



**FAKULTA
STROJNÍ
ČVUT V PRAZE**

Ústav konstruování a částí strojů

**Vliv změn teploty ložiska na signál doby
šíření impulsů povrchových akustických
vln**

**An impact of rolling bearing temperature
changes on signal variations of surface
acoustic wave propagation time**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2021

Bc. Martin JEŽEK

Studijní program: N0716A27001 Dopravní a transportní technika

Studijní obor: Transportní stroje

Vedoucí práce: Ing. Martin Dub, Ph.D.

Konzultant: Ing. Jakub Chmelař, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Vliv změn teploty ložiska na signál doby šíření impulsů povrchových akustických vln“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Martina Duba Ph.D. s použitím literatury uvedené na konci diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne

Bc. Martin Ježek

Poděkování

Své poděkování věnuji svým rodičům a ostatním členům rodiny za jejich trpělivost, neutuchající víru a podporu, kterou prokazovali během celého mého dosavadního studia a během tvorby této diplomové práce, dále pak vedoucímu práce Ing. Martinu Dubovi, Ph.D. za důsledné vedení a v neposlední řadě také svému konzultantovi Ing. Jakobovi Chmelařovi, Ph.D. za jeho konstantní podporu, poskytnutí nadhledu nad zpracovaným tématem a inspiraci nejen odbornou, ale i osobnostní.

Anotační list

Jméno autora:	Bc. Martin Ježek
Název DP:	Vliv změn teploty ložiska na signál doby šíření impulsů povrchových akustických vln
Anglický název DP:	An impact of rolling bearing temperature changes on signal variations of surface acoustic wave propagation time
Rok vypracování:	2021
Obor studia:	Transportní stroje
Ústav:	Ústav konstruování a částí strojů
Vedoucí DP:	Ing. Martin Dub, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jakub Chmelař, Ph.D.
Bibliografické údaje:	počet stránek 57 počet obrázků 38 počet tabulek 8 počet příloh 3
Klíčová slova:	valivá ložiska, vliv změn teploty, povrchové akustické vlny, analýza signálu, zařízení BeMoS, FFT analýza, ložiskové frekvence, monitoring mazací vrstvy
Keywords:	rolling bearings, effects of temperature changes, surface acoustic waves, signal analysis, BeMoS (Bearing Monitoring System), FFT analysis, bearing failure frequencies, lubrication film monitoring
Anotace:	Tato diplomová práce je zaměřena na zpracování tématu vlivu změn teploty ložiska na signál doby šíření povrchových akustických vln a doplňuje předcházející výzkum týkající se monitoringu stavu mazací vrstvy valivých ložisek.
Abstract:	This Diploma thesis is focused on elaboration of the topic of an impact of rolling bearing temperature changes on signal variations of surface acoustic wave propagation time and complements preceding studies addressing a topic of lubrication film monitoring in rolling bearings.

Obsah

1. Úvod	3
1.1. Cíl práce	4
2. Přehled problematiky.....	4
2.1. Valivá ložiska	4
2.1.1. Komponenty	5
2.1.2. Geometrie a charakteristiky.....	8
2.1.3. Kinematické vztahy.....	10
2.1.4. Ložiskové frekvence.....	13
2.2. Snímání a excitace povrchových akustických vln (SAW) zařízením BeMoS.....	15
2.2.1. Vybrané typy vlnění.....	15
2.2.1.1. Rayleighovy vlny	16
2.2.1.2. Lambda vlny	17
2.2.1.3. Obecné Rayleighovy, Stoneleyovy a Scholteho vlny [17]	19
2.2.2. Popis metody snímání a excitace SAW zařízením BeMoS [3]	19
2.3. Základní popis signálu	24
2.3.1. Popisná statistika [13]	24
2.3.1.1. Charakteristiky centrální tendence	24
2.3.1.2. Charakteristiky rozptýlenosti	25
2.3.2. Vizualizace.....	26
2.3.2.1. Rozložení četnosti [22].....	27
2.3.2.2. Krabicový graf [13].....	27
2.3.3. Frekvenční analýza signálu.....	28
2.3.3.1. Analýza konstantní relativní šířkou pásma – CPB [37]	28
2.3.3.2. Analýza konstantní absolutní šířkou pásma – FFT [37]	29
3. Analýza dat z dostupných měření	30
3.1. Testovací zařízení	30
3.2. Testovaný vzorek.....	31
3.3. Navržená metodika zpracování dat.....	32
3.4. FFT analýza signálu	33
3.4.1. Výběr zkoumaného úseku.....	34
3.4.2. Ložiskové frekvence testovaného ložiska	35
3.4.3. Identifikace ložiskových frekvencí ve frekvenčním spektru	36
3.5. Analýza vlivu teploty ložiska na průběh signálu	37
3.5.1. Výběr zkoumaných úseků	39
3.5.2. Průběh zkoumaných charakteristik doby šíření vybraných úseků	40
3.5.3. Statistické rozdělení zkoumaných charakteristik doby šíření vybraných úseků	43
3.5.4. Vývoj trendu zkoumaných charakteristik doby šíření	45
3.6. Shrnutí a navazující výzkum.....	47
4. Závěr.....	48
5. Seznam použité literatury	49
6. Seznam obrázků	52

7. Seznam tabulek.....	53
8. Seznam příloh	54
9. Přílohy	55

Seznam zkratek a symbolů

Seznam symbolů

Λ	Lamého konstanta	$[\text{Nm}^{-2}]$
α	stykový úhel	$[\text{°}]$
α^0	volný stykový úhel	$[\text{°}]$
Γ	vzdálenost	$[\text{m}]$
$\Delta\tau$	změna doby šíření	$[\text{ns}]$
Δt	délka úseku	$[\text{s}]$
$\Phi_{i,o}$	oskulace vnitřního (vnějšího) kroužku	$[-]$
π	Ludolfovo číslo	3,141592
ρ	hustota	$[\text{kgm}^{-3}]$
τ	doba šíření	$[\text{ns}]$
$\omega_{i,o}$	úhlová rychlost vnitřního (vnějšího) kroužku	$[\text{rads}^{-1}]$
ω_m	úhlová rychlost klece	$[\text{rads}^{-1}]$
ω_r	úhlová rychlost valivého elementu kolem své osy	$[\text{rads}^{-1}]$
A	vzdálenost středů poloměrů křivosti vnitřního a vnějšího kroužku	$[\text{mm}]$
B	šířka ložiska	$[\text{mm}]$
C	dynamická únosnost	$[\text{kN}]$
c	rychlost šíření vlnění	$[\text{ms}^{-1}]$
c_L	rychlost šíření vlnění v podélném směru	$[\text{ms}^{-1}]$
c_T	rychlost šíření vlnění v příčném směru	$[\text{ms}^{-1}]$
D	průměr valivého elementu ložiska	$[\text{mm}]$
D_i	průměr díry ložiska	$[\text{mm}]$
$d_{i,o}$	průměr oběžné dráhy vnitřního (vnějšího) kroužku	$[\text{mm}]$
d_m	roztečný průměr ložiska	$[\text{mm}]$
D_o	vnější průměr ložiska	$[\text{mm}]$
E	Youngův modul pružnosti v tahu	$[\text{Nm}^{-2}]$
F	zatížení	$[\text{kN}]$
f	frekvence, kapitoly 2.2.1.2 a 2.2.2	$[\text{Hz}]$
f_{BPI}	frekvence vnitřního kroužku	$[\text{Hz}]$
f_{BPO}	frekvence vnějšího kroužku	$[\text{Hz}]$
f_{BSF}	frekvence valivého elementu	$[\text{Hz}]$
f_{FTF}	frekvence klece ložiska	$[\text{Hz}]$



$f_{i,o}$	frekvence otáčení vnitřního (vnějšího) kroužku	[Hz]
f_m	frekvence otáčení klece ložiska	[Hz]
f_r	frekvence otáčení valivého elementu	[Hz]
G	modul pružnosti ve smyku	[Nm ⁻²]
h	počet tříd	[–]
h	tloušťka tělesa, kapitoly 2.2.1.2 a 2.2.2	[mm]
L_{we}	aktivní délka valivých elementů	[mm]
n	počet otáček	[–]
N	počet záznamů	[–]
n_n	nominální rychlost otáčení	[otmin ⁻¹]
N_v	počet valivých komponent	[–]
P	pravděpodobnost	[–]
P_d	radiální vůle ložiska	[mm]
P_e	axiální vůle nezátíženého radiálního kuličkového ložiska	[mm]
Q	mezikvartilové rozpětí	
Q_I	první neboli dolní kvartil (na hladině 25 %)	
Q_{III}	třetí neboli horní kvartil (na hladině 75 %)	
r_i	poloměr křivosti vnitřního kroužku ve směru kolmém k valení	[mm]
r_o	poloměr křivosti vnějšího kroužku ve směru kolmém k valení	[mm]
s	směrodatná odchylka	
s^2	rozptyl	
T	nominální teplota (teplota)	[°C]
$v_{i,o}$	obvodová rychlost vnitřního (vnějšího) kroužku	[ms ⁻¹]
v_m	obvodová rychlost klece	[ms ⁻¹]
x	nezávislá proměnná (hodnota záznamu)	
\bar{x}	aritmetický průměr	

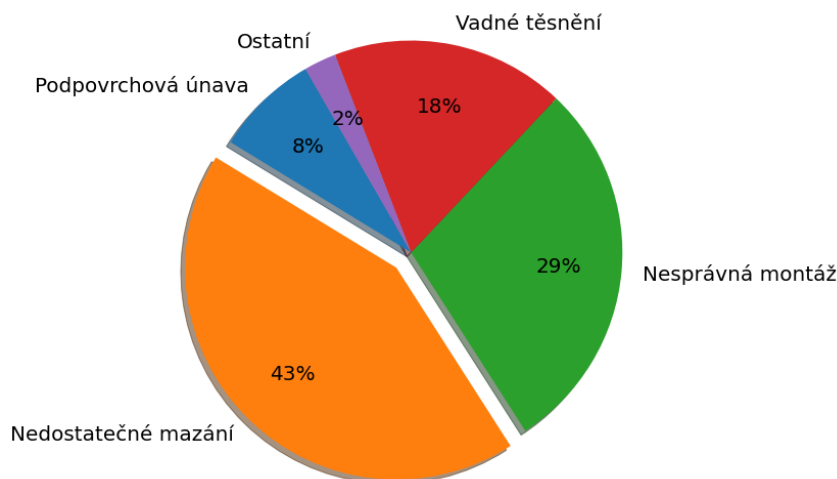
Seznam zkratk

CPB	konstantní relativní šířka pásma (Constant Percentage Bandwidth)
DFT	diskrétní Fourierova transformace (Discrete Fourier Transformation)
FFT	rychlá Fourierova transformace (Fast Fourier Transformation)
ISO VG	viskózní třída maziva
PZT	piezoelektrický
RTD	odporový snímač teploty
SAW	povrchová akustická vlna (Surface Acoustic Wave)

1. Úvod

Zpracování tématu vlivu teploty ložiska na šíření impulsů povrchových akustických vln bylo autorovi této práce nabídnuto během asistence při závěrečných laboratorních měřeních Ing. Jakuba Chmelaře, Ph.D., která se týkala využití povrchových akustických vln pro monitorování mazací vrstvy mezi valivými elementy a oběžnou drahou ložiska. [17]

Téma diplomové práce je aktuální, neboť bezprostředně navazuje na předchozí výzkum a obsahuje další analýzu signálu z dat, která byla důkladně zpracována ve výše zmíněné disertační práci. Doplnuje tak střípek v mozaice vývoje monitoringu stavu ložisek a predikce jejich životnosti přímo za provozu stroje s ohledem na adekvátní mazání, které je bez pochyby jedním z kritických faktorů (Obrázek 1).



Obrázek 1: Nejčastější příčiny poruch ložisek, reprodukováno z [10]

Jelikož při návrhu vhodného ložiska a odhadu jeho životnosti se vychází z představy prakticky dokonale mazaného ložiska, musí navrhující inženýr při výpočtech aplikovat koeficienty redukcující tuto životnost. Tyto koeficienty zpravidla pochází z laboratorních měření a numerických simulací provedených výrobcem.

Jejich vhodné užití pak ale nevyhnutelně závisí na zkušenostech navrhujícího inženýra, což není uspokojivé pro aplikace, jakými jsou například ložiska velkých energetických a průmyslových zařízení, kde je kladen důraz na vysokou spolehlivost. Neplánované odstávky kvůli opravě či výměně strojní komponenty představují velkou časovou i finanční zátěž. Není proto divu, že je diagnostika stavu ložisek za provozu oblíbenou disciplínou.

1.1. Cíl práce

Cílem práce je popsání vlivu změn teploty ložiska na signál doby šíření impulsů povrchových akustických vln prostřednictvím analýzy signálu z dostupných měření pocházejících z předcházejícího výzkumu. Dílčí cíle práce jsou pak stanoveny dle následujících bodů:

- Popsat základní komponenty valivých ložisek, jejich charakteristiky a funkce
- Popsat kinematické vztahy v ložisku mezi jednotlivými komponentami
- Z kinematických vztahů odvodit poruchové frekvence ložiska
- Popsat metody snímání a excitace povrchových akustických vln prostřednictvím zařízení BeMoS
- Zpracovat základní popis signálu a metody vyhodnocení
- Uskutečnit FFT analýzu signálu a identifikovat harmonické frekvence
- Porovnat výsledky předchozího bodu s odvozenými charakteristickými frekvencemi ložiska
- Analyzovat signál z dostupných měření a popsat vliv teploty ložiska na průběh signálu během měření

2. Přehled problematiky

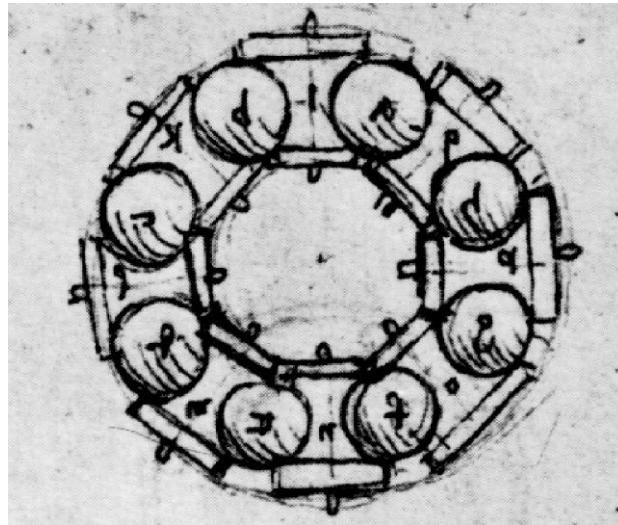
Následující kapitoly obsahují přehled problematiky týkající se ložisek, povrchového akustického vlnění a základního popisu signálu. Blíže je také popsána metoda snímání a excitace povrchových akustických vln zařízením BeMoS.

2.1. Valivá ložiska

V této kapitole je provedena stručná rešerše důležité strojní součásti, kterou je ložisko. Není bez zajímavosti, že již na přelomu patnáctého a šestnáctého století bylo možné v Madridském kodexu Leonarda da Vinci objevit náčrt součástky (Obrázek 2) nápadně připomínající axiální ložisko v jeho základní podobě tak, jak jej známe od dvacátého století, mající valivé elementy oddělené separátorem (klecí) [11].

Progresivní rozvoj výrobních technologií, vývoj ocelí dosahujících lepších vlastností a celkově rozvoj strojírenství vedl k zaměření vývoje také směrem k valivým ložiskům. Ty pak našly široké uplatnění ve velkém množství aplikací a nejrůznějších pracovních podmínkách. Od aplikací v ocelářských závodech a u těžebních strojů, přes aplikace

v zemědělských strojích a zpracovatelském průmyslu až po aplikaci v kosmickém průmyslu [11].



Obrázek 2: Axiální ložisko podle Leonarda da Vinci (cca. 1500 n.l.), převzato z [29]

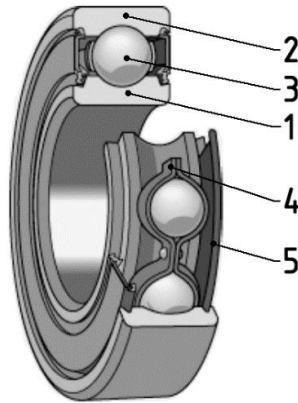
Funkce valivého ložiska je zcela zřejmá. Využitím odvalování valivých komponent mezi plochami dosáhnout rotačního, případně posuvného pohybu s minimálním třením, tedy minimálními energetickými ztrátami, při přenesení požadovaného výkonu. Oproti smykovému tření také dochází k daleko menšímu rozdílu mezi třením za klidu a za pohybu. Navíc některé konfigurace umožňují přenášet zatížení současně v radiálním i axiálním směru [11].

2.1.1. Komponenty

Na současném trhu se vyskytuje nepřehledné množství variant provedení valivých ložisek vyhovujících svými vlastnostmi širokému spektru aplikací. Pro potřeby této diplomové práce je zde uveden pouze omezený výčet, na kterém jsou demonstrovány základní vlastnosti valivých ložisek a jejich charakteristik. Pro vyčerpávající přehled lze pak nahlédnout do katalogů výrobců [32].

Na následujícím obrázku (Obrázek 3) je zobrazeno radiální kuličkové ložisko, na jehož příkladu jsou označeny základní komponenty valivých ložisek. Valivé ložisko se obecně skládá z vnitřního kroužku (1), vnějšího kroužku (2), valivého elementu (3) a klece (4). Pro aplikace ve znečištěném prostředí lze pak oddělit toto prostředí od prostoru vnitřních drah valivých elementů těsněním (5). Oběžné dráhy na vnějším a vnitřním kroužku pro vedení

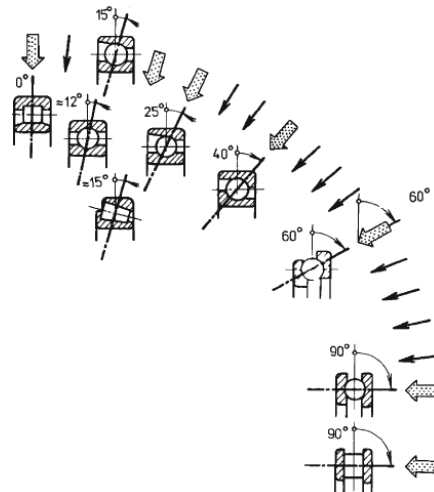
valivých elementů mají zpravidla dva poloměry křivosti. V podélném směru odpovídá tento poloměr křivosti poloměru oběžné dráhy vnitřního, případně vnějšího kroužku. V příčném směru pak křivost odpovídá pro radiální jednořadá kuličková ložiska 51,5 až 53 % průměru kuličky [11].



