

**UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA
KATEDRA DOPRAVNÍCH PROSTŘEDKŮ
A DIAGNOSTIKY**

**VLIV POŠKOZENÍ VALIVÉHO LOŽISKA
NA JEHO DIAGNOSTICKÉ PARAMETRY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**AUTOR PRÁCE: Bc. Pavel Košťál
VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel Kukla**

Pardubice 2009

**UNIVERSITY OF PARDUBICE
JAN PERNER TRANSPORT FACULTY
DEPARTMENT OF TRANSPORT MEANS AND
DIAGNOSTICS**

**EFFECT OF FAILURE OF BEARINGS
ON ITS DIAGNOSTIC PARAMETERS**

THESIS

**AUTHOR: Bc. Pavel Košťál
SUPERVISOR: Ing. Pavel Kukla**

Pardubice 2009

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 25. 5. 2009

Pavel Košťál

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří dopomohli k tvorbě této práce. Poděkovat bych chtěl především za sestavení strojního zařízení, zapůjčení diagnostického zařízení a vedoucímu mé práce panu Ing. Pavlu Kuklovi děkuji za poskytnutí materiálů a věnování svého času.

Pavel Košťál

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je sledování momentálního technického stavu valivých ložisek. Sledujeme diagnostické parametry jako kvantitativní projevy závad na valivém ložisku. Diplomová práce popisuje teoretickou povahu chvění a náležitosti, které se s touto problematikou spojují a poté na konkrétním strojním zařízení a pomocí diagnostických metod a diagnostických prostředků určuje technický stav valivých ložisek.

Obsah práce je koncipován tak, aby čtenáři poskytl potřebný teoretický základ od nejširších vědomostí až ke konkrétní problematice a navazuje na praktickou část měření. V první kapitole se tato práce zabývá technickou diagnostikou. Vysvětluje vlastní pojem a zužuje ji na část, která je zaměřena na vibrační sledování technického stavu. V další kapitole jsou podrobněji rozepsány vibrace, příklad jednoduchého signálu a jeho rozkladu na složky. V dalších kapitolách jsou podrobně rozepsány správné zásady měření a v kapitole o ložiscích je uvedeno jejich rozdělení, konstrukce a vzorce pro výpočet charakteristických frekvencí lokálních poruch těles. V praktické části jsou popisována měřící zařízení a postup měření, poté je provedena analýza naměřených signálů a jejich vyhodnocení.

Abstract

The aim of this diploma thesis is to monitor the current technical condition of rolling bearings. Diagnostic parameters are observed as quantitative manifestations of faults on rolling bearings. The theoretical nature of vibration and the elements that combine with this issue are described. Further the specific machinery and using the diagnostic methods and diagnostic means determine the technical condition of rolling bearings.

The content of this work is designed to provide the reader with the necessary theoretical basis of the broadest knowledge to the specific issues and builds on the practical part of measurement. In the first chapter, this work deals with the technical diagnostics. It explains the self-concept and narrows it to the part, which is focused on vibration monitoring of technical condition. In the next chapter are further specified vibrations, an example of simple signal and its desintegration into components. In the other chapters correct measurement principles are detailed. Chapter about bearings includes their distribution, structure and formula for calculating the characteristic frequency of local body failures. In practical part there are described measuring means and measuring procedure and then analysis of measured signals and its data evaluations is done.

Obsah

Seznam použitých zkratk	8
1 Úvod	10
2 Technická diagnostika	11
3 Vibrace a jejich parametry	14
3.1 Fourierova analýza	16
3.2 Měření chvění.....	20
3.2.1 Snímače zrychlení.....	21
3.2.2 Upevnění snímače.....	22
3.2.3 Vlivy prostředí	23
4 Ložiska	25
4.1 Charakteristické frekvence lokálních poruch tělísek	30
5 Měření vibrací na ložiscích – praktická část	32
5.1 Měřicí řetězec a použité komponenty	32
5.1.1 Strojní zařízení.....	33
5.1.2 Ložiska.....	34
5.1.3 Akcelerometry.....	35
5.1.4 Analyzátor.....	36
5.1.5 Software	37
5.1.6 Otáčkoměr.....	38
5.2 Postup měření.....	40
5.2.1 Demontáž a montáž ložiskového domku a výměna ložisek	40
5.2.2 Měření chvění	40
5.2.3 Naměřená data	41
5.3 Poškození ložisek	42
5.4 Analýza signálů	43
Závěr	48
Použitá literatura	49
Seznam grafů	50
Seznam obrázků	50
Seznam tabulek	50
Seznam příloh	51
Přílohy	52

Seznam použitých zkratk

A/D	Analog/Digital – převádění analogových signálů na digitální podobu
Amp	amplituda kmitavého pohybu
Avg	střední absolutní hodnota
B&K	Brüel & Kjaer – mezinárodní společnost se sídlem v Dánsku zabývající se vibrodiagnostikou
BPFI	Ball Passing Frequency Inner Race – frekvence kmitání způsobená pohybem kuličky po vnitřním kroužku
BPFO	Ball Passing Frequency Outer Race – frekvence kmitání způsobená pohybem kuličky po vnějším kroužku
BSP	Ball Spin Frequency – frekvence kmitání způsobená pohybem kuličky
f	frekvence harmonického pohybu
FFT	Fast Fourier Transformation – rychlá Fourierova transformace
ft./min	stopy za minutu
FTF	Fundamental Train Frequency – frekvence kmitání způsobená pohybem kuličky v ložiskové kleci
m/min	metry za minutu
MS	Microsoft – mezinárodní softwarová společnost
ot./min	otáčky za minutu
ot./s	otáčky za sekundu
RMS	Root Mean Square – efektivní hodnota kmitavého pohybu

rpm	Revolution Per Minute – otáčky za minutu
rps	Revolution Per Second – otáčky za sekundu
TD	technická diagnostika
ZVL	Závody valivých ložisek

1 Úvod

Lidská společnost ve svém vývoji stále hojněji užívá strojů jako prodloužení výkonu svých rukou a nohou. Stroje usnadňují práci lidí nebo ji v některých případech zcela nahrazují. Dosahují výkonů, kterých bychom pomocí lidské nebo zvířecí síly nemohli dosáhnout a zpravidla jsou stroje přesnější a rychlejší. Díky strojům se lze například pohybovat rychleji (silniční a železniční vozidla, vzdušné a vodní dopravní prostředky), lze získávat neuvěřitelné množství kusů z linkové výroby, vyrábět energii k samotnému pohonu strojů nebo je využívat v jiných oblastech života společnosti od domácností až po velké výrobní podniky. Stroje mají široké uplatnění a stále více využíváme jejich přednosti, snažíme se získávat co nejvíce práce za co nejméně vložené energie. Je také třeba se zaměřit na skutečnost, že se části strojů používáním postupně opotřebovávají. Užíváním tedy dochází k postupné únavě materiálu, ze kterého jsou vyrobeny a to má za následek vznik poruch. Technickou diagnostikou pomocí vhodného diagnostického zařízení a vhodnými metodami je možné odhalit závadu v raném stádiu, určit její rozsah a prognózovat vývoj, což je velmi vhodné v případech, kdy může porucha stroje znamenat vysoké finanční ztráty nebo v krajních případech, kdy by porucha mohla ohrozit zdraví či životy.

U otáčivých strojů je zapotřebí snížit velikost třecích sil v uchycení, aby nedocházelo vlivem zvýšeného tření ke ztrátám využívané energie a zvýšenému opotřebení, proto výrobci i provozovatelé strojních zařízení, užívají ta spojení, u kterých je nejmenší koeficient tření a to se týká hlavně valivého odporu (součinitel valivého tření je 0,001 až 0,002). V praxi se proto používají valivá ložiska nejrůznějších druhů, která tyto podmínky splňují nejlépe. V kombinaci s účinným mazáním navíc dochází k nejmenšímu opotřebení částí ložiska.

Únosnost a spolehlivost ložisek se staly v posledních letech velmi sledovanými parametry. Provozní spolehlivost je především ovlivněna podmínkami provozu, ale přesto je třeba začít od samého počátku výroby, protože jen kvalitní materiál a dokonalá konstrukce mohou zajistit vynikající výsledky v provozu. Výrobci ložisek proto dbají už na inherentní spolehlivost neboli spolehlivost vloženou při výrobě. Tato práce je založena na sledování změn diagnostických parametrů jako projevu technického stavu valivých ložisek, tzn. provozní spolehlivosti. Bližší seznámení s užitými výrazy se setkáme v následujících kapitolách.

2 Technická diagnostika

Technická diagnostika je vědní obor, který zahrnuje teorii, metody a prostředky související s určením momentální diagnózy technického stavu objektu. Objektem technické diagnostiky může být jakýkoli výrobní celek, jeho dílčí část nebo samostatný výrobek. Stav objektu lze určit pomocí pozorování vhodných příznaků (jedná se o fyzikální veličiny nebo jejich funkce (výkony, napětí, proudy apod.)). Příznaky mohou být jednoparametrické nebo víceparametrické. U jednoparametrických příznaků sledujeme jediný parametr – může se jednat například o stejnosměrný proud, který je charakterizován úrovní. U víceparametrických sledujeme více parametrů na jediné fyzikální veličině – například střídavý proud, který je charakterizován amplitudou a frekvencí (případně periodou).

V technické diagnostice se neelektrické veličiny převádí na elektrické. Takový elektrický signál je pak možné přenášet pomocí vhodné přenosové cesty (kabelem nebo bezdrátově) k dalšímu zpracování vhodným měřicím zařízením např. analyzátozem. Tím, že měření neelektrické veličiny převádíme na měření veličin elektrických, je potřebné zvolit správný snímač o správném rozsahu měření, neboť nevýhodou sestavené aparatury k měření je fakt, že při každém provedeném měření (pokud je správně zapojena aparatura) naměříme vždy nějaká data. Problém je však v tom, že nemusí být správná. Chybou může být například špatně zvolený rozsah snímače (příliš malý nebo příliš velký) nebo nevhodná metoda. Dalším problémem, který může zkreslovat nebo uvádět nepravdivé údaje, může být nevhodné umístění snímače. Tato fakta jsou velmi důležitá pro výběr metody a měřicího prostředku pro správné určení technického stavu objektu.

Diagnóza technického stavu diagnostikovaného objektu se dělí na dvě základní diagnózy [2]:

- dvoustavová – objekty technické diagnostiky musí vyhovovat dvěma základním podmínkám:
 - musí se nacházet v jednom ze dvou různých, navzájem se vylučujících stavů (provozní stav a alespoň jeden poruchový stav)

- musí mít rozpoznatelnou funkční strukturu, rozčlenitelnou na prvky, z nichž každý je charakterizován také alespoň dvěma technickými stavy.

Objekt můžeme považovat za provozuschopný, když nedosáhne určité hladiny diagnostického signálu. Po překročení této hodnoty se považuje objekt za neprovozuschopný.

- o Vícestavová – úroveň naměřeného signálu je rozdělena na několik intervalů a podle těchto intervalů je přiřazena kvantitativně vyjádřená charakteristika rozsahu poruchy. Může se jednat například o procentuální vyjádření poškození diagnostikovaného objektu.

Zvolené diagnostické metody by měly být objektivní a racionální:

Objektivnost úzce souvisí s požadavky na jednoznačnost a opakovatelnost jejich výsledků. Znamená to, že se opakované diagnostické kontroly objektů, nacházející se ve stejném stavu musí vést ke stejným výsledkům měření. Diagnóza musí být určena pouze na základě stavu objektu a nesmí záviset na subjektivních vlivech člověka.

Racionálnost spočívá v tom, že měření se konají bez demontáže vozidla nebo jejich skupin. Demontáž a opětovná montáž jsou totiž nákladné, časově náročné a často velmi pracné. Navíc u funkčně spojených součástí se v případě jejich demontáže v rámci kontroly projevuje nepříznivý vliv nutnosti opětovného záběhu součástí a tím zhoršení parametrů jejich životnosti. Ani nejpečlivější montáži totiž nelze zabránit novému vzájemnému přizpůsobování a zabíhání součástí, které je projevem intenzivnějšího opotřebení. [5]

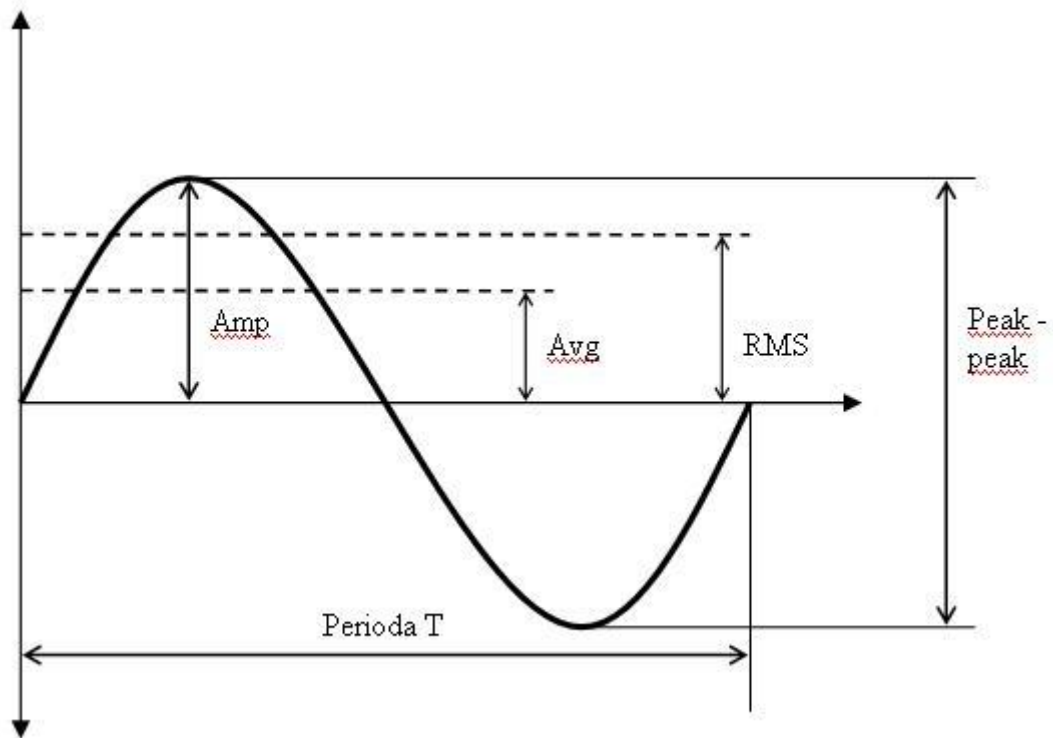
Předpokladem aplikace diagnostických metod a prostředků je splnění diagnostických podmínek:

1. stav objektu sledujeme pomocí diagnostického zařízení určitého typu a s požadovanou přesností, abychom dosáhli věrohodných výsledků
2. diagnostické zařízení nedosáhne poruchy během celé procedury měření
3. hodnotící kritérium správnosti signálů má pouze dvě pravdivostní hodnoty
 - a. pravdivý – správný, bezporuchový, v tolerancích apod.
 - b. nepravdivý – nesprávný, v poruše, mimo tolerance apod.

