



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ  
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# STUDIUM HLUČNOSTI VALIVÝCH LOŽISEK S OHLEDEM NA PŘESNOST VÝROBY

STUDY OF BEARING NOISE REGARDING ACCURACY OF MACHINING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

PAVEL STUDÝNKA

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. MILAN KLAPKA, Ph.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2014/2015

## **ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

student(ka): Pavel Studýnka

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

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

### **Studium hlučnosti valivých ložisek s ohledem na přesnost výroby**

v anglickém jazyce:

### **Study of bearing noise regarding accuracy of machining**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je experimentální ověření vztahu mezi přesností výroby ložiska a výslednou hlučností. V práci bude analyzován vztah mezi posouzením kvality zpracování valivého ložiska metodou frekvenční analýzy povrchu RTA a FFT analýzy vibrací za provozu.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Materiál a metody
5. Výsledky
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, fotografická dokumentace

Typ práce: experimentální; Účel práce: vzdělávání

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2015.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2015.pdf)

Šablona práce: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK\\_sablona\\_praci.zip](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip)

Seznam odborné literatury:

1. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
2. KREIDL, Marcel. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Milan Klapka, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 19.11.2014

L.S.

---

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

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se bude zabývat spojitostí mezi kvalitou povrchu funkčních ploch ložiska a jeho vibracemi za chodu. Práce popisuje základní geometrické parametry ložiska, které především ovlivňují jeho výslednou kvalitu a vibrace. Představuje metody hodnocení kvality povrchu a vzájemnou souvislost mezi nimi. Součástí práce je experiment, který by měl prokázat, jaká existuje souvislost mezi měřením kvality povrchu oběžných drah a vyhodnocováním vibrací ložiska za chodu tak, jak jsou tyto metody používány ve firmě KOYO Olomouc. Kvalita povrchu se vyhodnocuje na měřící stanici MUK-F 300 a vibrace na zařízení IL 100R/2000.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Ložisko, valivé, jehličkové, válečkové, technický stav, oběžné dráhy, vlnitost, kruhovitost, Real Time Analysis, vibrace, hlučnost

## **ABSTRACT**

This bachelor thesis deals with connection between the quality of surface of raceways of a bearing and vibrations in operation. This thesis describes basic geometrical parameters of a bearing that have main influence on its resulting quality and vibrations. It presents methods to evaluate the quality of the raceways surfaces and their connection between them. As a part of the thesis is an experiment, which should prove, what is the connection between the measuring of quality of the surface of raceways and measuring the vibrations of bearings during the process, by the way used in the company KOYO Olomouc. The quality of raceways is evaluated on a measuring device MUK-F 300 and vibrations on IL 100R/2000.

## **KEYWORDS**

Bearing, rolling, needle, roller, technical state, raceways, waviness, roundness, real time analysis, vibration, noisiness

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

STUDÝNKA, P. *Studium hlučnosti valivých ložisek s ohledem na přesnost výroby*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Milan Klapka, Ph.D.



## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

---

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího práce Ing. Milana Klapky, Ph.D. a konzultanta ve firmě Ing. Zdeňka Hajkra. V seznamu použitých zdrojů jsou uvedeny všechny literární a jiné zdroje.

V Brně 22. května 2015

.....  
Pavel Studýnka



## **PODĚKOVÁNÍ**

---

Rád bych poděkoval vedoucímu této bakalářské práce Ing. Milanu Klapkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při tvorbě této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Zdeňku Hajkrovi za pomoc při měření a provádění experimentů v provozu. Také bych chtěl poděkovat mé rodině za podporu během mého dosavadního studia.



**OBSAH**

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>13</b>
<b>2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ .....</b>	<b>14</b>
2.1 Ložiska.....	14
2.1.1 Kuličková ložiska .....	15
2.1.2 Jehličková ložiska .....	15
2.1.3 Válečková ložiska .....	16
2.2 Geometrie ložiska .....	16
2.2.1 Přímost.....	17
2.2.2 Rovnoběžnost .....	18
2.2.3 Kruhovitost .....	19
2.2.4 Vlnitost .....	21
2.2.5 Drsnost.....	21
2.3 Současný stav ve firmě .....	21
2.4 Harmonická analýza povrchu .....	22
2.5 Frekvenční analýza .....	22
2.6 Real Time Analysis (RTA).....	22
2.7 Metody měření kvality povrchu.....	24
2.7.1 Hluková diagnostika .....	24
2.7.2 Vibrodiagnostika.....	24
<b>3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE.....</b>	<b>25</b>
<b>4 MATERIÁL A METODY.....</b>	<b>26</b>
4.1 Měření kruhovitosti .....	26
4.1.1 Měřicí zařízení .....	26
4.1.2 Postup měření .....	27
4.1.3 Komponenty ložiska .....	29
4.2 Měření vibrací.....	29
4.2.1 Měřené ložisko.....	30
4.2.2 Měřicí zařízení .....	30
4.2.3 Postup měření .....	31
<b>5 VÝSLEDKY .....</b>	<b>33</b>
5.1 Měření RTA.....	33
5.1.1 Měření referenčního kroužku .....	33
5.1.2 Měření kroužků 2 až 6 .....	35
5.2 Měření vibrací.....	37
5.3 Porovnání výsledků .....	38
<b>6 DISKUZE .....</b>	<b>39</b>
<b>7 ZÁVĚR .....</b>	<b>40</b>
<b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>	<b>41</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ.....</b>	<b>43</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>44</b>



## 1 ÚVOD

Jedním z důležitých prvků ve strojích jsou ložiska. Ta slouží především k uchycení a vedení rotujících částí ve strojích. Pro běžné použití ve všeobecném strojírenství se v hojně míře uplatňují katalogová ložiska. Existuje i velká skupina aplikací, kde provedení a konstrukci ložiska zadává přímo zákazník. K tomu velmi často dochází např. v automobilovém a leteckém průmyslu a u konstrukcí kolejových vozidel.

V poslední době se na tato ložiska kladou čím dál větší nároky, např. vyšší únosnost, vyšší přesnost, nižší tření, delší životnost.

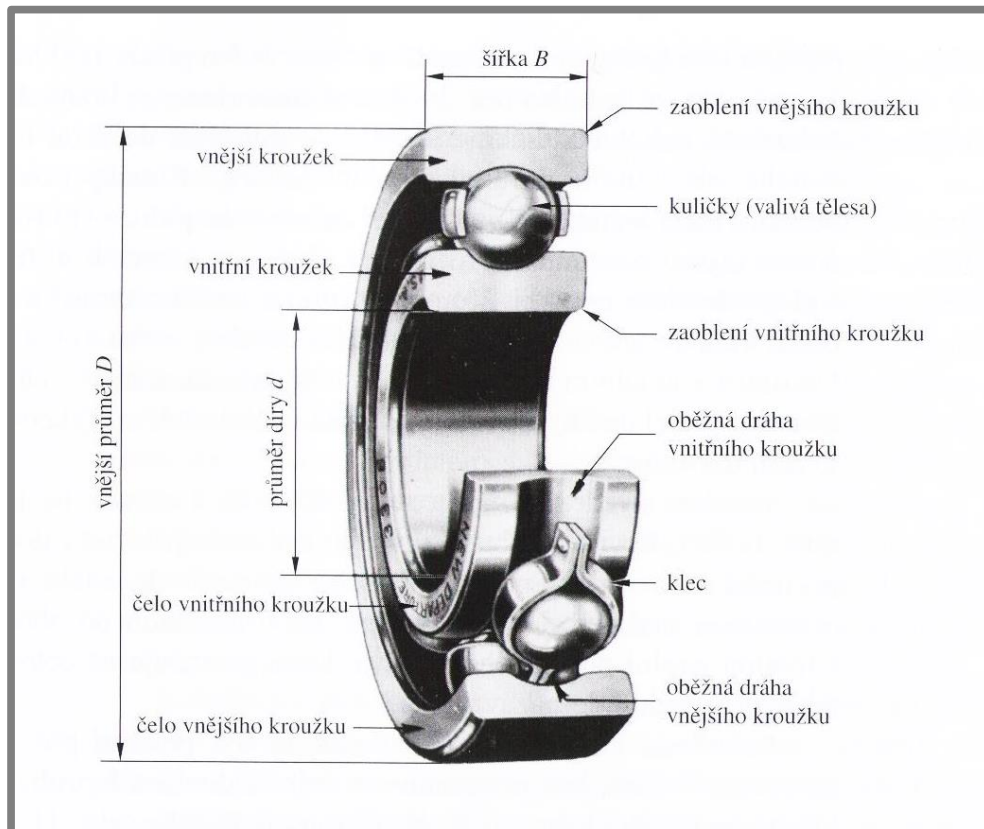
Jednou z významných inovací výrobců je snaha o docílení nižší hlučnosti ložisek. Hlučnost ložiska se zjišťuje výhradně ve smontovaném stavu. To však z hlediska výroby znamená vysoké náklady na odstranění případné nekvality. Takové ložisko se musí vyřadit jako neshodný výrobek, nebo v lepším případě demontovat a poté opravit. Z tohoto důvodu je snaha odstranit případnou nekvalitu již při výrobě samotných komponent ložiska. Proto se hledají metody včasné detekce defektů způsobujících hlučnost v předstihu - při výrobě, kdy odstranění případného defektu není tak nákladné. Takovou progresivní metodou je např. Real Time analysis (RTA). Jedná se o nedestruktivní metodu posuzování kvality oběžných drah komponentů ložiska (kroužků a valivých elementů). Tato metoda umožňuje identifikovat nekvalitu mnohem dříve než na smontovaném ložisku.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

S pokrokem v technologiích se začaly zvyšovat také nároky na přesnosti vyráběných ložisek. V dnešní době už nestačí dodržovat předepsané tolerance a odchylky tvaru, jako je přímost, kruhovitost, rovnoběžnost, aj. Přibývají další speciální požadavky na kvalitu výrobku. Jednou z velmi často požadovaných vlastností, zejména u rychloběžných rotujících částí, je nižší hlučnost. Tuto hlučnost způsobují vibrace vlivem nedokonalostí tvaru a kvality povrchu funkčních ploch – oběžných drah ložiska. Kvalitu povrchu lze vyjádřit mnoha způsoby. Do jedné z metod patří Real Time Analysis (RTA). Tato bakalářská práce se bude zabývat spojitostí mezi kvalitou vyrobených oběžných drah, vyhodnocených dle RTA a vibracemi ložiska.

### 2.1 Ložiska

Ložisko je konstrukční součást sloužící k zajištění rotačního pohybu daného prvku. Hlavní podstatou ložiska je snížení třecích sil, které vznikají při translačním či rotačním pohybu. Snížením třecích sil můžeme docílit vyšší účinnosti celého stroje. Základní rozdělení ložisek je na kluzná a valivá. Použití daného typu ložiska závisí především na provozních parametrech, např. na otáčkách, zatížení, provozních teplotách, způsobu mazání, apod. U valivých ložisek (Obr. 1) se zatížení přenáší pomocí valivých elementů, které se odvalují téměř bez skluzu. Tyto elementy, např. kuličky, jehličky, válečky, kuželíky nebo soudečky, se nacházejí mezi vnitřním a vnějším kroužkem ložiska. Valivá ložiska se dále rozlišují na kuličková, válečková, jehličková, kuželíková, soudečková, nebo kombinovaná. [1]



Obr. 2.1 Kuličkové ložisko [1]

Další rozdělení ložisek je dle působení zatěžujících sil na ložisko, tedy axiální a radiální. Na radiální ložiska působí zatěžující síla ve směru kolmo k ose. U axiálních ložisek působí zatěžující síla ve směru osy. Některá radiální ložiska mohou v menší míře přenášet i axiální síly, což je zjištěno konstrukčním prvkem.