Obrázek 3: Radiální kuličkové ložisko – komponenty, upraveno z [11]

Klece slouží k rovnoměrnému rozmístění valivých elementů po průměru ložiska a jsou-li dobře navrženy umožňují radiálnímu kuličkovému ložisku přenášet i malé ohybové momenty vzniklé nepřesným zarovnáním os hřídele a díry. Na rozdíl od ložiskových kroužků se od nich požaduje relativní měkkost. Pro zachování dobré nosnosti a zároveň lehkosti jsou vyráběny mimo jiné např. z mosazi, bronzu, polyamidu či plastu vyztuženého uhlíkovými vlákny [11].

Ložiska lze pak dělit podle různých kategorií. Základní je dělení podle typu valivých elementů a stykového úhlu. Valivých elementů rozlišujeme hned několik. V první řadě již zmíněné kuličky, které jsou oblíbené pro svou univerzálnost a své uplatnění ve vysokorychlostních aplikacích [11]. Vedle radiálních ložisek (nulový stykový úhel) podle stykového úhlu (Obrázek 4) rozlišujeme ložiska s kosoúhlým stykem do zhruba 40° a dále do 90° pak axiální ložiska [11].



Obrázek 4: Stykové úhly různých valivých ložisek, upraveno z [31]

Kontakt valivého elementu s oběžnými drahami kroužků je u radiálních kuličkových ložisek realizován přes bodový kontakt (při zatížení přechází v eliptický). Proto mají radiální kuličková ložiska menší únosnost než válečková či soudečková ložiska stejné řady, kde je kontakt valivého elementu s oběžnými drahami kroužků realizován přes kontakt liniový (ten při zatížení přechází v obdélníkový) [32]. Největší únosnost pak poskytují ložiska kuželíková. Ta se montují v párech orientovaných proti sobě. Dále lze pak zvýšit únosnost ložiska vhodným předpětím či zvýšením počtu řad valivých elementů [11].

Pro aplikace s omezenými zástavbovými rozměry lze zvolit valivé elementy v podobě jehliček. V takových aplikacích jsou pak k vidění ložiska nejen bez klecí, ale i bez vnitřního kroužku (Obrázek 5).

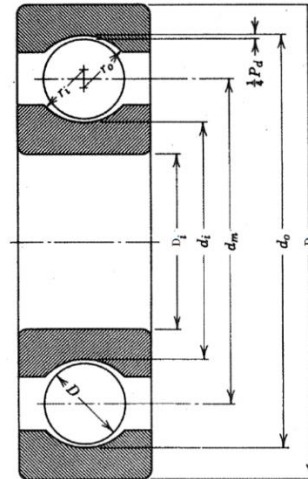


Obrázek 5: Jehličkové ložisko bez klece a vnitřního kroužku, převzato z [11]

2.1.2. Geometrie a charakteristiky

V této kapitole jsou odvozeny základní geometrické charakteristiky valivého ložiska a uvedeny jeho základní charakteristiky.

Na následujícím obrázku je schematické zobrazení valivého ložiska s okótovanými základními rozměry (Obrázek 6).



Obrázek 6: Kuličkové ložisko – rozměry, upraveno z [12]

Je zřejmé, že pro roztečný průměr platí následující vztah (1).

$$d_m = \frac{d_i + d_o}{2} \quad (1)$$

kde

d_m - roztečný průměr ložiska [mm]

d_i - průměr oběžné dráhy vnitřního kroužku [mm]

d_o - průměr oběžné dráhy vnějšího kroužku [mm]

Přibližně také platí vztah (2).

$$d_m \approx \frac{D_i + D_o}{2} \quad (2)$$

kde

D_i - průměr díry ložiska [mm]

D_o - vnější průměr ložiska [mm]

Obecně se kuličková ložiska a další radiální valivá ložiska jako např. válečková vyrábí s radiální vůlí [12]. Ta je popsána následujícím výrazem (3).

$$P_d = d_o - d_i - 2D \quad (3)$$

kde

D - průměr valivého elementu ložiska [mm]

P_d - radiální vůle ložiska [mm]

Parametrem napovídajícím o schopnosti valivého ložiska přenášet zatížení je oskulace valivého elementu a oběžných drah kroužků. Oskulace je poměrem poloměrů křivostí valivého elementu a oběžných drah ve směru kolmém k valení [12]. Proto pro vnitřní a vnější kroužek platí následující vztah (4).

$$\Phi_{i,o} = \frac{D}{2r_{i,o}} \quad (4)$$

kde

$\Phi_{i,o}$ - oskulace vnitřního (resp. vnějšího) kroužku [–]

$r_{i,o}$ - poloměr křivosti vnitřního (resp. vnějšího) kr. ve směru kolmém k valení [mm]

Radiální kuličkové ložisko bez zatížení umožňuje díky radiální vůli vzájemný pohyb vnitřního a vnějšího kroužku. Na základě náčrtu (Obrázek 7) lze určit vzdálenost středů o' a o'' , poloměrů křivosti vnitřního a vnějšího kroužku ložiska A .

$$A = r_i + r_o - D \quad (5)$$

kde

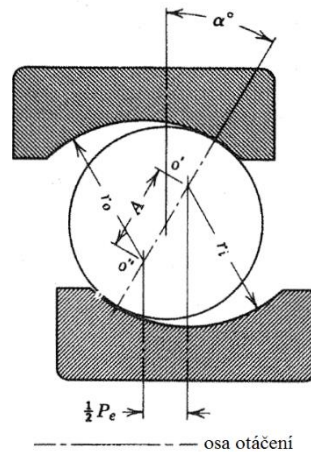
A - vzdálenost středů poloměrů křivosti vnitřního a vnějšího kroužku [mm]

Využitím výrazu (5) lze určit velikost volného smykového úhlu, které může nezatížené ložisko zaujmout.

$$\cos \alpha^0 = \frac{\frac{A}{2} - \frac{P_d}{4}}{\frac{A}{2}} = 1 - \frac{P_d}{2A} \quad (6)$$

kde

α^0 - volný stykový úhel [°]



Obrázek 7: Volný stykový úhel α^0 a axiální vůle P_e , upraveno z [12]

Jako poslední je v této kapitole uvedena velikost maximálního relativního pohybu v axiálním směru mezi vnitřním a vnějším kroužkem nezatíženého radiálního kuličkového ložiska P_e .

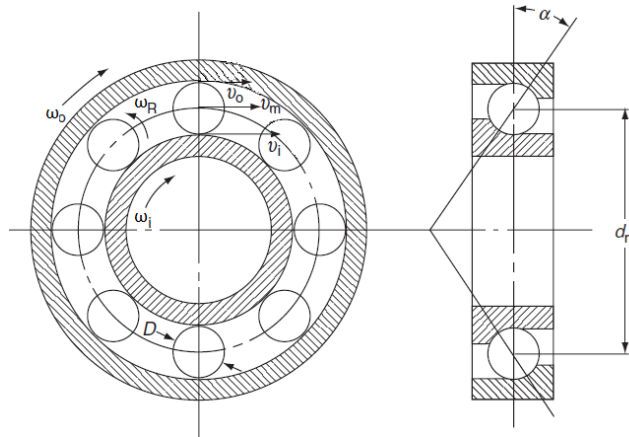
$$P_e = 2A \sin \alpha^0 \quad (7)$$

kde

P_e - axiální vůle nezatíženého radiálního kuličkového ložiska [mm]

2.1.3. Kinematické vztahy

Tato kapitola představuje kinematické vztahy v ložisku demonstrováné na jednořadém kuličkovém ložisku s kosoúhlým stykem (Obrázek 8). Vztahy jsou odvozeny zcela obecně pro současnou rotaci vnějšího i vnitřního kroužku. Při rotaci okolo osy otáčení platí pro oběžné dráhy vnitřního a vnějšího kroužku následující vztahy (8) pro výpočet obvodových rychlostí.



Obrázek 8: Rychlosti otáčení a obvodové rychlosti ložiska, upraveno z [11]

$$v_{i,o,m} = \frac{1}{2} \omega_{i,o,m} d_{i,o,m} \quad (8)$$

kde

$v_{i,o,m}$ - obvodová rychlost vnitřního (resp. vnějšího) kroužku (resp. klece) [ms^{-1}]

$\omega_{i,o,m}$ - úhlová rychlost vnitřního (resp. vnějšího) kroužku (resp. klece) [rads^{-1}]

Pro nenulový stykový úhel α platí následující vztahy (9).

$$v_{i,o} = \frac{1}{2} \omega_{i,o} (d_m \mp D \cos \alpha) \quad (9)$$

kde

α - stykový úhel [$^\circ$]

Za předpokladu valení elementů v ložisku bez uvažování skluzu lze obvodovou rychlost klece uvažovat následovně (10).

$$v_m = \frac{v_i + v_o}{2} \quad (10)$$

kde

v_m - obvodová rychlost klece [ms^{-1}]

Pak lze kombinací a následnou úpravou rovnic (8) pro obvodovou rychlost na roztečném průměru, (9) pro obvodové rychlosti na oběžných drahách vnitřního a vnějšího kroužku a (10) odvodit následující vztah (11) pro úhlovou rychlost klece.

$$\omega_m = \frac{1}{2} \left[\omega_i \left(1 - \frac{D \cos \alpha}{d_m} \right) + \omega_o \left(1 + \frac{D \cos \alpha}{d_m} \right) \right] \quad (11)$$

Pro odvození obvodové rychlosti valivých elementů se následně vychází z rovnosti obvodových rychlostí v bodě kontaktu valivého elementu s oběžnou dráhou vnitřního kroužku.

$$\frac{1}{2} (\omega_i - \omega_m) (d_m - D \cos \alpha) = \frac{1}{2} \omega_r D \quad (12)$$

kde

ω_r - úhlová rychlost valivého elementu kolem své osy [rads^{-1}]

Odtud,

$$\omega_r = (\omega_i - \omega_m) \frac{d_m}{D} \left(1 - \frac{D \cos \alpha}{d_m} \right) \quad (13)$$

Následně se dosazením rovnice (11) do rovnice (13), vytknutím $\frac{1}{2}$, ω_i a členu $\left(1 + \frac{d \cos \alpha}{d_m} \right)$ a užitím vzorce pro rozdíl čtverců dostane následující vztah (14) pro úhlovou rychlost valivého elementu kolem vlastní osy v obecném tvaru.

$$\omega_r = \frac{1}{2} (\omega_i - \omega_o) \frac{d_m}{D} \left[1 - \left(\frac{D \cos \alpha}{d_m} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Dosazením $2\pi f_{m,i,o}$ za $\omega_{m,i,o}$ v rovnici (11) se získá výraz (15) pro frekvenci otáčení klece ložiska.

$$f_m = \frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{D \cos \alpha}{d_m} \right) + f_o \left(1 + \frac{D \cos \alpha}{d_m} \right) \right] \quad (15)$$

kde

f_m - frekvence otáčení klece ložiska [Hz]

f_i - frekvence otáčení vnitřního kroužku [Hz]

f_o - frekvence otáčení vnějšího kroužku [Hz]

2.1.4. Ložiskové frekvence

V minulé kapitole byly odvozeny obecné kinematické vztahy jednotlivých základních komponent valivého ložiska. V této kapitole jsou odvozeny ložiskové (poruchové, chybové) frekvence opět pro obecný pohyb bez uvažování skluzu.

Podle lokace diskontinuity (zdroje impulzů) rozlišujeme čtyři ložiskové frekvence [25].

- frekvence vnitřního kroužku (Ball Passing Frequency of Inner Race) f_{BPFI}
- frekvence vnějšího kroužku (Ball Passing Frequency of Outer Race) f_{BPFO}
- frekvence klece ložiska (Fundamental Train Frequency) f_{FTF}
- frekvence valivého elementu (Ball Spin Frequency) f_{BSF}

Jelikož diskontinuita vyvíjí rázový impulz pokaždé, když přijde do kontaktu s valivou komponentou, lze snadno odvodit, že frekvence vnitřního kroužku f_{BPFI} odpovídá součinu počtu valivých komponent a relativní frekvence mezi klecí a vnitřním kroužkem.

$$f_{BPFI} = N_v(f_i - f_m) \quad (16)$$

kde

f_{BPFI} - frekvence vnitřního kroužku [Hz]

N_v - počet valivých komponent [-]

Stejným postupem, jako při odvození rovnice (14) lze obdržet následující (17).

$$f_{BPFI} = \frac{N_v}{2}(f_i - f_o) \left(1 + \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right) \quad (17)$$

Stejnou úvahou se získá frekvence vnějšího kroužku f_{BPFO} . Součinem počtu valivých komponent a relativní frekvence mezi klecí a vnějším kroužkem.

$$f_{BPFO} = N_v(f_m - f_o) \quad (18)$$

kde

f_{BPFO} - frekvence vnějšího kroužku [Hz]

Opakováním přechozího postupu se obdrží následující výraz (19).

$$f_{BPFO} = \frac{N_v}{2} (f_i - f_o) \left(1 - \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right) \quad (19)$$

Rovnice (15) odpovídá frekvenci klece ložiska f_{FTF} .

$$f_{FTF} = f_m = \frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right) + f_o \left(1 + \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right) \right] \quad (20)$$

kde

f_{FTF} - frekvence klece ložiska [Hz]

Dosazením $2\pi f_{r,i,o}$ za $\omega_{r,i,o}$ v rovnici (14) se získá výraz (21) pro výpočet frekvence valivého elementu f_{BSF} .

$$f_{BSF} = f_r = \frac{1}{2} (f_i - f_o) \frac{d_m}{D} \left[1 - \left(\frac{D \cos \alpha}{d_m} \right)^2 \right] \quad (21)$$

kde

f_{BSF} - frekvence valivého elementu [Hz]

f_r - frekvence otáčení valivého elementu [Hz]

Shrnutí odvozených výrazů pro výpočet poruchových frekvencí ložiska je k nalezení v následující tabulce:

Tabulka 1: Shrnutí odvozených charakteristických ložiskových frekvencí

Označení	Název	Výraz [Hz]
f_{BPFI}	frekvence vnitřního kroužku (Ball Passing Frequency of Inner Race)	$\frac{N_v}{2} (f_i - f_o) \left(1 + \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right)$
f_{BPFO}	frekvence vnějšího kroužku (Ball Passing Frequency of Outer Race)	$\frac{N_v}{2} (f_i - f_o) \left(1 - \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right)$
f_{FTF}	frekvence klece ložiska (Fundamental Train Frequency)	$\frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right) + f_o \left(1 + \frac{D \cos \alpha}{d_m}\right) \right]$
f_{BPF}	frekvence valivého element (Ball Spin Frequency)	$\frac{1}{2} (f_i - f_o) \frac{d_m}{D} \left[1 - \left(\frac{D \cos \alpha}{d_m} \right)^2 \right]$

Pro analýzu vlivu skluzu na jednotlivé charakteristické ložiskové frekvence je zde odkázáno na kapitolu 14.2. publikace [37].

2.2. Snímání a excitace povrchových akustických vln (SAW¹) zařízením BeMoS

Tato kapitola obsahuje popis metody snímání a excitace povrchových akustických vln integrované v komerčním zařízení BeMoS (Bearing Monitoring System, společnost BestSens AG), který byl aplikován při zkoumání tloušťky mazacího filmu radiálních válečkových ložisek v laboratořích Ústavu konstruování a částí strojů v Praze-Dejvicích.

Před samotným popisem dané metody je předřazen stručný teoretický základ k šíření povrchových akustických vln.

2.2.1. Vybrané typy vlnění

Rozeznává se mnoho typů vlnění v závislosti na okrajových podmínkách, typu média, kterým se šíří, a také typech médií sousedících. Jednotlivé typy vlnění v sebe vzájemně přechází a mění své vlastnosti v závislosti na mechanických a chemických vlastnostech daného prostředí.

Oproti šíření vlnění v plynech a kapalinách, která nepřenáší smyková napětí a vlnění se v nich tak šíří pouze podélným kmitáním částic, tedy periodickou změnou hustoty nebo tlaku, se při zkoumání vlnění v pevných elastických tělesech musí brát v úvahu také složka příčná [24].

Následující rovnici (22) pro rychlost šíření vlnění lze aplikovat pouze pro tenké pruty. Rozumí se takové, které mají malý průměr v porovnání k vlnové délce vlnění [39].

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (22)$$

kde

- c - rychlost šíření vlnění [ms^{-1}]
- E - Youngův modul pružnosti v tahu [Nm^{-2}]
- ρ - hustota [kgm^{-3}]

¹ Surface acoustic wave

Jelikož pevná elastická tělesa přenáší i smyková napětí, popisuje se rychlost šíření vlnění zvláště pro vlnění s výchylkou částic v podélném směru (23) a směru příčném (24).

$$c_L = \sqrt{\frac{\Lambda + 2G}{\rho}} \quad (23)$$

kde

c_L - rychlost šíření vlnění v podélném směru [ms^{-1}]

Λ - Lamého konstanta [Nm^{-2}]

G - modul pružnosti ve smyku [Nm^{-2}]

Lze pozorovat nárůst rychlosti šíření vlnění s výchylkou částic v podélném směru (23) u pevných elastických těles oproti rychlosti šíření vlnění v tenkých prutech (22). K tomu dochází díky vlivu tuhosti v příčném směru [39].

$$c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (24)$$

kde

c_T - rychlost šíření vlnění v příčném směru [ms^{-1}]

Tyto rovnice platí pouze pro teoreticky nekonečné těleso. Lze vidět, že takto popsaná rychlost nezávisí na frekvenci budící vlny ani na geometrii tělesa. Takové vlny se označují jako nedisperzní [39]. Jednotlivá vlnění postupují tělesem, aniž by se vzájemně ovlivňovala, a tvoří sférickou vlnoplochu. Její tvorbou ztrácí vlnění svou energii, a proto dochází k jeho útlumu s rostoucí vzdáleností r od centra buzení dle $\frac{1}{r}$ [39].

2.2.1.1. Rayleigho vlny

Jakmile se začne uvažovat geometrie tělesa, je nutné kromě výše opsaného vlnění uvnitř těles, uvažovat také vlnění šířící se na hranici těles – tzv. povrchové vlny. Zde již vlivem okrajových podmínek (v literatuře lze pro takové vlny nalézt označení *guided waves*²) dochází k odrazům a interakci jednotlivých vlnění.

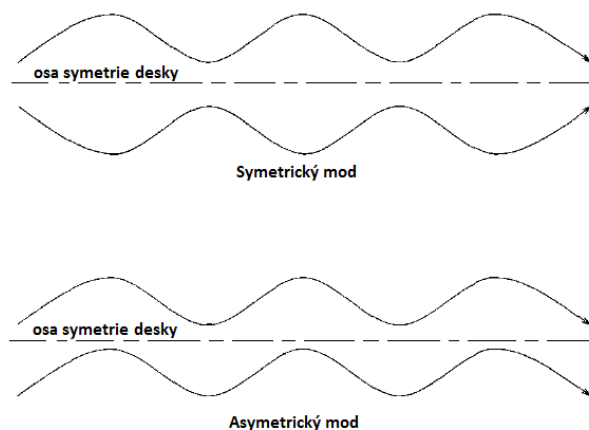
² „Vedené“ vlny

Pro polorovinu rozhraní pevného média a plynu pak odborná literatura [39] rozeznává Rayleighovy vlny. Tyto vlny se šíří po volném povrchu tělesa a mají malou prostupnost ve směru kolmém k povrchu. Již ve vzdálenosti jedné vlnové délky od povrchu tělesa je amplituda výchylky tohoto vlnění jen 10 % původní velikosti. Díky tomu v tomto směru neztrácí mnoho energie vlivem tvorby vlnoplochy, která má v tomto případě kruhový tvar, a po povrchu se šíří pouze s minimálním útlumem [39].