4. v diagnostickém objektu není použito zálohování
5. procedura musí být jednoznačná (při opakování za stejných podmínek a stejném stavu objektu musí vykazovat stejné výsledky) a opakovatelná (musí být nesčetněkrát opakovatelná a musí mít formulována pravidla prováděná v přesné posloupnosti)
6. vnější podmínky jsou konstantní – jakákoli změna diagnostických signálů je způsobena jen změnou stavu diagnostického objektu

Diagnostické měření pomocí technické diagnostiky je možné provádět pomocí technického zařízení (jako jsou měřicí a technická vybavení) a pomocí softwarového vybavení. Pomocí různých softwarů lze nejen měřit, ale přímo analyzovat naměřená data. U ložisek a většiny strojních zařízení přechází k poruchovému stavu postupně, jedná se tedy o poruchu postupnou. Postupná porucha je způsobena například vlivem opotřebení nebo vlivem změněných provozních podmínek. Z hlediska diagnostiky si proto nevystačíme s rozlišením dvou stavů (normálního a poruchového), ale technický stav objektu je spojitou funkcí času. V takovém případě sledujeme vývoj a pozorujeme přiblížení k meznímu stavu (mezní hodnotě parametru). Díváme-li se na poruchu jako jev, který nastal u objektu v důsledku postupného zhoršení stavu, můžeme na základě znalosti průběhu (extrapolace nebo údajů o mezním stavu z předchozích měření) určit dobu opravy nebo výměny objektu a předejít tak náhlé poruše. [2]

3 Vibrace a jejich parametry



Obrázek 1 – harmonické kmitání

Perioda – časový úsek, kdy se daný děj opakuje, jednotkou je sekunda [s] nebo její násobky a díly

Frekvence – převrácená hodnota periody udávaná v hertzech [Hz] nebo pomocí násobků a dílů

Amp – amplituda kmitavého pohybu

Avg – (anglicky average) průměrná hodnota kmitání vypočtená ze vztahu

$$\text{Avg} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt$$

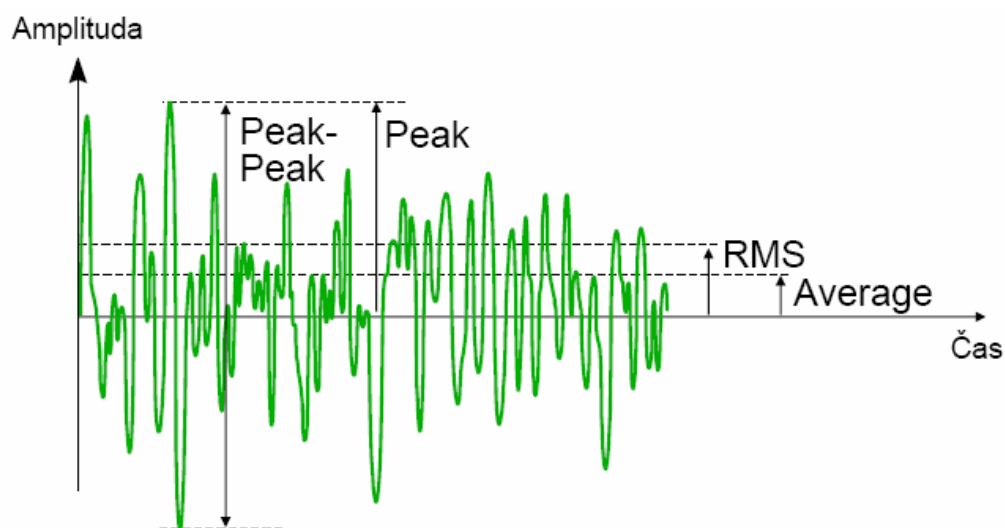
RMS – (anglicky Root Mean Square) efektivní hodnota kmitavého pohybu vypočtená

ze vztahu
$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

Peak – peak – maximální rozsah amplitud (přeloženo → špička – špička)

Chvění je kmitavý pohyb kolem rovnovážné osy. Počet plných opakování za jednu sekundu se nazývá frekvence a její převrácená hodnota je perioda. Kmitavý pohyb může být jednoduchý nebo složený z více složek a z časového průběhu pak už nelze pouhým pozorováním určit, z kolika dalších sinusových průběhů je výsledný signál složen. Z toho důvodu se provádí frekvenční analýza, která ve výsledku zobrazí množství harmonických složek, jejich frekvence a především amplitudy. Amplitudy jsou totiž kvantitativním vyjádřením škodlivosti chvění.

V praxi se zpravidla setkáváme s vibracemi, které mají podobu neharmonického signálu (viz následující obrázek) [5]:



Obrázek 2 – neharmonický průběh kmitání

Chvění můžeme hodnotit několika způsoby:

Maximální rozkmit (peak – peak) bývá označován jako dvojitá amplituda nebo hodnota špička – špička. Udává tedy maximální rozkmit hodnocené vlny a používá se především tam, kde je z hlediska maximálního přípustného mechanického namáhání a konstrukčních vůlí důležitá výchylka chvění.

Vrcholová hodnota (peak) popisuje především amplitudy krátkodobých jevů. Vrcholová hodnota však pouze indikuje přítomnost špičky, ale nemá vypovídající hodnotu o časovém průběhu nebo složení hodnoceného chvění.

Střední hodnota Average (střední absolutní hodnota) odráží časový průběh chvění, ale nemá přímý vztah k žádné důležitější fyzikální veličině.

Efektivní hodnota RMS má z hlediska kvantitativního hodnocení signálu největší význam. Odráží jeho časový průběh a současně má přímý vztah

k energetickému obsahu a proto je měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického chvění.

Chvění mohou popisovat 3 veličiny – výchylka, rychlost a zrychlení. Jejich vzájemný vztah je matematický a sice ten, že rychlost je derivace výchylky v čase a zrychlení je druhá derivace výchylky v čase. V našem případě budeme pomocí akcelerometrů měřit zrychlení a v případě potřeby by bylo možno zpětným integrováním dostat rychlost nebo výchylku mechanického kmitání. [3]

Abychom byli schopni rozlišovat jednotlivé složky kmitání, musíme umět rozložit naměřený signál na jednotlivé základní signály. To se děje za pomoci Fourierovy transformace.

3.1 Fourierova analýza

U signálů se kterými se setkáváme v praxi lze na první pohled jen těžko odhadnout, jaké jsou jednotlivé frekvence harmonických složek. Tento problém byl vyřešen J. Fourierem. Teorie Fourierových řad má četná užití v přírodních a technických vědách, zvláště když lze jednotlivé členy Fourierovy řady interpretovat fyzikálně. Tomu je například v akustice, optice, elektrotechnice, při studiu chování konstrukcí apod.

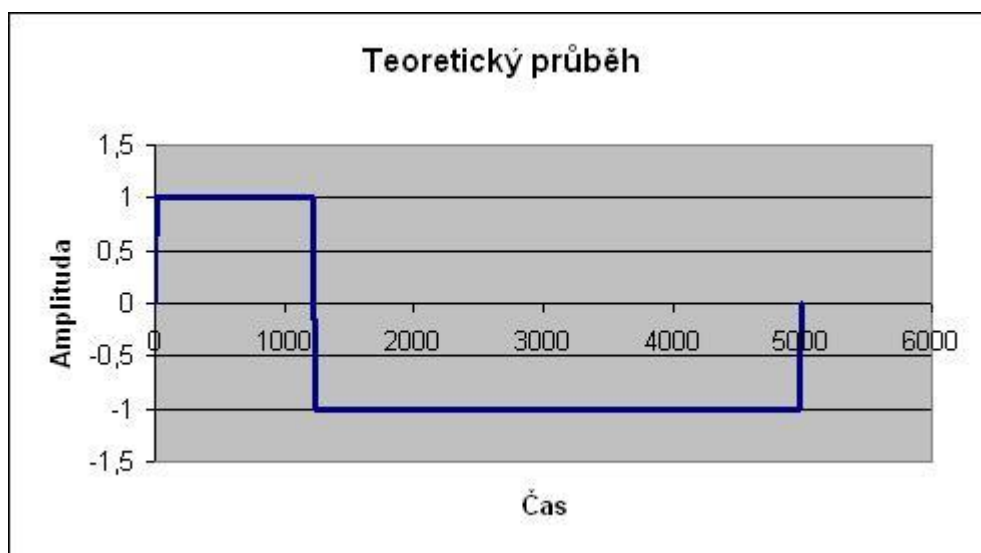
Obecně lze říci, že Fourierovy řady se používají v těch oblastech, kde se provádí analýza periodického děje, který je matematicky reprezentován nějakou periodickou funkcí s určitou periodou T . Funkce f rozvinutá ve Fourierovu řadu je vyjádřena jako „superpozice“ jednotlivých složek, což jsou (až na případný konstantní člen a_0) harmonické kmity nebo harmonické složky. Mluvíme pak o první, druhé, třetí atd. harmonické složce, od druhé je souhrnně označujeme jako vyšší harmonické. Analýza periodických dějů pomocí Fourierových řad se pak nazývá harmonická analýza.

Je-li nějaký periodický pohyb s periodou $2l$ popsán rovnicí $y = f(t)$ a splňuje-li funkce f podmínky rozvinutelnosti ve Fourierovu řadu (což je vskutku ve většině případů splněno), platí:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=+}^{\infty} \left(a_n \cos n \frac{\pi}{l} t + b_n \sin n \frac{\pi}{l} t \right), \quad (1)$$

což jeden z možných zápisů Fourierovy transformace. [6]

Na následujícím grafu je zobrazen teoretický průběh jednoduchého signálu s poměrem dob kmitů 1:3:



Graf 1 – teoretický průběh signálu

Z výše uvedeného teoretického rozboru vyplývá, že $2l$ je perioda, kterou lze nahradit fyzikální proměnnou T a z poměru $\frac{\pi}{l} = \frac{2\pi}{2l} = \frac{2\pi}{T} = \omega$, což je kruhová frekvence kmitavého pohybu. Této skutečnosti využijeme ve výpočtových vztazích.

Vypočteme hodnoty členů A_0 , A_k , B_k a dosadíme do rovnice (5):

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2)$$

$$A_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt \quad (3)$$

$$B_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt \quad (4)$$

$$f(x) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega t \quad (5)$$

Dosadíme číselné hodnoty tohoto ukázkového příkladu a určíme rovnice pro výpočet harmonických složek a absolutní člen. Jelikož je signál rozdělen na dvě části, musíme to zahrnout do výpočtů (tj. výpočet v daných intervalech $\left\langle 0; \frac{\pi}{2} \right\rangle$ a $\left\langle \frac{\pi}{2}; 2\pi \right\rangle$).

$$\text{Kruhová frekvence je } \omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{2\pi} = 1$$

$$\begin{aligned} A_0 &= \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} 1 dt + \int_{\frac{\pi}{2}}^{2\pi} (-1) dt \right) = \frac{1}{2\pi} \left(\left[t \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + \left[-t \right]_{\frac{\pi}{2}}^{2\pi} \right) = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{\pi}{2} - 0 - 2\pi + \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= \frac{-\pi}{2\pi} = -\frac{1}{2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt = \frac{2}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} 1 \cos kt dt + \int_{\frac{\pi}{2}}^{2\pi} (-1) \cos kt dt \right) = \\ &= \frac{2}{2\pi} \left(\left[\frac{\sin kt}{k} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + \left[-\frac{\sin kt}{k} \right]_{\frac{\pi}{2}}^{2\pi} \right) = \frac{2}{2\pi k} \left(\sin k \frac{\pi}{2} - \sin k 0 - \sin k 2\pi + \sin k \frac{\pi}{2} \right) = \\ &= \frac{2}{2\pi k} \left(\sin k \frac{\pi}{2} + \sin k \frac{\pi}{2} \right) = \frac{4}{2\pi k} \sin \frac{k\pi}{2} \end{aligned}$$

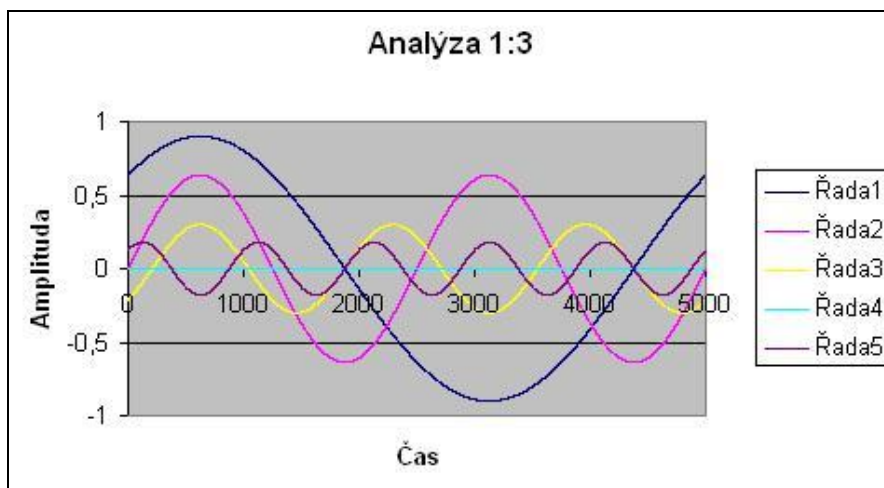
$$\begin{aligned} B_k &= \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt = \frac{2}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{2}} 1 \sin kt dt + \int_{\frac{\pi}{2}}^{2\pi} (-1) \sin kt dt \right) = \\ &= \frac{2}{2\pi} \left(\left[-\frac{\cos kt}{k} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + \left[-\frac{\cos kt}{k} \right]_{\frac{\pi}{2}}^{2\pi} \right) = \frac{2}{2\pi k} \left(-\cos \frac{k\pi}{2} + \cos k 0 + \cos k 2\pi - \cos \frac{k\pi}{2} \right) = \\ &= \frac{2}{2\pi k} \left(-2 \cos k \frac{\pi}{2} + 2 \right) = \frac{2}{\pi k} \left(-\cos \frac{k\pi}{2} + 1 \right) \end{aligned}$$

Výsledná analýza signálu se tedy dá zapsat pomocí vztahu:

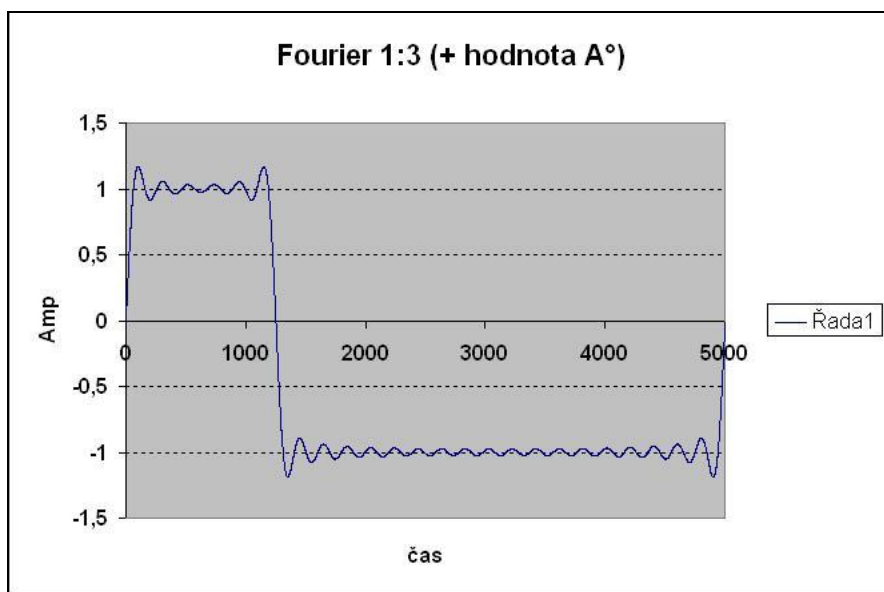
$$\begin{aligned} f(x) &= A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \sin k\omega t = \\ &= -\frac{1}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{4}{2\pi k} \sin \frac{k\pi}{2} \cos kt + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{\pi k} \left(-\cos \frac{k\pi}{2} + 1 \right) \sin kt \end{aligned}$$

Pomocí tabulkového procesoru lze vypočítat jednotlivé hodnoty pro konkrétní časový krok a součtem harmonických složek získat výsledný signál, který se podobá teoretickému. Teoretický signál je složen z nekonečně mnoho harmonických složek.