### 2.1.1 Kuličková ložiska

2.1.1

---

Kuličková ložiska se používají nejčastěji. Kuličkové ložisko (Obr. 2) se skládá z vnitřního, vnějšího kroužku, klece a valivých elementů, kterými jsou v tomto případě kuličky. Kuličková ložiska dokáží přenášet sílu v radiálním i axiálním směru. Přenos zatížení na kuličku probíhá přes bodový styk. Z tohoto důvodu kuličková ložiska nevydrží takové zatížení, jako např. ložiska válečková. Přesto snášejí poměrně vysoké frekvence otáčení a jsou poměrně levná.



Obr. 2.2 Kuličkové ložisko SKF [7]

### 2.1.2 Jehličková ložiska

2.1.2

---

Rozdíl mezi kuličkovým a jehličkovým provedením ložiska lze vysvětlit např. na radiálním jehličkovém ložisku. Takové jehličkové ložisko má oproti ložisku kuličkovému výhodu v možnosti většího radiálního zatížení. A to proto, že na místo bodového dotyku mezi kuličkami a kroužky, dochází u jehličkového ložiska mezi kroužky a valivým elementem k přímkovému dotyku. Tlak je rozložen na větší plochu, než jak je tomu v případě bodového dotyku kuličkového ložiska. Valivý element (jehlička) je zpravidla velmi štíhlý, délka bývá větší než její průměr.

Nevýhodou jehličkového ložiska je, že nedokáže přenést axiální sílu. Jehlička je vedena klecí tak, aby nedošlo k dotyku čela jehličky s bočním čelem nákržku ložiskového kroužku. V některých provedeních by pak došlo k axiálnímu vysunutí vnitřního, či vnějšího kroužku.

Jehličková ložiska se používají v rychloběžných zařízeních, velmi často např. v převodovkách.



Obr. 2.3 Jehličkové ložisko [8]

---

### 2.1.3 Válečková ložiska

Valečkové radiální ložisko stejně jako jehličkové je schopno přenášet vyšší radiální zatížení než kuličkové. Ani toto ložisko není primárně určeno pro přenos axiálního zatížení. Na rozdíl od jehličkových, je-li válečkové ložisko zatíženo axiálně, nedojde k jeho poškození. To je dáno konstrukčními prvky. Valivé elementy (válečky) mají broušená čela, ložiskové kroužky mají broušena boční čela nákrůžků. Vnější axiální zatížení působí na čela kroužku. Tato práce se bude týkat ložisek válečkových. Příklad použití válečkových ložisek je např. v převodkách.



Obr. 2.4 Válečkové dvouřadé ložisko [8]

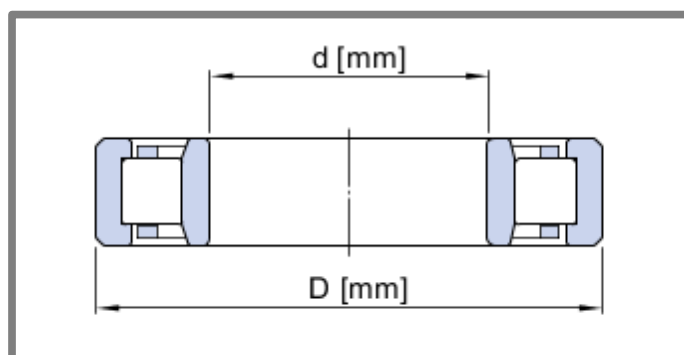
---

## 2.2 Geometrie ložiska

Základní parametry jsou dány katalogem nebo jsou upřesněny specifickými požadavky zákazníka. Mezi ně patří přípojovací rozměry: Vnější průměr, vnitřní průměr a šířka, vše v dané přesnosti (Obr. 2.5).

Kvalitu vlastnosti ložiska ovlivňuje přesnost provedení. Ta je dána především tolerancí jednotlivých rozměrů a geometrickými odchylkami tvaru a polohy. Mezi odchylkami tvaru patří zejména: přímost, rovnoběžnost, kruhovitost, válcovitost. K odchylkám

polohy patří např.: axiální a radiální házení, sousost. Kvalita povrchu se vyjadřuje parametry drsnosti.

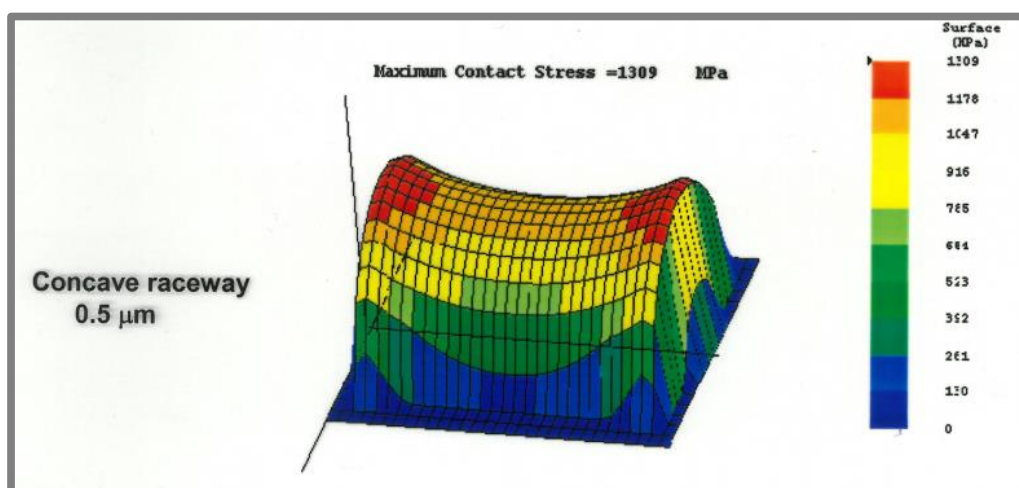


Obr. 2.5 Ložisko SKF s rozměry [6]

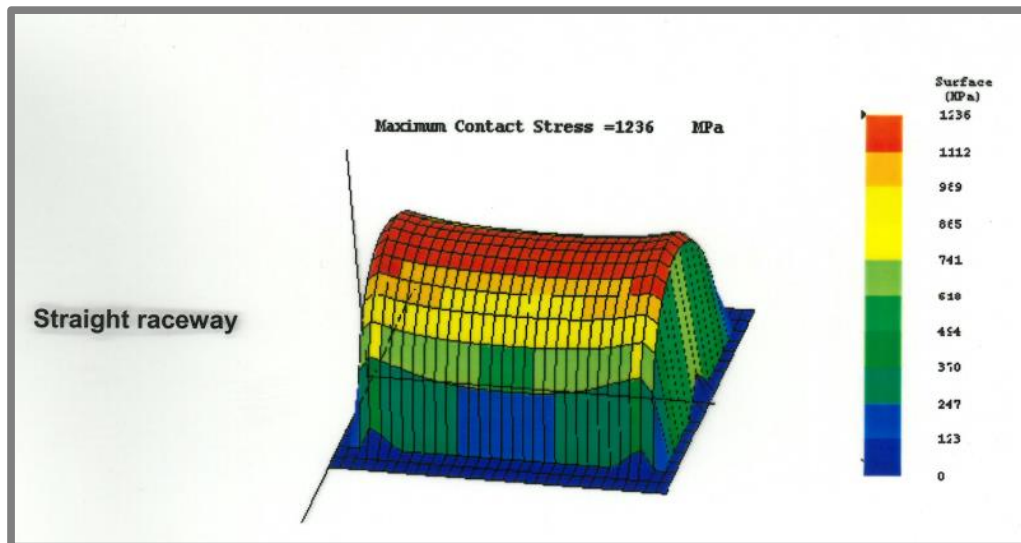
### 2.2.1 Přímost

Přímost je tvarová odchylka skutečného průřezu od teoretické přímky. Tato odchylka se stanoví tak, že se na profil přiloží dvě rovnoběžné obalové přímky tak, aby největší vzdálenost mezi nimi byla nejmenší. Skutečná hodnota přímosti musí být menší nebo rovna předepsané toleranci. [4]

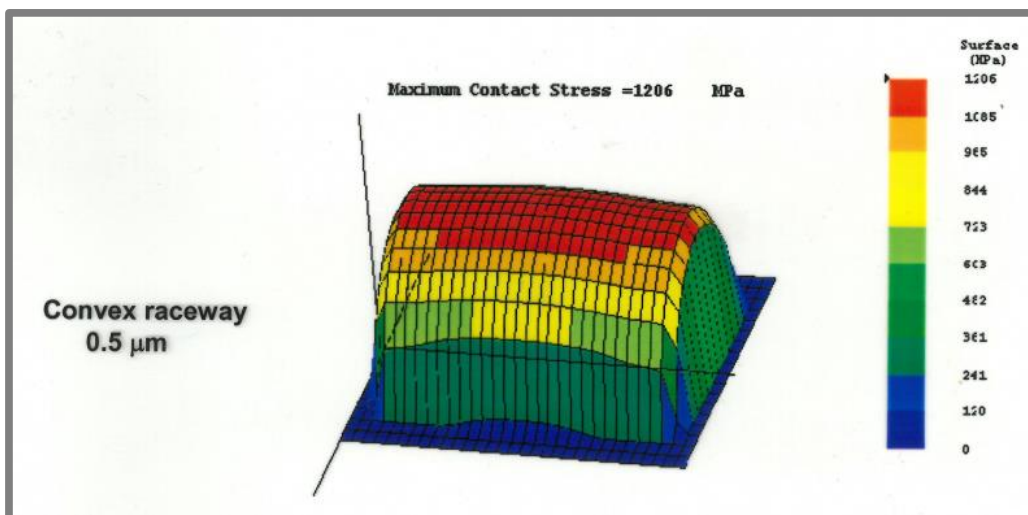
U válečkových a jehličkových ložisek je žádaný přímkový dotyk valivého elementu s oběžnými drahami kroužků. Pro přenos zatížení je důležité, aby nedošlo k bodovému dotyku, kdy je zatížení koncentrováno do dvou bodů (Obr. 2.6) – konkávní tvar. V takovém případě je veškeré zatížení přenášeno v koncových bodech dotyku, což způsobuje extrémní namáhání těchto míst a výrazně zkracuje životnost celého ložiska. V ideálním případě je zatížení přenášeno po celé délce dotyku (Obr. 2.7). V praxi se pro zajištění přímkového dotyku nejčastěji vytváří konvexní tvar (Obr. 2.8), kdy se zatížení rozkládá na mnohem větší plochu, takže se blíží ideálnímu stavu.



Obr. 2.6 Zatížení při konkávním tvaru



Obr. 2.7 Zatížení při přímkovém tvaru



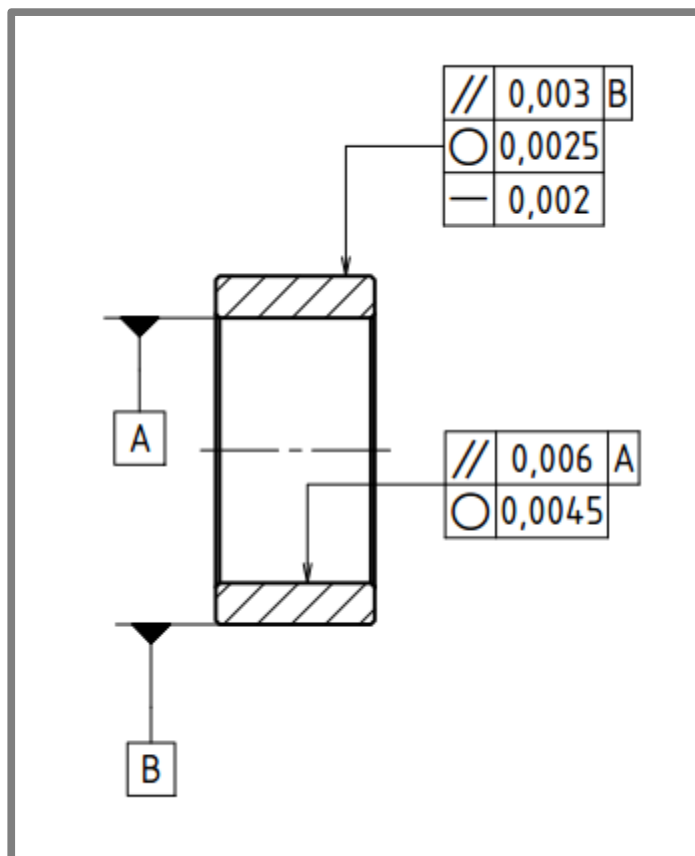
Obr. 2.8 Zatížení při konvexním tvaru

### 2.2.2 Rovnoběžnost

Rovnoběžnost u komponent valivých ložisek se předepisuje:

- U vnějšího kroužku: na oběžné dráze (vnitřní průměr) a na vnějším průměru.
- U vnitřního kroužku: na oběžné dráze (vnější průměr) a na vnitřním průměru
- U valivých elementů: na oběžné dráze.