Částice materiálu na hranici tělesa, kde se šíří tzv. Rayleighovo vlnění opisují eliptickou dráhu s hlavní poloosou orientovanou kolmo k volnému povrchu. V materiálech o vlastnostech podobných oceli se šíří rychlostí přibližně $0,93c_T$, rychlosti šíření vlnění v příčném směru. Výraz pro výpočet rychlosti odvozený z charakteristické rovnice opět není funkcí ani frekvence buzení vlnění ani geometrie tělesa. Je proto také označováno jako nedisperzní [39].³

2.2.1.2. Lambda vlny

Specifickým příkladem povrchové Rayleighovy vlny je Lambda vlna. Ta je popsána pro tenké desky, jejichž tloušťka přibližně odpovídá vlnové délce šířícího se vlnění. Je pro ni charakteristické, že se šíří současně ve vzájemně svázaných modech na obou volných plochách tělesa, buď v symetrickém modu, nebo v asymetrickém modu (Obrázek 9).

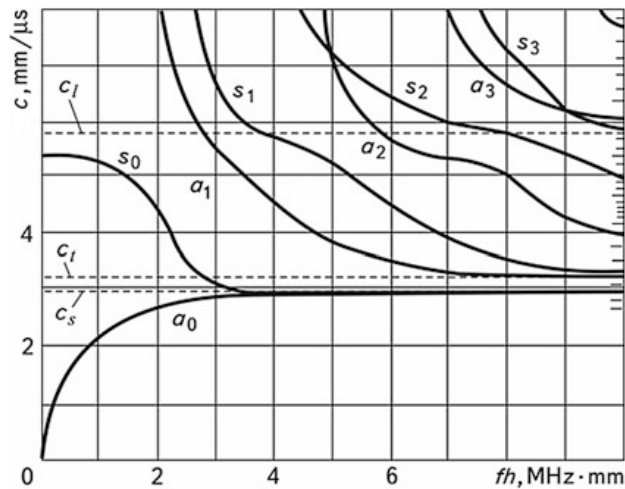


Obrázek 9: Mody oscilace Lambda vlny, upraveno z [39]

Z rovnic v [39] lze vyčíst, že rychlost jejího šíření je již závislá na frekvenci buzení a geometrii tělesa je proto disperzní. Tato charakteristika, *disperzivita*, bývá vykreslována

³ Podrobný rozbor, výrazy výchylek a odvození rychlosti šíření Rayleighovy vlnění lze nalézt v publikaci [39] případně [28].

jako rychlost šíření jednotlivých módů proti součinu budicí frekvence a tloušťky tělesa (Obrázek 10).



Obrázek 10: Disperzní křivky pro ocel, upraveno z [24]

Jednotlivé mody jsou označovány písmeny *S* pro symetrický a *A* pro asymetrický mód s dolním indexem podle jejich řádu. Mody označeny nulou se nazývají *fundamentální mody*. Dále jsou zde, v pořadí shora dolů, čárkovanou čarou zaneseny rychlosti šíření vlnění v podélném směru c_L , v příčném směru c_T a Rayleighovy vlny c_S .

Podle diagramu vykreslujícího disperzní křivky lze pozorovat, že pro určité hodnoty součinu $f \cdot h$ mohou povrchem desky probíhat mody několika řádů současně. Důkazem toho, že Lambda vlny jsou specifickým případem Rayleighových vln pro tenké desky, je zřetelná konvergence fundamentálních módů k rychlosti Rayleighovy vlny s rostoucí tloušťkou desky. Konkrétně od součinu $f \cdot h$ většího jak $3 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$.

Z diagramu disperzních křivek tak lze vyčíst prahovou hodnotu součinu $f \cdot h$ pro danou geometrii, do jejíž hodnoty bude vlna existovat pouze ve fundamentálním modu, případně s jakými dalšími mody může koexistovat. Na to je třeba vzpomenout při využití těchto vln v defektoskopii, jelikož větší počet módů může vést k nejednoznačnosti výsledků, kvůli jejich rozdílným rychlostem šíření, které by tak odražené od defektu přicházely ke snímači v rozdílných časech [39].

Navíc může při šíření fundamentálního symetrického modu, který narazí na nehomogenitu v materiálu, dojít k jeho konverzi na asymetrický mód, případně přestupu na mód vyššího řádu [39].

2.2.1.3. Obecné Rayleigho, Stoneleyho a Scholteho vlny [17]

Tyto typy vln spolu koexistují výhradně na rozhraní dvou elastických těles a na rozhraní elastických těles a kapalin. Za zmínku stojí jejich rozdílná závislost rychlosti šíření na charakteru kontaktního prostředí.

Pro obecné Rayleigho vlny platí, že se při šíření na rozhraní dvou elastických těles podobných mechanických vlastností šíří bez útlumu. Disperzní chování a útlum závislý na viskozitě jsou pak pozorovány na rozhraní elastického tělesa a elastické, případně viskoelastické vrstvy malé tloušťky. Rozumí se relativně k velikosti vlnové délky.

Obecné Rayleigho vlny jsou také někdy nazývané *Leaky waves*⁴. A to kvůli útlumu způsobenému vyzařováním energie vlivem rozdílných rychlostí šíření vlnění v kapalině a tělese při šíření na jejich rozhraní.

Téměř zanedbatelný útlum vykazují Stoneleyho vlny, které se šíří na rozhraní dvou elastických těles pouze za specifických podmínek. Rychlost jejich šíření po rozhraní je menší než menší rychlost šíření v příčném směru obou těles.

Konečně pak Scholteho vlny, šířící se jen na rozhraní elastického tělesa a kapaliny, dosahují rychlosti šíření menší než menší rychlost šíření vlnění z příslušných prostředí, tedy kapaliny. Díky tomu se tak šíří bez útlumu. Scholteho vlna vykazuje disperzní chování, pokud je tloušťka kapalina omezena.

2.2.2. Popis metody snímání a excitace SAW zařízením BeMoS [3]

Výše popsané charakteristické vlastnosti Lambda vln se využívá v metodě monitoringu stavu ložisek pomocí povrchových akustických vln na vnějším kroužku ložiska a konverzi modů v závislosti na kontaktu povrchu, v němž se vlna šíří, s mazacím olejem.

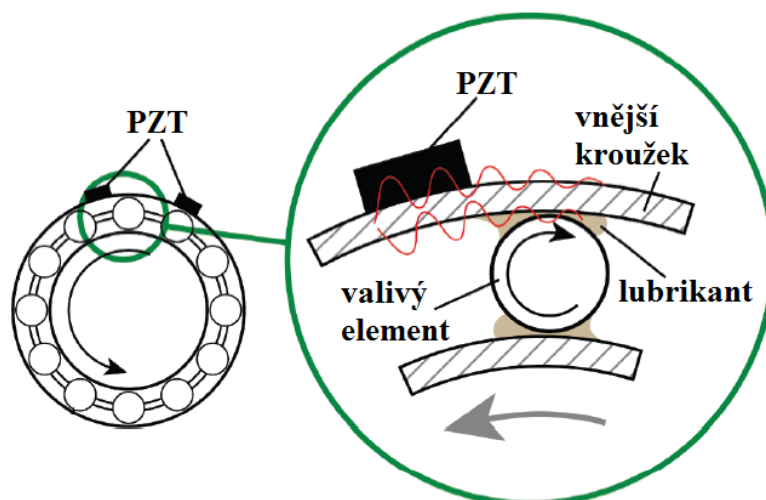
⁴ Rozptylné vlny



Obrázek 11: Zařízení BeMoS společnosti BestSens AG, upraveno z [38]

Tento princip je použit v komerčním zařízení dostupném pod názvem BeMoS One (Bearing Monitoring System) společnosti BestSens AG vycházejícím z patentového spisu [14]. Výrobce uvádí, že tento monitorovací systém poskytuje možnost odhalit podmínky (skluz, kontaminaci vodou, atd.) vedoucí následně k selhání ložiska a včasné jednat stran jejich eliminace.

Toto zařízení se vedle kontroléru skládá ze dvou totožných elementů (Obrázek 11), piezoelektrických členů (PZT), kdy jeden slouží k buzení a druhý ke snímání signálu. Tyto PZT akční členy jsou umístěny na vnější kroužek ložiska a z výše uvedených vlastností je patrné, že na vnitřní straně vnějšího kroužku budí svázané oscilace (viz. Obrázek 12). Přijde-li tak tato strana do kontaktu s mazivem, či valivým elementem, projeví se to na modulaci signálu konverzí do jiných módů na vnější straně vnějšího kroužku vstupujícího do snímače a tím dojde ke změně charakteristik jejich šíření – např. změně amplitudy, nebo rychlosti šíření.



Obrázek 12: Piezoelektrické akční členy umístěné na vnějším kroužku ložiska a šíření SAW, upraveno z [19]

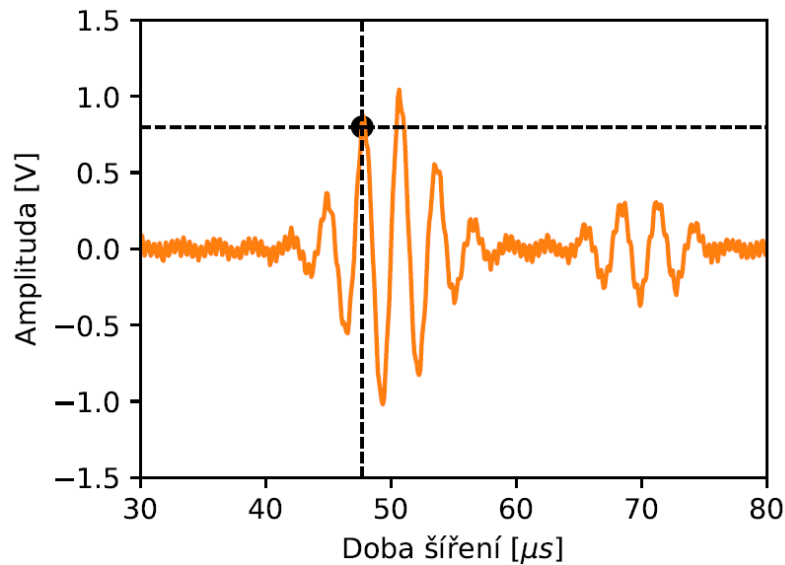
Snímače umístěné na vnějším kroužku je třeba umístit proti drahým valivých elementů se vzájemnou roztečí menší než 180° , aby řídicí algoritmus mohl rozlišit a odfiltrvat signál šířící se po vnějším kroužku v opačném směru, takto po delší dráze.

K zajištění dostatečného přitlaku, který je potřebný pro přenesení signálu z PZT členů na vnější kroužek, jsou v tělesech snímačů umístěny elastické členy kompenzující tepelnou roztažnost přilehlých komponent (samotné ložisko, ložiskový domek).

Nevyhnutelnou nedokonalostí kontaktu mezi PZT akčním členem a vnějším kroužkem, dochází nutně i k bočním odrazům a k zaznamenávání jiných modů mimo emitovaný antisymetrický fundamentální mód A0. Proto, aby generované vlnění mělo formu téměř výhradně Lambda vln na obou površích, je třeba vhodně volit frekvenci tohoto vlnění s ohledem na tloušťku materiálu, kterým se šíří. Toho je dosaženo, když je tloušťka daného materiálu alespoň pětkrát kratší než vlnová délka buzeného vlnění.

Pro Lambda vlny tloušťka materiálu zhruba odpovídá vlnové délce buzeného vlnění. I v tomto případě lze stále sledovat zmíněnou svázanost vlnění na protilehlých površích. Pro podmínky měření, z nichž pocházejí data zpracována v této práci a která budou doplněna v kapitole 3.2, tedy tloušťku kroužku 4,75 mm a budící frekvenci 350 kHz, je pracovní bod $f \cdot h = 1,6625 \text{ MHz} \cdot \text{mm}$. Ten se tak nachází v oblasti pracovního diagramu (Obrázek 10), kde je tento mód dobře odlišen od ostatních svou rychlostí šíření.

Emitovaný impulz je amplitudově modulován do tvaru Gaussovy křivky a frekvencí 10 kHz pravidelně emitován. Emitování a snímání je programově řízeno a přesně synchronizováno. Senzor příchozí vlnu snímkuje vzorkovací frekvencí 10 MHz a současně filtruje rušivé signály. Na následujícím obrázku (Obrázek 13) je k vidění rekonstruovaná příchozí vlna signálu.

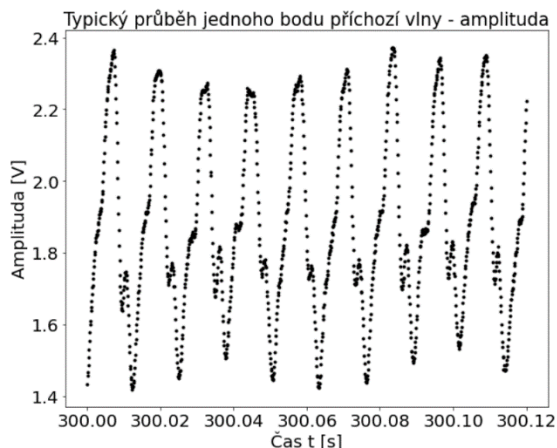


Obrázek 13: Rekonstruovaná přichodící vlna signálu, převzato a upraveno z [17]

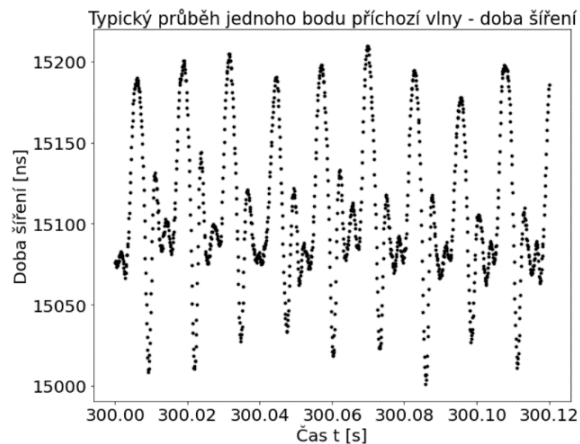
Z celé vlny jsou pak k dalšímu zpracování odečítány parametry, jako jsou doba šíření a amplituda, pouze z jednoho místa. Toto místo je třeba vhodně určit vzhledem k přítomnosti šumu netlumených vln, které vidíme mimo oblasti výrazného zvlnění a šumu od krajů kroužku odražených vln. Pro zpracovaná data bylo toto místo určeno pro první výrazný vrchol (znázorněno křížem). Méně výrazná vlna v závěru signálu je vlna odražená. [17]

Typický průběh bodu označeného křížem může být spatřen na následujících obrázcích (Obrázek 14 a Obrázek 15). Je vidět diskrétní záznamy s frekvencí 10 kHz a periodicitu záznamu způsobenou důsledkem otáčení hřídele a přejezdem valivých elementů pod PZT členy.

Za určitých podmínek (viz. [14]) se dá očekávat, že část energie vlnění, která se šíří základním materiálem, kde bylo vlnění primárně generováno, bude přenesena do maziva. Jednu podmínku splňují právě Lambda vlny. Ty, když jsou buzeny na vnějším povrchu materiálu, kterým se šíří, vytváří výchylku s nemizící podélnou složkou. Další podmínkou je rychlost šíření vlny větší v primárním materiálu než v mazivu. To je splněno pro kombinaci kov a olej.



Obrázek 14: Typický průběh jednoho bodu přichozí vlny při $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ – amplituda



Obrázek 15: Typický průběh jednoho bodu přichozí vlny při $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ – doba šíření

Proto dochází ke změně povrchové akustické vlny docházející k PZT snímači, a tak elektrického signálu, který je dále zpracován [14]. Vlivem množství maziva přítomného na oběžných drahách dochází mimo jiné ke snížení amplitudy výchylky. Dále pak lze pozorovat změnu signálu také vlivem teploty, stavem napjatosti a složením maziva. Podle patentu by mělo docházet k porovnání amplitudy referenčního ložiska bez maziva s ložiskem s mazivem, a tak usuzovat o stavu maziva (množství, viskozita).

Vedle změny amplitudy dochází také při kontaktu základního materiálu s okolím ke změně rychlosti šíření. Jednotlivé typy vlnění s různými rychlostmi šíření do sebe vzájemně přecházejí v závislosti na vlastnostech okolního prostředí. Je-li vnější kroužek, kterým se vlnění šíří v kontaktu s kapalinou – mazivem, přechází Lambda vlna v Scholteho vlnu a svou rychlost zpomalí na rychlost menší než je rychlost šíření vlnění v daném mazivu, jak bylo zmíněno v kapitole 2.2.1.3. Při kontaktu vnějšího kroužku s valivým elementem zase Lambda vlna přechází v obecnou Rayleighovu vlnu, která se také po délce kontaktu šíří s rychlostí shora omezenou menší z rychlostí.

V praxi bylo zjištěno (viz. [17]), že přes veškeré snahy o kvalitní kontakt akčních členů a vnějšího kroužku dochází ke značnému rozptylu střední hodnoty amplitudy a je tak ohrožena opakovatelnost a věrohodnost experimentů. Proto bude v dalších kapitolách pozornost zaměřena na dobu šíření signálu, tzv. propagation time a vliv teploty ložiska na její změnu.

2.3. Základní popis signálu

Následující kapitoly jsou zaměřeny na základní popis signálu a metody jeho vyhodnocení. Nástroje uvedené v této kapitole budou přímo aplikovány na data dostupná pro potřeby této práce.

2.3.1. Popisná statistika [13]

Pro náhodné signály se definují základní charakteristiky, které jsou shodné s charakteristikami náhodných veličin [37]. Jsou to například charakteristiky centrální tendence, charakteristiky rozptýlenosti a další nástroje popisné statistiky, jejímž cílem je třídění, zobrazení a popis dat, který data přehledně zpřístupní pro využití v dalších typech analýz, např. inferenční statistika.

2.3.1.1. Charakteristiky centrální tendence

Charakteristiky centrální tendence různým způsobem určují polohu střední hodnoty zkoumaného vzorku dat. Mezi základní se řadí aritmetický průměr, medián a modus.

Aritmetický průměr

Definice aritmetického průměru je následující podle výrazu (25).

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (25)$$

kde

\bar{x} - aritmetický průměr

N - počet záznamů [–]

x - nezávislá proměnná (hodnota záznamu)

Fyzikálně si lze tuto charakteristiku představit, jako těžiště dat. Součet hodnot pod a nad průměrem je stejný, a tak součet odchylek od těchto dat od průměru je roven nule. Společně s rozptylem a směrodatnou odchylkou, které se z něj počítají, je aritmetický průměr náchylný na extrémní hodnoty a zešikmení dat, které pak zkreslují dojem o jejich celkovém rozložení.