Získané harmonické složky jsou patrné na tomto grafu:



Graf 2 – harmonické složky



Graf 3 – výsledný součet 25 harmonických složek

Poznámka: Analyza je pro lepší přehlednost zobrazena jen pro prvních pět harmonických složek. Výsledný signál je však vytvořen pomocí výpočtů v tabulkovém procesoru MS Excel z 25 harmonických složek, proto se výsledný signál v grafu 3 blíží více signálu s nekonečným počtem harmonických složek.

V současné době využívají analyzátory vibrací tzv. rychlou Fourierovu transformaci (FFT) k vytváření spekter vibrací z naměřeného časového průběhu signálu. K prvním náznakům degradace valivých tělísek u ložisek se projevuje zvýšenými amplitudami v oblasti mezi 5 kHz až 20 kHz měřeného frekvenčního spektra. [7]

3.2 Měření chvění

Pokud měříme chvění, zajímají nás tři fyzikální veličiny – výchylka, rychlost, zrychlení. Každou tuto fyzikální veličinu můžeme měřit principiálně jinými druhy snímačů:

- výchylku lze měřit kapacitním snímačem, protože je kapacita závislá na vzdálenosti elektrod snímače,
- rychlost lze měřit elektrodynamickým snímačem, v němž se indukují napětí úměrné rychlosti pohybu,
- zrychlení lze měřit pomocí piezoelektrickými snímači, jejichž náboj je úměrný deformující síle tzn. zrychlení pohybu

V praxi lze měřit libovolné mechanické veličiny jediným snímačem a pomocí úpravy obvodu dochází k požadovanému zpracování měřeného signálu. Výběr měřené veličiny je důležitý při těch měřeních, která nelze opakovat. Z toho důvodu pro nízké kmitočty volíme měření výchylky, kdežto pro vysoké kmitočty se používají snímače zrychlení. Větší výchylky chvění se vyskytují převážně v pásmu nízkých kmitočtů (užívá se tam, kde je nutné sledovat například malé vůle a tolerance strojů, nevyváženost součástí).

Fyzikální veličiny mechanického chvění udáváme v jednotkách soustavy SI (metry – m, sekundy – s) a jejich násobcích a dílech. Je však možné vyjadřovat je také v bezrozměrných jednotkách. Touto jednotkou jsou decibely, stejně jako je jednotka určující hladinu hluku. Jejich zavedení je rovněž vhodné z toho důvodu, že se stejné přístrojové vybavení používá k měření hluku. Je však nutné znát referenční hodnoty, které přísluší jednotlivým fyzikálním veličinám:

Pro zrychlení:

$$L(a) = 20 \log \frac{a}{a_0}, \quad (6)$$

kde $a_0 = 10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$

Pro rychlost:

$$L(v) = 20 \log \frac{v}{v_0}, \quad (7)$$

kde $v_0 = 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$

Pro výchylku:

$$L(y) = 20 \log \frac{y}{y_0}, \quad (8)$$

kde $y_0 = 10^{-12} \text{ m}$

Použití snímačů chvění není libovolné, nesmí se použít tam, kde by mohly svou vlastní vahou zkreslovat výsledky měření např. kmitání tenké desky. [4]

3.2.1 Snímače zrychlení

Použití piezoelektrických snímačů zrychlení (akcelerometrů) je velmi výhodné, neboť ze zrychlení pomocí integrace lze získat rychlost nebo výchylku chvění. Jejich dalšími výhodnými vlastnostmi jsou relativně malá hmotnost, široký kmitočtový rozsah, velký dynamický rozsah, linearita, dlouhodobá stabilita a podle druhu piezoelektrického prvku mohou pracovat i při vysokých teplotách (některé až do teplot 400°C).

Určitou nevýhodou akcelerometrů je jejich celkem vysoká výstupní impedance a nelze proto používat dlouhé přívodní kabely. Tento problém lze však vyřešit pomocí speciálního předzesilovače.

Základem piezoelektrického snímače je piezoelektrický prvek zhotovený z piezokeramiky, jehož výstupní napětí je úměrné zrychlení, kterému je snímač vystaven.

Podle typu konstrukce se snímače namáhají na:

- tlak
- tah
- stříh

Pro speciální požadavky lze konstruovat i speciální typy snímačů o mnohem nižších hmotnostech a rozměrech a tudíž umožňují snímat extrémně velká zrychlení (zejména při rázech). Mohou také sloužit k měření chvění lehkých předmětů a všude tam, kde nesmí hmotnost snímače ovlivňovat měření. Obecně platí pravidlo, že hmotnost snímače nesmí být větší než 1/10 dynamické hmotnosti objektu, jehož vibrace měříme. [4]

3.2.2 Upevnění snímače

Upevnění snímače je velmi důležitý aspekt při měření vibrací, neboť může výraznou měrou ovlivnit naměřené výsledky. Nejvhodnějším způsobem jak uchytit snímač je pevné přišroubování k měřenému objektu. Tento způsob není však vždy možný. V praxi je možné snímače uchytit více způsoby:

Prvním možným způsobem je uchycení pomocí zavrtaného vrutu. Styčná plocha mezi snímačem a měřeným objektem nesmí vykazovat nerovnosti, a tudíž snímač musí dosedat celou svou plochou. V takovém případě je rezonanční kmitočet 31 kHz.

Jiným způsobem uchycení je rovněž pomocí zavrtaného izolovaného vrutu, ale mezi snímač a měřený objekt je vložena slídová destička, která zabraňuje elektrické propustnosti. Tento druh připevnění je nutný v případech, kde potřebujeme odstranit rušivé napětí, které se může vyskytnout. Rezonanční kmitočet se snižuje na 28 kHz.

Snímače se také připevňují na objekt pomocí lepení. Podmínkou je však zdrsnění povrchu, který navíc musí být velmi pečlivě vyčištěný. Nejlepší výsledky jsou dosaženy při použití včelího vosku. Lze jej však použít jen pro krátkodobá měření a v místnostech, kde teplota nepřesahuje 40°C. Při těchto teplotách nemůžeme zaručit kvalitní vazbu mezi snímačem a měřeným objektem. Rezonanční kmitočet je přibližně 29 kHz a lepení včelím voskem lze použít do zrychlení zhruba 100 m.s⁻² (podle povrchu, na kterém měření provádíme).

Lepit snímače lze i epoxidovými pryskyřicemi nebo akrylátovými lepidly. Výsledky měření jsou také vyhovující. Dochází k poměrně malému snížení rezonančního kmitočtu na 28 kHz. K lepení snímačů při méně náročných měřeních lze použít oboustranné lepicí pásky. Výsledky jsou postačující a rezonanční frekvence je okolo 20 kHz. Silná páska je nevyhovující, neboť rezonanční frekvence klesne na velmi nízkou úroveň (2 kHz). Měkká lepidla nejsou také příliš vhodná, snižují rezonanční frekvenci na 10 kHz.

K měření na kovových konstrukcích (oceli a některé slitiny) se používají speciální magnetické úchyty. Síla, kterou magnet vyvine je poměrně značná a proto je vhodná pro měření se zrychlením i 100 m.s^{-2} . Nevýhoda však spočívá ve snížení rezonanční frekvence, která je zhruba 7 kHz. Toto uchycení není navíc vhodné, pokud měříme chvění na drobnějších předmětech, jelikož samotná soustava snímače má vzhledem k měřenému objektu značnou hmotnost.

Poslední způsob jak měřit vibrace je přenos pomocí tyčky zašroubované do snímače a tyčka je ukončena hrotem nebo zaobleným koncem. Velkou výhodou je rychlá změna polohy snímače, ale výsledky měření jsou zatíženy velkou chybou. Větší nebo menší přitlačení způsobuje změnu zatížení a tlumení měřeného objektu, případně i kolmost může ovlivňovat výsledky měření. Resonanční kmitočet je navíc jen 2 kHz. [4]

3.2.3 Vlivy prostředí

Nejen uchycení je důležité pro správnost naměřených dat. Musíme brát na vědomí také vliv okolního prostředí, ve kterém snímáme data. Některé jsou nevýznamné a uplatňují se zcela výjimečně a to v extrémních podmínkách, se kterými se běžně nesetkáváme, ale s jinými vlivy musíme počítat a vytvářet vhodná opatření, aby zasahovaly do měření co nejmenší měrou.

Akcelerometry pracují spolehlivě do teploty asi 250°C . Vyšší teploty způsobují nevratnou změnu v piezoelektrickém elementu, která se navenek projeví změnou citlivosti snímače. Pro práci při vyšších teplotách se používají speciální snímače, které však nesouvisí s touto diplomovou prací.

Významnou roli mají v některých případech vlivy zemnicí smyčky. V případech, kdy je odděleně uzemněna měřicí soustava a zvláště snímač, mohou se ve vzniklé smyčce indukovat proudy, které procházejí stíněním kabelů. Jediný způsob jak tomuto

jevu zabránit je přerušit zemní smyčku pomocí elektrické izolace (např. izolační šroub a slídová podložka).

Dalším nepříznivým jevem je tzv. triboelektrický šum, který je vyvolán lokálními změnami kapacity a tím i náboji způsobenými stlačováním a roztahováním koaxiálního kabelu. Tomu lze zabránit použitím jiných druhů kabelů nebo upevněním kabelu již v bezprostřední blízkosti snímače. Dalším problémem je také měření v blízkosti elektrických strojů nebo zařízení, neboť u nich může dojít k indukci napětí. Tomuto problému lze čelit pomocí dvojitého stínění nebo vést kabel jinou cestou, případně umístit snímač na jiná místa.

Vliv hluku je zanedbatelný a na magnetické pole snímače nereagují. [4]

4 Ložiska

Ložiska jsou velmi důležitou součástí většiny strojů. Jsou na ně kladeny přísné nároky na únosnost a spolehlivost a proto se ložiska stala předmětem rozsáhlých výzkumů. V ložiscích jsou uloženy čepy hřídelí a udržují čepy a hřídele v požadované poloze, zachycují jejich zatížení a dovolují jim otáčivý, kývavý nebo posuvný pohyb. V kombinaci s účinným mazáním dochází k nejmenšímu opotřebení částí ložiska. [1]

Pomocí nových konstrukčních a výpočetních programů dochází k neustálému zlepšování konstrukce ložisek. Nové technologie výroby dovolují zvýšit jakost materiálu a tím i odolnost proti únavovému poškození. Neustále se zpřesňují vstupní data pro výpočty trvanlivosti ložisek. Účelem je sjednotit životnost ložiska s životností stroje nebo dosáhnout takové úrovně spolehlivosti, aby ložiska byla co nejvíce využita do doby rozsáhlejších oprav na strojních zařízeních. V praxi je však těžké tohoto dosáhnout, neboť se často překročí povolené zatížení a v kombinaci s nedostatečným nebo nevhodným mazáním dochází k rychlejšímu dosahování mezních stavů. Dalšími problémy, se kterými je možné se v praxi setkat, je neopatrná manipulace, neefektivní těsnění a tudíž pronikání nečistot do oběžné dráhy ložisek. Z těchto důvodů je také nutná zvýšená pozornost při montážích a soustředit se na podmínky provozování ložisek včetně vhodného mazání. [8]

Ložiska dělíme na dvě skupiny a to podle styku hřídele s ložiskem:

- kluzná ložiska
- valivá ložiska

Oba druhy ložisek ještě dělíme na dvě skupiny a to podle směru přenášené síly:

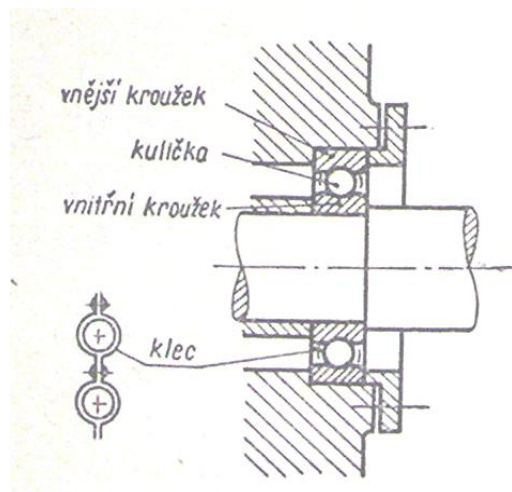
- radiální ložiska – síla působí ve směru kolmém k ose otáčení
- axiální ložiska (posuvná) – síla působí ve směru osy otáčení

Hřídel se stýká s ložiskem nepřímo přes valivá tělesa. Styk valivých těles s oběžnou drahou je teoreticky jen bodový (kuličky) nebo úsečkový (válečky a kuželíky), používají se například na nápravách silničních vozidel. U valivých ložisek se

zvyšováním rychlosti otáčení únosnost snižuje. Jsou tedy vhodná pro menší rychlosti, ale větší zatížení. Spotřeba maziva je u valivých radiálních ložisek velmi malá, snášejí provozní teploty okolo 100 °C i vyšší oproti kluzným ložiskům (50 °C až 60 °C). Jsou spolehlivější, bezpečnější a přesnější v provozu a značně menší a lehčí. Nemusí se zaběhávat a jejich rozběhový moment je malý. Po montáži pracují ihned s plným zatížením a plným počtem otáček. Jsou však dražší a snadněji se poškodí.

