kontakt v závislosti na provozních podmínkách pohybuje, lze provést prostřednictvím Talianova vztahu srovnávajícího tloušťku mazacího filmu a společnou drsnost obou těles v kontaktu.** [4], [13]

### 3. Cíle práce

Na základě výsledků rešerše bylo hlavním cílem této disertační práce zvoleno vyvinutí a ověření metody sledování mazacího filmu mezi valivými elementy a dráhou ložiska, prostřednictvím monitorování charakteristik šíření aktivně buzených povrchových akustických vln.

Díličí cíle práce jsou pak definovány v následujících bodech:

- **Vytvořit propojený matematický model válečkového ložiska a mazaného elastohydrodynamického kontaktu, který na základě vstupních provozních, geometrických a rheologických parametrů umožní stanovit tloušťku mazací vrstvy mezi valivým elementem a dráhou.** Model ložiska bude postavený na základech metody která je popsána v normě ISO/TS 16281. Detailní model mazací vrstvy bude řešen s využitím numerického řešení Reynoldsovi rovnice mazaného elastohydrodynamického kontaktu.
- **S využitím modelů ložiska a mazacího filmu vytvořit mapu provozních mazacích režimů ložiska**
- **Provést návrh a konstrukci testovacího stanoviště ložisek, které umožní provádět experimenty zaměřené na sledování mazací vrstvy s využitím metody snímání aktivně buzených povrchových akustických vln.**
- **Navrhnout a provést experimentální měření, s cílem snímání tvorby mazací vrstvy v ložisku za různých provozních podmínek**



**ložiska**, s využitím metody založené na snímání aktivně buzených povrchových akustických vln.

- **Navrhnout a definovat takové vyhodnocení signálu sledovaných charakteristik šíření povrchových akustických vln, které by umožňovalo identifikovat stav mazací vrstvy mezi valivým elementem a dráhou.**
- **Na základě porovnání vyhodnoceného signálu s predikcemi mazacích režimů a s publikovanými výsledky studií chování akustických vln během šíření, provést fyzikální interpretaci výsledků měření.** Cílem interpretace je popis pozorovaných změn v signálu charakteristik šíření povrchových akustických vln v závislosti na stavu mazací vrstvy.

## 4. Matematický model ložiska a mazací vrstvy

Tato kapitola popisuje matematické modely ložiska a mazaného elastohydrodynamického kontaktu, které byly použity k predikci provozních mazacích režimů. Implementace obou popsaných modelů byla provedena v software GNU Octave 4.2.2.

### 4.1 Kinematický model válečkového ložiska

Definice kinematických vztahů mezi jednotlivými částmi ložiska je důležitou komponentou modelu. Odvozené vztahy jsou platné za předpokladu kinematických pohybů valivých elementů v ložisku, které jsou dány jejich valením bez skluzů. Tento předpoklad je za běžných provozních podmínek obvykle splněn. Dále je předpokládána rotace pouze vnitřního kroužku. Vnější kroužek je uvažován statický. Odvozené vztahy jsou pak shrnuty v Tab. 1.

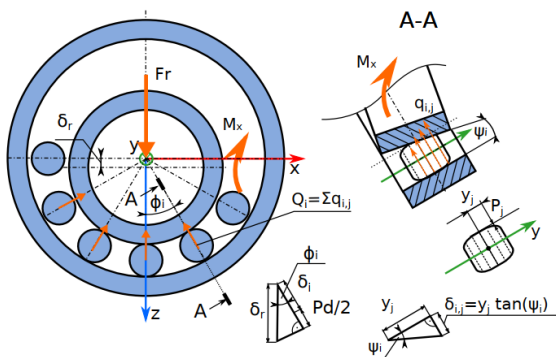
Tab. 1 Kinematické vztahy mezi komponenty ložiska

Popis	Ozn.	Jedn.	Vztah
Rychlost otáčení klece	$\omega_{FTF}$	rad/s	$\frac{\omega_{IR}}{2} \left(1 - \frac{D_{WE}}{D_{PW}}\right)$
Rychlost otáčení valivého elementu	$\omega_{D_w}$	rad/s	$\frac{\omega_{IR} D_{PW}}{2 D_{WE}} \left(1 - \left(\frac{D_{WE}}{D_{PW}}\right)^2\right)$
Relativní rychlost elementu a vnitřní dráhy	$u_s$	mm/s	$\frac{\omega_{IR} D_{PW}}{4} \left(1 - \left(\frac{D_{WE}}{D_{PW}}\right)^2\right)$
Frekvence minutí elementů vnitřní kroužek	$f_{BPI}$	1/s	$\frac{Z f_{IR}}{2} \left(1 + \frac{D_{WE}}{D_{PW}}\right)$
Frekvence minutí elementů vnější kroužek	$f_{BPO}$	1/s	$\frac{Z f_{IR}}{2} \left(1 - \frac{D_{WE}}{D_{PW}}\right)$

## 4.2 Model zatížení jednotlivých elementů valivého ložiska

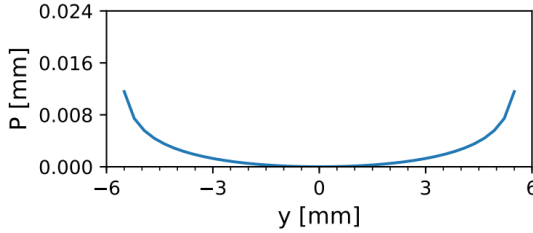
V této části je popsán model válečkového ložiska, který je postaven na základech normy ISO/TS 16281 [6]. Model byl nad rámec této normy rozšířen tak, aby umožňoval modelovat vliv: (i) provozního gradientu teploty v ložisku; a (ii) nalisování vnitřního kroužku na hřídel; na distribuci vnějšího zatížení po jednotlivých valivých elementech.

Základem modelu je rovnováha aplikovaného vnějšího zatížení ložiska s reakčními silami jednotlivých valivých elementů dle Obr. 2. Reakční síly jsou získány ze vztahu mezi tuhostí a deformací jednotlivých valivých elementů.

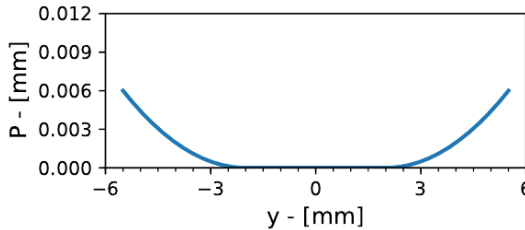


Obr. 2 Ilustrace modelu ložiska definovaného v normě ISO/TS 16281 [6]

Modelování tuhosti valivého elementu s podélnou tvarovou modifikací je provedeno s využitím konceptu tzv. lamin. Váleček je rozdělen na  $n_s$  diskretních dílů - lamin. Ty jsou dle Obr. 2 pro každý váleček  $i$  označeny indexem  $j$ . Každému dílu je pak přiřazena odpovídající tuhost z celkové tuhosti stanovené pro valivý elementem. Potom, dle řezu A-A na Obr. 2, každý díl válečku při deformaci  $\delta_{i,j}$  vyvolá reakční sílu  $q_{i,j}$ . Celková reakční síla valivého elementu je pak součtem dílčích reakčních sil jednotlivých částí. Mikrogeometrie, upravující profil valivého elementu, je popsána prostřednictvím parametru  $P_j$ . Norma ISO/TS 16281 [6] nabízí tzv. logaritmickou modifikaci ukázanou na Obr. 3a. Dále v práci však bude tato modifikace nahrazena parametrizací skutečné geometrie, získané měřením válečku. Její ukázka je na Obr. 3b [A4]. Během výpočtu je pak celková tuhost každého valivého elementu upravována odečtením velikosti modifikace  $P_j$  od deformace každého dílu elementu. Na aktuální tuhosti valivého elementu se pak podílí pouze ta lamina, která jsou při aktuálním zatížením v kontaktu s dráhou [6], [A1], [A4], tedy  $\delta_{ij} > 0$ , jak je ukázáno v rovnici (1).