Medián

Jestliže data obsahují extrémní hodnoty, lze střed jejich rozložení spolehlivěji získat pomocí mediánu. Jedná se o hodnotu, která se nachází na střední pozici hodnot seřazených podle velikosti. Pro lichý počet hodnot je to právě hodnota ve středu symetrie, po jejíchž stranách se nachází stejný počet hodnot. V případě sudého počtu záznamů se medián vypočítá jako aritmetický průměr dvou hodnot splňujících podmínku symetrie. Formálně je definován jako hodnota, pro kterou je distribuční funkce rovna právě jedné polovině [21].

Modus

Nejčastější hodnota, která se vyskytuje ve zkoumaných datech, se označuje jako modus. Tato charakteristika nalézá uplatnění u rozdělení dat s více vrcholy. U dat vyjádřených histogramem se určuje jako aritmetický průměr krajních hodnot intervalu s největší četností. Formálně je definován jako hodnota, ve které má distribuční funkce inflexní bod, pro normální rozdělení má pak stejnou hodnotu jako medián [21].

2.3.1.2. Charakteristiky rozptýlenosti

Představu o zkoumaných datech doplňují také charakteristiky rozptýlenosti, zachycující velikost proměnlivosti dat kolem střední hodnoty. V této práci jsou uvedeny rozptyl, směrodatná odchylka a kvantilové míry.

Rozptyl

Jak již bylo řečeno, tato charakteristika se společně se směrodatnou odchylkou vztahuje k aritmetickému průměru, od něhož měří míru rozptýlenosti podle následujícího předpisu (26).

$$s^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (26)$$

kde

s^2 - rozptyl

Tato charakteristika má kvůli druhé mocnině jinou jednotku než původní data a na první pohled neposkytuje přehlednou informaci o míře rozptýlenosti. Hraje významnou roli při testování hypotéz v rámci inferenční statistiky.

Směrodatná odchylka

Jak je patrné z předpisu (27), směrodatná odchylka je stejně jako rozptyl rovna nule, jsou-li všechny hodnoty dat stejné. Jinak je větší.

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (27)$$

kde

s - směrodatná odchylka

Její použití je omezeno vhodností aplikace aritmetického průměru pouze na data s dobrou symetrií, blízcí se tvarem normálnímu rozdělení bez extrémních hodnot.

Kvantilové míry

Kvantil se používá společně s mediánem a označuje se jím hodnota, pod níž se nachází definovaná část dat. Pro větší názornost jsou zavedeny percentily, což jsou kvantily o dané hladině vyjádřené v procentech. Například percentil s hladinou 50 % je medián. Pod ním se nachází 50 % menších hodnot zkoumaných dat. Tento a pak ještě percentily s hladinami 25 (první) a 75 % (třetí) se nazývají kvartily a označují se tiskacím písmenem Q s římskou číslicí v dolním indexu. Míra rozptýlenosti lze pak vyjádřit formou mezikvartilového rozpětí (28).

$$Q = Q_{III} - Q_I \quad (28)$$

kde

Q - mezikvartilové rozpětí

Q_{III} - třetí neboli horní kvartil (na hladině 75 %)

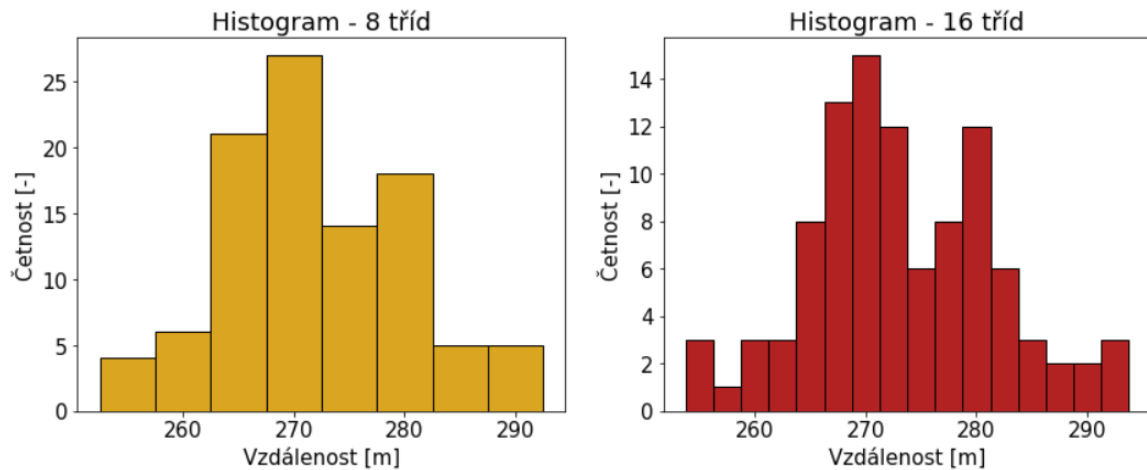
Q_I - první neboli dolní kvartil (na hladině 25 %)

2.3.2. Vizualizace

Mocným nástrojem analýzy poskytujícím přehlednou představu o datech je vizualizace. Díky ní lze snadněji hledat extrémní hodnoty, rozeznávat shluky nebo kontrolovat rozdělení. Tato kapitola v sobě zahrnuje zmínky o zobrazení rozložení četnosti a krabicovém grafu.

2.3.2.1. Rozložení četnosti [22]

Rozložení četnosti, jakými jsou absolutní četnost, relativní četnost a kumulativní četnost, lze vedle tabulky přehledně vyjádřit formou histogramu. Kritickým krokem je volba vhodného počtu tříd pokrývajících celý rozsah hodnot. Histogram poskytuje přehlednou informaci pro soubory dat o více jak 75 záznamech (Obrázek 16).



Obrázek 16: Porovnání vlivu volby počtu tříd na strukturu histogramu pro soubor o 100 záznamech (vzdálenost odpalu golfových míčků), reprodukováno a doplněno z [22]

Autor publikace uvádí, že neexistuje univerzální pravidlo pro volbu počtu tříd a jako možné přístupy zmiňuje vedle druhé odmocniny z počtu záznamů ještě Strugesovo pravidlo (29).

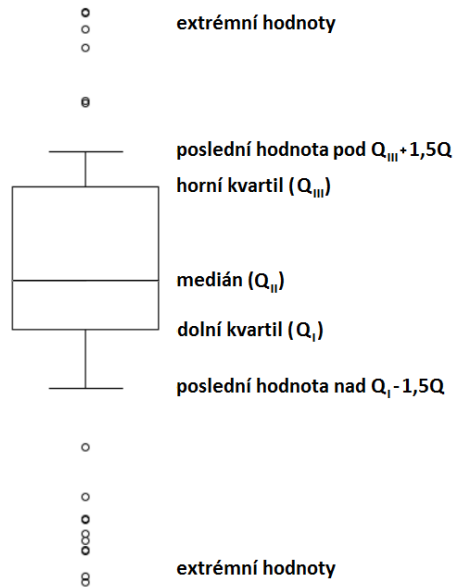
$$h = 1 + \log_2 N \quad (29)$$

kde

h - počet tříd [-]

2.3.2.2. Krabicový graf [13]

Velmi oblíbenou formou reprezentace rozdílů mezi skupinami dat jsou krabicové grafy, které umožňují, vedle porovnání charakteristiky centrální tendence a charakteristiky rozptýlenosti ve formě kvartilů, také odhalení extrémních hodnot (Obrázek 17).



Obrázek 17: Krabicový graf, reprodukováno z [13]

Krabicový graf se konstruuje jako tzv. krabička, která obsahuje 50 % dat, ohraničená prvním a třetím kvartilem s mediánem mezi nimi. Tzv. antény jsou pak stanoveny jako poslední hodnoty záznamů rovných 150 % mezikvartilového rozpětí nad a pod třetím a prvním kvartilem. Zbývající body jsou extrémními hodnotami. Rozdíl jejich maxim je variační rozpětí, které patří také mezi charakteristiky rozptýlenosti.

2.3.3. Frekvenční analýza signálu

K lepšímu porozumění, porovnání a zpracování signálů, jejichž proměnná je funkcí času, je výhodné, využít jejich vyjádření také ve frekvenční oblasti, tj. proměnná je funkcí frekvence [20]. Celá problematika frekvenční analýzy signálu je ale příliš rozsáhlá, aby ji v této práci bylo možno uspokojivě pojmout. Proto se tato práce spokojí jen se stručným a neúplným konstatováním několika skutečností týkajících se rozdílu mezi analýzou signálu konstantní relativní šířkou pásma, např. CPB⁵, a analýzou signálu konstantní absolutní šířkou pásma, např. FFT.

2.3.3.1. Analýza konstantní relativní šířkou pásma – CPB [37]

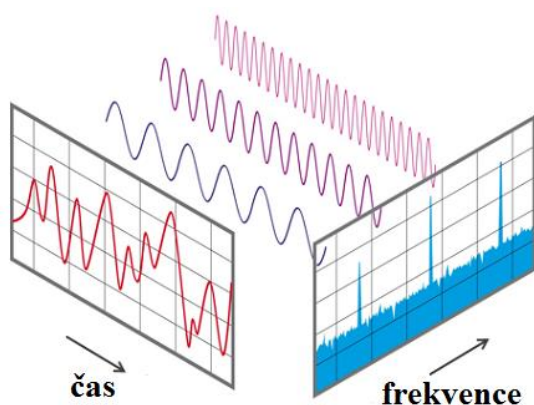
Cílem analýzy CPB je zjistit velikost amplitud signálu v určitých frekvenčních pásmech. Ta jsou vynášena na logaritmické frekvenční stupnici. Jejich šířka se díky velikosti volené jako konstantní podíl nominální frekvence pásma jeví jako konstantní, přestože jejich absolutní

⁵ Constant Percentage Bandwidth

velikost s rostoucí frekvencí roste. Tento konstantní podíl je volen jako jedna oktáva (případně její třetina či jiné zlomky s jedničkou v čitateli), takže každé následující pásmo má dvojnásobnou nominální frekvenci oproti předchozímu. CPB analýza sice poskytuje řádově širší pokrytí frekvenčního rozsahu v porovnání s analýzou FFT, ale její frekvenční stupnice je nepoměrně hrubší.

2.3.3.2. Analýza konstantní absolutní šířkou pásma – FFT [37]

Rozklad signálu v časové oblasti na součet (integrál) sinusoid různých frekvencí (Obrázek 18) se označuje jako Fourierova transformace. U diskrétních signálů se mluví o DFT (Discrete Fourier Transformation). V praxi se díky kratšímu výpočtovému času používají její optimalizované implementace, FFT (Fast Fourier Transformation), které umožnily široké uplatnění DFT v aplikacích, kde je potřeba zajistit zpracování signálu v reálném čase [18].



Obrázek 18: FFT analýza – signál v časové a frekvenční oblasti, přeloženo z [9]

Oproti CPB má FFT jednotný a jemnější frekvenční krok vyneseny na lineární frekvenční ose v celém frekvenčním rozsahu, který je shora omezený Nyquistovou frekvencí. Tato rovnoměrnost a jemnost rozlišení umožňuje lépe rozeznávat a lokalizovat harmonické složky signálu a jejich amplitudy. Proto bude v následujících kapitolách upřednostněna.

3. Analýza dat z dostupných měření

Následující kapitoly, navazující na poznatky uvedené v rešeršní části, jsou zaměřeny na analýzu dat z dostupných měření. Úvodem je představeno testovací zařízení a testovaný vzorek. Dále navazuje kapitola věnovaná FFT analýze, která obsahuje parametry analyzovaných úseků, výpočet ložiskových frekvencí testovaného ložiska v dané konfiguraci a samotnou frekvenční analýzu.

Od kapitoly 3.5 je obsah věnován vlivu teploty ložiska na průběh signálu. Dostupná data pro účely této diplomové práce poskytovala měření prováděná na ložisku, kterému byl během měření omezen přístup nového maziva (minerální olej ISO VG 10), dále odkazováno jako *nemazané* ložisko. A také data z měření prováděných na ložisku, které bylo před experimentem odmaštěno a následné měření probíhalo „nasucho“, dále odkazované jako *čištěné* ložisko.

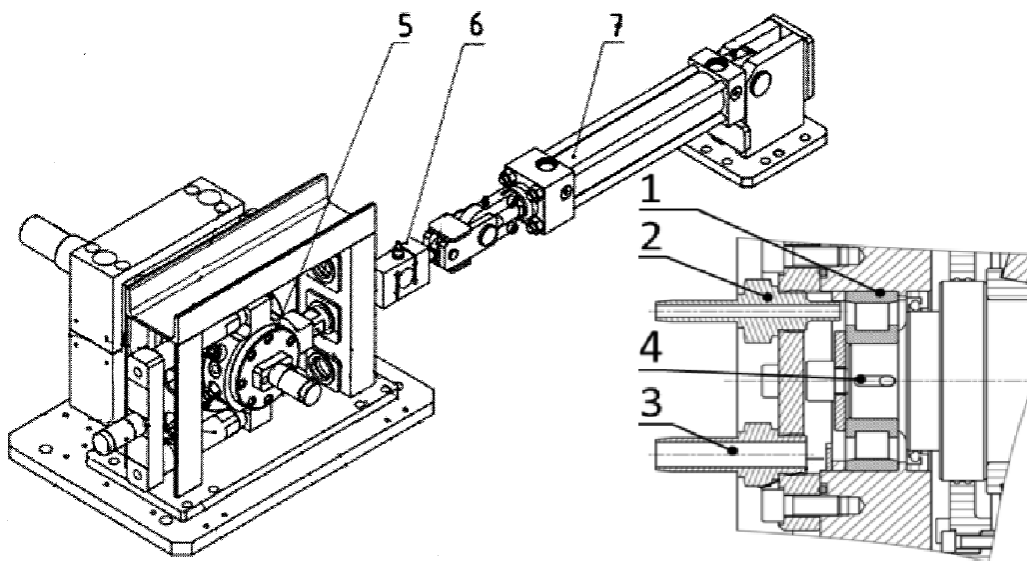
3.1. Testovací zařízení

Testovací zařízení (Obrázek 19), z kterého pocházejí analyzovaná data bylo vyvinuto a postaveno panem Ing. Jakubem Chmelařem, Ph.D. v rámci vypracování disertační práce [17]. Hlavní části tohoto zařízení jsou chráněny národním patentem CZ307380B6 s datem přihlášky 16.5.2017.

Testovací zařízení splňuje důležité požadavky vyplývající z charakteru proběhlých experimentů zaměřených na studium využití povrchových akustických vln pro monitorování mazací vrstvy mezi valivými elementy a oběžnými drahami ložiska. Následující výčet parametrů a vlastností testovacího zařízení není vyčerpávající a omezuje se pouze na požadavky relevantní vzhledem k experimentům, jejichž data jsou v této práci analyzována: Testovací zařízení umožňuje:

- zatížení ložiska čistě radiální silou do velikosti 10 kN (0,17 C testovaného ložiska),
- kontinuálně řídit provozní rychlost otáčení ložiska v rozsahu 0 až 3000 ot·min⁻¹,
- průtokové olejové mazání schopné provozu s oleji o viskozitě 1 až 120 mm²·s⁻¹ a řízení průtoku oleje v rozsahu 0 až 1 l·min⁻¹,
- monitoring teploty ložiska na vnějším a vnitřním kroužku,
- monitoring rychlosti a radiálního zatížení, které je aplikováno prostřednictvím vnějšího kroužku.

Pozice uvedené v závorkách tohoto odstavce se vztahují k následujícímu obrázku (Obrázek 19). Analyzovaná data jsou získána z odporového snímače teploty (RTD) PT100 zabudovaného v drážce (4) pod vnitřním kroužkem testovaného ložiska (1). Vysokoteplotní cement, zaplňující drážku a fixující snímač, zajišťuje efektivní přenos tepla mezi ložiskem a snímačem. Velikost zátěžné síly je pak snímána tenzometrickým snímačem síly (6), který se nachází mezi hydraulickým zatěžujícím členem (7) a domkem testovaného ložiska (5). Přívod, resp. odvod, maziva je zajištěn příslušnými kanálky (2, resp. 3).



Obrázek 19: Celkový pohled a detail zařízení pro testování provozních parametrů kluzných i valivých ložisek, převzato a upraveno ze [7] a [16]

3.2. Testovaný vzorek

Měření byla prováděna na radiálním válečkovém ložisku typu N 306 s axiálním pojištěním valivých elementů na vnitřním kroužku (Obrázek 20).

Tabulka 2: Základní parametry testovaného válečkového ložiska N306 uváděné výrobcem v [31]

Označení	Název	Hodnota
D_o [mm]	Vnější průměr ložiska	72
D_i [mm]	Průměr díry ložiska	30
N_v [-]	Počet valivých elementů	12
L_{we} [mm]	Aktivní délka valivých elementů	11
B [mm]	Šířka ložiska	19
C [kN]	Dynamická únosnost	58,5



Obrázek 20: Rozložené testované válečkové ložisko N306, převzato z [17]

Toto ložisko má 12 valivých elementů oddělených klecí, která je jimi vedena. Klec je vyrobena ze skelnými vlákny vyztuženého polyamidu – PA66. Parametry daného ložiska uváděné výrobcem (viz. Tabulka 2) nejsou pro potřeby této práce dostatečné. Proto tato práce využívá parametrů vnitřní geometrie ložiska, která je chráněnou informací výrobce, a které byly naměřeny v rámci předchozího výzkumu [17]. Výběr parametrů relevantních vzhledem k zaměření této práce je k nalezení v následující tabulce (Tabulka 3).