Valivá ložiska se skládají z těchto základních částí [1]:

- vnější kroužek
- vnitřní kroužek
- klec
- valivá tělíska



Obrázek 3 – kuličkové ložisko (řez)

Podle druhů otáčejících se tělísek (elementů) v kleci se rozeznávají tyto typy valivých ložisek:

- kuličková
- válečková
- jehlová
- kuželíková
- soudečková

V této práci se budeme zabývat jen valivými ložisky kuličkovými, neboť jsou předmětem připravované diagnostiky jejich technického stavu. K diagnostice technického stavu se užívají piezoelektrické snímače vibrací, které pomocí dynamického zatížení zachycují zrychlení kmitavého pohybu.

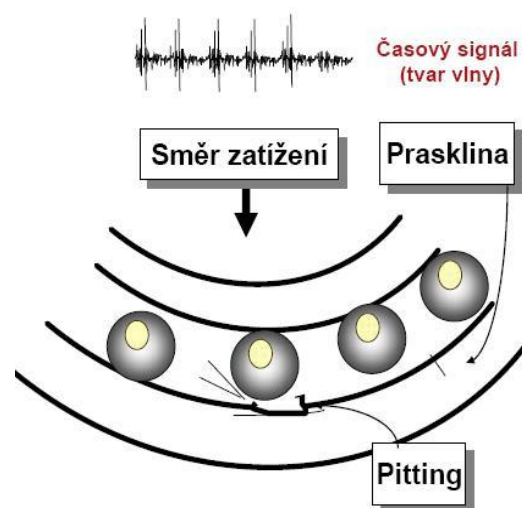
Ani nejlepší technologie výroby a konstrukce ložiska nemůže zaručit nekonečný provoz. Vlivem dynamického namáhání částí ložiska dochází k postupné únavě materiálu. Projev únavy materiálu je funkcí počtu otáček, velikosti zatížení a základní dynamické únosnosti ložiska. Únava je výsledkem smyku valivých tělísek a dynamických rázů způsobených při otáčení. Postupně se objevují trhliny v materiálu a ty se šíří na povrch. Následným průchodem valivých tělísek přes tyto trhliny způsobí velmi jemné odlamování materiálu. Tento jev se nazývá pitting (z anglického slova pit – jáma, prohlubeň). Vzniklé trhliny se neustále zvětšují a nakonec způsobí dosažení mezního stavu a tudíž nemožnosti použití ložiska. Zkoumá – li se místo výskytu pittingu, dojdeme k závěru, že se zpravidla objeví v místech vměstku materiálu (místo s nehomogenní strukturou). Trhliny vznikají nejprve ve vnitřní struktuře v místech nejvyššího smykového napětí (udává se okolo 6 000 MPa). Zvýšit spolehlivost ložiska znamená zabývat se inherentní spolehlivostí, takže se zabýváme ocelí, ze které je ložisko vyrobeno. Zkouškami bylo dokázáno, že ocel s homogenní strukturou vyrobená přetavením pod struskou nebo ve vakuu dosáhne několikanásobně vyšší dobu technické životnosti. Bohužel v praxi to znamená finančně velmi náročnou výrobu, a proto se nehodí pro standardní výrobní programy. Jelikož je projev únavy funkcí počtu otáček, lze vypočítat použitelnost ložisek. Je nutné si ale uvědomit, že výpočet je nastaven na konfidenční úroveň 90%, to znamená, že 90% ložisek bude odpovídat požadované spolehlivosti.

Na spolehlivost ložiska mají velký vliv podmínky používání. Při otáčení ložiska pod zatížením se kontaktní plochy stávají na pohled matnými. Matné plochy na oběžných drahách mají velký význam, neboť je možné díky normálním a abnormálním stopám poznat podmínky, ve kterých se ložiska provozují. Samozřejmě z této skutečnosti vyplývá fakt, že se pitting projevuje v této oblasti. Každá příčina se projevuje svými vlastními charakteristickými projevy. Mezi nejčastější poškození patří opotřebení, otlaky, povrchové poškození, koroze a poškození elektrickým proudem. Dokážeme-li poznat vzhled poškození, jsme s to provádět taková opatření, která omezí riziko tohoto poškození na minimum. Ve většině případů je však těžké odhadnout správný typ poškození, neboť může dojít k více poškozením najednou, nebo pokud

jedno poškození pokročilo natolik, že vyvolalo další poruchy. Na ložiscích se proto dělají různé zkoušky. [8]

Na příklad ve společnosti ZKL v oddělení Výzkum a vývoj jsou ložiska při zkouškách zatěžována vnějšími zatíženími, která jsou stanovena metodikou popsanou v podnikové normě PN 50209. Měří se a zaznamenávají se teploty a také hladina vibrací. Dle hladiny vibrací se vyhodnocuje vznik únavového jevu – pittingu. [8]

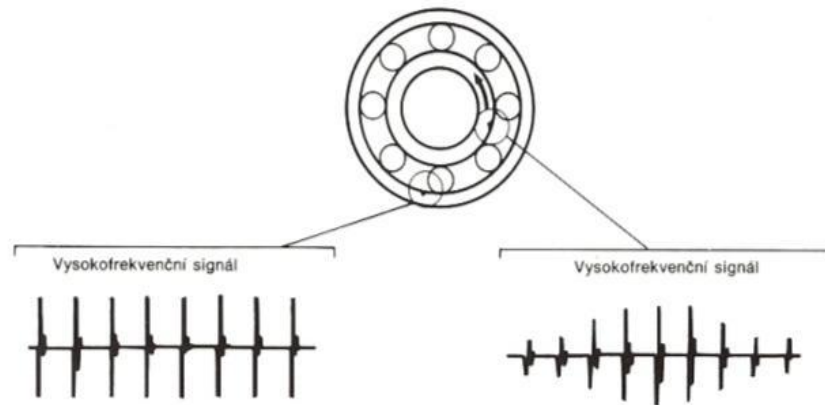
Průchod každého tělíska poškozeným místem vyvolává impulsy s malou amplitudou. Jednotlivé impulsy předávají energii tělesu ložiska a to kmitá na vlastním kmitočtu (rezonanční kmitočet). Kmity jsou tlumené a uvažovaná mechanická soustava se chová jako mechanický zesilovač. [7]



Obrázek 4 – pitting

V případě poškození nepohyblivého kroužku mají impulsy shodné amplitudy. Naopak při poškození pohyblivého kroužku se amplitudy mění v závislosti na změnách zatížení tělísek ložiska. Impulsy jsou tedy určitým způsobem amplitudově modulovány, tzn. nejsou stálé a mění se.

Na následujícím obrázku jsou patrné průběhy amplitud pohyblivého (vnitřního) a nepohyblivého (vnějšího) kroužku valivého ložiska:



Obrázek 5 – amplitudová modulace

Impulsy způsobené závadou valivého ložiska nejsou dostatečně intenzivní, aby se projevovaly v oblastech nízkých a středních kmitočtů. Projevy závad jsou však jasně patrné v oblastech vysokých kmitočtů přibližně v pásmu mezi 9 až 11 kHz. Včasné zjištění závad se pak provádí monitorováním chvění v úzkých kmitočtových pásmech. Impulsy závady ložisek mají velmi krátké a ostré průběhy a mohou vyvolávat rezonance jiných součástí. [4]

Ložisko by také mělo mít schopnost tlumit vibrace rotujících částí. Valivá ložiska nemají téměř žádnou schopnost útlumu, kdežto kluzná ložiska s dostatečně tlustou mazací vrstvou mají značný tlumící účinek. Z toho důvodu se na diagnostikování valivých ložisek hodí metody vibrodiagnostiky.

Obrázek 5 ilustruje rozdíly mezi signály vyvolanými poruchami na stacionárním (nepohyblivém) kroužku a pohybujícím se kroužku. V prvním případě bude porucha nepohyblivého kroužku pod stále stejným zatížením a výsledné rázy budou mít rovnocenné amplitudy. V druhém případě se bude porucha projevovat vlivem rotace vnitřního kroužku do oblasti velkého a malého zatížení a to ve výsledku způsobuje změnu amplitud rázů.

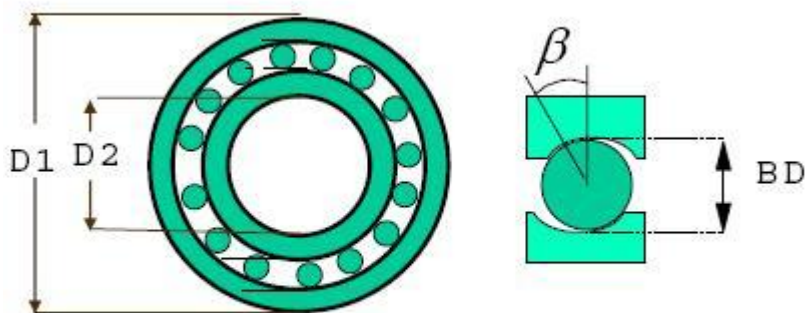
4.1 Charakteristické frekvence lokálních poruch tělísek

Lokální poruchy rotujících tělísek ložisek způsobují řadu rázů, které se periodicky opakují a jejich intenzita je závislá na architektuře (sestavění) ložiska.

Tyto intenzity jsou známy jako ložiskové frekvence. Dělí se na:

- *Frekvence kmitání způsobená pohybem kuličky po vnější straně kroužku (BPFO – ball passing frequency outer race)*
- *Frekvence kmitání způsobená pohybem kuličky po vnitřní straně kroužku (BPFI – ball passing frequency inner race)*
- *Frekvence kmitání způsobená pohybem kuličky po vnitřní nebo vnější části kroužku*
- *Frekvence kmitání způsobená pohybem poškozeného tělíska (BSF – ball spin frequency)*
- *Základní TRAIN frekvence (FTF) – poškození klece valivého ložiska*

Jednotlivé frekvence se dají určit výpočtem pomocí vzorců související s parametry dané obrázkem [5]:



Obrázek 6 – parametry valivého ložiska

$$BPFO \rightarrow f_{outer} [Hz] = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (8)$$

$$BPMI \rightarrow f_{inner} [Hz] = \frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (9)$$

$$BSF \rightarrow f_{ball} [Hz] = f_r \cdot \frac{PD}{2 \cdot BD} \cdot \left[1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta \right)^2 \right] \quad (10)$$

$$FTF \rightarrow f_{cage} [Hz] = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta \right) \quad (11)$$

$$PD = \frac{D_1 + D_2}{2} \quad (12)$$

n ... počet valivých tělísek

f_r ... otáčková frekvence [Hz]

Příklady vypočtených frekvencí v pro otáčky 600 rpm, 1500 rpm a 2400 rpm jsou uvedeny v následující tabulce:

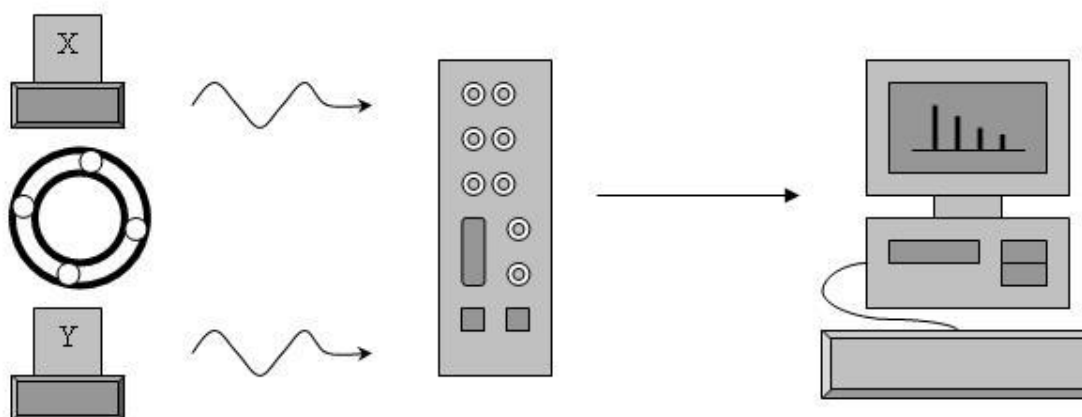
tabulka 1 – charakteristické frekvence lokálních poruch tělísek

	BPFO	BPMI	BSF	FTF
600 rpm	22 Hz	58 Hz	9 Hz	3 Hz
1500 rpm	56 Hz	144 Hz	23 Hz	7 Hz
2400 rpm	90 Hz	230 Hz	37 Hz	11 Hz

5 Měření vibrací na ložiscích – praktická část

5.1 Měřicí řetězec a použité komponenty

Měření jsme provedli pomocí klasického měřicího řetězce k měření vibrací na strojních součástech. Základem každého měřicího řetězce je snímač, z něhož jsou informace pomocí přenosového kanálu vedeny do analyzátoru, ve kterém probíhá potřebné zpracování signálu (probíhá zde FFT nutná k zobrazení frekvenčního spektra). Analyzátor je dále pomocí dalšího přenosového kanálu připojen k počítači a pomocí vhodného softwarového vybavení dochází k zobrazování a zpracovávání požadovaných charakteristik. V našem případě jsme nepoužili žádný fyzický filtr k odstranění pásem frekvencí a brali jsme v úvahu celé spektrum naměřeného chvění.



Obrázek 7 – měřicí řetězec

Měření vibrací na valivých ložiscích bylo realizováno pomocí dvou snímačů zrychlení. Snímali jsme chvění na osách X a Y. Hodnoty na těchto osách zobrazovaly radiální zrychlení při otáčivém pohybu ložiska a snímače byly vzájemně otočeny o 90°. Spojení s analyzátozem bylo zajištěno pomocí koaxiálního kabelu. Na analyzátoru jsme využili jen dva kanály, neboť jak již bylo řečeno, snímali jsme data jen z dvou os. Analyzátor byl připojen k počítači pomocí křížového síťového kabelu. Celý měřicí řetězec je v reálném zobrazení vložen do přílohy.