a) Ilustrace logaritmické modifikace profilu válečku ložiska



b) Parametrizovaná změřená modifikace profilu válečku ložiska

Obr. 3 Ukázky modifikace profilu válečku ložiska

$$\delta_{i,j} = \delta_r \cos(\varphi_i) - \frac{P_d}{2} - 2P_j \quad (1)$$

Ve které  $\delta_r$  je vzájemné posunutí kroužků ložiska a  $P_d$  je radiální vůle. Rovnice rovnováhy pro radiální a momentové zatížení ložiska, prostřednictvím kterých je model řešen jsou definovány následovně (2) a (3):

$$F_r - c_s \sum_{i=1}^Z \left( \cos(\varphi_i) \sum_{j=1}^{ns} \delta_{ij}^{\frac{10}{9}} \right) = 0 \quad (2)$$

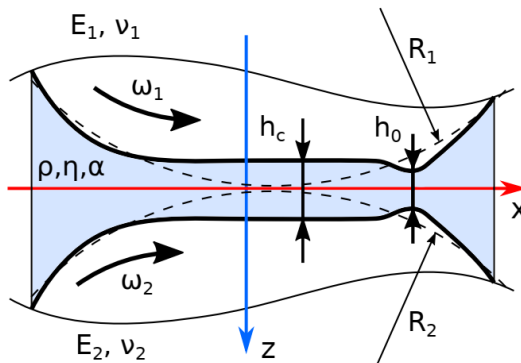
$$M_x - c_s \sum_{i=1}^Z \left( \cos(\varphi_i) \sum_{j=1}^{ns} y_j \delta_{ij}^{\frac{10}{9}} \right) = 0 \quad (3)$$

Ve kterých:  $F_r$  a  $M_x$  vyjadřují vnější zatížení radiální silou a ohybovým momentem v ose x;  $c_s$  je odpovídající konstanta tuhosti diskretního dílu válečku;  $\delta_{ij}$  je deformace dílu j válečku i a  $y_j$  je souřadnice dílu válečku. Obě rovnice jsou řešeny pro takové  $\delta_r$  v rovnici (1) které vyhoví definované rovnováze.

### 4.3 Model tlakového pole a tloušťky EHL mazací vrstvy valivého kontaktu

Model popsáný v následující části práce popisuje tlakové pole a elastickou deformaci těles v kontaktu, při předpokladu tzv. elasto-hydrodynamického (EHL) režimu mazání.

Na Obr. 4 je ilustrován model mazaného kontaktu. Čárkovaně je zobrazena geometrie těles před deformací. Plnou čarou pak typický průběh elastické deformace geometrie v EHL kontaktu. Parametry  $h_c$  a  $h_0$  označují tloušťku mazací vrstvy v centrální části kontaktu a minimální tloušťku filmu na výstupu.



Obr. 4 Model EHL kontaktu a jeho základní parametry

Model tenkého mazacího filmu ve vyšetřované kontaktní oblasti, je definován Reynoldsovou rovnicí [4], [12]. Ta je pro případ liniového kontaktu vyjádřena vztahem (4) [12], [13]. Jedná se o upravený tvar rovnice, který popisuje proudění kapaliny pouze ve směru rovnoběžném s osou  $x$ , jak je ilustrováno Obr. 4. Předpokládá se tedy, že proudění ve směru osy  $y$  a  $z$  má na samotnou tloušťku mazací vrstvy zanedbatelný vliv. Tyto předpoklady velmi dobře popisují situaci ve střední části kontaktu, která je hlavním bodem zájmu modelu. [A4]

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} \right) = 6u_s \frac{\partial(\rho h)}{\partial x} \quad (4)$$

Ve které:  $u_s$  je vzájemná relativní rychlost povrchů ve směru proudění;  $\rho$  je hustota kapaliny;  $\eta$  je dynamická viskozita kapaliny a  $p$  je absolutní tlak v kapalině.

Profil tloušťky mazacího filmu mezi tělesy, včetně příspěvku elastické deformace, je popsán vztahem (5) [12].

$$h(x) = h_c + \frac{x^2}{2R'} + \frac{4}{\pi E'} \int_{-inf}^{inf} \ln \left| \frac{x - x'}{x_0} \right| p(x') dx' \quad (5)$$

Ve kterém  $h_c$  je tloušťka mazací vrstvy ve střední části kontaktu; druhý člen rovnice vyjadřuje nedeformovaný profil obou těles a posledním členem je popsána elastická deformace;  $R'$  je pak společná křivost kontaktních těles v místě kontaktu;  $E'$  je redukovaný modul pružnosti obou těles a  $x'$  je pomocná souřadnice kontaktu pro výpočet elastické deformace.

Dále byly do výpočtu zahruty vlivy změny hustoty a dynamické viskozity s tlakem [12],[13]. Během výpočtu je předpokládán izotermický stav, tedy že nedochází ke změnám teploty, které ovlivňují i další parametry. Tento předpoklad je v případě valivého kontaktu za běžných provozních rychlostí dle dostupných zdrojů možný.

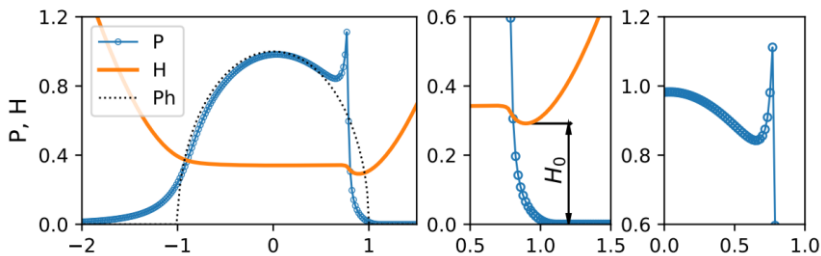
Podmínka rovnováhy mezi vnějším zatížením  $P$  a tlakovým polem  $p(x)$ , uzavírá celý výpočet dle vztahu (6) [12].

$$P = \int_{-inf}^{inf} p(x) dx \quad (6)$$

Její prostřednictvím je v průběhu výpočtu řízeno nastavení konstanty  $h_c$ , tedy tloušťky mazací vrstvy ve střední části kontaktu, aby byl systém v rovnováze.

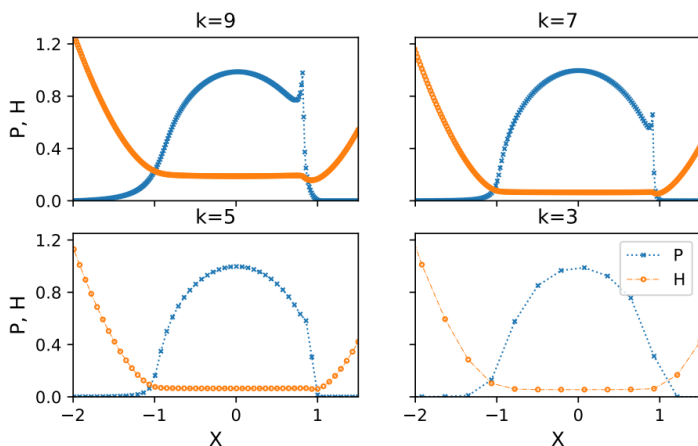
Model mazací vrstvy byl diskretizován prostřednictvím metody sítí (konečných diferencí). [12]. Soustava rovnic pro jednotlivé body sítě byla řešena Newton-Raphsonovou iterační metodou s využitím algoritmu vícenásobné metody – Multigrid, pro urychlení konvergence výpočtu [14].

Typický výstup řešení je ukázán na Obr. 5. Patrný je rozdíl tlakového profilu mazaného kontaktu – modrý a nemezáného kontaktu dle Hertzovi teorie -černý [A4].