Tabulka 3: Výběr měřených parametrů testovaného ložiska, převzato z [15] a [17]

Označení	Název	Hodnota
d_o [mm]	Průměr oběžné dráhy vnějšího kroužku	62,526
d_i [mm]	Průměr oběžné dráhy vnitřního kroužku	40,524
D [mm]	Průměr valivého elementu ložiska	10,984
P_d [mm]	Radiální vůle ložiska (vypočtené)	0,034

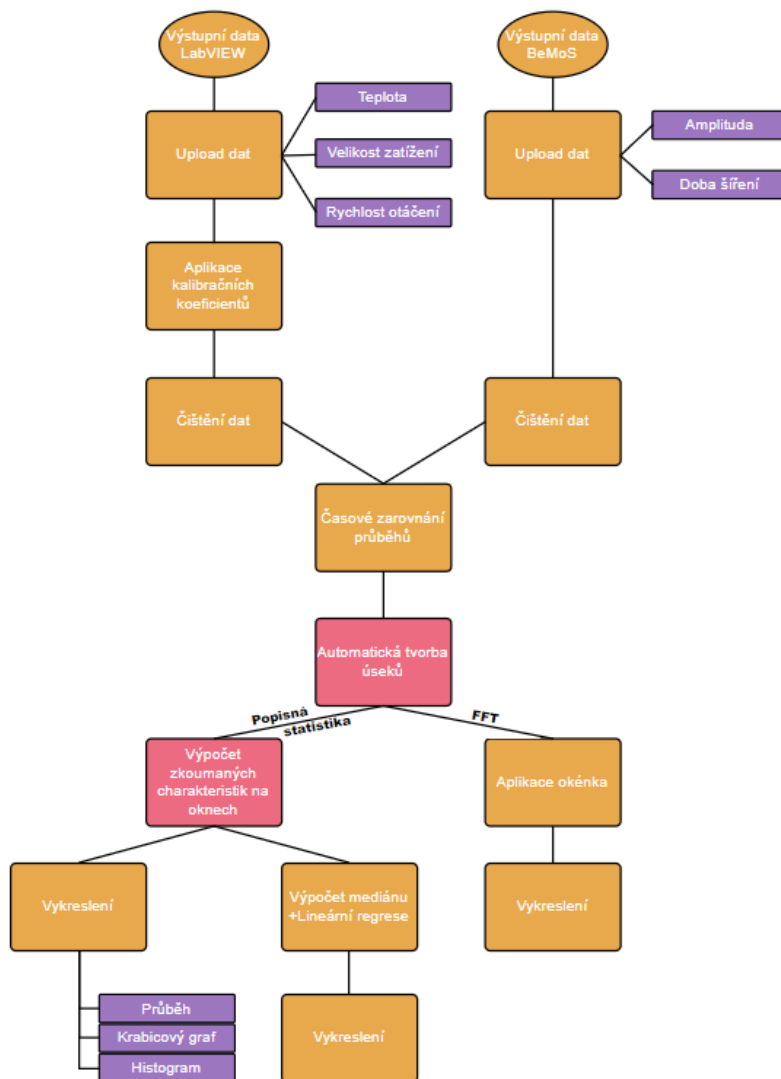
3.3. Navržená metodika zpracování dat

Pro zpracování dostupných dat z proběhlých měření pro účely této práce byly vytvořeny skripty v programovacím jazyce Python. Jednotlivé kroky zpracování jsou vyobrazeny na následujícím schématu (Obrázek 21).

Ze schématu je patrné, že data pocházela ze dvou zdrojů. Jedním bylo zařízení BeMoS popsané v kapitole 2.2.2 a druhým byly snímače zmíněné v kapitole 3.1. Po aplikaci kalibračních koeficientů na data z kanálů velikosti zatížení a rychlosti otáčení bylo třeba nahradit případná chybná data z obou zdrojů. Dostupná data obsahovala pouze omezené množství chybných dat, která tak byla nahrazena mediánem vypočítaným z nejbližšího okolí inkriminovaných dat.

V následujícím kroku bylo třeba pomocí jedinečného úseku dat přítomného v obou zdrojích (např. konec doběhové rampy) časové průběhy zarovnat. Dále byl vyvinut skript pro automatickou tvorbu úseků, jehož ukázka společně s ukázkou skriptu pro výpočet zkoumaných charakteristik na oknech (ve schématu barevně odlišeny) je dostupná v příloze na konci této práce (Příloha 3). poslední zmíněný skript využívá funkce minima a maxima definované dále v kapitole 3.5.

V posledních krocích se metodika zpracování dat rozdělila zvlášť pro FFT frekvenční analýzu popsanou v kapitole 2.3.3.2 a zvlášť pro analýzu pomocí prostředků popisné statistiky popsaných v kapitole 2.3.1. Jejich výsledky jsou prezentovány v následujících kapitolách.



Obrázek 21: Schéma návrhu metodiky zpracování dostupných dat pro účely této práce

3.4. FFT analýza signálu

Výsledky prezentované v následující kapitole 3.4.3 byly vytvořeny pomocí modulu `fft`, který je součástí knihovny `SciPy`, knihovny pro vědecké a technické výpočty v programovacím jazyce `Python`, verze 3.8.5. Mezi použité funkce patří `scipy.fft.fft` a `scipy.fft.freq`, převádějící signál z časové do frekvenční oblasti, jak bylo uvedeno v kapitole 2.3.3. Funkce `scipy.fft.fft` standardně operuje na základě algoritmu využívajícího symetrie počítaných výrazů, která je největší, je-li součin délky úseku a vzorkovací frekvence, tedy počet

záznamů, roven celé mocnině čísla dvě [35]. Počet potřebných operací pro provedení transformace pak není druhá mocnina počtu záznamů (N^2), jak by tomu bylo, kdyby byla transformace prováděna čistě podle definice DFT, ale snižuje se na součin počtu záznamů a logaritmu počtu záznamů o základu dvě ($N \cdot \log_2 N$).

Zmíněná podmínka ale s ohledem na kombinaci vzorkovací frekvence a délky úseku uvedené v následující kapitole 3.4.1 není splněna a funkce proto využívá Bluesteinův algoritmus, který je postaven na odlišném přístupu k dosažení úměrně nízkého počtu operací [1]. Výstupem funkce `scipy.fft.fft` jsou komplexní čísla s reálnou a imaginární částí. Dále je třeba určit velikost těchto komplexních čísel a podělit je počtem záznamů. Je-li tento výsledek vykreslen, lze pozorovat symetrické frekvenční spektrum v kladné i záporné polorovině. Rozdělení informace do dvou polorovin je však pro aplikaci této práce nežádoucí a je tak pro obdržení skutečných velikostí příspěvků jednotlivých frekvencí pouze v kladné polorovině třeba výsledek výše zmíněných operací ještě násobit dvěma. Hlubší rozbor zmíněných algoritmů přesahuje rozsah a zaměření této práce, která si pro zájemce dovoluje nabídnout odkazy na primární zdroje [5] a [1].

3.4.1. Výběr zkoumaného úseku

Pro FFT analýzu byl vybrán úsek z měření, při kterém bylo aplikované konstantní zatížení 10 kN, konstantní rychlost otáčení $1500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ a průměrná teplota úseku 68°C . Gradient teploty je v daném úseku roven $0,5^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ a celkový teplotní rozsah na měřeném úseku je $0,26^\circ\text{C}$.

Tabulka 4: FFT analýza – základní parametry úseku, doplněný výběr z tabulky (viz. Příloha 1)

Označení	Název	Hodnota
$T [^\circ\text{C}]$	Nominální teplota	68
$n_n [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$	Nominální rychlost otáčení	1500
$\Delta T [^\circ\text{C}]$	Rozsah teploty	$\pm 0,13$
$s [^\circ\text{C}]$	Směrodatná odchylka	0,17
$\Delta t [\text{s}]$	Délka úseku	15,7
$n [-]$	Počet otáček	393,1
$F [\text{kN}]$	Zatížení	10
$\frac{\Delta T}{\Delta t} [^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}]$	Teplotní gradient	0,50
$\frac{1}{\Delta t} [\text{Hz}]$	Frekvenční rozlišení	0,064

Systematická chyba únikem, tzv. leakage error, vzniká ve frekvenčním spektru neuzavřením periody signálu na daném úseku počáteční hodnotou (nulou). Tato chyba se projevuje rozšířením základen významných frekvencí frekvenčního spektra a poklesem velikosti jejich amplitud. Tuto chybu lze částečně kompenzovat aplikací pomocné funkce, tzv. okénka. v praxi často např. Hannova (kosinového) okénka (Obrázek 22), kterým se signál vynásobí a uměle tak sjednotí hodnotu signálu na začátku a na konci na nulu [20]. To je s ohledem na nedokončené otáčky (viz. Tabulka 4) provedeno i u tohoto úseku.



Obrázek 22: FFT analýza – Hannovo (kosinové) okénko, přeloženo z [36]

3.4.2. Ložiskové frekvence testovaného ložiska

Po převodu signálu z časové domény do frekvenční domény je možné pozorovat významné frekvence ložiska. Proto je vhodné uvést konkrétní poruchové frekvence, které mohou být v signálu patrné.

Úsek dat pro FFT analýzu je vybrán tak, aby zachycoval průběh konstantní rychlosti otáčení 1500 ot · min⁻¹, tedy 25 Hz. Dosazením parametrů ložiska (viz. Tabulka 2 a Tabulka 3) a dané rychlosti otáčení vnitřního kroužku f_i do výrazů odvozených v kapitole 2.1.4 a zjednodušených díky zastavenému vnitřnímu kroužku $f_o = 0$ Hz a nulovému stykovému úhlu $\alpha = 0^\circ$ získány následující hodnoty ložiskových frekvencí zaokrouhlené na dvě desetinná místa:

$$f_{BPFI} = \frac{N_v}{2} f_i \left(1 + \frac{D}{d_m}\right) = \frac{12}{2} 25 \left(1 + \frac{10,984}{51,525}\right) = 181,98 \text{ Hz} \quad (30)$$

$$f_{BPFO} = \frac{N_v}{2} f_i \left(1 - \frac{D}{d_m}\right) = \frac{12}{2} 25 \left(1 - \frac{10,984}{51,525}\right) = 118,02 \text{ Hz} \quad (31)$$

$$f_{FTF} = \frac{1}{2} f_i \left(1 - \frac{D}{d_m}\right) = \frac{1}{2} 25 \left(1 - \frac{10,984}{51,525}\right) = 9,84 \text{ Hz} \quad (32)$$

$$f_{BPF} = \frac{1}{2} f_i \frac{d_m}{D} \left[1 - \left(\frac{D}{d_m}\right)^2\right] = \frac{1}{2} 25 \frac{51,525}{10,984} \left[1 - \left(\frac{10,984}{51,525}\right)^2\right] = 55,97 \text{ Hz} \quad (33)$$

Následující tabulka (Tabulka 5) shrnuje výsledky společně s vyššími harmonickými frekvencemi, opět zaokrouhlenými na dvě desetinná místa.

Tabulka 5: Fundamentální a harmonické frekvence pro rychlost otáčení 1500 min⁻¹

Označení	Hodnota [Hz]	1.harmonická [Hz]	2.harmonická [Hz]	3.harmonická [Hz]
f_{BPFI}	181,98	363,95	545,93	727,91
f_{BPFO}	118,02	236,05	354,07	472,09
f_{FTF}	9,84	19,67	29,51	39,34
f_{BPF}	55,97	111,94	167,92	223,89

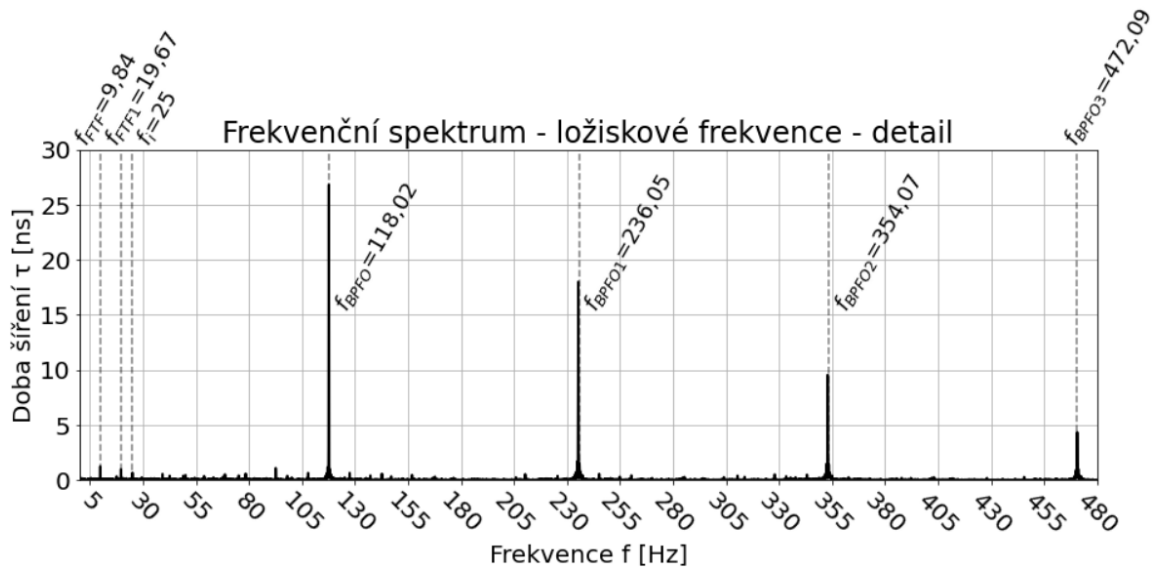
3.4.3. Identifikace ložiskových frekvencí ve frekvenčním spektru

Následující obrázek (Obrázek 23) je detailem frekvenčního spektra úseku popsaného v kapitole 3.4.1. Na nulové frekvenci se mimo zobrazenou oblast nachází velikost průměrné hodnoty doby šíření emitovaných pulzů, 15 105 ns. Na nulové frekvenci se nachází proto, že emise pulzů a snímovací frekvence jsou synchronizovány.

Na předloženém detailu lze nalézt významné frekvence frekvenčního spektra. Tyto frekvence se díky dobrému frekvenčnímu rozlišení a vysoké vzorkovací frekvenci⁶ překrývají s vykreslenými asymptotami ložiskových frekvencí a jejich harmonických násobků vypočtených v kapitole 2.1.4. Vedle frekvence klece ložiska f_{FTF} společně s jejím harmonickým násobkem a frekvence otáčení hřídele f_i lze pak zejména zaznamenat výraznou frekvenci vnějšího kroužku f_{BPFO} s dominantní první harmonickou frekvencí

⁶ V diskutovaném případě je z Nyquist-Shannonova vzorkovacího teoremu minimální frekvence, nad kterou již nedochází k aliasingu, $2 \times 480 \text{ s}^{-1}$, což vzorkovací frekvence 10 kHz zbytečně převyšuje. Nadměrné vzorkování nad zmíněnou limitní vzorkovací frekvencí již nepřináší žádný užitek a jen zvyšuje nároky na operační paměť [18].

f_{BPFO1} . Frekvence vnějšího kroužku a její harmonické násobky jsou přirozeně větší než ostatní ložiskové frekvence objevující se ve frekvenčním spektru vlivem umístění PZT akčních členů, pod kterými se nachází oběžná dráha vnějšího kroužku testovaného ložiska.



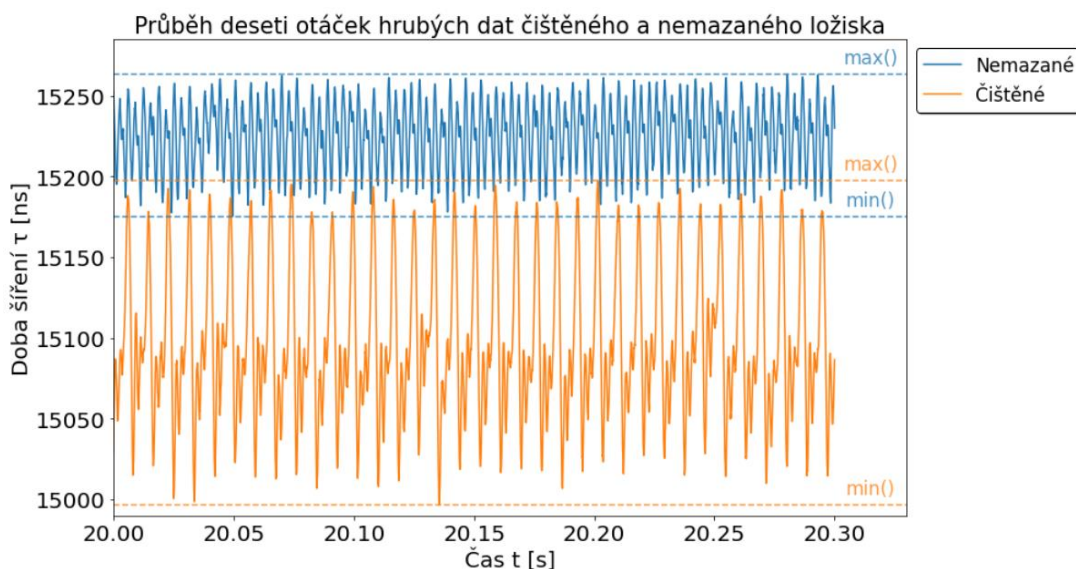
Obrázek 23: FFT analýza – frekvenční spektrum – ložiskové frekvence

To, že se skutečné hodnoty překrývají s vypočtenými také vypovídá o tom, že na daném úseku neprobíhal skluz při odvalování, který by byl vypočteným frekvenčním rozlišením postihnutelný. Ten se jinak podle [37] projevuje zvětšením frekvence vnějšího kroužku f_{BPFO} a poklesem frekvence vnitřního kroužku f_{BPFI} o shodnou hodnotu. Na frekvenci valivého elementu f_{BPF} má v porovnání s vlivem na výše zmíněné charakteristické ložiskové frekvence zanedbatelný vliv.

3.5. Analýza vlivu teploty ložiska na průběh signálu

Tato kapitola přímo navazuje na předcházející výzkum [17] týkající se monitoringu mazací vrstvy metodou snímání a excitace SAW zařízením BeMoS popsané v kapitole 2.2.2 této práce. Jedním ze závěrů tohoto výzkumu byl poznatek, že potenciálně směrodatnými indikátory stavu mazací vrstvy ložiska na oběžných drahách ložiska mohou být maximální, resp. minimální hodnoty signálu doby šíření SAW. Maximálními hodnotami doby šíření je možné registrovat změny mazacího filmu na oběžné dráze mezi valivými elementy. Minimální hodnoty doby šíření se pak zase mění v závislosti na stavu maziva mezi valivým elementem a oběžnou drahou ložiska.

Průběhy hrubých dat pro čištěné a nemazané ložisko definované v úvodu kapitoly 3 jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obrázek 27), kde jsou také vyznačeny hladiny maxim a minim zvláště pro ložisko čištěné a zvláště pro ložisko nemazané tak, jak budou v následujících kapitolách určovány. Graf obsahuje deset otáček ložiska a je pro větší přehlednost vykreslen ve spojitém zobrazení. Vyhodnocení zkoumaných charakteristik lze přiblížit představou, že tento graf je oknem, na kterém je aplikována funkce minima či maxima. Pak je pro celé okno obdržena jedna hodnota maxima a jedna hodnota minima rovna příslušným hladinám. Okno se pak posune o jeden záznam doby šíření dále a proces vyhodnocení se opakuje pro nově vzniklé okno.



Obrázek 24: Průběh deseti otáček hrubých dat čištěného a nemazaného ložiska s vyznačenými hladinami maxim a minim při $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ – spojitě zobrazení

Na dobu šíření SAW byl v [17] popsán vliv vybraných faktorů a jejich kombinací. Výběr z výsledků metody Design of Experiment poskytující informace o citlivosti měřených veličin na změnu úrovně těchto faktorů je k nalezení v následující tabulce (Tabulka 6).