Rovnoběžnost na oběžné dráze má významný vliv na určení radiálních vůlí mezi komponentami a tím na správnou funkci ložiska.



Obr. 2.9 Geometrické tolerance na vnitřním kroužku

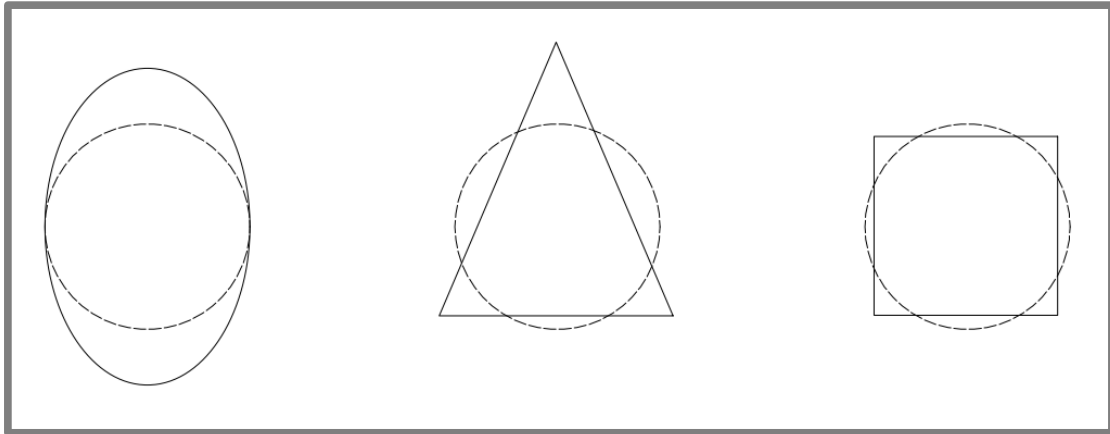
### 2.2.3 Kruhovitost

2.2.3

Kruhovitost se u valivých ložisek předepisuje hlavně na oběžných drahách - vnitřní průměr u vnějšího kroužku, vnější průměr u vnitřního kroužku a na vnějším průměru valivého elementu. Předepsaná kruhovitost na těchto plochách výrazně ovlivňuje kvalitu chodu ložiska. Dále se kruhovitost předepisuje na vnějším průměru vnějšího kroužku a na vnitřním průměru vnitřního kroužku. Z pohledu smontovaného ložiska tedy na průměrech, kterými bude ložisko namontováno do aplikace. Zde je hodnota kruhovitosti obvykle řádově větší. Tyto plochy totiž nemají vliv na chod ložiska, dodržení kruhovitosti je nutné pro správnou montáž.

Na kruhovitost oběžné dráhy pohlížíme jako na profil skutečného tvaru pohybující se kolem ideální kružnice v kladných i záporných odchylkách. Ty jsou pak obvykle pravidelné, dá se tedy říci, že se jedná o vlny. Hovoříme-li o kruhovitosti v praxi, vyhodnocujeme odchylky s nízkým počtem vln, kdy počet vln je obvykle menší než 14 na jednu otáčku.

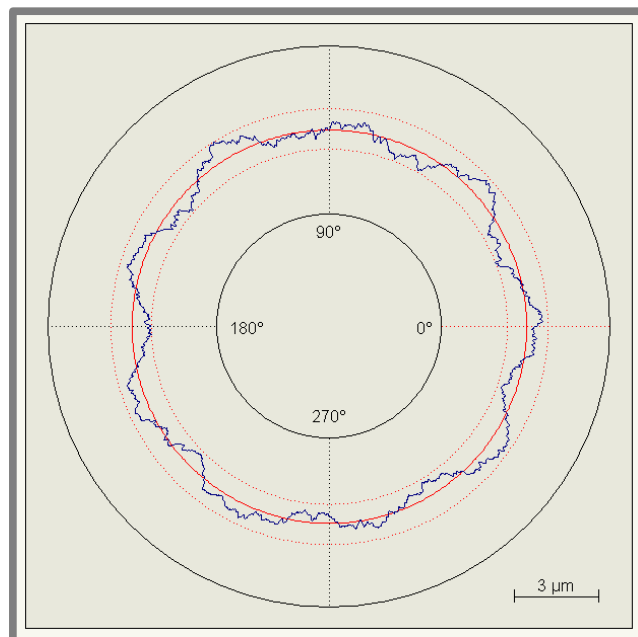
Nejčastější odchylky kruhovitosti mají tyto tvary: Oválný, trojúhelníkovitý, čtvercový, nebo mnohohran. (Obr. 2.10)



Obr. 2.10 Nejčastější odchylky kruhovitosti

Kruhovitost (Obr. 2.11) se vytvoří zejména při hrubovacích obráběcích operacích, jako je např. soustružení. Vliv na tvar kruhovitosti může mít zpravidla způsob upnutí (tříčelist'ové sklíčidlo), deformace při manipulaci s materiálem, při řezání nebo při tepelném zpracování.

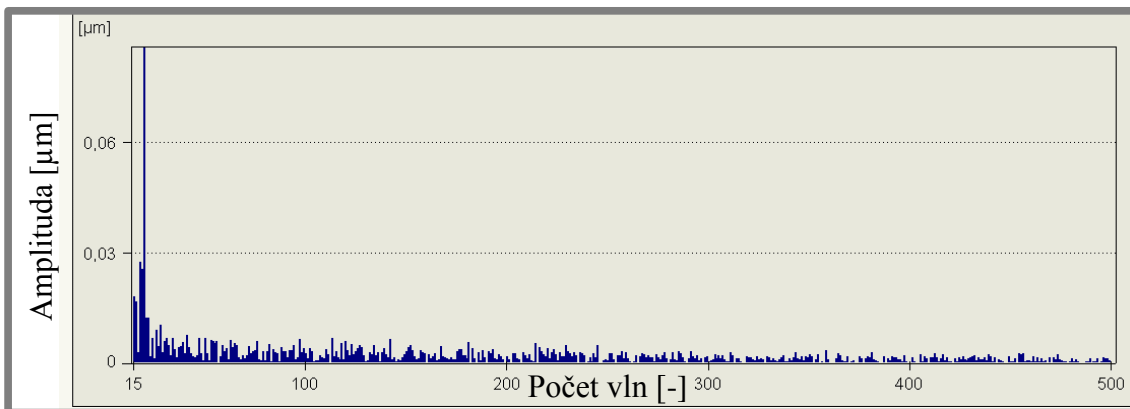
Měření kruhovitosti začíná upnutím obrobku naplocho na otočný stůl. Následuje nasnímání skutečného profilu povrchu v radiálním směru. Kruhovitost se určí z rozdílu naměřených hodnot.



Obr. 2.11 Reálná kruhovitost

### 2.2.4 Vlnitost

Vlnitost stejně jako kruhovitosť posuzujeme ve vztahu k ideální kružnici. Přičemž počet vln je zpravidla větší než 14 na jednu otáčku. Vliv na vlnitost mají dokončovací operace, jako je broušení na hotovo nebo superfinišování. Vlnitost posuzujeme ze stejného nasnímaného signálu jako kruhovitosť, u nějž se odfiltrují frekvence, zahrnované do kruhovitosti.

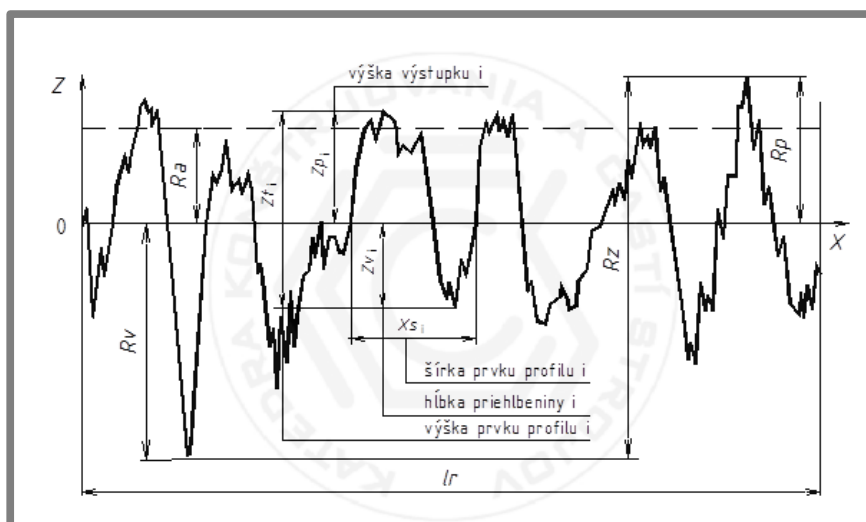


Obr. 2.12 Harmonická analýza povrchu

### 2.2.5 Drsnost

Drsnost neboli jakost povrchu může být např. dána aritmetickým průměrem absolutních hodnot výšek posuzovaného povrchu v libovolné poloze na ose  $x$  v rozsahu posuzované délky ( $R_a$ ). [4]

Nižší drsnost na oběžných drahách způsobuje: nižší opotřebení, větší životnost, nižší hlučnost.



Obr. 2.13 Drsnost povrchu [11]

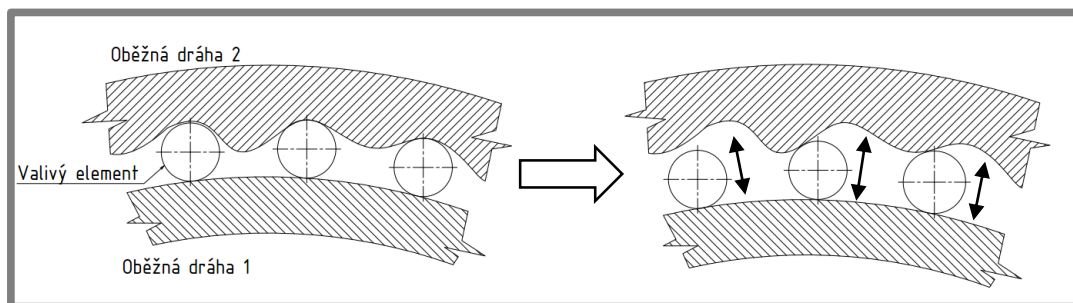
## 2.3 Současný stav ve firmě

Jednou z posuzovaných kvalitativních vlastností hotového ložiska je úroveň jeho vibrací. Ve firmě KOYO se úroveň vibrací měří na ložiscích ve smontovaném stavu a posuzuje s přípustnými hodnotami, stanovenými dle interního předpisu nebo ve spolupráci se zákazníkem. Již dříve byla prokázána jedna z příčin zvýšených vibrací

ložiska za chodu. Tou může být také vyšší vlnitost oběžné dráhy některé komponenty ložiska. V poslední době se ve firmě uplatňují nové přístupy. Je zde snaha detekovat a odstranit vyšší vlnitost již při výrobních operacích na oběžných drahách kroužků a valivých elementů. K tomu firma vyhodnocuje naměřený signál o kruhovitosti a vlnitosti a porovnává jej s limitou, stanovenou metodou RTA (viz. 2.6).