Obr. 5 Ukázka výstupu modelu EHL kontaktu. Veličiny jsou vyjádřeny v bezrozměrných jednotkách

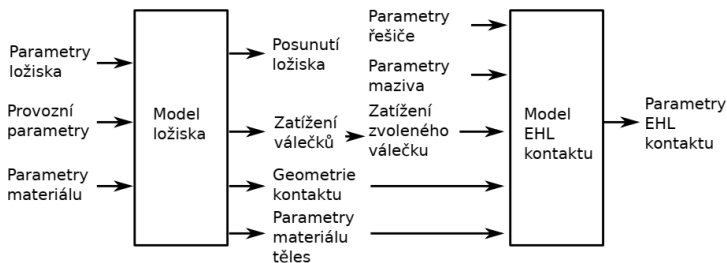
Ukázka postupného řešení úlohy na jednotlivých úrovních sítí v rámci řešení prostřednictvím vícenásobného – multigríd, algoritmu je na Obr. 6.



Obr. 6 Ukázka řešení modelu mazací vrstvy na jednotlivých úrovních (sítích) při řešení metodou multigríd.

#### 4.4 Propojení modelů

Řešení modelů popsaných v této kapitole, tedy radiálního válečkového ložiska a liniového EHL kontaktu, je koncipováno jako jednosměrné. Nejprve je na základě vstupních parametrů vyřešen model ložiska a následně se s využitím výstupu prvního modelu a dalších vstupních parametrů řeší model mazací vrstvy. [A4]. Graficky je tento proces znázorněn na Obr. 7.



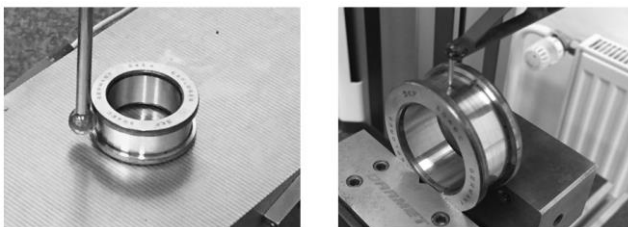
Obr. 7 Schéma propojení modelu ložiska a EHL mazací vrstvy.

## 5. Návrh experimentu s využitím matematických modelů

V této kapitole je popsán návrh experimentu a experimentálního zařízení podpořený matematickým modelováním. V první části kapitoly je popsáno měření a parametrizace vnitřní geometrie testovaného ložiska. Druhá část pak popisuje mapování vlivu provozních podmínek na samotné ložisko a citlivost tloušťky mazacího filmu na tyto změny. Sledována je také citlivost obou modelů na parametry jejichž hodnota musela být buď odhadována, nebo je zatížena velkou nejistotou. Poslední část kapitoly pak popisuje návrh experimentálního stanoviště, jehož parametry byly zvoleny na základě výsledků simulací.

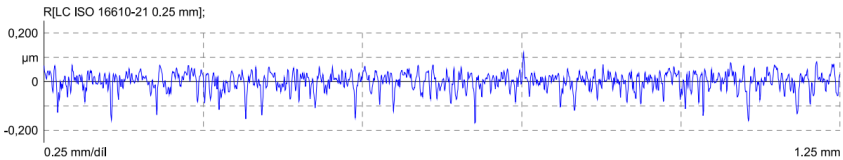
### 5.1 Měření geometrie ložiska

Jako testovací vzorek bylo zvoleno ložisko typ N306. Jedná se o radiální válečkové ložisko, které má axiální pojištění valivých elementů na vnitřním kroužku. Parametry vnitřní geometrie ložiska byly změřeny na souřadnicovém měřicím zařízení *Prismo* od firmy *Carl Zeiss*. Obr. 8 vlevo. Drsnost povrchu valivých drah a elementů pak na kombinovaném zařízení pro měření kontury a drsnosti povrchů *MahrSurf LD 120*, jak ukazuje Obr. 8 vpravo [A4].



Obr. 8 Ukázka z průběhu měření parametrů geometrie ložiska - vlevo měření geometrie; vpravo měření drsnosti.

Profil drsnosti povrchu byl změřen na všech komponentách ložiska. Hodnoty vstupujících do výpočtu byly středními hodnotami získanými vždy alespoň ze 3 nezávislých měření. Ukázka profilu drsnosti válečku je na Obr. 9.



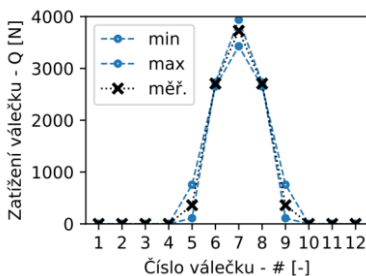
Obr. 9 Ukázka drsnosti povrchu válečku ložiska -  $R_a = 0.025 \mu\text{m}$ .

## 5.2 Studie vlivu parametrů provozních podmínek na ložisko a mazací film

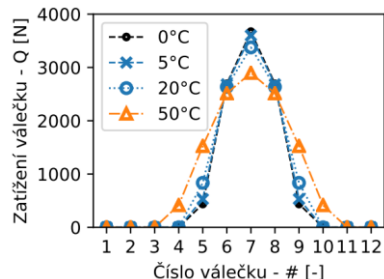
Následující studie, s využitím modelů, byly provedeny s cílem získat informace o citlivosti parametrů ložiska na provozní parametry a podmínky. Specificky se pak tyto studie umožnily získání následujících informací

- Zjištění citlivosti zatížení jednotlivých valivých elementů ložiska na parametry reprezentující výrobní tolerance a teplotní gradient mezi kroužky.
- Zjištění citlivosti koeficientu  $\lambda$ , získaného prostřednictvím modelu EHL kontaktu, na parametry maziva, provozní podmínky ložiska, teplotu a hodnotu drsnosti povrchu.
- Vytvoření mapy mazacích režimů ložiska pro vybraný rozsah provozních podmínek a parametrů maziv.

Ukázané grafy ukazují předpokládaný vliv výrobních tolerancí ložiska na zatížení jednotlivých elementů – Obr. 10; a dále vliv teplotního gradientu mezi kroužky, při předpokladu teplejšího vnitřního kroužku – Obr. 11



Obr. 10 Vliv výrobních tolerancí ložiska na zatížení jednotlivých elementů.

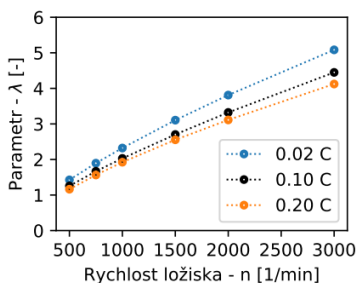


Obr. 11 Vliv teplotního gradientu na zatížení jednotlivých elementů .

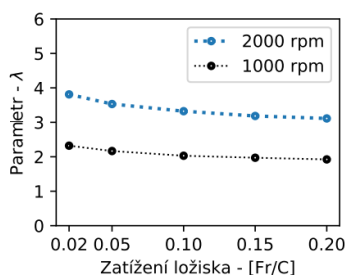


Zjištěna byla relativně nízká citlivost distribuce zatížení v ložisku na výrobní parametry (vnitřní vůle, nalisování). Je proto možné během experimentu zaměřovat vzorky od jednoho výrobce, bez ztráty opakovatelnosti. Stejně tak bylo ukázáno, že za standardních provozních podmínek, kdy je rozdíl teplot kroužků ložiska  $<10^{\circ}\text{C}$ , nemá gradient teplot významný vliv na změny zatížení jednotlivých elementů, tedy tento vliv může být zanedbán [A4].

Další studie ukazují vliv zatížení a rychlosti ložiska na režim mazání, respektive parametr  $\lambda$ . Níže ukázané grafy indikují dominantní vliv rychlosti, což je patrné na Obr. 12. Méně jej pak ovlivňuje zatížení, což ukazuje Obr. 13.