Tabulka 6: Efekty jednotlivých faktorů na střední hodnotu doby šíření SAW, výběr z tabulek [17]

Faktor	Dolní úroveň	Horní úroveň	Výsledný efekt [ns]
Rychlost	$500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	$3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$	35,94
Zatížení	1,2 kN	10 kN	-78,07
Viskozita	$10 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	$100 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	-121,14
Mezní hodnota efektu pro hladinu významnosti $p=0,05$			18,60

Vliv faktoru viskozity je daleko největší a z dat dostupných pro potřeby této práce se jej nepodařilo zcela odizolovat od teploty struktury ložiska. Efekty interakcí jednotlivých vlivů nepřekročily mezní hodnotu efektu pro hladinu významnosti 0,05 a nejsou proto ve výběru uvedeny.

Následující kapitoly jsou věnovány analýze vlivu teploty na průběh charakteristik uvedených v této kapitole provedené na datech z měření výše definovaných provozních stavů ložiska definovaných v úvodu kapitoly 3.

3.5.1. Výběr zkoumaných úseků

Pro maximální izolaci vlivu teploty na průběh signálu byly vybrány úseky s jednotnou hladinou zatížení 10 kN pro čištěné i nemazané ložisko. Vliv rychlosti otáčení ložiska nebylo možné zcela eliminovat s ohledem na potřebu obsažení dostatečného teplotního rozsahu. Rychlost otáčení je proto u jednotlivých úseků uváděna jako parametr.

Rozdílné rychlosti jednotlivých úseků byly také brány v patrnost při zpracování hodnot zkoumaných charakteristik. Jednotlivé charakteristiky byly vypočteny vždy v rámci okna o velikosti snímající deset celých otáček. Velikosti oken pro příslušné rychlosti otáčení k nalezení v následující tabulce (Tabulka 7).

Tabulka 7: Velikosti oken snímajících deset celých otáček

Rychlost otáčení [$\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}$]	Velikost okna [s]
1000	0,60
1500	0,40
2000	0,30
2500	0,24
3000	0,20

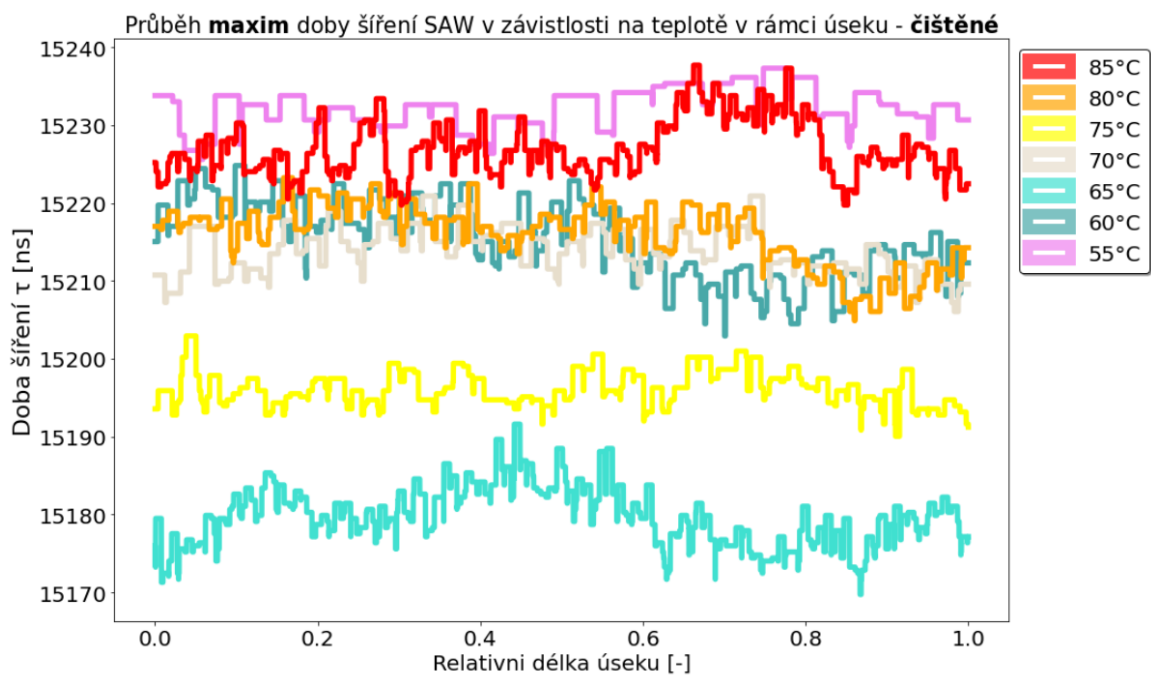
Délka jednotlivých zkoumaných úseků a jejich poloha v celkovém záznamu byly určovány pomocí nástrojů popisné statistiky popsanych v kapitole 2.3.1 tak, aby průměrná hodnota teploty byla shodná s hodnotou nominální, rozsah teplot byl vždy $\pm 0,13^\circ\text{C}$ a směrodatná odchylka byla menší než $0,2^\circ\text{C}$. Základní parametry vybraných úseků jsou předneseny v následující tabulce (Tabulka 8). Pro informace o základních parametrech vybraných úseků nemazaného ložiska je čtenář odkázán na obsah tabulky v závěru práce (Příloha 2).

Tabulka 8: Základní parametry vybraných úseků čištěného ložiska, výběr z tabulky (viz. Příloha 1)

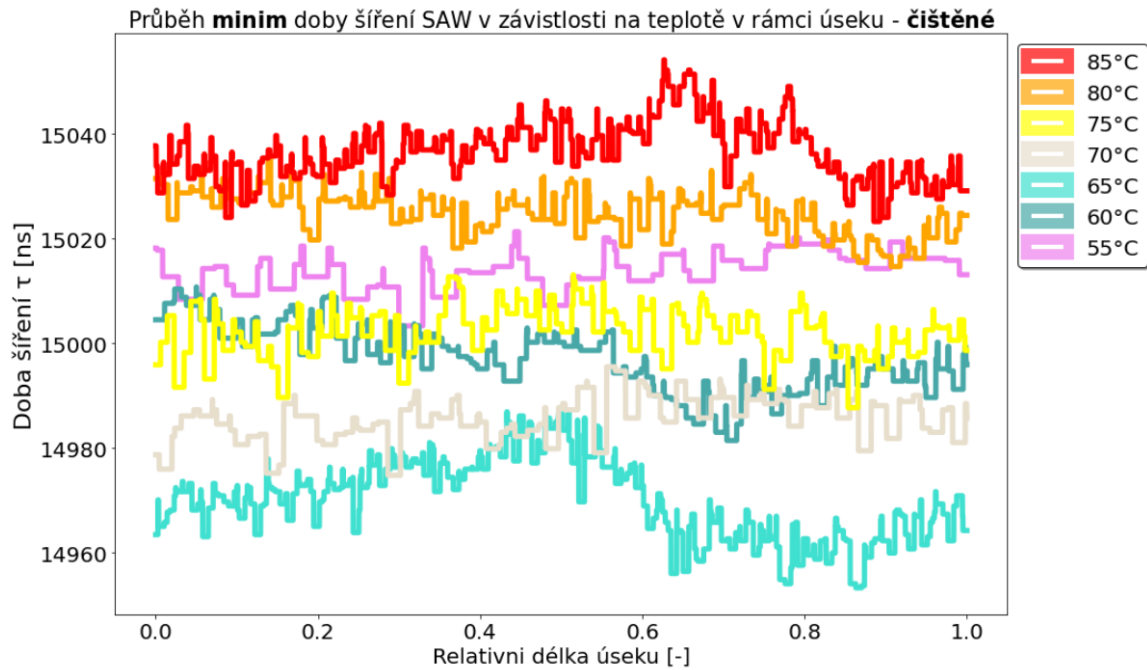
Nominální teplota T [°C]	Nominální rychlost otáčení n_n [ot · min ⁻¹]	Směrodatná odchylka s [°C]	Délka úseku Δt [s]	Teplotní gradient $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ [°C · min ⁻¹]
55	1000	0,17	20,9	0,37
60	1000	0,17	49,9	0,16
65	1000	0,14	85,4	0,09
70	1500	0,18	25,9	0,30
75	1500	0,15	25,0	0,31
80	2000	0,17	27,5	0,28
85	2000	0,17	41,5	0,19

3.5.2. Průběh zkoumaných charakteristik doby šíření vybraných úseků

Následující grafy zobrazují vykreslení maximálních (Obrázek 25, resp. Obrázek 27) a minimálních (Obrázek 26, resp. Obrázek 28) hodnot doby šíření SAW čištěného, resp. nemazaného, ložiska v rozsahu teplot 55°C až 85°C s krokem 5°C. Aby bylo možné vzájemně porovnávat úseky o rozdílné rychlosti otáčení, jsou průběhy vykresleny na osu relativní délky úseku. Díky relativnímu měřítku, získanému z podílu okamžité délky úseku a jeho celkové délky, jsou jednotlivé průběhy zarovnané a zdánlivě mají stejnou délku. Ta je nicméně různá pro každý úsek a konstantní proměnnou je zde jen rozsah teplot $\pm 0,13^\circ\text{C}$.

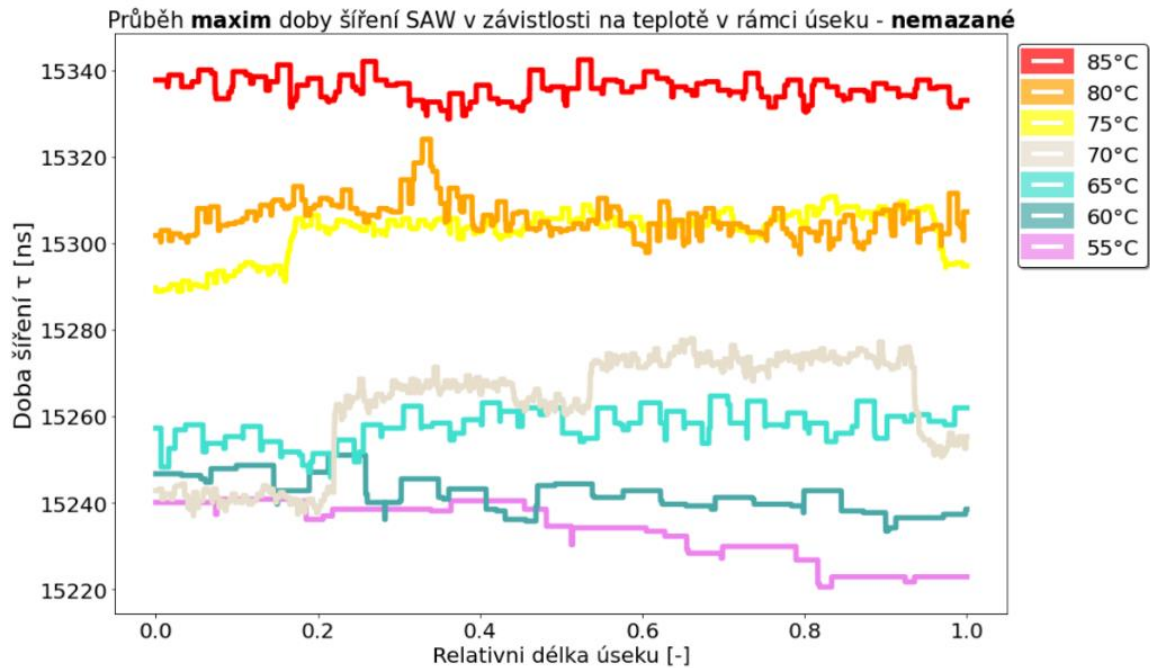

Obrázek 25: Průběh maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – čištěné

Hranatost vykreslených průběhů je způsobena aplikací okna, na kterém je prováděn výběr maximální, resp. minimální, hodnoty. Ke změně určené hodnoty dochází až ve chvíli, kdy zorné pole okna získá novou *extrémní* hodnotu, případně, když tato ze zorného pole vypadne a nahradí se ze stávajících hodnotou novou. Tento jev je patrnější u průběhů s větší velikostí okna, protože *extrémní* hodnota má tak větší *pole působnosti*.



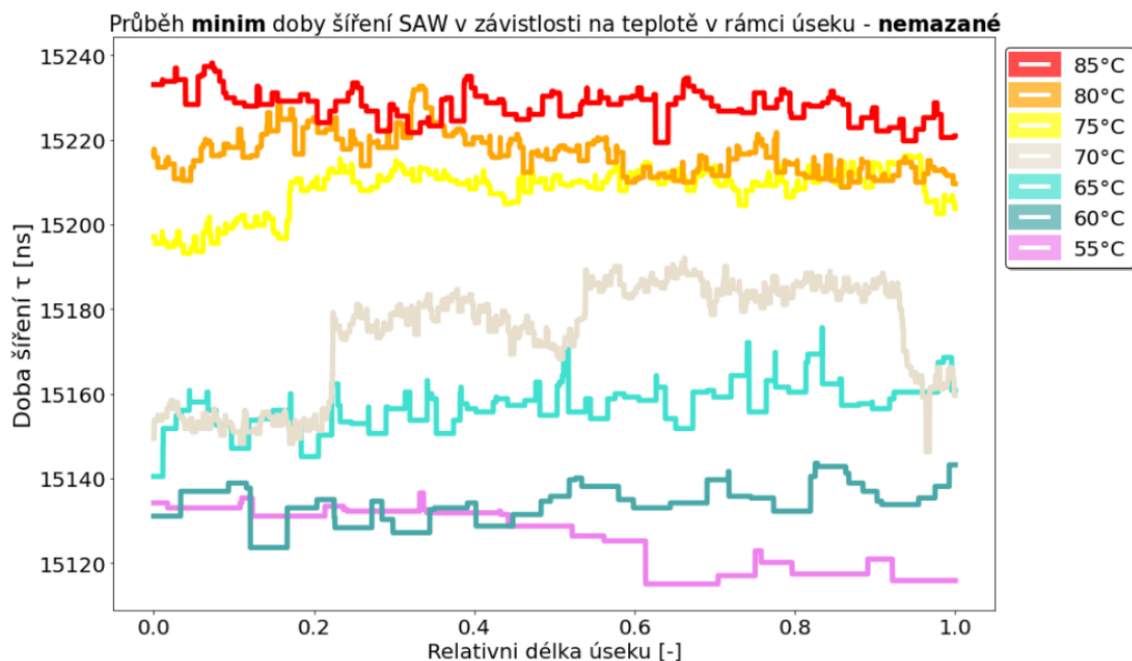
Obrázek 26: Průběh minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – čištěné

Na první pohled je také patrný částečný překryv průběhů na extrémních teplotních hladinách maximálních hodnot čištěného ložiska (Obrázek 25). Ten je pravděpodobně způsoben vstříkem ředidla na bázi alkoholu do kontaktu v oblasti přechodu mezi teplotními hladinami 61 a 62°C. K vypaření ředidla došlo s ohledem na vysokou teplotu poměrně rychle, nicméně celistvost případného trendu tak byla narušena. Průběhy čištěného ložiska občasné vykazují u maximálních i minimálních hodnot zvlnění. K výrazným skokům však nedochází.



Obrázek 27: Průběh maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – nemazané

U vykreslení maximálních hodnot nemazaného ložiska si lze v rámci úseku (Obrázek 27) povšimnout přeskoků velikosti doby šíření zhruba o 20 ns v datech o nominální teplotě 70°C. S tímto odskokem ve střední části tento úsek zapadá do celkového trendu, který sledují okolní průběhy s rozdílnou teplotou, tedy prodlužování doby šíření s rostoucí teplotou.



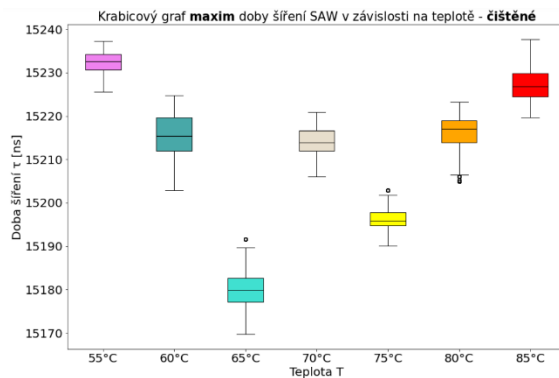
Obrázek 28: Průběh minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – nemazané

Skokové změny průběhu u úseku s nominální teplotou 70°C lze pozorovat i u vykreslení minim (Obrázek 28). Stejně jako u maximálních hodnot, i zde se jedná o přeskok *do trendu*.

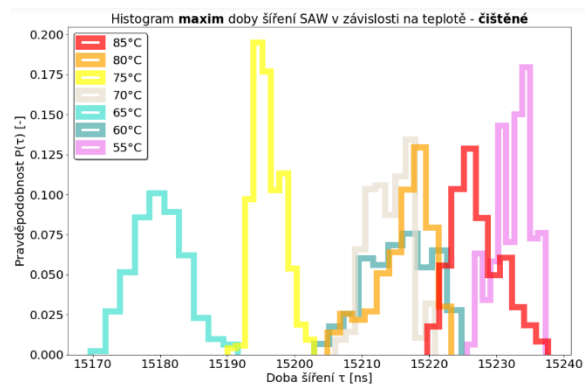
U nemazaného ložiska lze pro maxima i minima pozorovat stabilní prodlužování doby šíření SAW s rostoucí teplotou. V následující kapitole je tento trend dále sledován a je doplněn o nové informace.

3.5.3. Statistické rozdělení zkoumaných charakteristik doby šíření vybraných úseků

Tato kapitola přináší doplnění a přehlednější zobrazení statistického rozdělení vybraných úseků z předchozí kapitoly s využitím nástrojů vizualizace popsanych v kapitole 2.3.2, které umožní rychlou orientaci v předkládaných výsledcích.

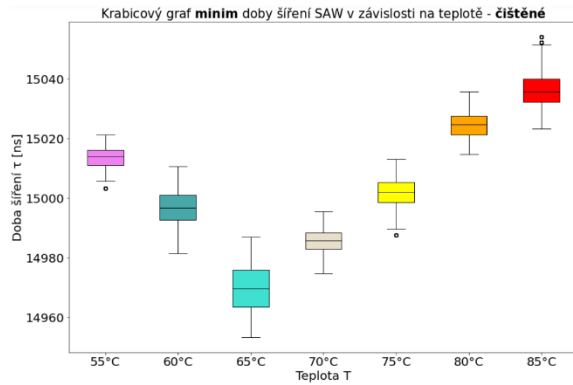


Obrázek 29: Krabicový graf maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné

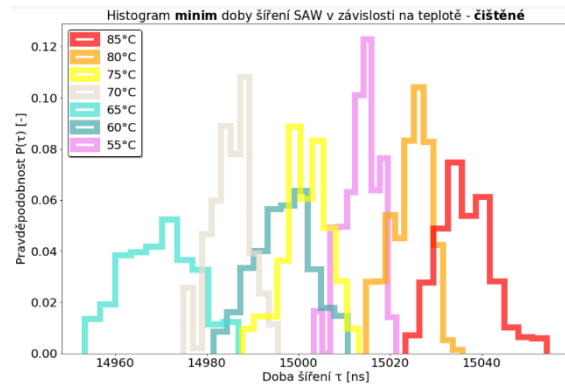


Obrázek 30: Histogram maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné

Na obrázcích (Obrázek 30, Obrázek 32, Obrázek 34 a Obrázek 36) jsou vykresleny histogramy s pravděpodobností výskytu hodnot v dané třídě. Zobrazení pravděpodobnosti výskytu bylo upřednostněno před zobrazením absolutní četnosti vyobrazené v kapitole 2.3.2.1, aby bylo možno vzájemně porovnávat úseky o různých délkách.