## 2.4 Harmonická analýza povrchu

V praxi nastávají případy, kdy oběžné dráhy ložiska splňují všechny požadované geometrické tolerance a odchylky (především kruhovitost) a přitom ložisko bude hlučné. K tomu může dojít např. tak, že některá z oběžných drah je příliš zvlněná. Tato vlnitost je způsobena prohlubněmi a výstupky, obvykle s pravidelnou roztečí. Nerovnosti pak vytvářejí vlny, jejichž amplituda může být mnohem menší než parametr kruhovitosti a přitom za chodu vyvolají vibrace valivých elementů ložiska a tím způsobí hlučnost (Obr. 2.14).



Obr. 2.14 Vznik vibrací v ložisku

Rozklad signálu pomocí Fourierovy řady se využívá při vyhodnocování záznamu z kruhoměru. Zařízení MUK 300 (viz. 4.1.1) pracuje s harmonickou analýzou profilu povrchu (Obr. 2.12).

Pro další použití v naší práci pojem „frekvence“ nahradíme pojmem „počet vln“, přičemž hodnoty frekvencí, resp. počtu vln jsou diskrétní čísla.

## 2.5 Frekvenční analýza

Pro analýzu signálu se dá využít tzv. rychlá Fourierova transformace, Fast Fourier transform (FFT). Záznam signálu se obvykle znázorňuje v čase, tedy v časové oblasti. Tento signál se dá rozložit na soubor elementárních funkcí. Pro technické aplikace v oboru kmitání mechanických systémů jde o rozklad na soubor harmonických funkcí odlišujících se amplitudou, úhlovou frekvencí a svou počáteční fází. Takovou analýzu signálu nám vytvoří Fourierova integrální transformace. Daný soubor harmonických signálů zobrazujeme jako amplitudu v závislosti na frekvenci. Nepoužívá se závislost na čase, jelikož posuzování signálu je přehlednější ve frekvenční oblasti. Při použití závislosti na čase mohou určité jevy v signálu splynout, např. amplitudy zrychlení při rázech. [5]

Využití pomocí FFT se používá např. při zpracování dat z vibroměru (viz. 4.2.2).

## 2.6 Real Time Analysis (RTA)

Metoda Real Time Analysis se zabývá nastavením limitů pro posouzení profilu povrchu oběžné dráhy vyrobené strojní součásti, v našem případě ložiskového

kroužku. Zaznamenaný signál z kruhoměru se zobrazí jako závislost amplitudy na počtu vln (Graf 2.15) - frekvenci.

Původní dostupnou metodou posouzení kvality povrchu byla omezující přímka s jedinou hodnotou amplitudy - kruhovitost. Lepší variantou poté bylo omezení výšky vln (amplitud) i u vyšších frekvencí, které bylo určeno intervalově – limity tedy tvoří přímky se schodovitým tvarem (a).

Nejnovější trend představuje RTA, kde se definuje omezující křivka hodnot amplitud pomocí exponenciální funkce (b), která je dána rovnicí:

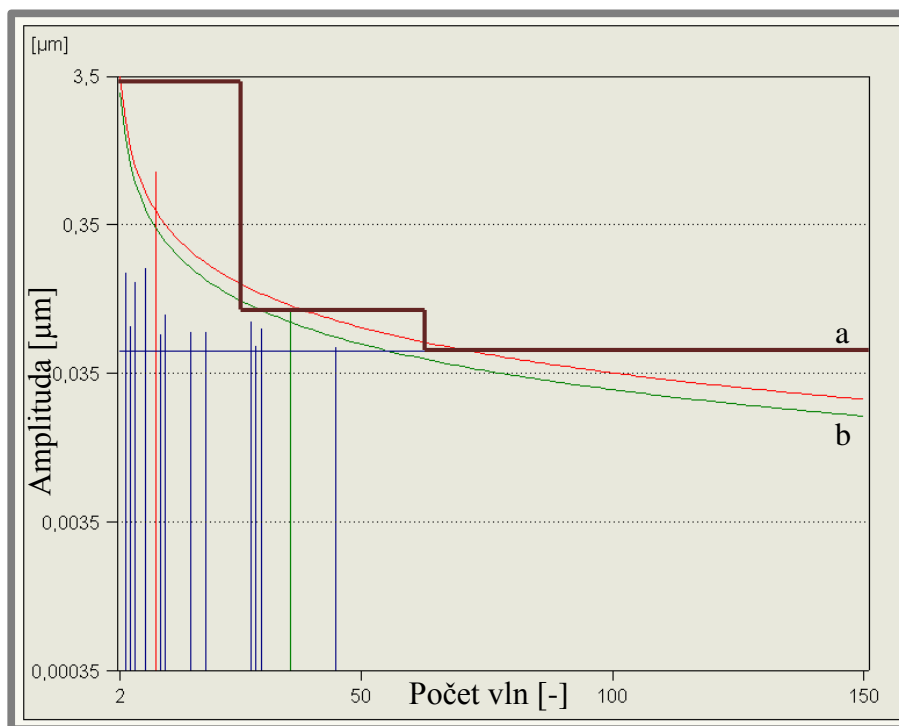
$$H_w = R/(w - 1)^n; \quad (1)$$

$$\text{kde } n = n_0 + \frac{k}{w} \quad (2)$$

$H_w$	[-]	-amplituda vlny
$R$	[-]	-volitelná konstanta, nastavuje svislou pozici omezující křivky
$K$	[-]	-volitelná konstanta
$n_0$	[-]	-volitelná konstanta
$w$	[-]	-počet vln, v intervalu $2 \div 150$ , nebo $2 \div 500$

Parametry pro RTA ( $R$ ,  $k$ ,  $n_0$ ) jsou předepsány na výkresu a vycházejí z požadavků na konkrétní aplikaci.

Z rovnice je patrné, se vzrůstajícím frekvencí klesá omezující limita amplitudy, a to exponenciálně. V praxi to znamená, že při vyšších frekvencích i relativně velmi malá hloubka vlny může způsobit vibrace s nezanedbatelnou energií, což se projeví zvýšenou hlučností celého ložiska.



Graf 2.15 Amplitudy vln v závislosti na jejich počtu

Srovnáme-li tyto metody, lze vidět, že naměřené hodnoty jsou posuzovány nejpřísněji metodou RTA.

V této práci budeme dokazovat, zda limit RTA byl nastavený adekvátně k možným vniklým vibracím a včas je detekoval.

## 2.7 Metody měření kvality povrchu

### 2.7.1 Hluková diagnostika

Pojem hluk značí nežádoucí zvuk v pásmu frekvencí mezi 20 Hz až 20 kHz.

Při odvalování valivých elementů přes nerovnosti oběžné dráhy dochází k mechanickému kmitání pohybujících se částí. Toto kmitání je přenášeno do okolních součástí. Pokud je toto kmitání dostatečně intenzivní (amplitudy) a o frekvencích uvedených výše, šíří se vzduchem jako hluk. Tento hluk pak můžeme využít pro stanovení technického stavu zařízení.

Tato metoda však v provozu není příliš přesná, jelikož dochází k interferenci v uzavřených prostorách. Navíc nemůžeme přesně určit místo vzniku vibrací z důvodu hluku ostatních strojních objektů. Jde však o metodu snadno dostupnou v praxi a z tohoto důvodu se používá často. [2]

### 2.7.2 Vibrodiagnostika

Vibrační diagnostika patří k základním způsobům vyhodnocení stavu valivých ložisek. Vibrace je totožná termínu kmitání dle normy ČSN ISO 2041. K vibracím neboli mechanickému kmitání dochází, pokud na těleso působí budící síla, která může působit externě i interně, zároveň tato síla musí působit kolem rovnovážné polohy tuhého tělesa. Rovnovážná poloha je taková, při níž je hodnota působících sil nulová. Pokud se jedná o interní budící sílu, původ této síly je uvnitř tělesa. V případě externí síly, její původ je zvenku posuzovaného objektu. Vibrace lze popsat amplitudou a fází v daném časovém okamžiku.

Vibrace mají spojitost s technickým stavem a dynamickým namáháním strojních součástí, např. hřídele, ložiska, vačkové mechanismy, aj. V případě ložisek jsou vibrace způsobeny rázy, které vznikají při střetu dvou navzájem se pohybujících těles. Při rázu dochází k náhlé změně gradientu určující veličiny vibrací, např. výchylky, rychlosti nebo zrychlení.

Podle změny časových veličin mohou mít vibrace průběh neperiodický, periodický nebo náhodný. Periodické vibrace jsou harmonické vibrace mající jedinou frekvenci a jsou dány vztahem (3). Pro tyto vibrace stačí stanovit jedinou z určujících veličin (výchylku, rychlost, zrychlení) a zbývající veličiny můžeme vypočítat pomocí derivace či integrace podle času. [2]

$$x = x_0 + \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

$x$	[m]	-okamžitá výchylka vibrací
$x_0$	[m]	-amplituda vibrací (maximální výchylka)
$\omega$	[rad. s <sup>-1</sup> ]	-úhlová rychlost ( $\omega = d\varphi/dt$ ), úhlová frekvence ( $\omega = 2\pi f$ )
$t$	[s]	-čas
$\varphi$	[rad]	-fáze harmonické veličiny v čase $t = 0$

### 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

V moderním strojírenství se kladou stále vyšší nároky na přesnost a kvalitu konstrukce, provedení a užité vlastnosti celého zařízení. Mezi významnými požadavky ve specifikacích uživatelů se často objevuje mimo jiné i nízká hlučnost. Tato hlučnost může být způsobena celou řadou vlivů, k nimž patří do značné míry hlučnost instalovaných ložisek.

Hlučnost ložiska se zjišťuje ve smontovaném stavu metodou vyhodnocení vibrací. Ve stavu, kdy je ložisko prakticky ložisko hotové, představuje případná vada značné ekonomické ztráty. Začínají se používat metody včasného zjištění případného defektu na profilu oběžné dráhy komponenty již při její výrobě. Mezi takové postupy patří např. nastavení limitů pro hodnocení kvality povrchu pomocí RTA.

Cílem této práce je prokázat, jaká je spojitost mezi vyhodnocením profilu povrchu oběžných drah kroužků ložiska metodou RTA a vibracemi, způsobující hlučnost takového ložiska ve smontovaném stavu. Tím lze významně snížit náklady na výrobu.

## 4 MATERIÁL A METODY

### 4.1 Měření kruhovitosti

Měření začíná naměřením kruhovitosti daných kroužků. V tomto případě se budou měřit vnější kroužky ložiska (Obr. 4.1). Výběr testovaných kroužků byl proveden na základě předběžných informací o jejich kvalitě takto: První kus byl vybrán z kroužků s vyhovujícími parametry kvality a označen jako referenční. Dalších pět kusů pak bylo vybráno ze skupiny s velkou vlnitostí. Ty byly označeny jako neshodné výrobky.