5.1.1 Strojní zařízení

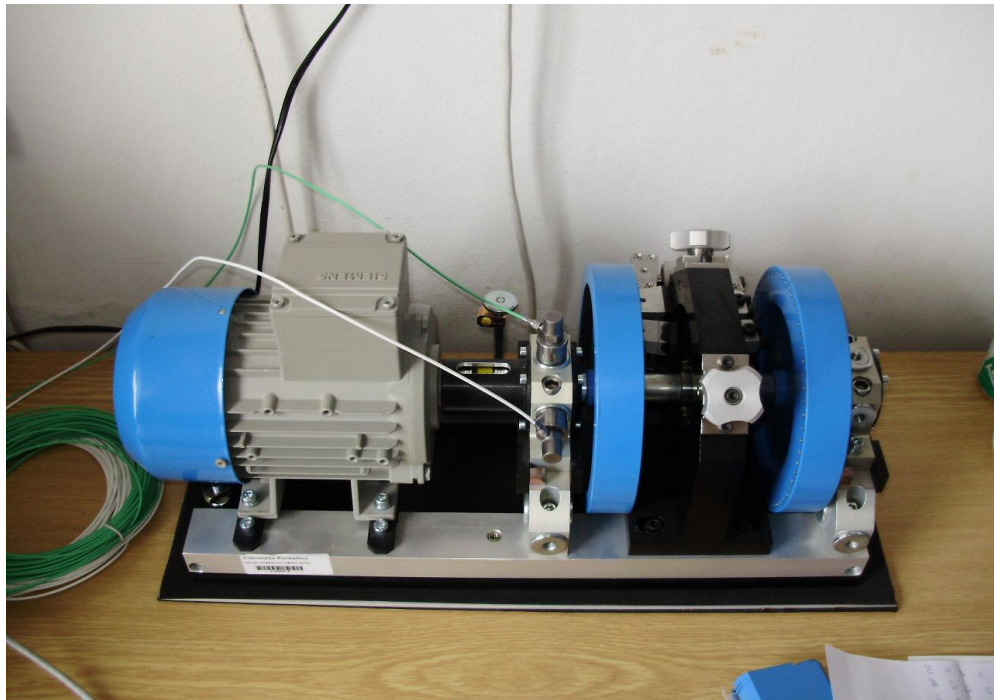
Strojní zařízení, na kterém jsme realizovali měření chvění na valivých ložiscích, byla na zakázku zhotovena firmou Spectris Praha. Kompaktní rozměry jsou vhodné pro měření v laboratorních podmínkách. Toto zařízení má širší využití, neboť mimo měření chvění na valivých ložiscích umožňuje měření vibrací vychýleného hřídele od své vodorovné osy a také vibrace způsobené nevyváhou kotoučů. Zařízení umožňuje plynule měnit otáčky motoru pomocí frekvenčního měniče a je opatřeno brzdou, která umožňuje rychlejší a především bezpečnější zastavení. Výrobce elektromotoru je německá firma Siemens. Maximální otáčky byly naměřeny pomocí otáčkoměru firmy Voltcraft. Zařízení je z důvodu tlumení nežádoucích vibrací umístěno na podložce sestavené z vrstvy pryž – kovový plát – pryž. Kovový plát zpevňuje konstrukci podložky. Navíc je zařízení umístěno na odpruženém podstavci a tímto zabráňujeme rezonancím a tudíž zkreslování naměřených výsledků. Rozměry strojního zařízení včetně maximálních otáček, specifikace motoru a spojky jsou uvedeny v následující tabulce:

tabulka 2 – strojní zařízení

Celková délka	460 mm
Celková šířka	190 mm
Celková výška	230 mm
Vzdálenost osy hřídele od nulové hladiny	120 mm
Průměr kotoučů	170 mm
Maximální otáčky v ot./min (ot./s)	2776 rpm (46,28 rps)
Motor – 3 fázový asynchronní elektromotor řady 1LA7070-4AB10	
Výkon motoru	0,25 kW
Vstupní napětí motoru	230/400 V ~ 50 Hz
Vstupní proud motoru	1,34/0,77 A
Spojka elektromotoru a hřídele	Rotex GS 14KTR

Na následujícím obrázku je fotografie popisovaného zařízení umožňující měření chvění na valivých ložiscích. Snímače na fotografii jsou umístěny na ložisku před levým kotoučem, při měření jsme však využívali uložení za pravým kotoučem, neboť

zde byl snadnější přístup a tudíž lepší a rychlejší možnost demontování krytů a uchycení a následné výměny ložisek.



Obrázek 8 – strojní zařízení

5.1.2 Ložiska

K měření jsme použili valivá radiální jednořadá kuličková ložiska firmy KLF – ZVL OMNIA a.s. se sídlem v Žilině. Označení ložisek je ZVL 6202. Ložiska mají tyto parametry [9]:

tabulka 3 – charakteristika ložisek

	vlastnosti
Vnější průměr vnějšího kroužku	35 mm
Vnitřní průměr vnitřního kroužku	15 mm
Velikost valivých kuliček	11 mm
Šíře ložiska	11 mm
Počet valivých tělísek	8
Hmotnost ložiska	45 g

Umístění ložiska a demontované strojní zařízení jsou patrné na tomto obrázku:



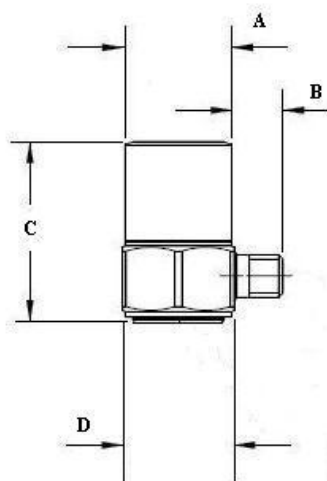
Obrázek 9 – ložisko ve strojním zařízení

5.1.3 Akcelerometry

Měření bylo provedeno pomocí snímačů zrychlení neboli akcelerometrů. Byly použity dva snímače zrychlení stejného výrobce a typu. Jedná se o snímače Kistler 8702B100. Jsou to malé, relativně lehké snímače s širokou škálou možností využití. Tyto akcelerometry se vyznačují zdrsněnou, hermeticky uzavřenou konstrukcí. Snímače jsou opatřeny bočním výstupem pro koaxiální kabel, který se upevňuje pomocí závitu. Uvnitř snímačů je křemíkový krystal, který při dynamickém namáhání generuje napětí závislé na zrychlení, které budící síla vyvolá. Křemíkový krystal je stabilní i při vyšších teplotách a zaručuje opakovatelnost a přesnost měření po mnoho let. Obal je tvořen z titanu nebo ze slitiny titanu a nerezové oceli. Snímače se také vyznačují vysokou úrovní signálu a nízkou úrovní impedance. Snímače lze použít jak v laboratorních tak průmyslových podmínkách. Technická specifikace a rozměry snímačů jsou uvedeny v tabulkách [11]:

tabulka 4 – snímače vibrací - specifikace

Rozsah měření – zrychlení g	± 100 g
Citlivost	49,49 mV/g
Maximální měřitelná frekvence	54 kHz
Doporučená teplota prostředí	(-54; +100) °C
Plný rozsah napětí	± 5 V
Impedance	<100 Ω
Hmotnost snímače	8 g
Konektor	Boční 10 – 32 neg.



Obrázek 10 – snímač Kistler

tabulka 5 – snímače vibrací - rozměry

	mm
A	12,2
B	5,8
C	19,3
D	12,7

5.1.4 Analyzátor

Pro zpracování signálu a převod na frekvenční spektrum jsme použili šesti kanálový analyzátor firmy Brüel & Kjaer s typovým označením 3032A. Z důvodu měření jen v osách X a Y vždy na jediném ložisku jsme potřebovali jen dva kanály.

Do analyzátoru vstupuje analogový signál získaný ze snímačů vibrací a pomocí A/D převodníku se signál digitalizuje a poté probíhá výpočet frekvenčního spektra pomocí FFT. Propojení s počítačem je realizováno pomocí kříženého síťového kabelu. Na počítači se pak již jen zobrazují zpracovaná data a lze je pomocí vhodného softwaru dále přizpůsobovat požadavkům měření např. měnit frekvenční rozsah a vzorkování.

Na této fotografii je zobrazen výše zmiňovaný analyzátor vibrací:



Obrázek 11 – analyzátor B&K 3032A

Analyzátor a akcelerometry se navzájem propojují koaxiálním kabelem. Bílým kabelem jsme propojili snímač z osy X a zeleným snímač osy Y.

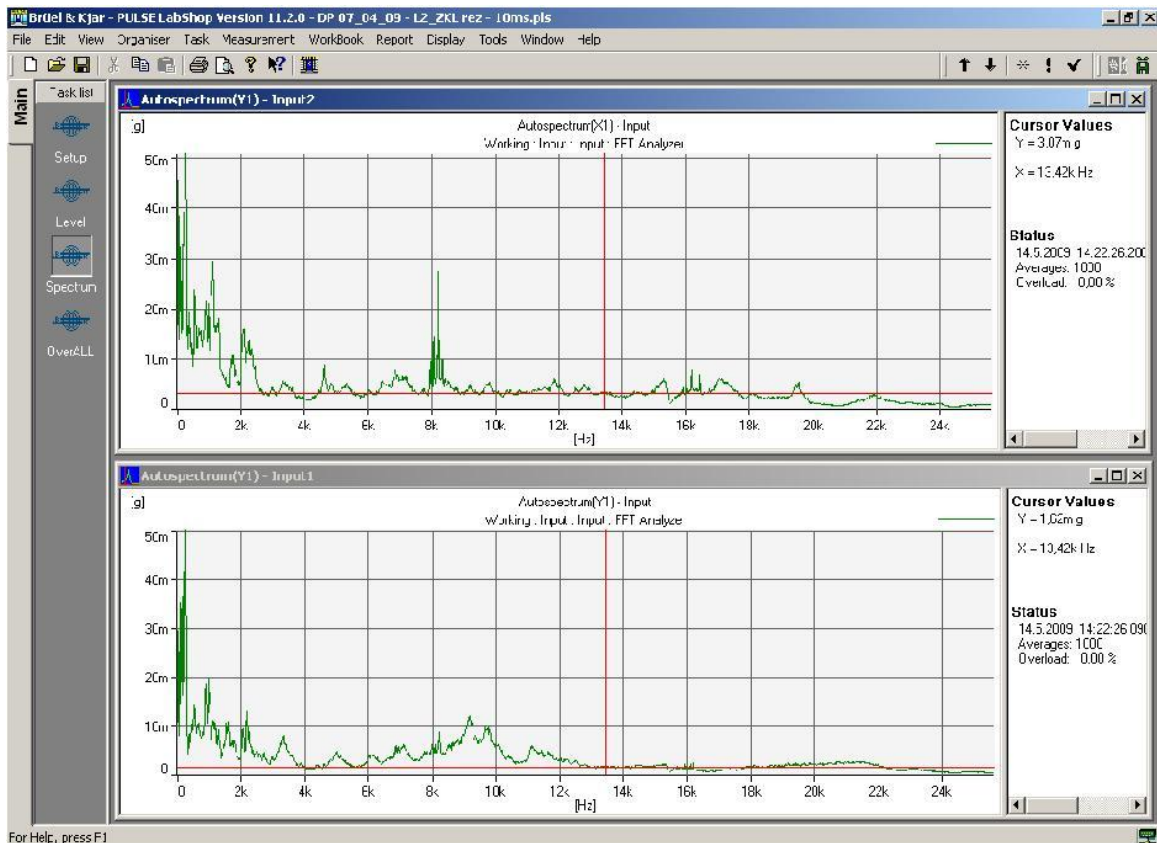
5.1.5 Software

Měřený signál převedený do frekvenčního spektra byl zobrazován pomocí softwaru Pulse Labshop firmy Brüel & Kjaer. K našim účelům měření jsme měli k dispozici verzi PULSE LabShop v.11.2.0. Software pracuje pod operačními systémy Windows, v našem případě Windows XP Professional.

Pulse umožňuje zobrazení časového signálu nebo jeho frekvenční spektrum jednoduchým přepínáním v nastavení mezi mody Auto spectrum a Time. Software samozřejmě umožňuje souběžné zobrazování jak časového signálu, tak i jeho frekvenčního spektra. Pro různé druhy měření je možné uložit individuální uživatelské

nastavení konfigurace do projektů a odpadá tak neustálé nastavování atributů pro stejná měření.

Uživatelské prostředí je zobrazeno na tomto obrázku:



Obrázek 12 – LabShop – uživatelské rozhraní

Pulse je uzpůsoben pro export dat do jiných druhů výpočetních softwarů (např. MatLab). Pro naše účely jsme využívali jen ukládání frekvenční analýzy do textových souborů s příponou txt a následně je vykreslovali pomocí funkce vložit graf v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

5.1.6 Otáčkoměr

Otáčky jsme měřili pomocí ručního otáčkoměru DT-2 L/K. Tento velice přesný otáčkoměr může měřit bezdotykově pomocí laserové jednotky nebo mechanicky přes kontaktní kroužky. Měřicí rozsah přístroje je 0,5 až 99 999 otáček za minutu. Vhodnější měření je pomocí laserového paprsku, který zabraňuje zkreslení výsledku, neboť vlivem prokluzu kontaktních kroužků může dojít k zobrazení špatného počtu skutečných

otáček. Výsledek měření se zobrazuje na pětimístném LCD displeji. Pokud měříme do 1000 otáček za minutu, přístroj měří na desetiny otáček za minutu. Výška číslic je 21 mm. Funkce min a funkce max ukládají nejnižší a nejvyšší naměřené hodnoty, které proběhly v jedné sérii měření. Přepínat lze mezi módy měření otáček za minut, metrů za minutu a stop za minutu.

Vlastnosti měřicího přístroje jsou uvedeny v tabulce 6 [10]:

tabulka 6 – technická specifikace otáčkoměru

měřicí rozsah bezdotykový	5 až 99 999 ot./min, přesnost $\pm 0,05\%$
měřicí rozsah kontaktní	5 až 19 999 ot./min, přesnost $\pm 0,05\%$
přepínatelné údaje	ot./min, m/min, ft/min
vlnová délka laseru	645 nm
šířka	75 mm
výška	215 mm
hloubka	38 mm
hmotnost	260 g

Otáčkoměr DT-2 L/K je na následujícím obrázku:



Obrázek 13 – otáčkoměr DT-2 L/K

5.2 Postup měření

Před započítím výměny ložisek jsme si sestavili měřicí řetězec a poté jej připojili ke strojnímu zařízení. Snímače vibrací byly uchyceny pomocí závitů.

Strojní zařízení jsme demontovali na konečné části hřídele, neboť zde jsme měli nejlepší podmínky pro snadnou a rychlou výměnu zkoumaných ložisek. Ložiskový domek byl sestaven z částí z lehké tvrdé slitiny a spojen pomocí imbusových šroubů.

5.2.1 Demontáž a montáž ložiskového domku a výměna ložisek

Nejprve bylo nutné demontovat boční bezpečnostní kryt ložiska a následně odmontovat horní polovinu ložiskového domku, na kterém již byly přimontovány snímače vibrací. Poté bylo nutné ještě demontovat uchycení vnitřního kroužku ložiska na hřídeli, které zabraňovalo posuvu v axiálním směru. Teprve po těchto úkonech bylo možno sejmout ložisko z hřídele a vyměnit jej za jiné. Montování proběhlo stejným způsobem v obráceném pořadí, tj. upevnění vnitřního kroužku, přišroubování horní poloviny ložiskového domku a namontování bezpečnostního krytu.