Obrázek 31: Krabicový graf minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné

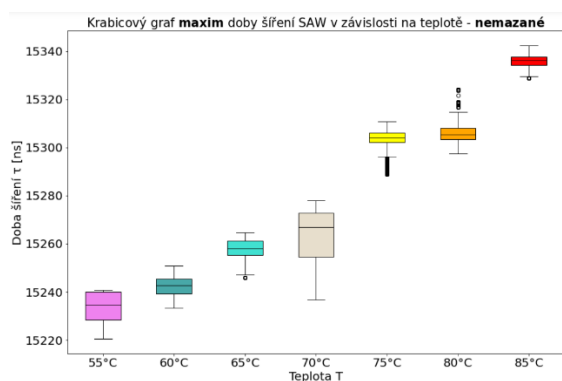


Obrázek 32: Histogram minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné

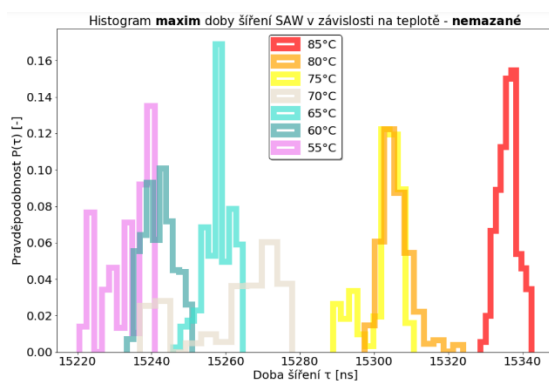
Při pohledu na obrázky s krabicovými grafy (Obrázek 29, Obrázek 31, Obrázek 33 a Obrázek 35) v kombinaci s histogramy je vidět, že četnost extrémních hodnot je nízká a rozsah hodnot je až na výjimky určen anténami.

Pro maxima čišťeného ložiska se rozsah hodnot doby šíření pohybuje kolem 17 ns a pro minima okolo 26 ns. Mezikvartilové rozpětí těchto charakteristik pro čišťené ložisko, definované v kapitole 2.3.1.2, je pak průměrně 5 a 7 ns.

Pro maxima, resp. minima, nemazaného ložiska lze rozsah hodnot doby šíření očekávat okolo 23 ns, resp. 27 ns. Mezikvartilové rozpětí pak průměrně okolo 8 a 9 ns.



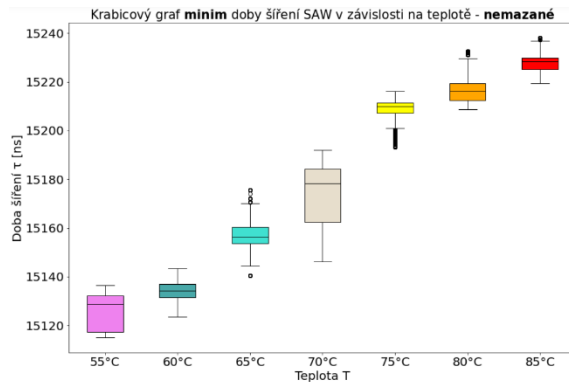
Obrázek 33: Krabicový graf maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané



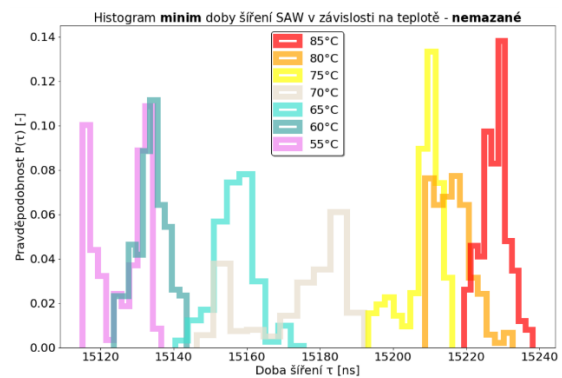
Obrázek 34: Histogram maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané

Rozdělení pravděpodobností pro vyčištěné i nemazané ložisko až na výjimky připomíná normálové rozdělení. Jednou z výjimek je dvourcholovost rozdělení u minimálních hodnot nemazaného ložiska pro nominální teplotu 55°C (Obrázek 36) a pak u obou charakteristik

na nominální teplotě 70°C (Obrázek 34 a Obrázek 36), což je způsobeno nehomogenitou průběhu pozorovanou na zobrazeních z kapitoly 3.5.2, která s největší pravděpodobností není způsobena vlivem teploty, protože je ojedinělá a vyskytuje se uprostřed teplotního rozsahu.



Obrázek 35: Krabicový graf minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané



Obrázek 36: Histogram minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané

Z grafů této i předchozí kapitoly není jednoznačný trend změny charakteristik popisné statistiky jakými jsou mezikvartilový rozptyl a rozsah hodnot. Výrazný trend růstu mediánu doby šíření s rostoucí teplotou lze však zaznamenat u maximálních i minimálních hodnot nemazaného ložiska. U čištěného ložiska lze podobný trend pozorovat u minimálních hodnot od nominální teploty 65 °C. U maximálních hodnot je tento trend narušen úsekem na hodnotě 70°C. Následující kapitola nabídne další přiblížení a podrobnější pohled na vývoj mediánu v závislosti na teplotě.

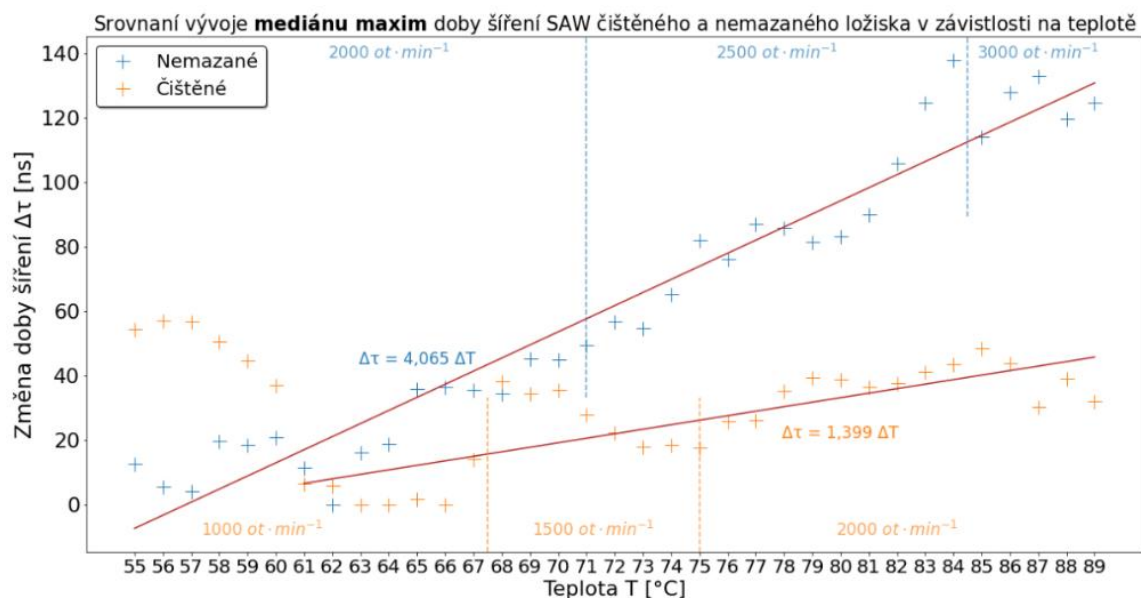
3.5.4. Vývoj trendu zkoumaných charakteristik doby šíření

Následující grafy (Obrázek 37, Obrázek 38) zobrazují vývoj trendu mediánu maximálních a minimálních hodnot doby šíření pro nemazané a čištěné ložisko. Toto přiblížení umožňuje přehledné zobrazení více teplotních hladin a tím snazší odhalení případného trendu. Data jsou normována na nejnižší hodnotu souboru, takže na osu y je vynášena změna doby šíření $\Delta\tau$.

Rozsah nominálních hodnot teplotních hladin je 34°C s krokem 1°C od 59°C do 89°C. Jednotlivé vývoje mediánu jsou rozděleny do oblastí rychlostních hladin, ve kterých dané úseky probíhaly, a které tak doplňují informaci o případném vlivu tohoto faktoru na vývoj trendu.

Nejprve necht' je věnována pozornost vývoji mediánů čištěného ložiska – oranžově. Úseky se rozprostírají na oblastech rychlostních hladin 1000, 1500 a 2000 $ot \cdot min^{-1}$. Vývoj mediánu maxim i minim je nespojitý na dvou místech. Prvním je skokový pokles mezi teplotními hladinami 60 a 61°C, kdy bylo do kontaktu vstříknuto 5 ml odmašťovadla na bázi alkoholu.

Dalším je pak skok mezi teplotními hladinami 67 a 68°C, kdy už je s ohledem na teplotu a časový odstup od vstřiku alespoň 15 minut. Vliv odmašťovadla na signál je proto nepravděpodobný. Lokace skoku je však totožná se změnou rychlostní hladiny z 1000 na 1500 $ot \cdot min^{-1}$. Při další změně rychlostní hladiny již však není zaznamenán žádný významný skok. Z uvedených skutečností jsou případné trendy čištěného ložiska sledovány až od teplotní hladiny 61°C, od které se dá vývoj považovat za nenarušený.

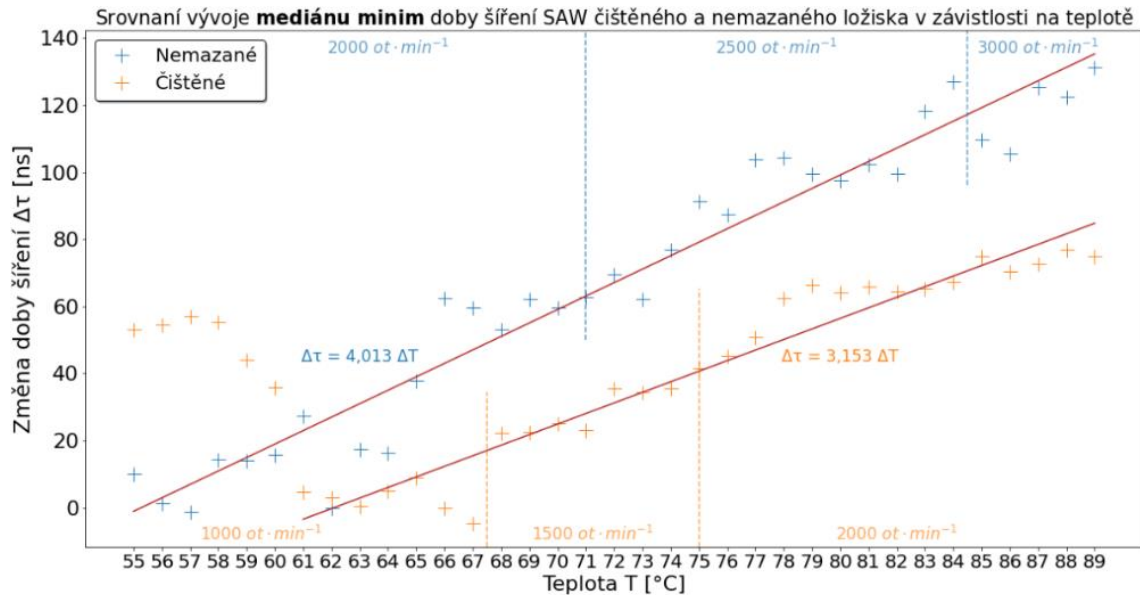


Obrázek 37: Srovnání vývoje mediánu maxim doby šíření SAW čištěného a nemazaného ložiska

Vývoj mediánu maxim nemazaného ložiska – modře (Obrázek 37) vykazuje stabilní nárůst přes celý teplotní rozsah. Pokud se body proloží pomocí metody nejmenších čtverců, získá se odhad směrnice přímky, z kterého vyplývá, že se změnou teploty o jeden stupeň dojde ke změně o 4,065 ns. Stejný trend lze pozorovat u nemazaného ložiska i pro mediány minim, kdy je tato směrnice rovna 4,013 ns.

Vývoj mediánu maxim čištěného ložiska – oranžově (Obrázek 37) tak výrazný trend nevykazuje. Směrnice vývoje je pouze 1,399 ns a navíc zde vyvstává oprávněné podezření, že k provázanosti s teplotou nedochází, jelikož úsek mezi teplotními hladinami 61 a 67°C

působí, jak kdyby byl celý jen vytržen z jinak téměř horizontálního vývoje, který nevykazuje se zvyšující se teplotou výrazný růst.



Obrázek 38: Srovnání vývoje mediánu minim doby šíření SAW čistěného a nemazaného ložiska

Takový nárůst je nicméně možno zpozorovat u vývoje mediánu minim čistěného ložiska – oranžově (Obrázek 38). Se směrnici 3,153 ns na jeden stupeň Celsia dochází nehledě na předchozí vývoj, pravděpodobně ovlivněný vstříkem lihu, ke stabilnímu růstu doby šíření o přibližně 60 ns v rozsahu teplot 68 až 89°C.

3.6. Shrnutí a navazující výzkum

Učinit obecné závěry o chování minim a maxim v závislosti na teplotě z výše uvedených faktů by bylo předčasné. Povedlo se jimi nicméně přiblížit možné směřování navazujícího výzkumu. Trend růstu mediánu obou charakteristik u nemazaného ložiska je téměř totožný a nápadně koresponduje s vývojem svázaným se změnou viskozity minerálního oleje v závislosti na teplotě demonstrováným na experimentu v [17]. Ta s rostoucí teplotou klesá, a tak narůstá doba šíření SAW (viz. Tabulka 6). Lze proto vývoj sledovaný v předchozí kapitole předběžně připsat zbytkovému filmu maziva na površích interagujících komponent. Tuto hypotézu navíc podporuje rozdílnost vývoje mediánu charakteristiky maxima u nemazaného a čistěného ložiska, kdy maxima čistěného ložiska výraznou svázanost s teplotou nevykazují. Nejbližší navazující výzkum by se tak mohl zaměřit na potvrzení rozdílnosti svázanosti průběhů charakteristik maxima a minima na teplotě jejím úplným izolováním eliminací rotace a přítomnosti zbytkového maziva.

4. Závěr

Tato práce nabídla ve svém obsahu rešerši a analýzu dat z dostupných měření se zaměřením na vliv teploty navazující na předchozí výzkum [17] chování povrchových akustických vln ve struktuře ložiska jako prostředku k průběžnému monitorování stavu maziva za provozu.

V úvodních kapitolách byly popsány základní komponenty valivých ložisek, jejich charakteristiky a funkce. Dále byly z popsáných kinematických vztahů mezi jednotlivými komponentami odvozeny ložiskové frekvence. V následujících kapitolách byly po stručném shrnutí vybraných typů vlnění souvisejících s tématem této práce popsány metody snímání a excitace povrchových akustických vln zařízením BeMoS. Na závěr rešeršní části bylo zpracováno téma základního popisu signálu a metod jeho vyhodnocení, kdy představené nástroje byly dále využity v praktické části.

Výsledky praktické části této práce obsahující analýzu signálu, byly zpracovány pomocí programovacího jazyka Python. Veškeré skripty, jejichž ukázka je přiložena v závěru této práce, byly vytvořeny autorem této práce speciálně pro její potřeby. Úvodem praktické části byla provedena frekvenční analýza signálu pomocí algoritmu FFT, který byl představen v rešeršní části. Pro danou rychlost otáčení byly vypočteny ložiskové frekvence, s kterými byly následně výsledky analýzy porovnány. Díky známé rychlosti otáčení, dostatečnému množství dat a dobrému frekvenčnímu rozlišení vypočtené ložiskové frekvence velmi dobře korelovaly s vykresleným frekvenčním spektrem.

V závěrečné části této práce byly předneseny výsledky analýzy vlivu teploty ložiska na průběh signálu během měření. Analýza byla provedena pro dvě charakteristiky, minima a maxima doby šíření povrchové akustické vlny, které podle závěrů předcházejícího výzkumu [17] nejlépe reagují na změny mazacího režimu v ložisku. Z výsledků předložené analýzy byly formulovány předběžné závěry a návrh směřování navazujícího výzkumu.

Bylo zjištěno, že i zbytkový film maziva uplatňuje skrze změnu viskozity výrazný vliv na průběh signálu a je proto pro další výzkum vlivu teploty na průběh signálu vhodné jeho přítomnost zcela eliminovat. U čištěného ložiska byl popsán trend zvětšujícího se minima doby šíření SAW s rostoucí teplotou, pro dostupná data předběžně odhadnut na 3,15 ns na jeden stupeň Celsia, a neshodnost teploty s maximem doby šíření SAW. Veškeré závěry uvedené v této práci jsou prozatímni a závislé na potvrzení dalšími studiemi.