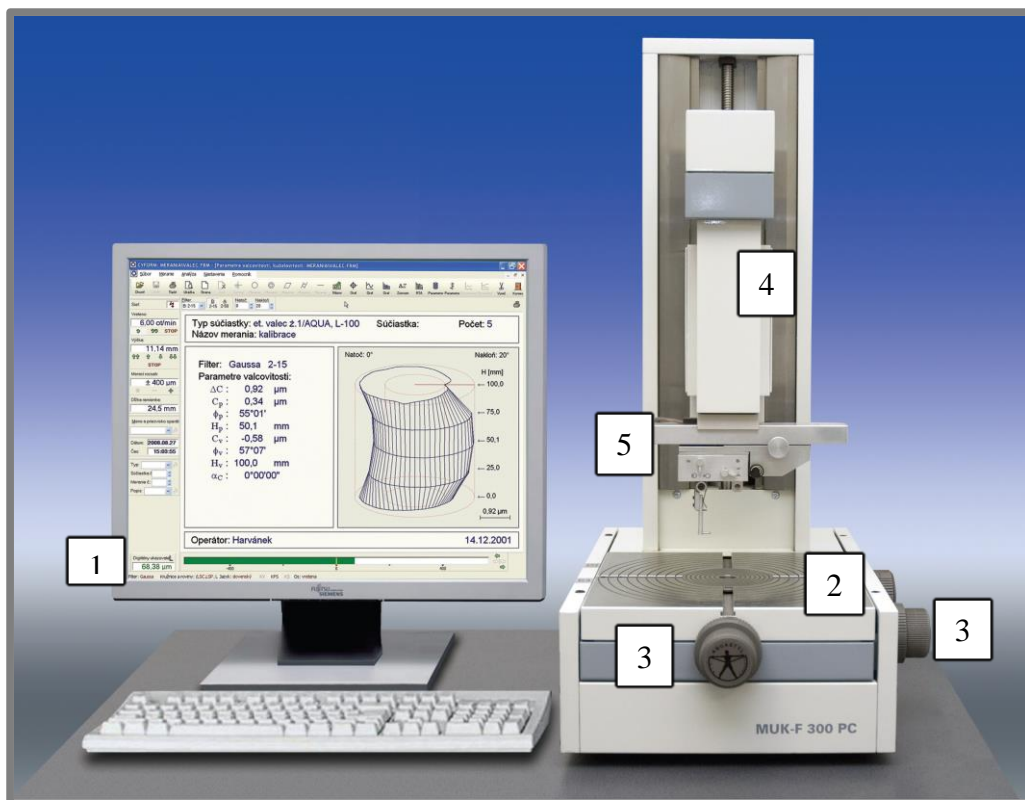


Obr. 4.1 Vnější kroužek měřeného ložiska

U signálu kruhovitosti byla provedena harmonická analýza. Výsledky pak byly porovnány s limity danými RTA. Hodnoty RTA jsou předepsány na výkrese. Tyto hodnoty jsou dány buď zákazníkem, nebo jsou stanoveny přímo výrobcem.

#### 4.1.1 Měřící zařízení

Pro změření kruhovitosti použijeme kruhoměr MUK-F 300 (Obr. 4.2) připojený k počítači (PC). Toto zařízení je umístěno v klimatizované místnosti, aby se co nejvíce eliminoval vliv změny teplot.



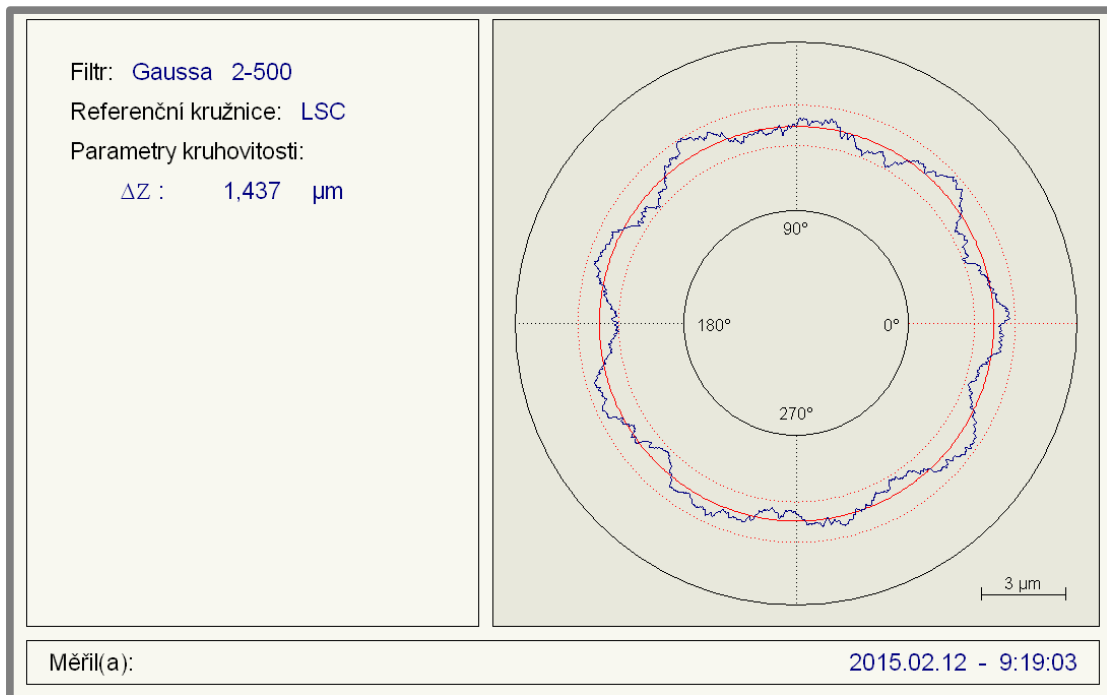
Obr. 4.2 MUK-F 300 [9]

- 1-PC
- 2-Křížový stůl
- 3-Ovládací prvky středění
- 4-Měřící vřeteno
- 5-Snímač

#### 4.1.2 Postup měření

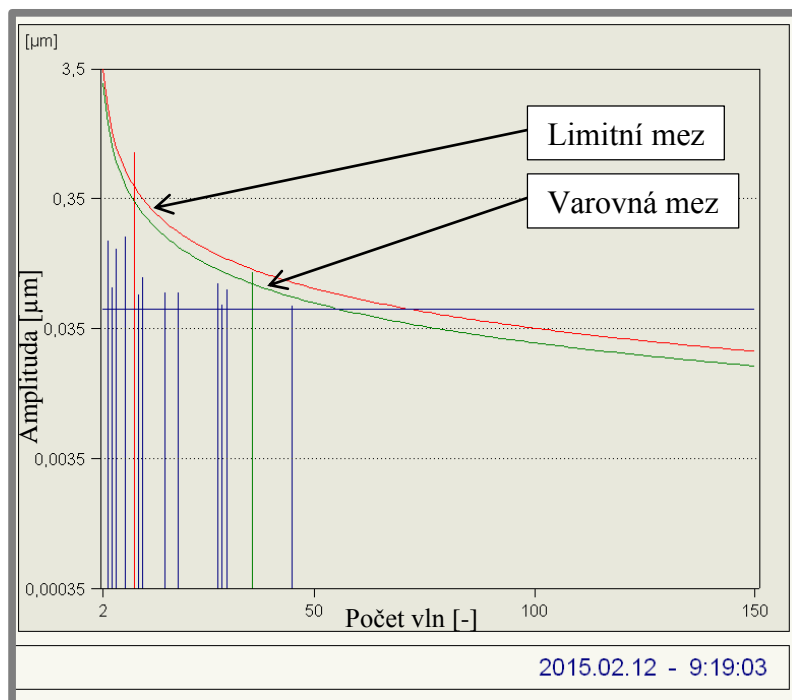
Vnitřní kroužek se umístí naplocho čelem na křížový stůl. Kroužek se uchytí do středu pracovní plochy pomocí otáčivých středících čelistí. Pojezdem měřicího vřetena a příčného supportu posuneme snímač tak, aby se dotkl měřeného povrchu. Před vlastním měřením je nutné měřený kroužek vystředit v obou vodorovných osách. Měřící vřeteno se snímačem roztočíme a sledujeme hodnoty excentricity. Tu pak musíme snížit na hodnotu blízkou nule. K jemnému doladění použijeme ovládací prvky obou vodorovných os desky křížového stolu. Při vlastním měření musí měřící snímač absolvovat alespoň jednu otáčku o 360°. Vykreslí se polární graf kruhovitosti (Graf 4.3).

4.1.2



Graf 4.3 Naměřená kruhovitosť

Ze zaznamenaných dat profilu signálu lze dále analyzovat vlnitost. K tomu je potřeba zadat předem dané parametry pro omezující křivku (RTA). Vytvoří se graf závislosti výšky amplitud na počtu vln. V grafu jsou vykresleny i omezující křivky (varovná a limitní mez) (Graf 4.4). Jakékoli překročení výšky vlny nad omezující křivky je znázorněno jak graficky tak i výpisem numerické hodnoty.



Graf 4.4 Záznam analýzy RTA

### 4.1.3 Komponenty ložiska

Pro přesnější měření bylo z výroby vybráno válečkové ložisko bez vnitřního kroužku. Toto ložisko se bude montovat z vnějšího kroužku (Obr. 4.1), klece (Obr. 4.5), a valivých elementů – válečků (Obr. 4.6).



Obr. 4.5 Klec ložiska



Obr. 4.6 Valivé elementy ložiska

### 4.2 Měření vibrací

Měření vibrací se provádí na kompletním ložisku. Budeme posuzovat sestavu vnějšího kroužku s valivými elementy v kleci. Jako referenční použijeme sestavu s kroužkem s vyhovující kvalitou oběžné dráhy (referenční kus). Měřit pak budeme i dalších 5 sestav ložisek, jejichž vnější kroužky byly již dříve testovány na kruhovitost a RTA (viz. 4.1).

#### 4.2.1 Měřené ložisko

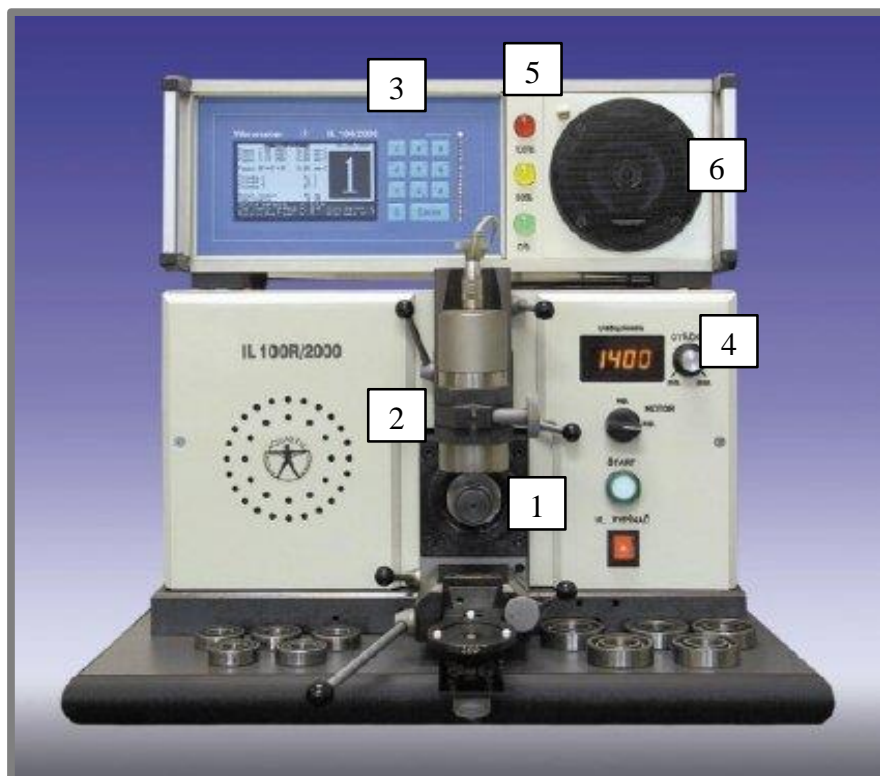


Obr. 4.7 Měřené ložisko

Jedná se o válečkové ložisko (Obr. 4.7), které se montuje do automobilové převodovky. Ložisko je neúplné, nemá vnitřní kroužek – válečky se pak v převodovce odvalují přímo po hřídeli. U ložiska je požadována vyšší přesnost a nižší hlučnost.

#### 4.2.2 Měřící zařízení

Měření vibrací provedeme na měřícím zařízení IL 100R/2000 (Obr. 4.8) umístěném v klimatizovaném prostředí. Toto zařízení vyhodnocuje mechanické vibrace [ $ms^{-2}$ ] měřeného ložiska. Tyto vibrace mohou být rovněž zpracovány, zesíleny a převedeny na akustický signál. Tento signál vychází z reproduktoru a je posuzován jako pomocná informace – neměří se, pouze vypovídá o charakteru vibrací.