5.2.2 Měření chvění

Měření probíhalo vždy ve třech režimech otáčení. Jelikož se otáčky při maximálním vytížení ustálily na 2776 otáčkách za minutu (což jsme naměřili pomocí ručního otáčkoměru), zvolili jsme si tři úrovně otáček, při kterých bude probíhat měření: 600, 1500 a 2400 ot./min. Ačkoli bylo zvyšování otáček pomocí frekvenčního měniče plynulé, zpravidla se nepodařilo dosáhnout přesných hodnot otáčení, a proto jsme si stanovili toleranci ± 5 rpm. Za uspokojivé jsme tedy považovali tyto rozsahy:

- pro 600 rpm – 595 až 605 rpm
- pro 1500 rpm – 1495 až 1505 rpm
- pro 2400 rpm – 2395 až 2405 rpm

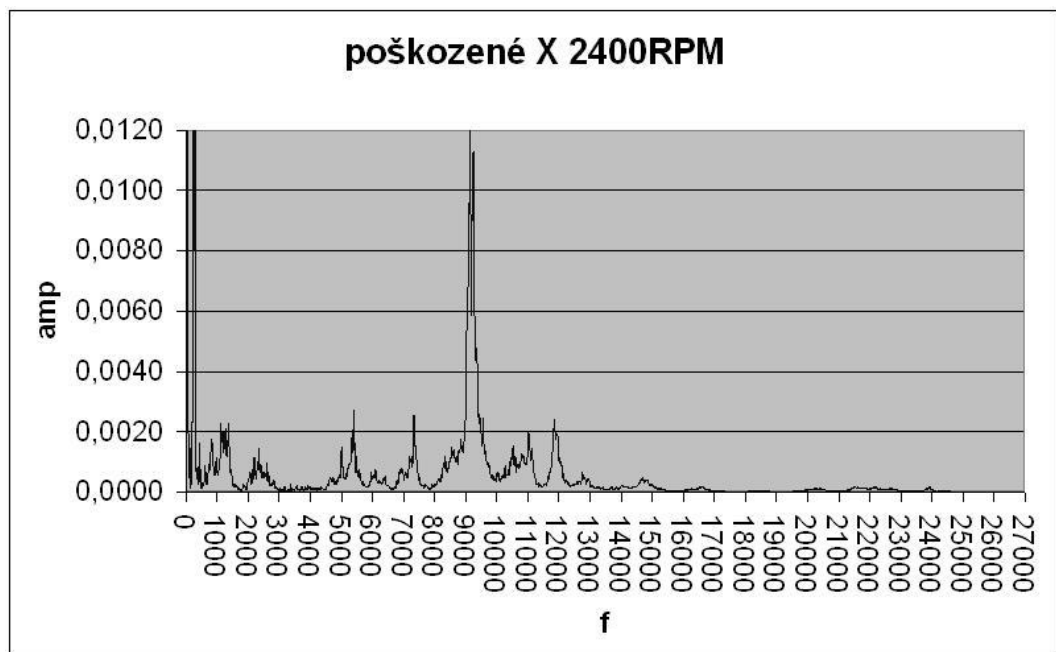
Chvění bylo zaznamenáváno pomocí měřicího řetězce. Pomocí softwaru jsme nastavili průměrování hodnot měření a zobrazené výsledky jsme pro každé měření ukládali do textových souborů s příponou txt. Jelikož z časového signálu není možné

rozpoznat frekvence harmonických složek, používali jsme nastavení Auto spectrum. Pro naše účely měření jsme využili zobrazení dvou frekvenčních spekter z jednotlivých os X a Y.

Po ukončení měření ve všech třech režimech otáčení jsme vypnuli frekvenční měnič a otáčející se strojní zařízení zastavili pomocí jeho brzdy. Poté následovala již popisovaná demontáž, výměna ložisek a opětovná montáž. Měření probíhalo za stejných podmínek pro všechna ložiska.

5.2.3 Naměřená data

Všechna měření z obou snímačů byla ukládána do textových souborů s příponou txt a následně zpracována pomocí tabulkového procesoru MS Excel. Pomocí nástroje k vytváření grafu byl z naměřených dat vytvořen XY bodový graf, který byl ekvivalentem zobrazení frekvenční analýzy v Pulse LabShop. Příklad takového zobrazení je na následujícím grafu:



Graf 4 – poškozené ložisko L4

Tento graf je z měření chvění na ložisku L4. Osa x zobrazuje frekvence po tisících hertzech. Maximální měřená frekvence tedy byla 27 kHz. Osa y zobrazuje amplitudu kmitavého pohybu a je zobrazena v jednotkách mg. Pro všechna měření byla

zvolena stejná maximální hodnota, abychom měli možnost objektivního srovnání. Údaje v popisu všech grafů znamenají vždy o jaký druh ložiska nebo poškození se jedná, z jaké osy jsou data měřena a při jakých otáčkách probíhalo měření.

5.3 Poškození ložisek

Měření bylo uskutečněno na pěti ložiscích stejného typu a stejné firmy. Tři valivá ložiska jsme pomocí vnějšího zásahu poškodili a sledovali změny v diagnostických parametrech. Dvě ložiska jsme nechali nepoškozená, neboť jsme potřebovali naměřit data na referenčních vzorcích. Hlavním cílem bylo určit frekvenční pásmo, ve kterém se závady projeví, porovnat jejich amplitudy a výpočtem určit konstrukční celek ložiska, ze kterého pochází nejvíce se projevující poškození.

Nepoškozená ložiska jsme označili L1 a L2. Ložiska byla nová, tudíž byl předpoklad jejich bezvadného technického stavu.

Ložisko s označením L3 jsme záměrně poškodili nasypaním jemného písku do oběžné dráhy valivých tělísek a nechali otáčet ve strojním zařízení, dokud nevymizely výrazné zvukové projevy charakteristické při drcení písku valivými tělesy. Písek rozemletý na prach výborně posloužil jako erozivní hmota a simulovala v našich laboratorních podmínkách například vnik vzdušného pískového prachu do prostoru ložisek v pouštních oblastech.

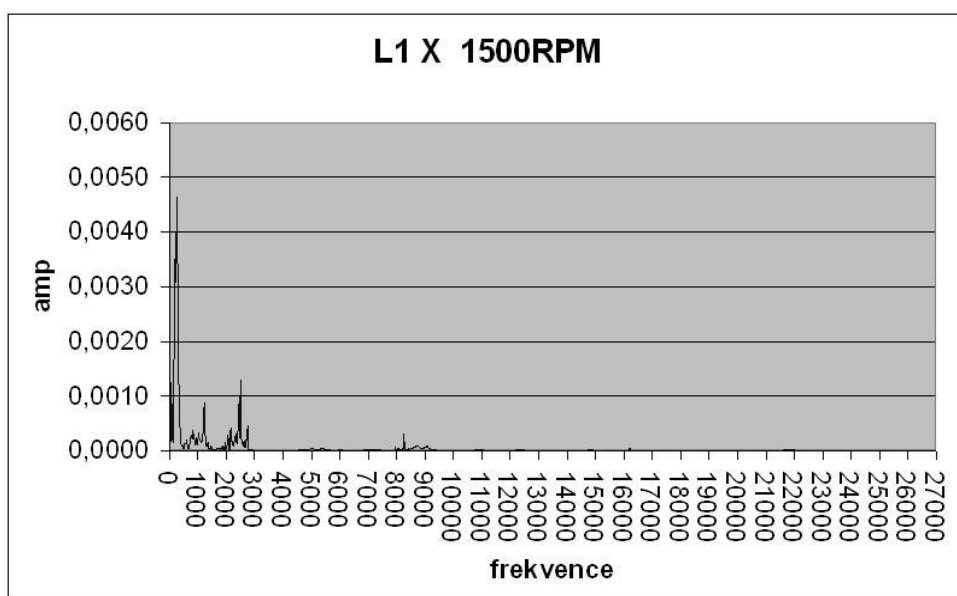
Ložisko označené jako L4 bylo poškozeno pomocí drobné obrysové frézy vsazené do ruční akumulátorové vrtačky. Mechanické poškození bylo záměrně provedeno jen v jednom místě na vnějším kroužku.

Ložisko L5 bylo na několik dní zcela ponořeno do roztoku vody a kuchyňské soli NaCl a díky agresivitě prostředí se na celém ložisku již na druhý den vytvořila souvislá vrstva koroze, která byla pro naše měření žádoucí. Tento postup mohl simulovat práci strojních zařízení v přímořských oblastech, kde ani při nejlepším možném těsnění po čase nezabráníme vniku slané vzdušné vlhkosti do okolí ložisek. Ložisko bylo před montáží do strojního zařízení pečlivě očištěno na vnější straně vnějšího kroužku od koroze, aby rez v těchto místech nezpůsobila při vysokých rychlostech otáčení prokluz v ložiskovém domku v axiálním směru. Očištění bylo provedeno pomocí jemného smirkového papíru.

5.4 Analýza signálů

Z důvodu lepšího porovnání amplitud bylo nutné upravit osy y vykreslených grafů v poměru 1 : 2 : 4 pro otáčky 600 rpm : 1500 rpm : 2400 rpm. Všechny grafy z měření jsou vloženy do přílohy. Z teorie chvění je známo, že se závady na valivých ložiscích projevují až od 5 kHz. Od této hodnoty jsme tedy začali s hledáním projevujících se závad.

První zkoumané ložisko bylo L1 (nepoškozené):

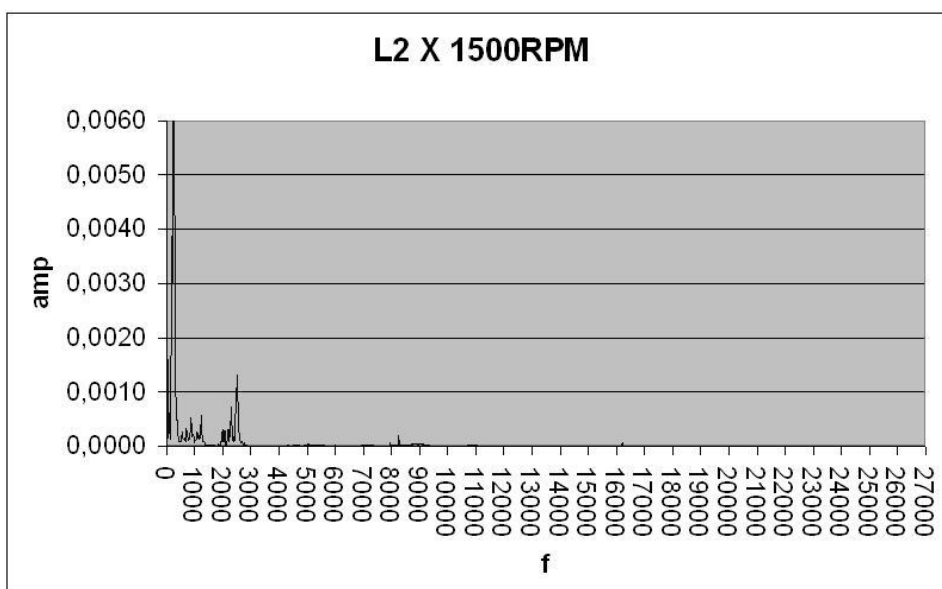


Graf 5 – frekvenční analýza L1

Z grafu je patrné, že nemohly být od oblasti 5 kHz naměřeny žádné významné složky chvění, neboť se jednalo o zcela nové ložisko, které by od výroby mělo být v bezvadném stavu. Ložisko L1 tudíž posloužilo jako první referenční vzorek našeho měření.

Druhým ložiskem bylo ložisko L2, které bylo rovněž nové a ničím nepoškozené a po měření signálu z ložiska L1 jsme předpokládali, že dojdeme ke stejnému výsledku. Náš předpoklad se měřením potvrdil, a tudíž jsme měli potvrzeno, jak se prezentuje chvění na ložiscích bez závad.

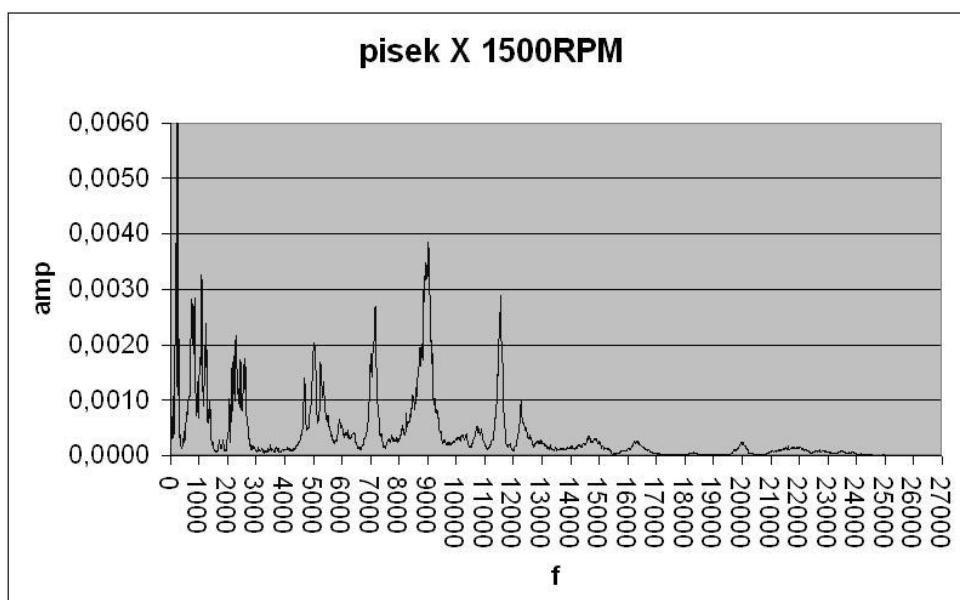
Frekvenční analýza ložiska L2 je na následujícím grafu:



Graf 6 – frekvenční analýza L2

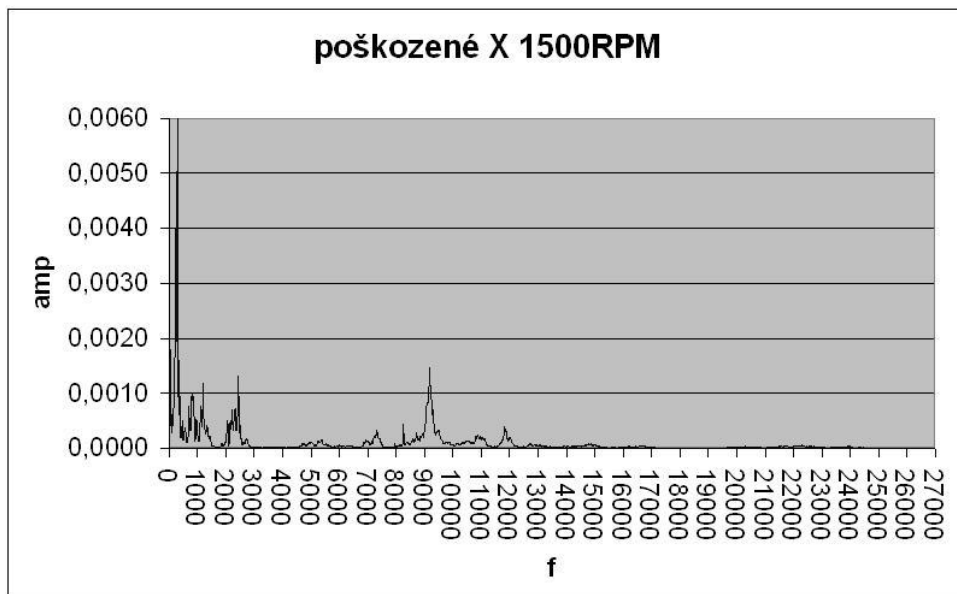
Ložisky L1 a L2 se již nemá smysl zabývat, neboť demonstrace zanedbatelných špiček za frekvencí 5 kHz je dostatečná a jasně poukazuje na bezvadný stav nových ložisek, který nemá žádný vliv na diagnostické parametry.