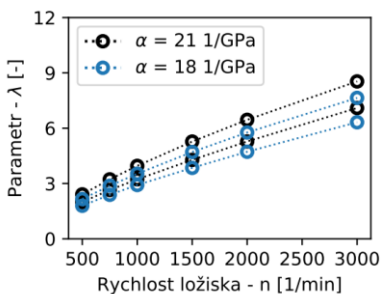


Obr. 12 Vliv rychlosti ložiska na parametr  $\lambda$  pro olej VG 46

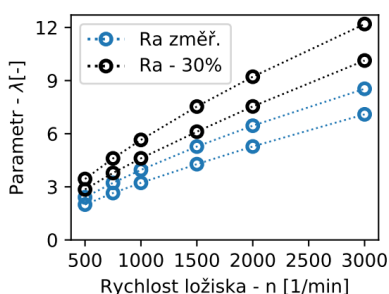


Obr. 13 Vlivu zatížení ložiska na parametr  $\lambda$  pro olej VG 46

Parametr závislosti viskozity maziva na tlaku -  $\alpha$ , který byl v rámci výpočtu volen na základě studie odborné literatury, pak dle výstupu studií na Obr. 14 přináší pouze malou chybu do predikce. To naopak drsnost, u které může dojít během zábehu až k 30% redukci, může zcela zásadně ovlivnit provozní režimy ložiska - Obr. 15 [A4].

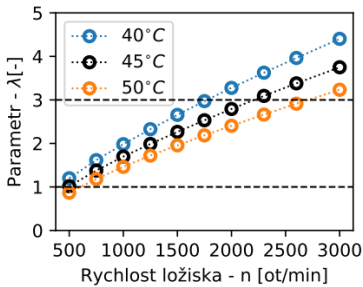


Obr. 14 Vliv odhadovaného parametru maziva  $\alpha$  na parametr  $\lambda$  ložiska pro olej VG 100

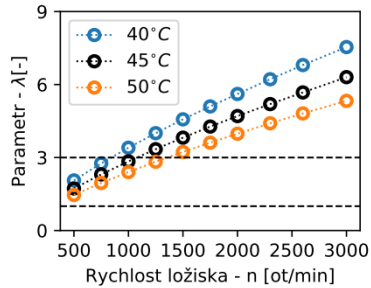


Obr. 15 Vliv drsnosti povrchů ložiska na parametr  $\lambda$  ložiska pro olej VG 100

Zcela zásadní vliv teploty pak pro viskozity maziv VI 46 a VI 100 ukazují Obr. 16 a Obr. 17. V těch je patrný významný posuv rychlosti přechodu hraniční hodnoty koeficientu  $\lambda = 3$  s narůstající teplotou.



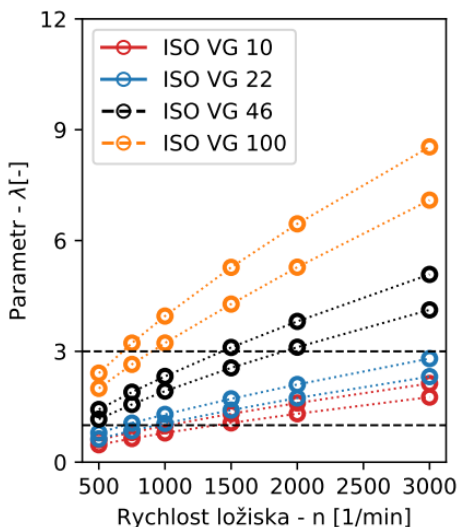
Obr. 16 Vliv teploty maziva na parametr  $\lambda$  ložiska pro olej VG 46



Obr. 17 Vliv teploty maziva na parametr  $\lambda$  ložiska pro olej VG 100

Posledním výstupem pak byla kompletní mapa mazacích režimů ložiska ukázaná na Obr. 18. Spodní křivka pro každou ze zvolených viskozit ukazuje průběh při zatížení 0.02 C, horní pak při 0.2 C. Jasně patrné je to, že při použití maziva VG 10 a VG 22 není možné očekávat dosažení EHL režimu mazání. S olejem o viskozitě VG 46 je přechod predikován při 1650 ot/min a u oleje VG 100 již při 700 ot/min [A4].

Díky provedeným studiím bylo ukázáno, že odhad parametru závislosti viskozity na tlaku -  $\alpha$ , v rámci mezi uvedených pro dané typy olejů v literatuře, může mírně ovlivnit predikci koeficientu  $\lambda$ . Avšak v rámci prováděných experimentů jej neovlivní tak, že by docházelo k výraznému posunutí provozních bodů mezi mazacími režimy. Teplota naopak, dle předpokladů, hraje pro provozní režimy zcela zásadní roli. Pro mapování mazacích režimů bude použit předpoklad provozu ložiska při konstantní teplotě maziva 40°C, což bude muset být v rámci experimentů jeden z kontrolovaných parametrů. Větší nejistota do predikce mazacích režimů ložiska tak přináší pouze vliv záběhu na drsnost kontaktních povrchů, kterou není možné s dostatečnou přesností kontrolovat.



Obr. 18 Mapa mazacích režimů ložiska N306 pro teplotu olejů 40°C

## 6. Testovací zařízení

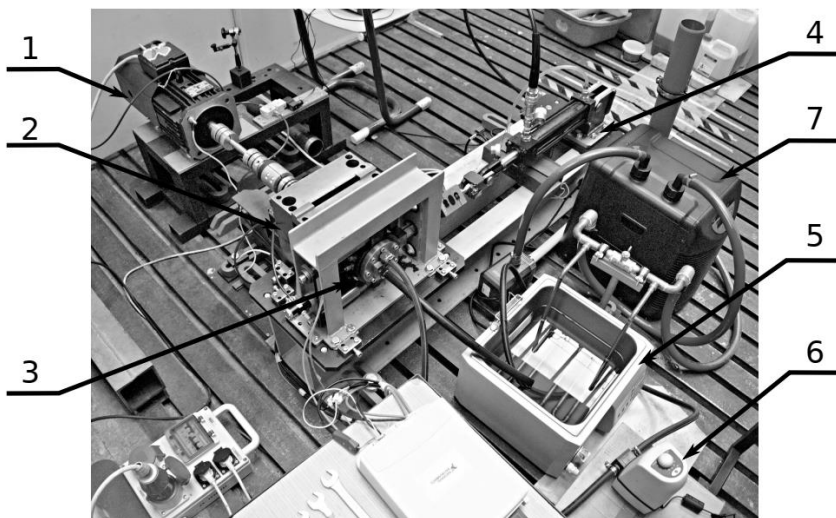
Pro experimentální část této práce bylo vyvinuto a postaveno testovací zařízení, jehož hlavní části byly následně ochráněny národním patentem [A6]. V této kapitole je testovací zařízení představeno, jsou popsány specifické požadavky, vyplývající z charakteru experimentů a je prezentováno jejich technické řešení.

Požadavky na parametry a vlastnosti zařízení byly odvozeny z provedených simulačních studií. Testovací zařízení by mělo být navrženo tak, aby umožnilo provozovat ložisko v podmínkách, kdy dle provedených studií dochází ke změnám mazacích režimů. Dalším obecným požadavkem je zajištění a dodržení základních předpokladů, na kterých byly modely postaveny. Jde např. o čistě radiální zatížení ložiska, a nebo kontrolu teploty ložiska a oleje. Konkrétní požadavky jsou pak vyjmenovány v bodech níže.

- Zatížení ložiska radiální silou do velikosti 10 kN (odpovídá 0.17 C pro testované ložisko).
- Kontinuálně říditelná rychlost ložiska v rozsahu do 3000 ot/min.
- Průtokové olejové mazání umožňující provoz s oleji v rozsahu viskozity 1 mm<sup>2</sup>/s - 120mm<sup>2</sup>/s a s řízením průtoku oleje v rozsahu 0-1 l/min.
- Řízení a kontrola teploty oleje v zásobníku s přesností ±1°C.

- Uložení testovaného ložiska s kompenzací možných mimo-osých (parazitních) zatížení.
- Monitoring teploty ložiska na vnějším a vnitřním kroužku.
- Monitoring radiálního zatížení a rychlosti.