Obr. 4.8 Vibroměr IL 100R/2000 [10]

- |  |
|--|
| 1-Unášecí vřeteno<br>2-Snímač vibrací<br>3-Vyhodnocovací jednotka<br>4-Nastavení otáček<br>5-Světelná signalizace<br>6-Reproduktor |
|--|

### 4.2.3 Postup měření

Nejprve je nutné měřicí stanici uvést do chodu, nastavit parametry a roztočit unášecí vřeteno na požadované otáčky. Předem smontované ložisko uchopíme za vnější kroužek a nasuneme na trn unášecího vřetena. Tím dojde k dotyku snímače se stojícím vnějším kroužkem ložiska, přičemž valivé elementy s klecí ložiska jsou roztočeny trnem vřetena. Po krátkém zaběhnutí ložiska dojde k samotnému měření vibrací. K analýze získaného signálu měřicí zařízení používá rychlou Fourierovu transformaci, Fast Fourier transform (viz. 2.5). Měřicí zařízení vyhodnocuje naměřené vibrace v několika frekvenčních pásmech (nízké od 40 do 300 Hz, střední od 0,3 do 1,8 kHz a vysoké od 1,8 do 10 kHz). Pro porovnání výsledků měření vlnitosti a měření vibrací nás budou zajímat všechny tři pásma. Každé pásmo ukazuje na jinou oblast vad. Pásmo nízkých frekvencí ukazuje na vady oběžných drah kroužků - ovalita, tvar čtyřhranu, popř. šestihranu (viz. 2.2.3). Pásmo středních frekvencí indikuje poruchu na klecích nebo na oběžných drahách valivých elementů. A v případě výskytu vysokých frekvencí se zpravidla jedná o nečistoty v ložisku nebo nevyhovující drsnost povrchu. Pro každé frekvenční pásmo se předem stanovuje mezní hodnota vibrací.

4.2.3

Vyhodnocuje se jak překročení mezních hodnot vibrací v jednotlivých frekvenčních pásmech, tak i jejich akustický projev. Dojde-li k překročení mezních hodnot v kterémkoliv z frekvenčních pásem, je ložisko označeno jako neshodný výrobek.

## 5 VÝSLEDKY

**5**

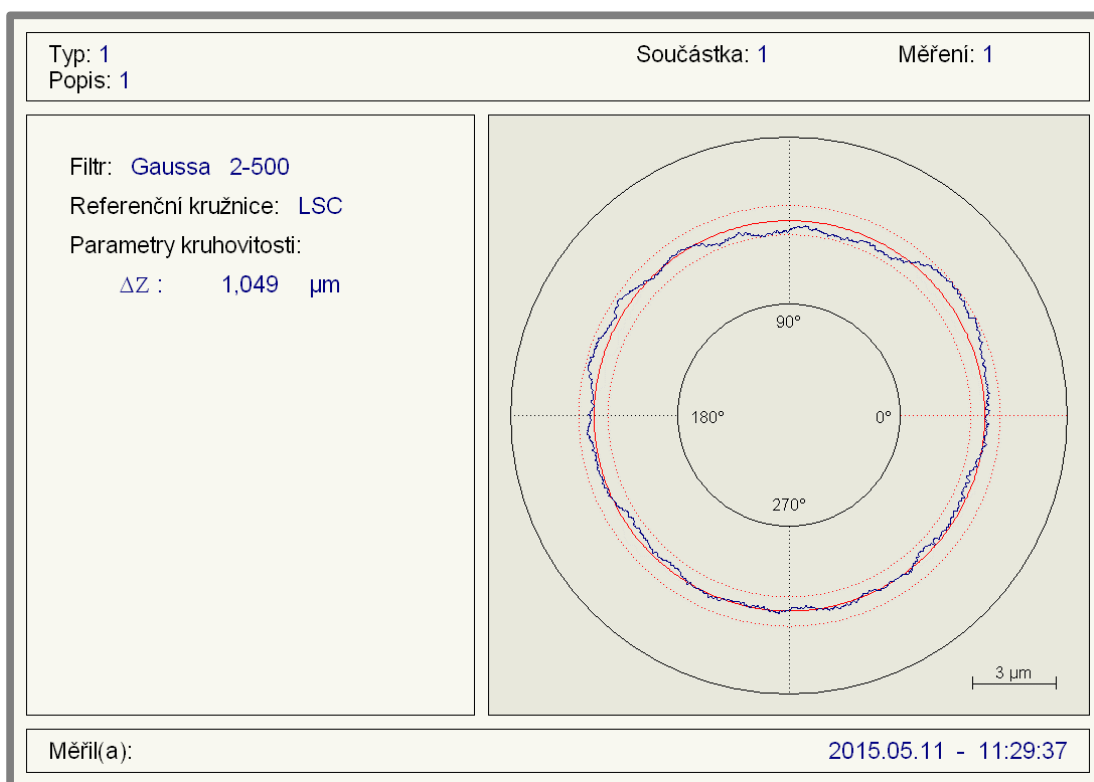
### 5.1 Měření RTA

5.1

#### 5.1.1 Měření referenčního kroužku

5.1.1

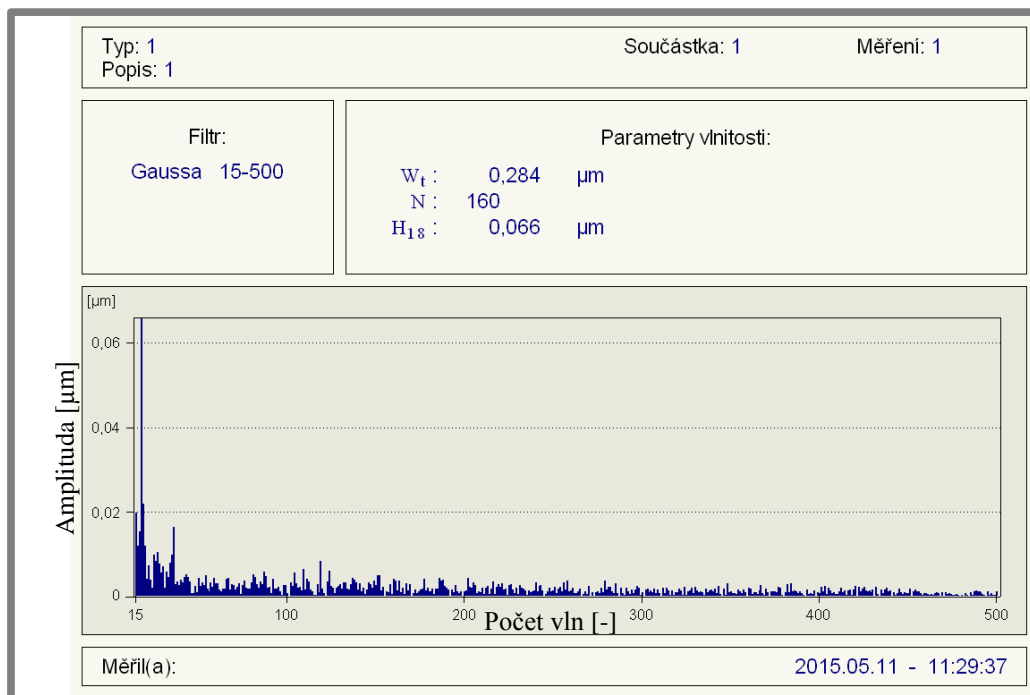
Nejprve jsme provedli měření oběžné dráhy vnějšího kroužku. Kroužek jsme umístili na stůl měřicí stanice MUK-F 300 a zahájili samotné měření (viz. 4.1.2). Po dokončení měření jsme dostali vyhodnocení kruhovitosti (Graf 5.1) v polárním grafu se skutečnou hodnotou kruhovitosti  $\Delta Z$ . Nastavili jsme Gaussův filtr na rozsah 2÷500, což znamená, že zařízení z naměřeného signálu vyhodnocuje část ohraničenou od 2 do 500 vln.



Graf 5.1 Kruhovitost referenčního kroužku

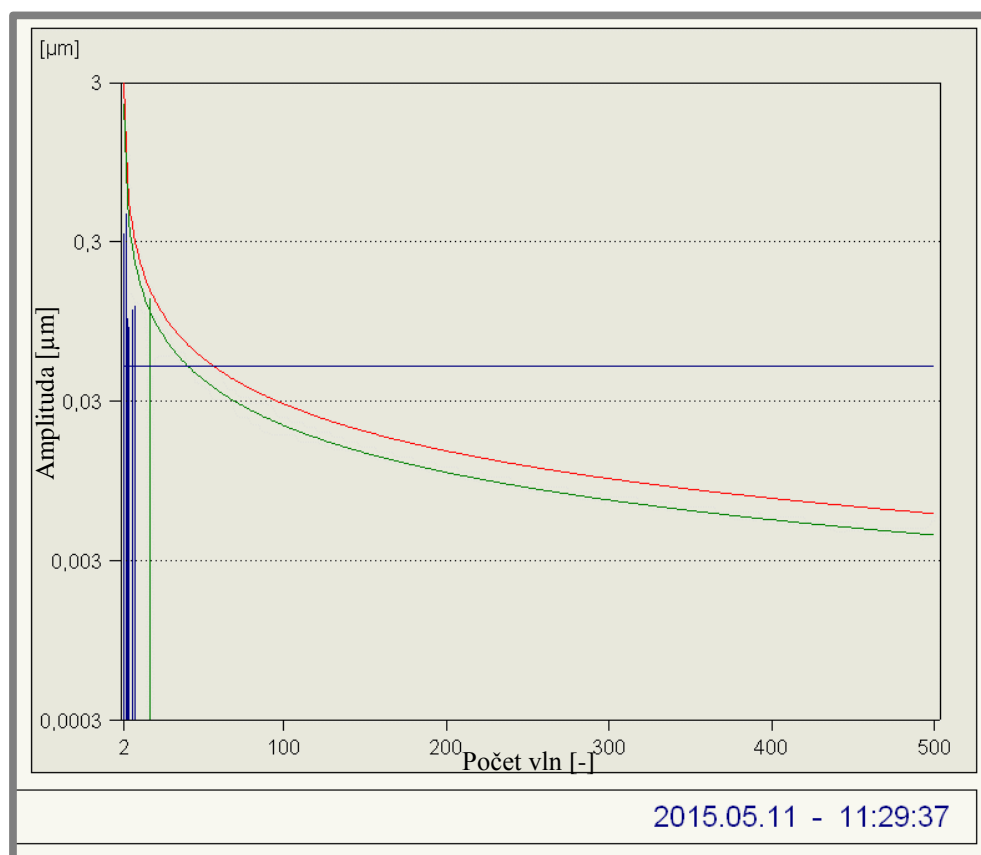
V grafu je naměřený signál proložený několika kružnicemi. Referenční kružnice, vykreslena červenou plnou čarou, která byla vytvořena metodou nejmenších čtverců. K ní pak byly vytvořeny kružnice opsaná a vepsaná, vyznačeny červenou tečkovanou čarou. Kruhovitost hodnotíme vůči středové (referenční) kružnici – viz. nastavená volba LSC.

Následovalo rozložení naměřeného signálu na graf závislosti amplitud na počtu vln – harmonická analýza signálu (Graf 5.2).



Graf 5.2 Harmonická analýza profilu

Z nasnímaného signálu byla provedena analýza RTA (Graf 5.3). Parametry RTA byly nastaveny dle interní směrnice KOYO PF4020WA.