Třetím zkoumaným ložiskem bylo ložisko L3. Zde již byly patrné výrazné složky již při malých otáčkách. Úroveň amplitud vzrostla velmi výrazně a z frekvenční analýzy bylo snadné rozpoznat nejvyšší špičku. Frekvenční analýza je patrná na následujícím grafu:



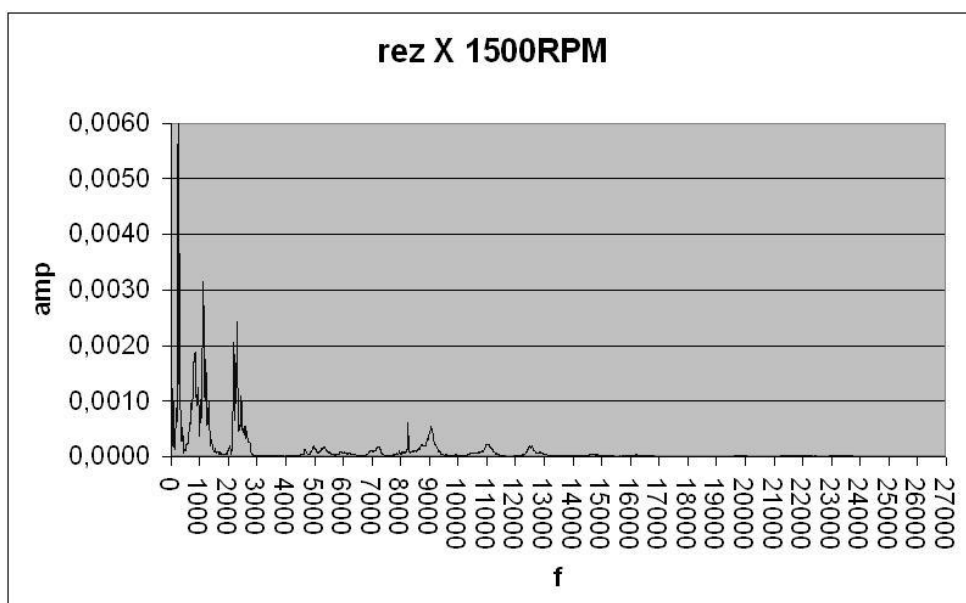
Graf 7 – frekvenční analýza L3

Projevy poškození vnitřního kroužku na ložisku L4 již nebyly tak výrazné, ale přesto byla snadno rozpoznatelná špička poškození. Frekvenční analýza je patrná na následujícím grafu:



Graf 8 – frekvenční analýza L4

Posledním zkoumaným vzorkem bylo ložisko pokryté rží. U ložiska s označením L5 nedošlo k tak výrazným výskytům jako u ostatních poškození. Tento stav lze vysvětlit jako obroušení souvislé tenké vrstvy koroze na jednotlivých částech ložiska při neustálém otáčení během měření. Přesto se zde závada projevila a bylo možné ji pomocí frekvenční analýzy odhalit. Analýza je patrná na následujícím grafu:



Graf 9 – frekvenční analýza L6

Z grafů lze nyní určit nejvýraznější špičky u jednotlivých ložisek a pomocí původních dat z textových souborů otevřených v programu MS Excel lze i k těmto maximálním hodnotám přiřadit přesnou hodnotu frekvence. Tento krok je velice důležitý, neboť také chceme určit, z jaké části valivého ložiska toto chvění pochází. Musíme tedy vypočítat budící frekvence jednotlivých částí ložisek popisované v teoretické části. Jedná se o frekvence BPFO, BPFI, BSF a FTF. Výpočty jsou u stejných typů ložisek navíc závislé na otáčkách, proto se musí pro každou změnu otáček provést nový výpočet. Hodnoty jsou pak násobeny celočíselným koeficientem, neboť se jedná o vyšší harmonické složky. Hodnoty budících frekvencí se poté srovnávají s hodnotami naměřených frekvencí a pak lze již snadno určit, které části valivého ložiska se poškození týká. Odečtené hodnoty frekvencí maximálních špiček a vypočtené hodnoty pomocí tabulkového procesoru MS Excel jsou zavedeny do následujících tabulek (všechny údaje jsou v hertzech):

tabulka 7 – budící frekvence osa X

Osa X					
L3	naměřená frekvence	BPFO	BPFI	BSF	FTF
600 rpm	9025	9027	9043	<u>9026</u>	<u>9024</u>
1500 rpm	9025	9016	9072	<u>9026</u>	9023
2400 rpm	8976	8960	8986	<u>8980</u>	8971
L4	naměřená frekvence	BPFO	BPFI	BSF	FTF
600 rpm	9122	<u>9117</u>	9101	9136	9136
1500 rpm	9184	<u>9184</u>	9072	9164	<u>9184</u>
2400 rpm	9044	<u>9050</u>	8986	9127	9128
L5	naměřená frekvence	BPFO	BPFI	BSF	FTF
600 rpm	9088	9094	9101	9090	<u>9089</u>
1500 rpm	9056	9072	9072	9049	<u>9058</u>
2400 rpm	9088	9050	8986	<u>9090</u>	9083

tabulka 8 – budící frekvence osa Y

Osa Y					
L3	naměřená frekvence	BPFO	BPFI	BSF	FTF
600 rpm	9025	9027	9043	<u>9026</u>	<u>9024</u>
1500 rpm	9047	9072	9072	<u>9049</u>	9044
2400 rpm	8978	8960	8986	<u>8980</u>	8982
L4	naměřená frekvence	BPFO	BPFI	BSF	FTF
600 rpm	9117	<u>9117</u>	9101	9118	9118
1500 rpm	9131	<u>9128</u>	9072	9141	9135
2400 rpm	9136	<u>9139</u>	9216	9164	<u>9139</u>
L5	naměřená frekvence	BPFO	BPFI	BSF	FTF
600 rpm	8032	8042	8006	8027	<u>8033</u>
1500 rpm	9056	9072	9072	9072	<u>9058</u>
2400 rpm	9088	9050	8986	<u>9090</u>	9083

Podtržené vypočtené frekvence jsou nejbližší naměřeným hodnotám a podle nich se identifikovala část ložiska, ze které se projevuje závada. Poškození bylo identifikováno podle četností jejich výskytu v různých režimech zatížení. V některých případech došlo ke shodě naměřené a vypočtené budící frekvence a tudíž mohlo docházet k projevu poškození i jiné součásti ložiska. Rozptyl celočíselných násobků budících frekvencí byl například u ložiskové klece natolik malý, že byla větší pravděpodobnost shody naměřené a vypočtené hodnoty.

Z výsledků výpočtů a naměřených dat vyplývají tyto skutečnosti:

- Ložisko L3, které bylo ovlivněno vsypáním písku do oběžné dráhy valivých těles, vykazuje poškození na kuličce.
- Ložisko L4 mělo shody naměřené frekvence s vypočtenými hodnotami v takových hodnotách, které odpovídaly budícím frekvencím vnějšího kroužku, a tudíž jsme si měřením ověřili skutečnost, že náš mechanický zásah do vnějšího kroužku se při frekvenční analýze skutečně projevil.
- Ložisko L5, které bylo několik dní ponecháno v solném roztoku, vykazovalo závady na kleci.

Závěr

Pomocí diagnostického měřicího řetězce jsme metodou frekvenční analýzy mohli spolehlivě určovat závady na ložiscích, kdy jsme nejprve hledali frekvenční oblast, ve které se vyskytuje nejvyšší špička poškození, a poté podrobnějším zkoumáním této oblasti hledali přesnou hodnotu frekvence dané špičky a nakonec pomocí vypočtených budících frekvencí identifikovali poškození.

Podrobným zkoumáním jsme zjistili, že nejrazantnější projevy byly u ložiska s pískem uvnitř dráhy valivých těles. Písek měl tedy největší vliv na diagnostické parametry, z čehož plyne závěr, že se jedná o nejhorší vnější zásah a nejvíce narušuje části ložiska. V našem případě se nejvíce projevovalo poškození na kuličkách. Zjištění této skutečnosti znamená, že je potřeba dbát velmi důsledně zabránění vniku prachových zrněk písku do prostor ložiskových domků, aby tímto vlivem nedocházelo k prudkému snižování provozní spolehlivosti valivých ložisek.

V pořadí druhým nejhorším poškozením byl mechanický zásah do vnějšího kroužku valivého ložiska. Každý průchod valivého tělesa přes narušené místo způsobuje nejen postupné prohlubování vytvořené jamky, ale také narušování samotných valivých těles a přes ně narušování dalších částí ložisek. Provozní spolehlivost se tedy snižuje podstatně méně než v případě vniku písku do oběžné dráhy, ale přesto dochází vlivem poškození ke zkrácení doby, kdy ložisko plní požadovanou funkci.

Nejmenší vliv na diagnostické parametry měl roztok kuchyňské soli. Na zcela ponořeném ložisku se vytvořila souvislá tenká vrstva koroze, avšak při otáčení ložiska se koroze z oběžné dráhy a valivých těles postupně odstranila a špičky nebyly tak výrazné. Přesto se drobná závada projevila, ale ne s takovou razancí jako předchozí dvě poškození. Při korozi byly nejvyšší zjištěné špičky způsobovány závadou na ložiskové kleci.

Naměřené hodnoty a vypočtené jsou jen výjimečně totožné, neboť nebylo možné dosáhnout přesných otáček a počítali jsme s intervalem, kde jsme považovali měření za dostatečně přesné. Navíc je nutné vzít v úvahu odchylky měřících přístrojů. Ložiska navíc nevykonala v našich laboratorních podmínkách takový počet cyklů, jakých dosahují v běžném provozu, proto by se mohly výsledky identifikace poškození lišit. Měřením a výpočty se potvrdilo poškození vnějšího kroužku ložiska (závada, o které nebylo pochyb), tudíž můžeme považovat metodu za dostatečně přesnou.

Použitá literatura

- [1] Bartoš, Novák, Gajdoš: Strojní součásti. Vázaný výtisk. První vydání. Statní technické nakladatelství technické literatury, Praha, 1963. 04-265-63
- [2] I. Janoušek, J. Kozák, O. Taraba a kol.: Technická diagnostika. Vázaný výtisk. První vydání. 432 stran. Statní nakladatelství technické literatury, 1988. 04-236-88
- [3] M. Navrátil, O. Pluhař: Měření a analýza mechanického kmitání (metody a přístroje). Vázaný výtisk. První vydání. 404 stran. Statní nakladatelství technické literatury, 1986
- [4] Monitorování mechanického chvění strojních zařízení. Technická příručka Brüel & Kjaer. Zvláštní vydání. ISSN 007-2621
- [5] Prezentace Brüel & Kjaer, elektronická podoba, 2006
- [6] Seibert J.: Matematika III. UPa-FES-ÚM-pro posluchače DFJP
- [7] Ziegler, Helebrant: Technická diagnostika a spolehlivost: Vibrodiagnostika. První vydání. Ostrava VŠB-TUO, 2004. 178 s. ISBN 80-248-0650-9

Internetové zdroje:

- [8] http://www.zkl.cz/czech/koncern_media.aspx?id=f11c2e74-37aa-49f1-9061-a208a368060b
- [9] <http://www.dimensor.cz/produkty/prumyslova-loziska/loziska-kulickova/jednorada/6202-p6-000-003132.html>
- [10] <http://www.electro24.cz/detail-43292-digitalni-rucni-otackomer-dt-2-1-k/>
- [11] http://www.kistler.com/mediaaccess/8702B100_000-239e-03.08.pdf

Seznam grafů

Graf 1 – teoretický průběh signálu.....	17
Graf 2 – harmonické složky	19
Graf 3 – výsledný součet 25 harmonických složek	19
Graf 4 – poškozené ložisko L4	41
Graf 5 – frekvenční analýza L1	43
Graf 6 – frekvenční analýza L2	44
Graf 7 – frekvenční analýza L3	44
Graf 8 – frekvenční analýza L4	45
Graf 9 – frekvenční analýza L6	45

Seznam obrázků

Obrázek 1 – harmonické kmitání.....	14
Obrázek 2 – neharmonický průběh kmitání.....	15
Obrázek 3 – kuličkové ložisko (řez)	26
Obrázek 4 – pitting.....	28
Obrázek 5 – amplitudová modulace	29
Obrázek 6 – parametry valivého ložiska.....	30
Obrázek 7 – měřící řetězec	32
Obrázek 8 – strojní zařízení	34
Obrázek 9 – ložisko ve strojním zařízení.....	35
Obrázek 10 – snímač Kistler.....	36
Obrázek 11 – analyzátor B&K 3032A.....	37
Obrázek 12 – LabShop – uživatelské rozhraní	38
Obrázek 13 – otáčkoměr DT-2 L/K.....	39

Seznam tabulek

tabulka 1 – charakteristické frekvence lokálních poruch tělísek	31
tabulka 2 – strojní zařízení.....	33
tabulka 3 – charakteristika ložisek.....	34
tabulka 4 – snímače vibrací - specifikace	35
tabulka 5 – snímače vibrací - rozměry.....	36
tabulka 6 – technická specifikace otáčkoměru.....	39
tabulka 7 – budící frekvence osa X.....	46
tabulka 8 – budící frekvence osa Y.....	47