Postavené testovací zařízení se pak dle fotografie na Obr. 19 skládá z následujících klíčových komponent: hnacího AC motoru řízeného v servo režimu – **pozice 1**; domků s tandemem kuželíkových ložisek pro uložení hnacího hřídele – **pozice 2**; domku s testovaným ložiskem – **pozice 3**; systému radiálního zatížení s vloženým tenzometrickým snímačem síly a dvěma kulovými klouby – **pozice 4**; olejového rezervoáru s aktivním řízeným ohříváním oleje – **pozice 5**; membránového olejového čerpadla – **pozice 6**; a chladičho zařízení pro odběr přebytečného tepla z oleje – **pozice 7**.



Obr. 19 Fotografie testovacího zařízení. Popisky v textu

Konkrétní technické řešení jednotlivých částí je pak blíže popsáno v disertační práci a v autorových článcích [A2], [A3].

## 7. Experimentální snímání mazací vrstvy prostřednictvím povrchových akustických vln

Kapitola popisuje experimentální snímání mazacího filmu. Je tedy přímo navázána na hlavní cíl této práce. Podstatná část, včetně závěru této kapitoly, byla publikována v impaktovaném časopise [A5]. Úvod kapitoly je věnován

přehledu typů vlnění v tělesech a na rozhraní těles a kapalin. Dále je popsána použitá metoda a jsou definovány nástroje jejího vyhodnocení. Další část pak popisuje jednotlivé experimenty včetně jejich výstupů. Závěr kapitoly je pak věnován interpretaci výsledků.

## 7.1 Klasifikace vlnění v kapalinách a tělesech

V této kapitole jsou shrnuty základní vlastnosti vybraných typů vlnění v tělesech, na povrchu a na rozhraní mezi tělesy. Tato kapitola je jedním z pilířů interpretace výsledků měření. V rámci této kapitoly byla s využitím odborné literatury [8] a dalších, provedena charakterizace níže uvedených typů vlnění:

Prostorové vlny v tělese:

- Podélné vlnění P-vlny
- Příčné vlnění S-vlny

Povrchové vlny na rozhraní těles:

- Rayleighovy vlny
- Lambda vlny

Povrchové vlny na rozhraní těles a kapaliny

- Obecné Rayleighovy vlny
- Stoneleyovy vlny
- Scholteovy vlny

## 7.2 Zařízení pro buzení a snímání povrchových akustických vln

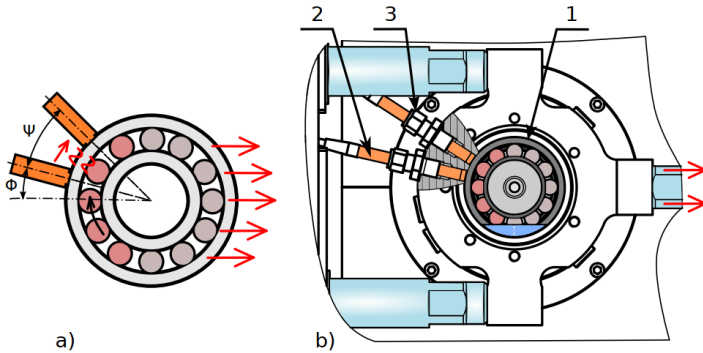
Pro buzení a snímání povrchových akustických vln bylo v popisovaném experimentu použito zařízení, dodávané pod obchodním názvem BeMoS One, od společnosti BestSens AG, Coburg.



Obr. 20 Fotografie zařízení BeMoS One.

Zařízení se dle Obr. 20 skládá ze samostatného kontroléru, který řídí veškeré operace spojené s buzením a snímáním akustických vln a z dvojice identických

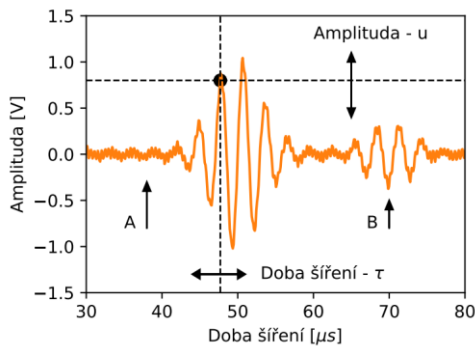
piezoelektrických (PZT) elementů, z nichž jeden slouží k buzení povrchových vln a druhý k jejich snímání. Při snímání musí být oba PZT elementy kontaktně spojeny s vnějším kroužkem ložiska, jak ilustruje Obr. 21 a).



Obr. 21 a) Ilustrace umístění senzorů na ložisku. b) Uložení ložiska během testování

### 7.3 Parametry buzených akustických vln

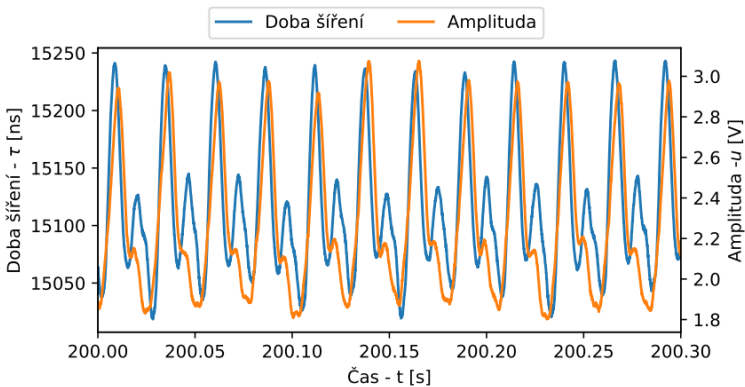
Buzení akustických vln probíhá v impulsích, které jsou tvořeny vlnou o jedné fázi s frekvencí 350 kHz. Impuls má délku 14 ms a je amplitudově modulován do tvaru Gaussovi křivky. Schématicky je impuls ukázán na Obr. 22. Impulsy jsou pravidelně emitovány s frekvencí 10 kHz. Základním excitovaným módem je antisymetrický mód Lambda vlny- A0. Buzení a snímání vln je velmi přesně synchronizovaný proces, díky kterému je pro každý emitovaný impuls možné měřit dobu šíření vlny od okamžiku vybuzení [A5].



Obr.22 Ilustrace zaznamenaného signálu akustické vlny

Otáčení ložiska, respektive přechod valivých elementů mezi vysílačem a senzorem vyvolá, interakci vln s valivými elementy, amplitudovou modulaci

signálu v obou snímaných charakteristikách. Jak je ukázáno na průběh signálu zaznamenaného během rychlosti otáčení ložiska 500 ot/min, při použití maziva VG 46, na Obr. 23.



Obr. 23 Záznam průběhu amplitudy a doby šíření vlny při otáčení ložiska

## 7.4 Nástroje vyhodnocení signálu

Z obou výše popsaných charakteristik povrchových akustických vln, se tato práce dále omezuje na analýzu doby šíření akustické vlny –  $\tau$  [ns]. Volba doby šíření, jako hlavního ukazatele pak byla učiněna z důvodu nižší citlivosti veličiny na stav a kvalitu kontaktu PZT elementu s vnějším kroužkem ložiska.

Signál získaný během měření byl analyzován s využitím následujících popisujících charakteristik: Minimální hodnota, Maximální hodnota, Střední hodnota, rozptyl normalizovaný střední hodnotou a střední hodnotou normalizovaný rozdíl extrémních hodnot signálu nazvaný modifikovaný Crest Factor. Poslední popisující charakteristikou byla entropie dle definice C.E. Shanona, která popisuje míru neurčitosti (náhodnosti jevů) v signálu [A3].