Graf 5.3 RTA analýza

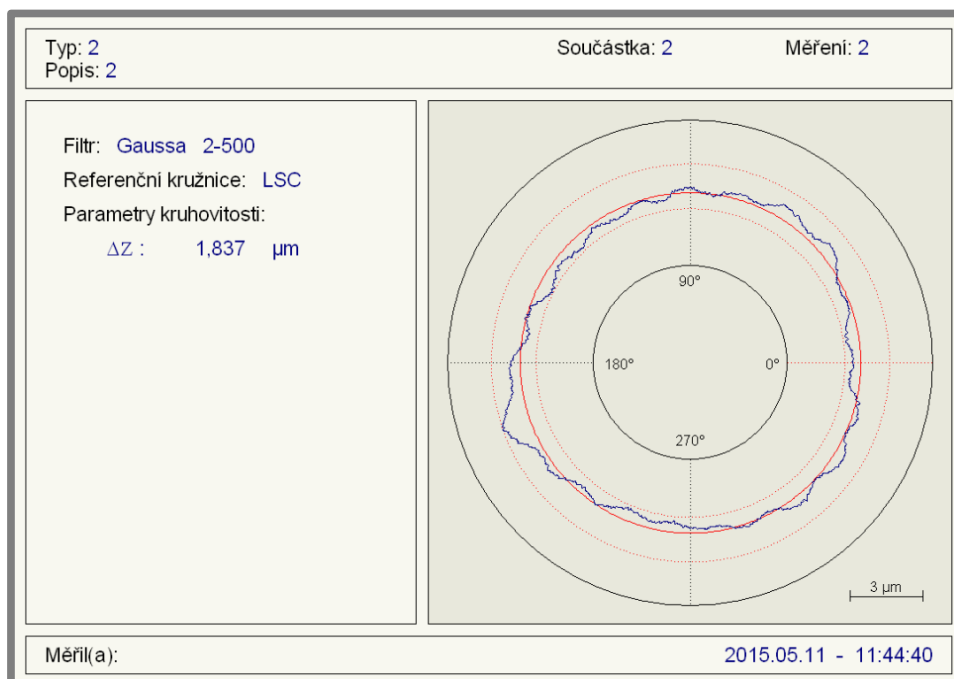
Z grafu je patrné, že naměřený kroužek vyhovuje. Vlny jedné frekvence přesahují varovnou mez (zelená křivka), nepřesahují však mez limitní. Jedná se o přípustný stav.

### 5.1.2 Měření kroužků 2 až 6

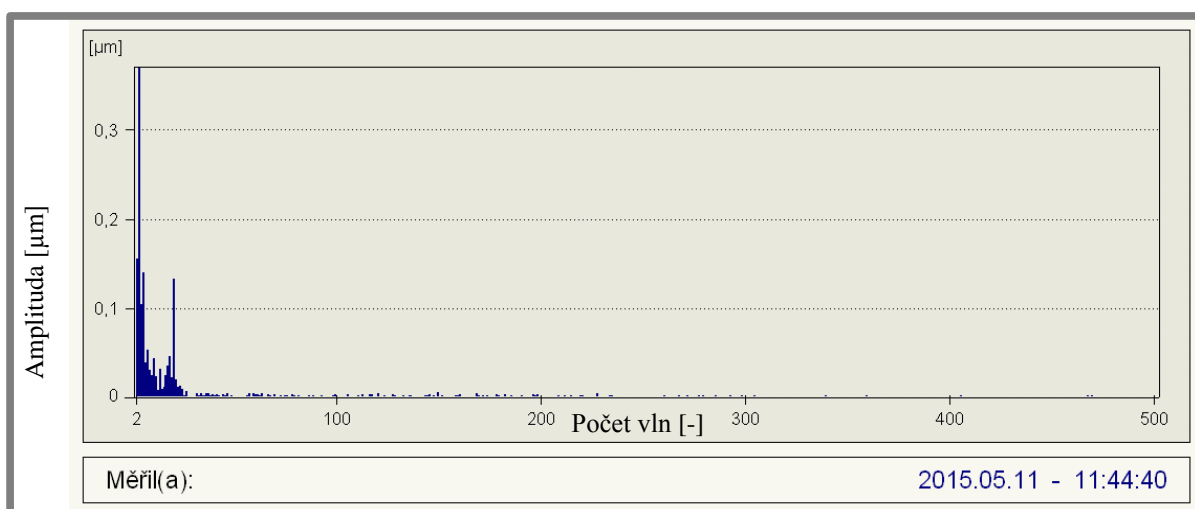
5.1.2

#### Vnější kroužek 2

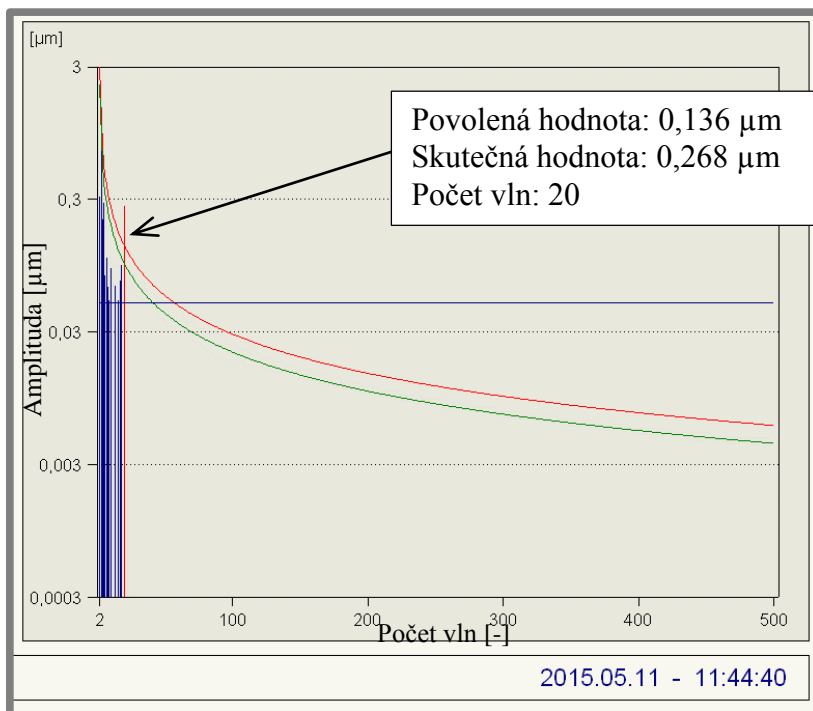
Po naměření referenčního kusu jsme naměřili pět vnějších kusů, které byly předem vyřazeny z výroby jako neshodné výrobky. Měření je identické s měřením referenčního kusu (viz. 5.1.1)



Graf 5.4 Kruhovitost - 2. kroužek



Graf 5.5 Harmonická analýza profilu - 2. kroužek



Graf 5.6 RTA - 2. kroužek

Z výsledku pokusného měření je vidět, že daný kroužek přesahuje jak křivku varovnou, tak křivku přípustné meze.

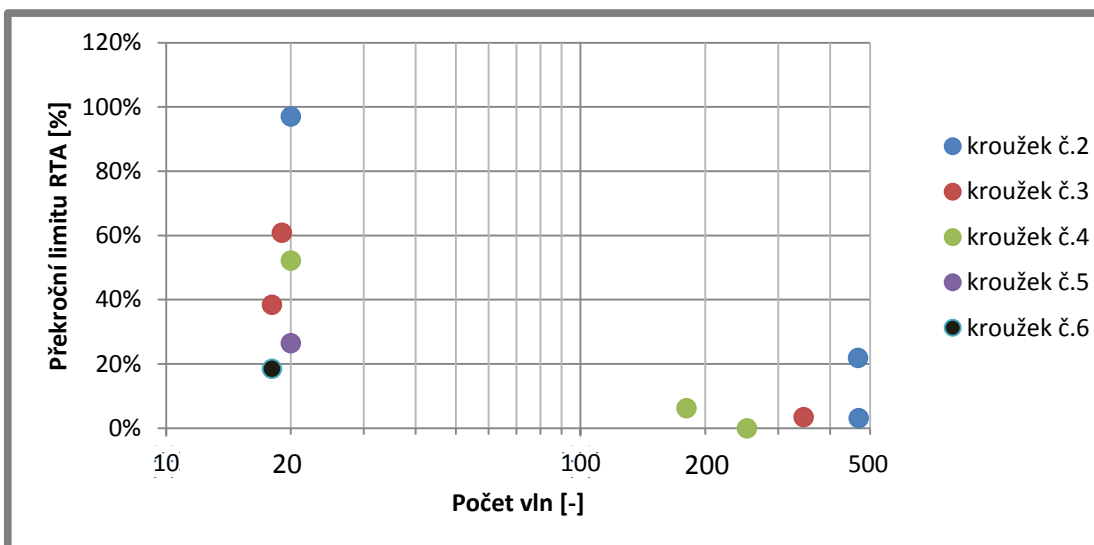
Detailní výsledky vyhodnocení RTA kroužků 1 až 6 se nachází v příloze č. 1.

U některých kroužků došlo k překročení omezující křivky RTA ve větším počtu případech, a to při různých počtech vln. Pro zjednodušení se budeme dále zabývat pouze prvními třemi (3) překročeními, počítanými od nejnižšího počtu vln. Následující tabulka ukazuje souhrn takových překročení u měřených kroužků:

č. kroužku	č. překročení	skutečná hodnota	mezní hodnota	počet vln	procentuální překročení
[-]	[-]	[μm]	[μm]	[-]	[%]
2	1	0,268	0,136	20	97%
	2	0,0078	0,0064	467	22%
	3	0,0065	0,0063	469	3%
3	1	0,209	0,151	18	38%
	2	0,23	0,143	19	61%
	3	0,0089	0,0086	345	3%
4	1	0,207	0,136	20	52%
	2	0,017	0,016	180	6%
	3	0,012	0,012	252	0%
5	1	0,172	0,136	20	26%
	2				
	3				
6	1	0,179	0,151	18	19%
	2				
	3				

Tab. 5.7 Překročené hodnoty RTA jednotlivých kroužků

Ze souhrnu překročení vyplývá, že u všech kroužků byly překročeny limity RTA v oblasti nízkých vln, a to kolem 20 vln/otáčku. U některých z kroužků byly překročeny meze v oblasti 200 resp. 500 vln/otáčku:



Graf 5.8 Souhrn výsledků RTA

## 5.2 Měření vibrací

5.2



Obr. 5.9 Měření vibrací

Následovalo měření vibrací na vibroměru (viz. 4.2.2 ). Ložiska byla již ve smontovaném stavu. Pro námi měřená ložiska je dána maximální přípustná hodnota součtu vibrací v daném frekvenčním pásmu (Tab. 5.10). Tyto hodnoty byly nastaveny dle interního předpisu KOYO Olomouc (hodnoty se stanovují dle skutečných projevů hlučnosti ložiska v aplikaci). Jelikož měřicí stanice neumožňuje grafický výstup

na PC, naměřené hodnoty amplitud zrychlení byly zapsány do tabulky (Tab. 5.11). Jedná se o součet amplitud vibrací v daném frekvenčním pásmu.

NF	SF	VF	Celková úroveň
$[ms^{-2}]$	$[ms^{-2}]$	$[ms^{-2}]$	$[ms^{-2}]$
0,45	4	35	35,23

Tab. 5.10 Povolené hodnoty vibrací u daného kroužku

č. součásti	NF	SF	VF	Celková úroveň
	$[ms^{-2}]$	$[ms^{-2}]$	$[ms^{-2}]$	$[ms^{-2}]$
1*)	0,29	1,63	14,6	14,69
2	0,26	2	<b>21,98</b>	<b>22,08</b>
3	0,25	1,86	10,67	10,84
4	0,3	1,86	<b>21,68</b>	<b>21,76</b>
5	0,33	<b>2,64</b>	<b>25,48</b>	<b>25,62</b>
6	0,23	1,56	7,61	7,77

Tab. 5.11 Naměřené hodnoty vibrací

\*) Pozn.: Součástka č. 1 – referenční kroužek

Z měření vyplývá, že žádné z námi naměřených ložisek nepřekračuje limitní mez vibrací ani v jednom frekvenčním pásmu. Všechna ložiska byla zkouškou vibrací klasifikována jako vyhovující.

U kroužků č. 2, 4, 5 byly naměřené úrovně vibrací v některých frekvenčních pásmech vyšší než u referenčního kroužku (zvýrazněno v Tab. 5.11).