5. Seznam použité literatury

- [1] BLUESTEIN, Leo I. A Linear Filtering Approach to the Computation of the Discrete Fourier Transform. OPPENHEIM, Alan V., ed. Papers on Digital Signal Processing [online]. The MIT Press, 1969, 451-455 [cit. 5.4.2021]. ISBN 9780262310840. Dostupné z: doi:10.7551/mitpress/5222.003.0018
- [2] BOLEK, Alfred a Josef KOCHMAN. Části strojů. 5. přeprac. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. Technický průvodce. ISBN 9788003004263.
- [3] BRÜCKNER, C., & BestSens, 2014. Determination of a bearings operating conditions during the working process by means of BeMoS®.
- [4] BURRUS, C. Sidney, Ramesh A. GOPINATH a Haitao GUO. Introduction to wavelets and wavelet transforms: a primer. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998. ISBN 0-13-489600-9.
- [5] COOLEY, James W. a John W. TUKEY. An algorithm for the machine calculation of complex Fourier series. Mathematics of Computation [online]. 1965, 19(90), 297-301 [cit. 5.4.2021]. ISSN 0025-5718. Dostupné z: doi:10.1090/S0025-5718-1965-0178586-1
- [6] DAUBECHIES, Ingrid a Christopher HEIL. Ten Lectures on Wavelets. Computers in Physics [online]. 1992, 6(6) [cit. 6.4.2021]. ISSN 08941866. Dostupné z: doi:10.1063/1.4823127
- [7] DYNBYL, Vojtěch a Jakub CHMELÁŘ. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE, Jugoslávských partyzánů 1580/3, 160 00 Praha 6, Dejvice, Česká republika. Zařízení pro testování provozních parametrů kluzných i valivých ložisek. CZ307380B6. Uděleno 30.05.2018. Dostupné také z: <https://isdv.upv.cz/doc/FullFiles/Patents/FullDocuments/307/307380.pdf>
- [8] FIALA, Jaroslav. Waveletová transformace [online]. 1999, 6(1) [cit. 6.4.2021]. ISSN 1805-4382. Dostupné z: <http://kfes-117.karlov.mff.cuni.cz/ms/bul99-1/fiala.pdf>
- [9] FROELICH, Jon E., UNIVERSITY OF WASHINGTON, United States of America, [online], [cit. 5.4.2021], Dostupné z: <https://makeabilitylab.github.io/physcomp/signals/FrequencyAnalysis/index.html>
- [10] HARRIS, Tedric A. a Michael N. KOTZALAS. Rolling bearing analysis – Advanced Concepts of Bearing Technology. 5th ed. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis, c2007. ISBN 978-0-8493-7182-0.
- [11] HARRIS, Tedric A. and Michael N. KOTZALAS, 2007. Essential concepts of bearing technology. Boca Raton: CRC Press.
- [12] HARRIS, Tedric A. Rolling bearing analysis. 4. ed. New York: John Wiley & Sons. ISBN 0-471-35457-0
- [13] HENDL, Jan. Přehled statistických metod: analýza a metaanalýza dat. 4., rozš. vyd. Praha: Portál, 2012. ISBN 9788026202004.
- [14] 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.
- [15] CHMELÁŘ, Jakub, Karel PETR, Petr MIKEŠ a Vojtěch DYNBYL. Cylindrical roller bearing lubrication regimes analysis at low speed and pure radial load. Acta Polytechnica [online]. 2019, 59(3), 272-282 [cit. 2021-6-21]. ISSN 1805-2363. Dostupné z: doi:10.14311/AP.2019.59.0272

- [16] CHMELAŘ, Jakub, Pavel Mossoczy, Vojtěch Dynybyl. 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
- [17] CHMELAŘ, Jakub. Využití povrchových akustických vln pro monitorování mazací vrstvy mezi valivými elementy a dráhou ložiska. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Ústav konstruování a částí strojů. Praha, 2019.
- [18] LAXPATI, Sharad R. and Vladimir GONCHAROFF, 2018. Practical signal processing and its applications: with solved homework problems. Singapore: World Scientific. ISBN 978-981-3224-02-5
- [19] Lindner, G.; BRÜCKNER, 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.
- [20] MILÁČEK, Stanislav. Měření a vyhodnocování mechanických veličin. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 8001024172.
- [21] MILÁČEK, Stanislav. Náhodné a chaotické jevy v mechanice. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2000. ISBN 800102170x.
- [22] MONTGOMERY, Douglas C., George C RUNGER and Norma Faris HUBELE, 2012. Engineering Statistics: SI Version. Hoboken: John Wiley Sons. ISBN 978-0-470-64607-6
- [23] NATIONAL INSTRUMENTS CORP.. Understanding Frequency Performance Specifications [online], Copyright 2021, [cit. 6.4.2021], Dostupné z: <https://www.ni.com/cs-cz/support/documentation/supplemental/06/understanding-frequency-performance-specifications.html>
- [24] NAZARCHUK, Zinoviy, Valentyn SKALSKYI and Oleh SERHIYENKO, 2017. Acoustic Emission. Foundations of Engineering Mechanics [online]. Retrieved z: doi:10.1007/978-3-319-49350-3
- [25] NĚMEČEK Pavel a Elias TOMEH, Vibrační diagnostika základních závad, Technická univerzita v Liberci, Liberec 2010
- [26] PIECHOTA, Hynek. Analýza signálů technikou Waveletů [online]. 1999, [cit. 6.4.2021]. ISBN 80-7078-774-0. Dostupné z: <http://akce.fs.vsb.cz/2000/ASR2000/Sbornik/papers/piechota.pdf>
- [27] RANDALL, R.B. Frequency Analysis. 3rd ed. Naerum: Brüel & Kjaer, 1993. ISBN 8787355078.
- [28] RAYLEIGH, Lord, 1885. On Waves Propagated along the Plane Surface of an Elastic Solid. Proceedings of the London Mathematical Society [online]. vols. s1-17, no. 1, pp. 4–11. Retrieved z: doi:10.1112/plms/s1-17.1.4
- [29] RETI, L., Leonardo on bearings and gears, Scientific American, 224(2), 101–110, 1971.
- [30] ROQUE, Antonio & SILVA, Tiago & CALADO, João & DIAS, J., 2009. An approach to fault diagnosis of rolling bearings. WSEAS Transactions on Systems and Control. 4.
- [31] SKF Group, Rolling bearings. PUB BU/P1 10000/2 EN, 2013
- [32] SKF Group, Rolling bearings. PUB BU/P1 17000 EN, 2018

- [33] STRANGMAN, Gary. GitHub, Inc.. History of SciPy Repository – signaltonoise [online], Copyright 2021, [cit. 6.4.2021], Dostupné z: <https://github.com/scipy/scipy/blob/v0.14.0/scipy/stats/stats.py#L1864>
- [34] The MathWorks, Inc.. Help Center Documentation – snr [online], Copyright 1994-2021, [cit. 6.4.2021], Dostupné z: https://www.mathworks.com/help/signal/ref/snr.html#bt2g_cb-2
- [35] The SciPy community, SciPy v1.6.3 Reference Guide – scipy.fft.fft [online], Copyright 2008-2021, [cit. 6.4.2021], Dostupné z: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.fft.fft.html#scipy.fft.fft>
- [36] The SciPy community, SciPy v1.6.3 Reference Guide – scipy.signal.windows.hann [online], Copyright 2008-2016, [cit. 25.4.2021], Dostupné z: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.windows.hann.html>
- [37] TŮMA, Jiří. Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT. Praha: Sdělovací technika, 1997. ISBN 8090193617.
- [38] WOLFGANG, Diller, BestSens AG, [online], Germany, [cit. 5.3.2021], Dostupné z: www.bestsens.de
- [39] WORDEN, K., 2001. Rayleigh and Lamb Waves - Basic Principles. Strain [online]. vol. 37, no. 4, pp. 167–172. Retrieved z: doi:10.1111/j.1475-1305.2001.tb01254.x

6. Seznam obrázků

Obrázek 1: Nejčastější příčiny poruch ložisek, reprodukováno z [10]	3
Obrázek 2: Axiální ložisko podle Leonarda da Vinci (cca. 1500 n.l.), převzato z [29]	5
Obrázek 3: Radiální kuličkové ložisko – komponenty, upraveno z [11].....	6
Obrázek 4: Stykové úhly různých valivých ložisek, upraveno z [31]	7
Obrázek 5: Jehličkové ložisko bez klece a vnitřního kroužku, převzato z [11].....	7
Obrázek 6: Kuličkové ložisko – rozměry, upraveno z [12]	8
Obrázek 7: Volný stykový úhel α_0 a axiální vůle Pe , upraveno z [12]	10
Obrázek 8: Rychlosti otáčení a obvodové rychlosti ložiska, upraveno z [11]	11
Obrázek 9: Mody oscilace Lambda vlny, upraveno z [39]	17
Obrázek 10: Disperzní křivky pro ocel, upraveno z [24]	18
Obrázek 11: Zařízení BeMoS společnosti BestSens AG, upraveno z [38]	20
Obrázek 12: Piezoelektrické akční členy umístěné na vnějším kroužku ložiska a šíření SAW, upraveno z [19]	20
Obrázek 13: Rekonstruovaná příchozí vlna signálu, převzato a upraveno z [17]	22
Obrázek 14: Typický průběh jednoho bodu příchozí vlny při $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ – amplituda.....	23
Obrázek 15: Typický průběh jednoho bodu příchozí vlny při $500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ – doba šíření	23
Obrázek 16: Porovnání vlivu volby počtu tříd na strukturu histogramu pro soubor o 100 záznamech (vzdálenost odpalu golfových míčků), reprodukováno a doplněno z [22]	27
Obrázek 17: Krabicový graf, reprodukováno z [13]	28
Obrázek 18: FFT analýza – signál v časové a frekvenční oblasti, přeloženo z [9]	29
Obrázek 19: Celkový pohled a detail zařízení pro testování provozních parametrů kluzných i valivých ložisek, převzato a upraveno ze [7] a [16]	31
Obrázek 20: Rozložené testované válečkové ložisko N306, převzato z [17]	31
Obrázek 21: Schéma návrhu metodiky zpracování dostupných dat pro účely této práce	33
Obrázek 22: FFT analýza – Hannovo (kosinové) okénko, přeloženo z [36].....	35
Obrázek 23: FFT analýza – frekvenční spektrum – ložiskové frekvence	37
Obrázek 24: Průběh deseti otáček hrubých dat čištěného a nemazaného ložiska s vyznačenými hladinami maxim a minim při $2000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$ – spojitě zobrazení	38
Obrázek 25: Průběh maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – čištěné	40
Obrázek 26: Průběh minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – čištěné.....	41
Obrázek 27: Průběh maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – nemazané	42
Obrázek 28: Průběh minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě v rámci úseku – nemazané.....	42
Obrázek 29: Krabicový graf maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné	43
Obrázek 30: Histogram maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné	43
Obrázek 31: Krabicový graf minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné	44
Obrázek 32: Histogram minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – čištěné	44
Obrázek 33: Krabicový graf maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané.....	44
Obrázek 34: Histogram maxim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané	44
Obrázek 35: Krabicový graf minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané	45
Obrázek 36: Histogram minim doby šíření SAW v závislosti na teplotě – nemazané.....	45
Obrázek 37: Srovnání vývoje mediánu maxim doby šíření SAW čištěného a nemazaného ložiska	46
Obrázek 38: Srovnání vývoje mediánu minim doby šíření SAW čištěného a nemazaného ložiska	47

7. Seznam tabulek

Tabulka 1: Shrnutí odvozených charakteristických ložiskových frekvencí.....	14
Tabulka 2: Základní parametry testovaného válečkového ložiska N306 uváděné výrobcem v [31]	31
Tabulka 3: Výběr měřených parametrů testovaného ložiska, převzato z [15] a [17]	32
Tabulka 4: FFT analýza – základní parametry úseku, doplněný výběr z tabulky (viz. Příloha 1).....	34
Tabulka 5: Fundamentální a harmonické frekvence pro rychlost otáčení 1500 min ⁻¹	36
Tabulka 6: Efekty jednotlivých faktorů na střední hodnotu doby šíření SAW, výběr z tabulek [17]	38
Tabulka 7: Velikosti oken snímajících deset celých otáček.....	39
Tabulka 8: Základní parametry vybraných úseků čištěného ložiska, výběr z tabulky (viz. Příloha 1)	40



8. Seznam příloh

Příloha 1: Základní parametry zkoumaných úseků čištěného ložiska.....	55
Příloha 2: Základní parametry zkoumaných úseků nemazaného ložiska	56
Příloha 3: Ukázka skriptu v programovacím jazyce Python.....	57

9. Přílohy

Příloha 1: Základní parametry zkoumaných úseků čištěného ložiska

Nominální teplota T [°C]	Nominální rychlost otáčení n_n [ot · min ⁻¹]	Teplotní rozsah ΔT [°C]	Směrodatná odchylka s [°C]	Délka úseku Δt [s]	Počet otáček n [-]	Teplotní gradient $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ [°C · min ⁻¹]
55,0	1000	±0,13	0,17	20,9	349,3	0,37
56,0	1000	±0,13	0,16	29,8	498,7	0,26
57,0	1000	±0,13	0,17	41,4	693,4	0,19
58,0	1000	±0,13	0,16	40,0	670,2	0,20
59,0	1000	±0,13	0,17	42,1	705,3	0,18
60,0	1000	±0,13	0,17	49,9	834,5	0,16
61,0	1000	±0,13	0,16	15,0	251,1	0,52
62,0	1000	±0,13	0,17	24,8	415,5	0,31
63,0	1000	±0,13	0,17	32,6	544,9	0,24
64,0	1000	±0,13	0,20	72,2	1207,6	0,11
65,0	1000	±0,13	0,14	85,4	1429,5	0,09
66,0	1000	±0,13	0,17	118,7	1986,8	0,07
67,0	1000	±0,13	0,18	197,0	3296,2	0,04
68,0	1500	±0,13	0,17	15,7	393,1	0,50
69,0	1500	±0,13	0,18	20,1	504,3	0,39
70,0	1500	±0,13	0,18	25,9	649,8	0,30
71,0	1500	±0,13	0,18	30,4	764,2	0,26
72,0	1500	±0,13	0,18	26,4	663,9	0,30
73,0	1500	±0,13	0,18	43,9	1101,5	0,18
74,0	1500	±0,13	0,17	59,3	1488,9	0,13
75,0	1500	±0,13	0,15	25,0	625,7	0,31
76,0	2000	±0,13	0,17	13,6	455,4	0,57
77,0	2000	±0,13	0,18	18,3	611,8	0,43
78,0	2000	±0,13	0,16	18,9	629,9	0,41
79,0	2000	±0,13	0,17	22,2	743,0	0,35
80,0	2000	±0,13	0,17	27,5	920,4	0,28
81,0	2000	±0,13	0,17	29,4	982,7	0,27
82,0	2000	±0,13	0,17	32,0	1070,1	0,24
83,0	2000	±0,13	0,18	38,9	1301,2	0,20
84,0	2000	±0,13	0,18	41,9	1400,5	0,19
85,0	2000	±0,13	0,17	41,5	1386,5	0,19
86,0	2000	±0,13	0,17	45,4	1518,9	0,17
87,0	2000	±0,13	0,17	50,9	1701,3	0,15
88,0	2000	±0,13	0,18	73,7	2464,1	0,11
89,0	2000	±0,13	0,12	42,0	1403,1	0,19

Příloha 2: Základní parametry zkoumaných úseků nemazaného ložiska

Nominální teplota T [°C]	Nominální rychlost otáčení n_n [ot · min ⁻¹]	Teplotní rozsah ΔT [°C]	Směrodatná odchylka [°C]	Délka úseku Δt [s]	Počet otáček n [-]	Teplotní gradient $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ [°C · min ⁻¹]
55,0	2000	±0,13	0,17	3,6	120,8	2,16
56,0	2000	±0,13	0,16	3,4	114,7	2,27
57,0	2000	±0,13	0,18	4,2	141,9	1,84
58,0	2000	±0,13	0,17	4,5	149,8	1,74
59,0	2000	±0,13	0,17	5,5	182,9	1,43
60,0	2000	±0,13	0,17	6,8	228,0	1,14
61,0	2000	±0,13	0,17	8,4	281,0	0,93
62,0	2000	±0,13	0,17	10,9	363,2	0,72
63,0	2000	±0,13	0,17	14,7	490,5	0,53
64,0	2000	±0,13	0,17	17,7	591,8	0,44
65,0	2000	±0,13	0,17	14,2	475,6	0,55
66,0	2000	±0,13	0,17	21,4	715,2	0,36
67,0	2000	±0,13	0,17	30,2	1010,9	0,26
68,0	2000	±0,13	0,17	40,4	1349,6	0,19
69,0	2000	±0,13	0,18	53,9	1803,5	0,14
70,0	2000	±0,13	0,19	72,7	2431,9	0,11
71,0	2000	±0,13	0,17	65,3	2181,1	0,12
72,0	2500	±0,13	0,17	19,7	824,7	0,40
73,0	2500	±0,13	0,16	23,7	989,0	0,33
74,0	2500	±0,13	0,16	26,3	1099,4	0,30
75,0	2500	±0,13	0,16	28,0	1170,5	0,28
76,0	2500	±0,13	0,16	26,2	1095,2	0,30
77,0	2500	±0,13	0,16	27,9	1164,5	0,28
78,0	2500	±0,13	0,16	24,1	1007,0	0,32
79,0	2500	±0,13	0,16	22,4	935,7	0,35
80,0	2500	±0,13	0,16	23,9	998,0	0,33
81,0	2500	±0,13	0,16	27,0	1129,4	0,29
82,0	2500	±0,13	0,16	28,7	1200,6	0,27
83,0	2500	±0,13	0,17	37,2	1556,5	0,21
84,0	2500	±0,13	0,14	28,9	1208,1	0,27
85,0	3000	±0,13	0,14	12,9	641,0	0,60
86,0	3000	±0,13	0,15	15,4	764,7	0,51
87,0	3000	±0,13	0,14	14,3	711,6	0,54
88,0	3000	±0,13	0,15	13,4	664,3	0,58
89,0	3000	±0,13	0,15	13,1	650,2	0,60

Příloha 3: Ukázka skriptu v programovacím jazyce Python

```
# Určení teplotního rozsahu celého souboru a jednotlivých úseků
temp_start=55
temp_stop=89
pulzrosah=0.13

# Vypis spodní meze teplotního rozsahu každého úseku
temp_min=[]
temp_min=list(np.arange(temp_start-pulzrosah,temp_stop+1-pulzrosah,1))

# Lokalizace prvního výskytu výše vypsaných teplot a výpis příslušného indexu
start=[]
for i in list(np.arange(0,len(temp_min),1)):
    start.append(min(pd_temp['temp'][pd_temp['temp']>=temp_min[i]].index.tolist()))

# Vypis horní meze teplotního rozsahu každého úseku
temp_max=[]
temp_max=list(np.arange(temp_start+pulzrosah,temp_stop+1+pulzrosah,1))

# Lokalizace posledního výskytu výše vypsaných teplot a výpis příslušného indexu
stop=[]
for i in list(np.arange(0,len(temp_max),1)):
    stop.append(max(pd_temp['temp'][pd_temp['temp']<=temp_max[i]].index.tolist()))

# Výpočet velikostí oken příslušných daným rychlostem otáčení
pocet_otacek=10
velikost_okna1=60/1000*pocet_otacek
velikost_okna2=60/1500*pocet_otacek
velikost_okna3=60/2000*pocet_otacek

# Výpočet zkoumaných charakteristik
p_min=[]
p_max=[]

# Pro 1000rpm
for i in list(np.arange(0,13,1)):
    p_min.append(ROLL_min(pd_prop[start[i]:stop[i]],velikost_okna1,1e4))
    p_max.append(ROLL_max(pd_prop[start[i]:stop[i]],velikost_okna1,1e4))

    p_min[i].dropna(inplace=True)
    p_max[i].dropna(inplace=True)

# Pro 1500rpm
for i in list(np.arange(13,20,1)):
    p_min.append(ROLL_min(pd_prop[start[i]:stop[i]],velikost_okna2,1e4))
    p_max.append(ROLL_max(pd_prop[start[i]:stop[i]],velikost_okna2,1e4))

    p_min[i].dropna(inplace=True)
    p_max[i].dropna(inplace=True)

# Pro 2000rpm
for i in list(np.arange(20,len(temp_max),1)):
    p_min.append(ROLL_min(pd_prop[start[i]:stop[i]],velikost_okna3,1e4))
    p_max.append(ROLL_max(pd_prop[start[i]:stop[i]],velikost_okna3,1e4))

    p_min[i].dropna(inplace=True)
    p_max[i].dropna(inplace=True)

print('Splněno!')
```