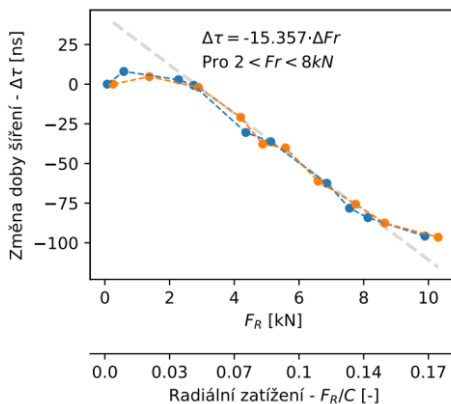
Většina vyhodnocení probíhala na úseku dat, pro který byla vypočtena jediná charakterizující hodnota sledované statistiky. V případech měření, která probíhala při proměnné rychlosti, avšak s konstantním zrychlením, byly výše popsané nástroje vyhodnocení aplikovány na data po vzájemně se nepřekrývajících oknech, jejichž délka byla řízena změnou rychlosti

## 8. Experimentální měření a interpretace výsledků

Jednotlivá experimentální měření a definice testů byly navrženy tak, aby umožnily postupně získávat informace o chování povrchových akustických vln za konkrétních provozních podmínek a umožnit jejich systematické studium.

### 8.1 Vliv radiálního zatížení na změnu doby šíření akustických vln při zastaveném ložisku

Cílem testu bylo zjištění vlivu radiálního zatížení ložiska na změnu doby šíření povrchových akustických vln při zastaveném ložisku. Výstup, který indikuje lineární odezvu je pak ukázán na Obr.24. [A3]



Obr. 24 Změna doby šíření akustické vlny v závislosti na zatížení ložiska

### 8.2 Mapování odezvy doby šíření povrchových akustických vln na změnu provozních podmínek ložiska

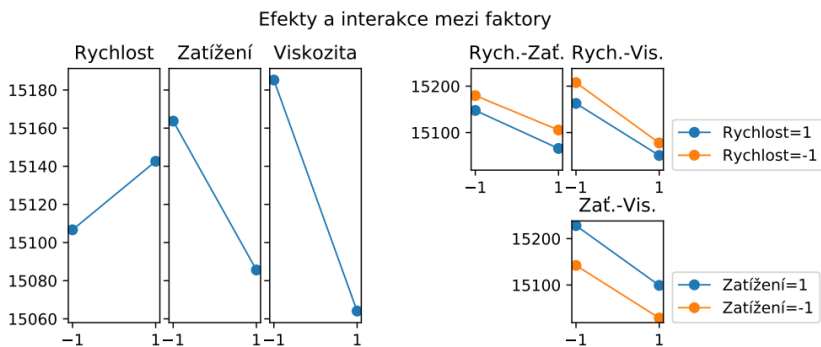
Navazující experiment byl proveden k získání odezvy doby šíření akustické vlny na provozní podmínky ložiska. Vzhledem k existenci více faktorů, které mohou mít vliv na šíření akustických vln během provozu byl pro jejich komplexní zmapování proveden experiment dle metodiky: Design of Experiment, konkrétně pak metodou: vícefaktoriální experiment s dvěma úrovněmi faktorů. Faktory experimentu byly zvoleny: rychlost ložiska, zatížení ložiska a viskozita maziva. Řazení experimentu a volba hladin faktorů pak byla provedena dle schématu v Tab. 2.



Tab. 2 Faktory, úrovně a řazení experimentu

Test	Faktory		
	Rychlost	Zatížení	Viskozita
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	-1	1	-1
4	1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	-1	1	1
8	1	1	1

Výsledné efekty získané zpracováním výsledků jsou pak ukázány na Obr. 25.



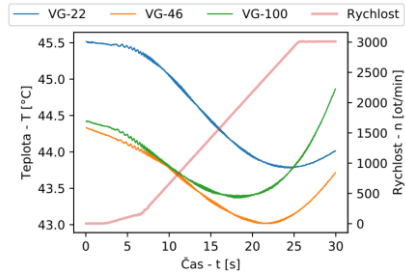
Obr. 25 Efekty faktorů na střední hodnotu signálu zpoždění

Z nich je patrné, že při zvýšení rychlosti dochází k růstu střední hodnoty signálu. Zvýšením zatížení naopak k poklesu této hodnoty. Zvýšení viskozity pak dle získaných efektů vede ke snížení doby šíření. Faktor viskozity byl ale zatížen systémovou chybou vyplývající z provádění experimentu, kdy během výměny oleje docházelo k manipulaci se senzory a proto získaný efekt byl vyhodnocen jako málo směrodatný a bude dále řešen u dalších experimentů.

### 8.3 Vliv rychlosti na dobu šíření akustické vlny za podmínek konstantní teploty

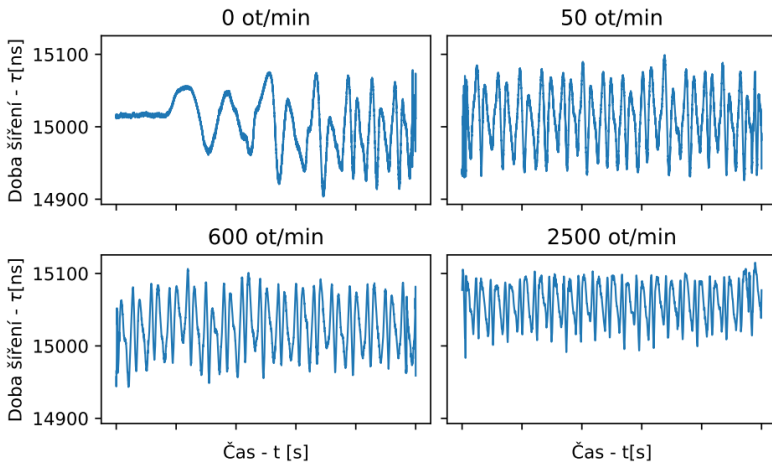
Následující experiment byl zaměřen na sledování vlivu rychlosti otáčení ložiska na snímání signálu doby šíření povrchových akustických vln. Během jednotlivých testů ložisko procházelo rozjezdovými rampami ze zastaveného stavu až do rychlosti 3000 ot/min za podmínek konstantního zrychlení

150 ot/min/s. Zatížení ložiska bylo během testů konstantní na hodnotě odpovídající 0.17 C. Podmínky experimentu, během kterého každý test trval přibližně 20 s, byly navrženy tak, aby teplota obou kroužků ložiska zůstávala v úzkém intervalu do 45°C. To ilustruje Obr. 26.



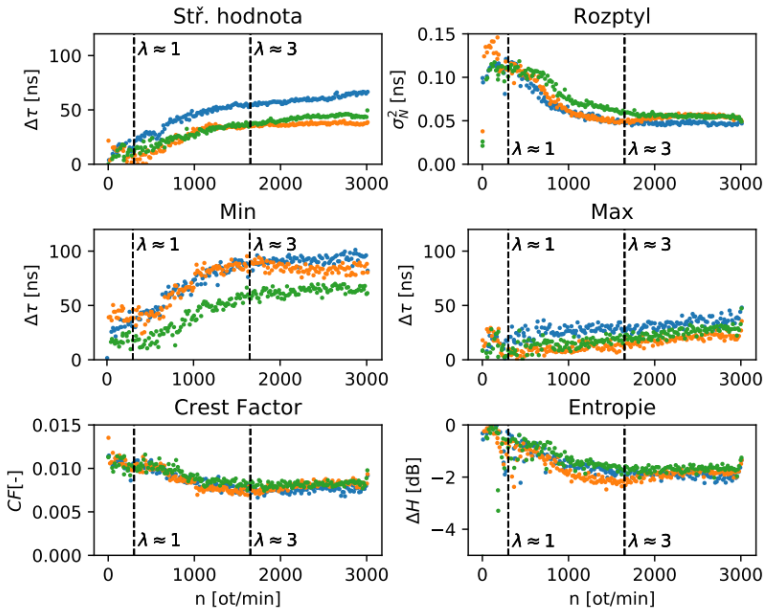
Obr. 26 Průběh teploty vnitřního kroužku ložiska během experimentů

Experimenty byly provedeny s oleji VG 22, VG 46 a VG 100. Pro každý vždy v počtu 3 opakování. Kontrolním případem pak byly testy s nemazaným ložiskem, které sloužily k porovnání a interpretaci.