### 5.3 Porovnání výsledků

Z porovnání výsledků měření vlnitosti kroužků a měření vibrací smontovaných ložisek vyplývá:

- Referenční kus nepřekročil limit RTA a hodnoty vibrací byly nízké.
- Kroužek č. 2 překročil limit RTA výrazně (o 100%) v oblasti nízkého počtu vln (20), ale rovněž i v oblasti vysokého počtu vln (470). Hodnoty vibrací byly ve vysokém frekvenčním pásmu zvýšeny, vibrace však nepřekročily limitní mez v žádném pásmu. Výsledky vibrací mohou ukazovat na poněkud vyšší množství nečistot na oběžných drahách ložiska. Toto ložisko bylo vyhodnoceno jako vyhovující.
- Kroužek č. 3 překročil limit RTA (o 60%) v nízkém počtu vln (20). Při měření vibrací byly hodnoty velmi nízké. Toto ložisko vyhovuje
- Kroužek č. 4 překročil limit RTA (o 50%) v nízkém počtu vln (20). Hodnoty vibrací byly zvýšeny ve vysokém frekvenčním pásmu, přesto vibrace nepřekročily limitní mez v žádném frekvenčním pásmu. Ložisko je vyhovující.
- Kroužek č. 5 překročil limit RTA (o 25%) v nízkém počtu vln. Hodnoty vibrací byly zvýšené ve středním a vysokém frekvenčním pásmu. Vibrace však nepřekročily limitní mez, proto bylo ložisko vyhodnoceno jako vyhovující.
- Kroužek č. 6 překročil limit RTA (o 20%) v nízkém počtu vln. Vibrace nebyly zvýšené v žádném frekvenčním pásmu. Ložisko bylo vyhodnoceno jako vyhovující

Většina kroužků překročila meze RTA, při měření vibrací však všechna ložiska smontovaná z těchto kroužků vyhověla.

## 6 DISKUZE

Cílem práce bylo prokázat, zda existuje souvislost mezi posouzením vlnitosti metodou RTA na komponentách a měřením vibrací ložisek smontovaných z těchto komponent. U všech měřících metod byla použita nastavení dle předpisů výrobce. Testované kroužky byly vybrány tak, aby překročily meze definované RTA, s předpokladem, že nevyhoví při testu vibrací. Naměřené hodnoty vlnitosti překračovali mez RTA o 20% až 100% (viz Graf 5.8). U testovaných ložisek však úroveň vibrací dosahovala 22% až 73% maximální dovolené hodnoty mezi jednotlivých frekvencí (viz Tab. 5.11). Všechna ložiska tedy vyhověla při testu vibrací. Předpoklad, že jakékoliv překročení mezi RTA způsobí překročení nastavených limitů vibrací, se nepotvrdil. Může to být způsobeno např.:

- a) Počet vln překračující limit RTA a počet valivých tělísek jsou nesoudělná čísla. Valivá tělíška tedy nezapadají do „prohlubní“ oběžných drah kroužků. Vzniklé vibrace jsou nízké.
- b) Kritérium RTA není v souladu s nastavením mezí vibrací. Limit RTA je pravděpodobně nastaven příliš přísně.
- c) Nastavené meze vibrací v jednotlivých frekvenčních pásmech je méně přísné. Zde je však nutné respektovat požadavky na hlučnost, respektive vibrace, požadované zákazníkem. Mohlo by se stát, že vyrobené ložisko by bylo mnohem lepší, než jaký byl požadavek – výrobek by se zbytečně prodražil.

Je možné, že defekty s jiným počtem vln by mohly mít větší vliv na vibrace ložiska. V našem měření jsme zanedbávali vliv vibrací zbývajících komponent ložiska (klec, valivé elementy). Pro další zpřesnění by bylo vhodné změřit také vlnitost valivých elementů, která by mohla způsobovat vzniklé vibrace.

## 7 ZÁVĚR

Mezi nejčastěji žádané vlastnosti ložisek patří kromě vyšší přesnosti, delší trvanlivosti také především nižší hlučnost za chodu. Testy hlučnosti se provádějí na smontovaném ložisku. Taková operace pak zajistí, že zákazník neobdrží hlučné ložisko. Pokud by ložisko testem hlučnosti neprošlo, znamenalo by to, že některá z jeho komponent je vadná. Toto ložisko by se muselo buď demontovat a vadnou komponentu opravit, nebo ložisko vyřadit jako neshodný výrobek. Takový postup je nákladný. Z tohoto důvodu se hledají metody včasné detekce vad, které mají vliv na hlučnost. Jednou z preferovaných metod je metoda RTA, vyhodnocující kvalitu povrchu oběžných drah kroužků již při jejich výrobě. Pro správné fungování takové detekce je důležité ověřit, jaká je souvislost mezi RTA a výslednou hlučností.

Stěžejní část této práce se zabývá porovnáním výsledků analýzy RTA s měřením vibrací.

U testovaných komponent (kroužků) jsme vyhodnocovali vlnitost vůči omezujícímu kritériu RTA. Tyto křivky RTA byly nastaveny podle interního předpisu PF4020WA. Z výsledků je zřejmé, že omezující křivku překročilo všech pět kroužků, které tak byly označeny jako nevyhovující. Pro měření vibrací a posouzení hlučnosti byla použita ložiska smontovaná z těchto kroužků. Ani jedno z měřených ložisek však nepřekračovalo stanovené vibrace a to ani v jednom z frekvenčních pásem. V některých případech byly naměřené vibrace nižší než hodnoty zjištěné u referenčního kusu.

Ukázalo se, že rozhodující vliv na vibrace a tím i výslednou hlučnost ložiska mají parametry jako frekvence a amplitudy vlnitosti, počet valivých elementů, otáčky ložiska a další.

Počáteční hypotéza, že kroužky, které překročí limit RTA, budou vykazovat vyšší vibrace, se nepotvrdila. Je to způsobeno nejspíše skutečností, že takto vytvořená vlnitost na oběžných drahách kroužků daných frekvencí a amplitud nezpůsobila dostatečně silné vibrace na smontovaných ložiscích. V práci jsme se zabývali pouze jedním typem ložiska. Pro ověření hypotézy by bylo vhodné zabývat se větším souborem dat - změřit více různých typů ložisek o větším počtu měření, kde bude zajištěno větší množství a rozmanitost defektů. Nabízí se provést další analýzy ložisek z výrobního programu firmy KOYO Olomouc.

**8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ**

- [1] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [2] KREIDL, Marcel. Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [3] MAZAL, Pavel, Luboš PAZDERA a Jaroslav SMUTNÝ. *Identifikace kontaktního poškození materiálů a ložisek metodou akustické emise*. Vyd. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2009, 116 s. ISBN 978-80-214-3826-2.
- [4] SVOBODA, Pavel. *Základy konstruování*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011, 234 s. ISBN 978-80-7204-750-5.
- [5] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. ISBN 80-901-9361-7.
- [6] SKF Bearing Calculator. *SKF Bearing Calculator*. [online]. 12.5.2015 [cit. 2015-05-12]. Dostupné z: <http://webtools3.skf.com/BearingCalc/selectProduct.action;jsessionid=0EA9A0BBE44A4DC320DAB23C4FC60030>
- [7] SKF 61840. *ecplaza*. [online]. 1996 [cit. 2005-05-16]. Dostupné z: <http://srweldedmesh.en.ecplaza.net/skf-61840-single-row-deep-185853-2011111.html>
- [8] Ball and roller bearings. *KOYO*. [online]. © 1997 [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: <http://www.koyo.com.br/upload/koyo/cat203ex%20-%20Ball%20&%20Roller%20Bearings.pdf>
- [9] PRÍSTROJ NA MERANIE TVAROVÝCH ODCHÝLOK KRUHOVITOSTI. *Aquastyl Slovakia, s.r.o.* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: [http://www.aquastyl.sk/vyrobky/prospekty/muk300pc\\_sk.pdf](http://www.aquastyl.sk/vyrobky/prospekty/muk300pc_sk.pdf)
- [10] PRÍSTROJ NA MERANIE A VYHODNOCOVANIE HLADINY VIBRÁCIÍ VALIVÝCH LOŽÍSK. *Aquastyl Slovakia, s.r.o.* [online]. [cit. 2015-05-15]. Dostupné z: [http://www.aquastyl.sk/htm/il100r\\_sk.htm](http://www.aquastyl.sk/htm/il100r_sk.htm)
- [11] Katedra konstruovania a částí strojov Strojnícka fakulta Žilinská univerzita v Žiline . Drsnost povrchu. [online]. © 2012 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: <http://www.konstruovanie1.uniza.sk/Subory/Obr/Obr9.8.html>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

<i>aj.</i>	-a jiné
<i>např.</i>	-například
<i>obr.</i>	-obrázek
<i>tzv.</i>	-tak zvaný
<i>RTA</i>	-Real Time analysis
<i>FFT</i>	-Fast Fourier transform
Tab.	-Tabulka

$H_w$	[-]	-amplituda vlny
$R$	[-]	-volitelná konstanta, nastavuje svislou pozici omezující křivky
$K$	[-]	-volitelná konstanta
$n_0$	[-]	-volitelná konstanta
$w$	[-]	-počet vln, v intervalu $2 \div 150$ , nebo $2 \div 500$
$x$	[m]	-okamžitá výchylka vibrací
$x_0$	[m]	-amplituda vibrací (maximální výchylka)
$\omega$	[rad. $s^{-1}$ ]	-úhlová rychlost ( $\omega = d\varphi/dt$ ), úhlová frekvence ( $\omega = 2\pi f$ )
$t$	[s]	-čas
$\varphi$	[rad]	-fáze harmonické veličiny v čase $t = 0$

**SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ**

<b>Obr. 2.1</b> Kuličkové ložisko [1]	14
<b>Obr. 2.2</b> Kuličkové ložisko SKF [7]	15
<b>Obr. 2.3</b> Jehličkové ložisko [8]	16
<b>Obr. 2.4</b> Válečkové dvouřadé ložisko [8]	16
<b>Obr. 2.5</b> Ložisko SKF s rozměry [6]	17
<b>Obr. 2.6</b> Zatížení při konkávním tvaru	17
<b>Obr. 2.7</b> Zatížení při přímkovém tvaru	18
<b>Obr. 2.8</b> Zatížení při konvexním tvaru	18
<b>Obr. 2.9</b> Geometrické tolerance na vnitřním kroužku	19
<b>Obr. 2.10</b> Nejčastější odchylky kruhovitosti	20
<b>Obr. 2.11</b> Reálná kruhovitost	20
<b>Obr. 2.12</b> analýza profilu	21
<b>Obr. 2.13</b> Drsnost povrchu [11]	21
<b>Obr. 2.14</b> Vznik vibrací v ložisku	22
<b>Graf 2.15</b> Amplitudy vln v závislosti na jejich počtu	23
<b>Obr. 4.1</b> Vnější kroužek měřeného ložiska	26
<b>Obr. 4.2</b> MUK-F 300 [9]	27
<b>Graf 4.3</b> Naměřená kruhovitost	28
<b>Graf 4.4</b> Záznam analýzy RTA	28
<b>Obr. 4.5</b> Klec ložiska	29
<b>Obr. 4.6</b> Valivé elementy ložiska	29
<b>Obr. 4.7</b> Měřené ložisko	30
<b>Obr. 4.8</b> Vibroměr IL 100R/2000 [10]	31
<b>Graf 5.1</b> Kruhovitost referenčního kroužku	33
<b>Graf 5.2</b> Harmonická analýza profilu	34
<b>Graf 5.3</b> RTA analýza	34
<b>Graf 5.4</b> Kruhovitost - 2. kroužek	35
<b>Graf 5.5</b> Harmonická analýza profilu - 2. kroužek	35
<b>Graf 5.6</b> RTA - 2. kroužek	36
<b>Tab. 5.7</b> Překročené hodnoty RTA jednotlivých kroužků	36
<b>Graf 5.8</b> Souhrn výsledků RTA	37
<b>Obr. 5.9</b> Měření vibrací	37
<b>Tab. 5.10</b> Povolené hodnoty vibrací u daného kroužku	38
<b>Tab. 5.11</b> Naměřené hodnoty vibrací	38

---

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Laboratorní protokol měření vlnitosti