Obr. 27 Časový záznam signálu na 4 rychlostních hladinách pro olej VG 46.

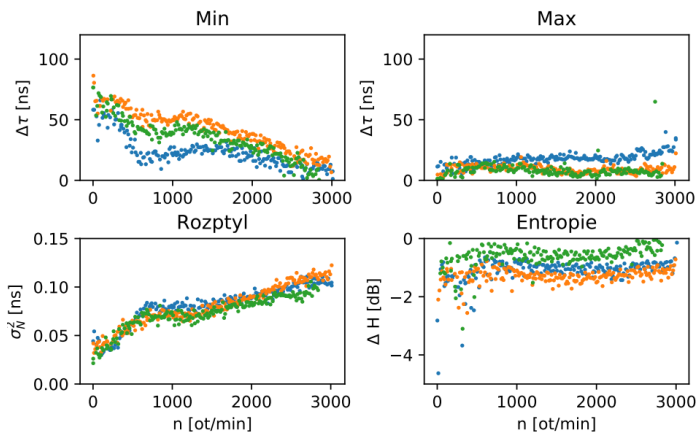
Obr. 27 ukazuje vývoj signálu doby šíření během rozjezdové rampy. Zejména patrné jsou změny v minimální a maximální hodnotě signálu s rychlostí. Tyto změny jsou pak v závislosti na rychlosti ukázány prostřednictvím vyhodnocovaných charakteristik na Obr. 28.



Obr. 28 Vyhodnocené záznamy popisující charakteristiky signálu pro olej VG 46, doplněné o predikované hodnoty koeficientu  $\lambda$ , které byly získány prostřednictvím matematických modelů.

Na Obr. 28 je ukázan již zpracovaný signál ze 3 rozběhových ramp, provedených s olejem VG 46. Jednotlivé grafy jsou navíc doplněny o predikované hodnoty koeficientu  $\lambda$ , které byly získány prostřednictvím matematických modelů. První nápadnou charakteristikou průběhů je poměrně vysoká opakovatelnost měření mezi jednotlivými opakováními. Dále, prakticky u všech ukázaných průběhů, je možné vysledovat 3 zóny, které kopírují predikované hodnoty koeficientu  $\lambda$  a tedy s vysokou pravděpodobností implikují změny mazacích režimů. Zóny jsou definovány takto [A3]:

- $\lambda < 1$ : zóna s vysokou neurčitostí signálu, která je charakteristická vyšší hladinou normalizovaného rozptylu a entropie.
- $1 < \lambda < 3$ : zóna konstantní změny. Bližším zkoumáním grafů označených MIN a MAX je možné zachytit, že dochází k růstu především minimální hodnoty signálu, která má za následek relativně prudký pokles rozptylu a růst střední hodnoty. Podobně také dochází k poklesu entropie.
- $\lambda > 3$ : zóna nízké citlivosti charakteristik minimální hodnoty signálu, rozptylu, Crest Factoru a entropie na změnu rychlosti.



Obr. 29 Vyhodnocené záznamy popisující charakteristiky signálu pro nemazané a vyčištěné ložisko.

Na Obr. 29 jsou ukázány záznamy z kontrolních experimentů provedených s vyčištěným ložiskem. Na první pohled patrným rozdílem je odlišný průběh charakteristiky minimální hodnoty signálu, kdy dochází k jejímu poklesu s rostoucí rychlostí. Naopak maximum signálu je v případě nemazaného ložiska prakticky na rychlosti nezávislé. Hodnota změny entropie také zůstává v průběhu všech běhů experimentu na konstantní hodnotě. Chování rozptylu je pak odvozeno od chování maximální a minimální hodnoty.

Z provedených pozorování na Obr. 27, které jsou blíže popsány a analyzovány v [A3] lze konstatovat, že průchod valivých elementů mezi vysílačem a senzorem akustických vln vyvolá modulaci signálu. Pokud je přítomno mazivo, dochází ke změnám především minimální hodnoty signálu. Maximum pak pozvolna s rychlostí roste. Pokud ložisko není mazáno, minimum signálu klesá avšak maximum zůstává prakticky konstantní. Z těchto pozorování pak lze vyslovit hypotézu

- Minimum signálu nastává, když se valivý element nachází mezi emitorem a senzorem, což podporuje pozorování provedené při zastaveném ložisku a také změny v chování minimální hodnoty s rychlostí
- Maximum signálu je pak v okamžiku, kdy se může vybuzená akustická vlna pohybovat mezi emitorem a senzorem bez kontaktu s valivým elementem, tedy v mezeře mezi elementy. Toto tvrzení je pak podpořené jeho pozorovanou praktickou nezávislostí na

koeficientu  $\lambda$ . Mírný lineární růst s rychlostí je pak přisuzován hromadění maziva pod klecí mezi elementy za vyšších rychlostí.

Vzhledem k tomu, že velmi podobný průběh signálu, i shoda identifikovaných zón s predikovanými hodnotami byla zaznamenána u všech měření s mazivy, a experimenty s vyčištěným ložiskem mají velmi odlišný průběh, byla provedena následující interpretace pozorovaných jevů [A3]:

- $\lambda < 1$ : v oblasti malých rychlostí nemá mazací film dostatečnou tloušťku k nesení zatížení, dochází tím pádem k přímému kontaktu mezi valivými elementy a dráhou. Rychlost šíření vlny je pak dána především obecnými Rayleigho vlnami, které jsou popsány na rozhraní kontaktů tuhých těles.
- $1 < \lambda < 3$ : zvyšující se tloušťka mazací vrstvy v kontaktu pak postupně vede k transformaci vln na pomalejší módy, které jsou typické pro rozhraní pevného tělesa s viskózním nebo resp. visko-elastickým mediem. Lineární průběh změny je pak dán zvyšující se četností transformovaných vln s rostoucí tloušťkou maziva. Tento bod také vysvětluje mírné rostoucí chování maximální hodnoty s rychlostí
- $\lambda > 3$ : v oblasti úplného oddělení povrchů mazací vrstvou existuje poměrně stabilní prostředí pro šíření vln. Vzhledem k vlnové délce buzeného módu A0, která je přibližně 4~mm, je tloušťka vrstvy  $h_0 < 1 \mu\text{m}$  velmi malá. Její růst v testované oblasti tak nemá vliv na disperzní chování, a proto se charakteristiky v této oblasti jeví jako rychlostně nezávislé.

## 9. Závěr:

**Hlavním výsledkem disertační práce je popis nově vyvinuté metody vyhodnocení snímaného signálu aktivně buzených povrchových akustických vln Lambda. Díky té je možné provést hodnocení stavu mazací vrstvy a režimu mazání mezi valivým elementem a dráhou ložiska, což doposud nebylo prakticky možné.** Metoda je založena na statistickém vyhodnocení pravidelných změn doby šíření akustické vlny prostřednictvím charakteristik jako je lokální maximum a minimum signálu, normalizovaný rozptyl nebo změna entropie. Důležitým prvkem v popisu metody vyhodnocení signálu je fyzikální interpretace pozorovaných změn v analyzovaných charakteristikách, s ohledem na stav mazací vrstvy. Tato interpretace byla provedena s oporou o dostupné zdroje v odborné literatuře.

**Prezentovanou metodu monitorování je možné použít prakticky u všech valivých ložisek mazaných olejem.** Jedinou, avšak snadno řešitelnou překážkou pro průmyslové nasazení metody u ložisek, je nutnost přímého

kontaktem emitoru a senzoru akustických vln s vnějším kroužkem. Pro správnou interpretaci dat je výhodné pro každý jednotlivý snímaný případ provést referenční měření při různých rychlostech a zatížení. Tento krok umožní vytvořit celkový přehled možných změn, se kterými je pak možné provozní měření porovnávat. **Rozhodnout o provozním stavu ložiska pouhou analýzou signálu je při současných znalostech metody zatíženo velkým rizikem nesprávné interpretace, a to i navzdory diskusi pozorovaných znaků specifických pro režim mezního mazání.** Zmíněné riziko nesprávné interpretace plyne především z nedostatečně popsanych konkrétních projevů přímého kontaktu kroužku s valivým elementem, a také kvůli prozatím nejednoznačným vlivům teploty na výsledky. Oba tyto poměrně specifické body již byly mimo rozsah této disertační práce a jsou možným pokračováním výzkumu.

**Všechny definované cíle práce se podařilo bezesbytku splnit.**

## Publikace související s tématem disertace

[A1] Chmelar, J.; Dinybyl, V.: Analytical Bearing Model for Analysis of Inner Load Distribution and Estimation of Operational Lubrication Regime. In Proceedings of 58th International Conference of Machine Design Departments – ICMD 2017, Česká zemědělská univerzita v Praze. Technická fakulta, 2017, ISBN 978-80-213-2769-6, s.118–123.

[A2] Chmelar, J.; Mossoczy, P.; Dinybyl, V.: Rolling Element Bearing Test Rig Development. In Proceedings of 58th International Conference of Machine Design Departments– ICMD 2017, Česká zemědělská univerzita v Praze. Technická fakulta, 2017, ISBN 978-80-213-2769-6, s. 114–117.

[A3] Chmelar, J.; Mossoczy, P.; Dinybyl, V.: Bearing Test Rig: Setting Up and Lesson Learnt. In Proceedings of the ICMD 2018, University of Zilina. Faculty of Mechanical Engineering, Springer International Publishing, 2020, ISBN 978-3-030-33145-0, str. V přípravě.

[A4] Chmelar, J.; Petr, K.; Mikes, P.; Dinybyl, V.: CYLINDRICAL ROLLER BEARING LUBRICATION REGIMES ANALYSIS AT LOW SPEED AND PURE RADIAL LOAD. Acta Polytechnica, ročník 59, č. 3, jul 2019: s. 272–282, doi:10.14311/ap.2019.59.0272.

[A5] Chmelar, J.; Petr, K.; Mossoczy, P.; Dinybyl, V.: Experimental study of lubrication film monitoring in a roller bearing by utilization of surface acoustic waves. Tribology International, 141, January 2020, doi:10.1016/j.triboint.2019.105908

[A6] České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní: Zařízení pro testování provozních parametrů valivých a kluzných ložisek. Původci: Dinybyl, V., Chmelař, J. Česká republika. Patentový spis: CZ307380B6. Datum 11.7.2018

Bez ohlasu a recenzí

## Seznam použité literatury v tezích

- [1] Gegner, J.: Tribological Aspects of Rolling Bearing Failures. In Tribology - Lubricants and Lubrication, InTech, oct 2011, s. 33 – 94, doi:10.5772/20790.
- [2] Hochschule Für Angewandte Wissenschaften Fachhochschule Coburg: Arrangement and method for determining properties of a bearing. World Intellectual Property Organization. Patentový spis: WO2012035169A1, 2012-03-22.
- [3] Harris, T. A.: *Essential Concepts of Bearing Technology, Fifth Edition*. CRC Press, oct 2006 ISBN 978-0849371837, doi:10.1201/9781420006599.
- [4] Harris, T. A.: *Advanced Concepts of Bearing Technology, Fifth Edition*, CRC Press, oct 2006, ISBN 978-0849371820, doi:10.1201/9781420006582.
- [5] ISO 281: 2007. Rolling bearings – Dynamic Load Ratings and Rating Life. Standard, International Organization for Standardization, Ženeva, Švýcarsko, 2007
- [6] ISO/TS 16281: 2008. Rolling bearings – Methods for calculating the modified reference rating life for universally loaded bearings. Standard, International Organization for Standardization, Ženeva, Švýcarsko, 2008
- [7] Johnson, K. L.: Contact Mechanics. Cambridge University Press, 1985, ISBN 0-521-34769-3 doi:10.1017/cbo9781139171731
- [8] Kundu, T. (editor): Ultrasonic Nondestructive Evaluation, kapitola Mechanics of Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation. CRC Press, dec 2003, s. 1–142, doi:10.1201/9780203501962
- [9] Lindner, G.; Schmitt, M.; Schubert, J.; Krempel, S.; Faustmann, H.: On-line surveillance of lubricants in bearings by means of surface acoustic waves. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, ročník 57, č. 1, jan 2010: s. 126–132, doi: 10.1109/tuffc.2010.1388.
- [10] Lindner, G.; Bruckner, C.; Schmitt, M.: Online bearing lubricant sensing by mode conversion of surface acoustic waves. SENSOR Proc, 2011: s. 45–52, doi:10.5162/sensor11/a2.3.



[11] Radu, C.: The most common causes of bearing failure and the importance of bearing lubrication. RKB Technical Review, February 2010: s. 1–7.

[12] Venner, C. H.: Multilevel solution of the EHL line and point contact problems. Dizertační práce, University of Twente, Faculty of Engineering Technology, Enschede, Netherlands, 1991.

[13] Stachowiak, G. W.; W.Batchelor, A.: Engineering Tribology, Elsevier, 2013, ISBN 978-0-12-397047-3, doi:10.1016/b978-0-12-397047-3.00018-7

[14] Yang, P.: Encyclopedia of Tribology, kapitola Multi-Grid Method. Boston, MA: Springer US, 2013, ISBN 978-0-387-92897-5, s. 2333–2339, doi:10.1007/978-0-387-92897-5\_631.

## Anotace

Tato disertační práce se zabývá tématem snímání mazací vrstvy v ložiskách s valivými elementy. Problémy s mazáním jsou dle statistik nejčastější příčinou selhání valivých ložisek a zdrojem nákladných servisních zásahů. Konvenční metody monitorování ložisek, založené např. na vibrodiagnostice, nejsou dostatečně citlivé, aby jimi bylo možné efektivně detekovat začínající problémy spojené s lokální absencí mazací vrstvy, nebo její nedostatečnou tloušťkou, a poškozením tak předcházet. V této práci je použita existující metoda pro snímání stavu mazání valivých ložisek k doposud nepublikované aplikaci přímého monitorování mazací vrstvy. Metoda je založena na využití vlastností povrchových akustických vln, které jsou prostřednictvím páru piezoelektrických elementů aktivně buzeny na povrchu vnějšího kroužku ložiska a opět snímány. V této práci je popsána metoda vyhodnocení takového signálu, která umožňuje provést hodnocení stavu mazací vrstvy. Neboť nebyla identifikována žádná jiná metoda, která by umožňovala nezávislé ověření výsledků vyhodnocení, byl pro návrh experimentu a následné ověření popsání metody použit matematický model ložiska a Reynoldsovou rovnicí popsaný model mazací vrstvy. Výsledky provedených experimentálních měření se ukázala být ve velmi dobré shodě s predikcemi z modelů. Společně s poskytnutou interpretací chování signálu za konkrétních podmínek, při které byly využity výsledky aktuálních výzkumů, tak byla pozorování vývoje mazací vrstvy v ložisku prostřednictvím popsání metody vyhodnocení ověřena.

## Summary

This dissertation thesis addresses a topic of lubrication film monitoring in rolling element bearings. According to statistical data, lubrication problems are behind most of bearing failures. Sensitivity of conventional bearing monitoring methods, such as vibration-based monitoring, is in most cases insufficient to detect problems with local absence of lubrication film or its low thickness and to prevent the failures. In this thesis, an existing method for bearing lubrication monitoring is used, but in yet unpublished application of direct monitoring of lubrication film. The method stands on active excitation of surface acoustic waves at outer ring of bearing and their subsequent sensing. In this thesis a signal evaluation method, which allows an assessment of the lubrication film is presented and described. Due to absence of another method which would allow independent verification of obtained results, a coupled bearing mathematical model and a lubrication film model described by Reynolds equation, was used to design the experiment and verify results. Evaluated results of experimental measurements showed a good agreement with predictions obtained by models. Together with provided interpretation of results, which was based on published results of other researchers, the observation of lubrication film in the bearing was verified.