Seznam příloh

Příloha 1 – měřicí řetězec	52
Příloha 2 – frekvenční měnič	52
Příloha 3 – frekvenční analýza ložisek na ose X při 600 rpm	53
Příloha 4 – frekvenční analýza ložisek na ose Y při 600 rpm	54
Příloha 5 – frekvenční analýza ložisek na ose X při 1500 rpm	56
Příloha 6 – frekvenční analýza ložisek na ose Y při 1500 rpm	58
Příloha 7 – frekvenční analýza ložisek na ose X při 2400 rpm	59
Příloha 8 – frekvenční analýza ložisek na ose Y při 2400 rpm	61

Přílohy

Přílohy

Příloha 1 – měřicí řetězec

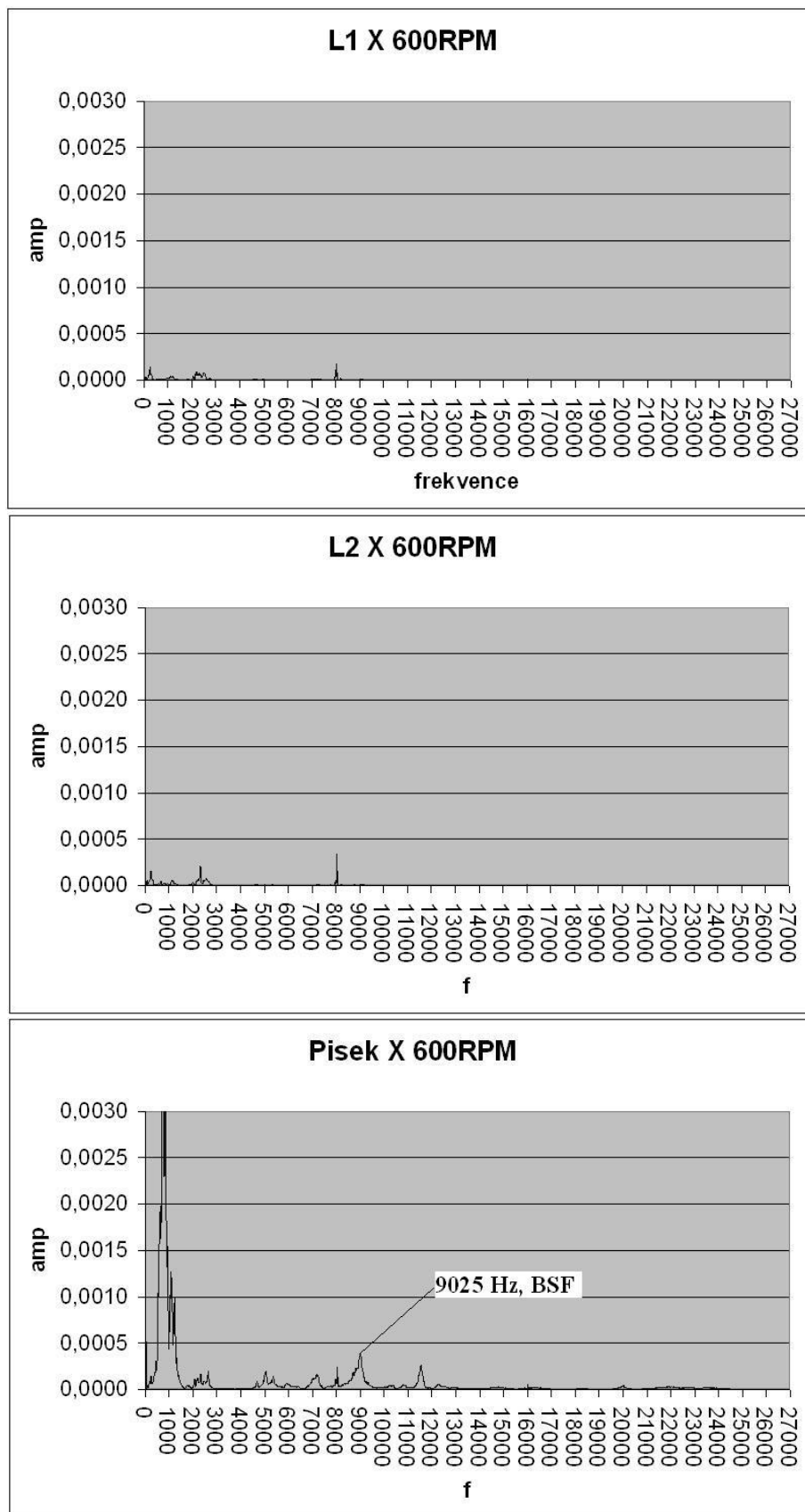


Příloha 2 – frekvenční měnič

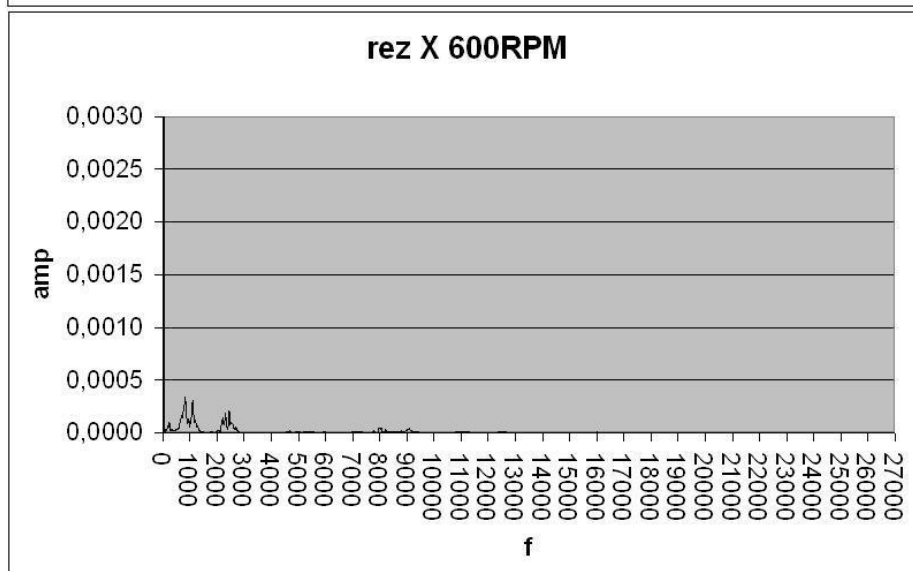
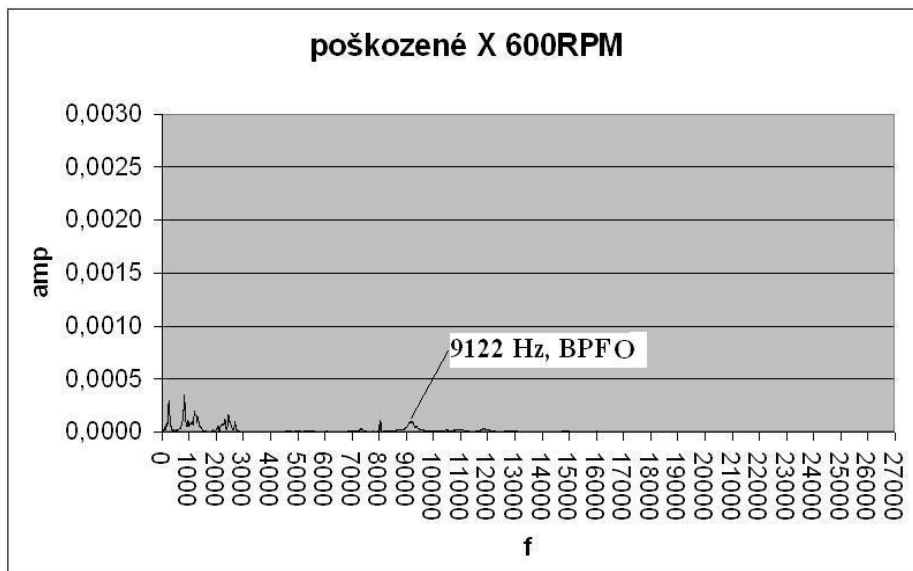


Přílohy

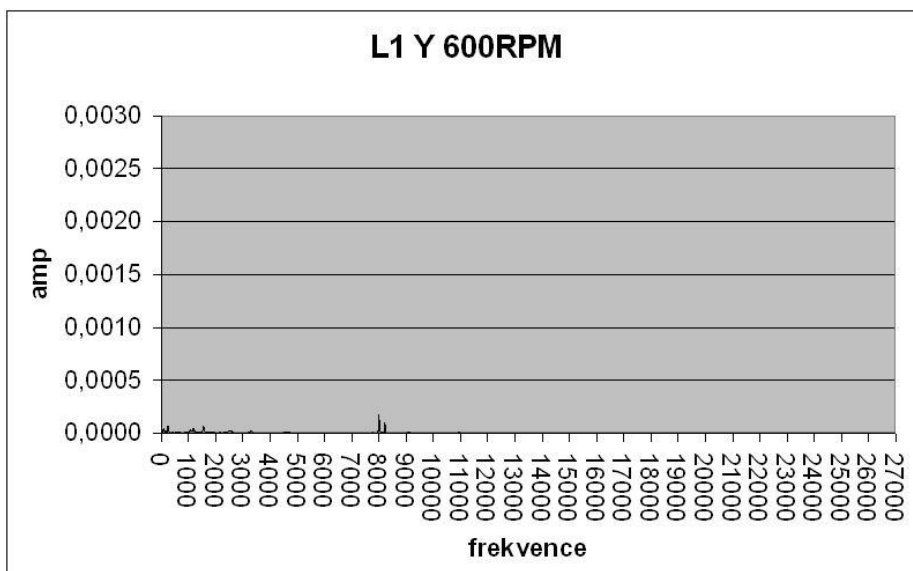
Příloha 3 – frekvenční analýza ložisek na ose X při 600 rpm



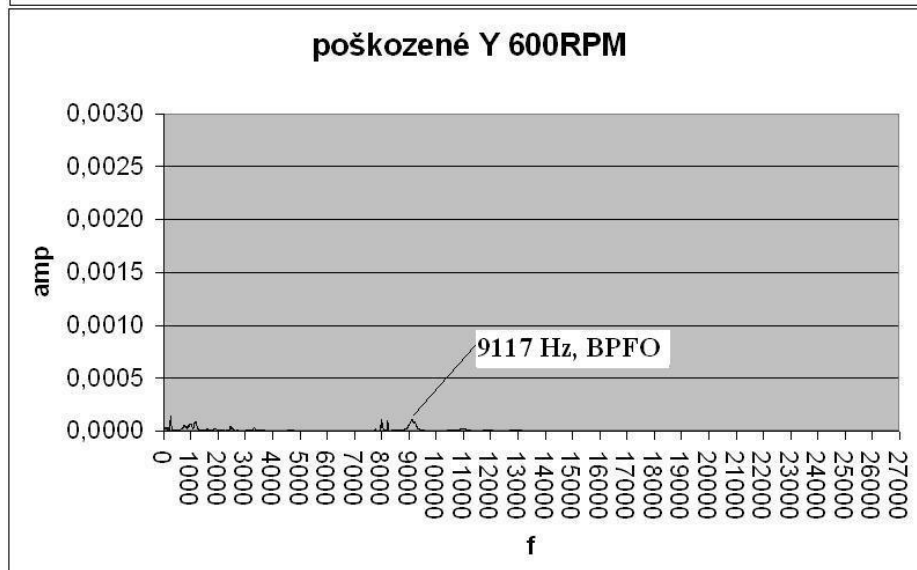
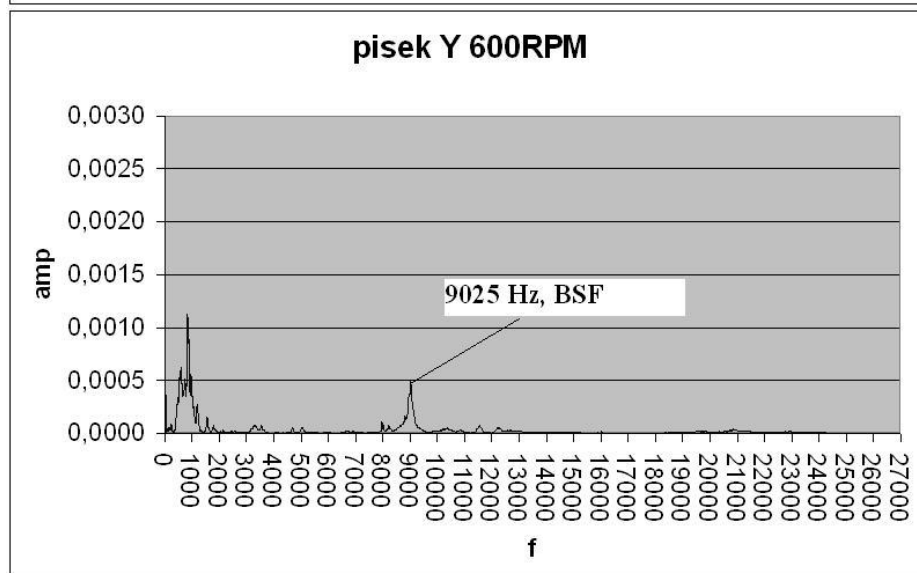
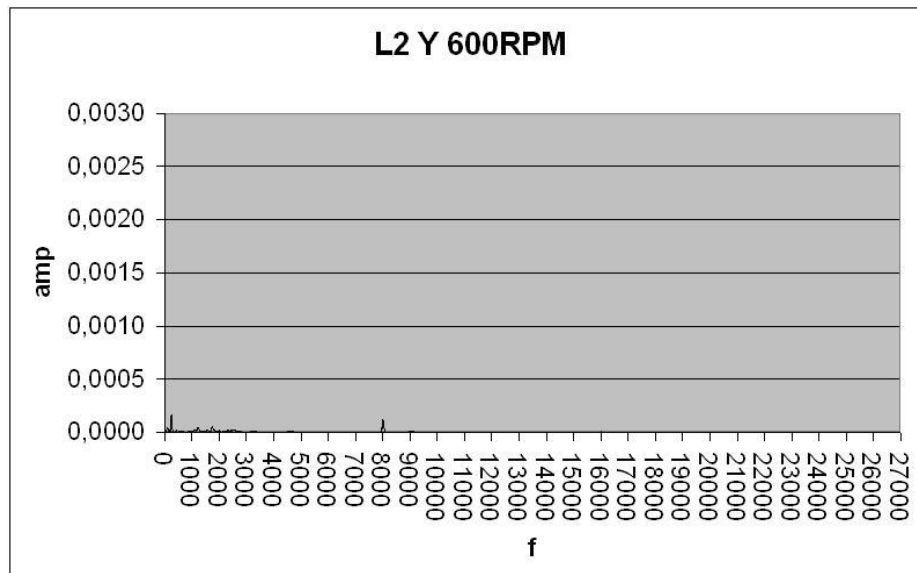
Přílohy



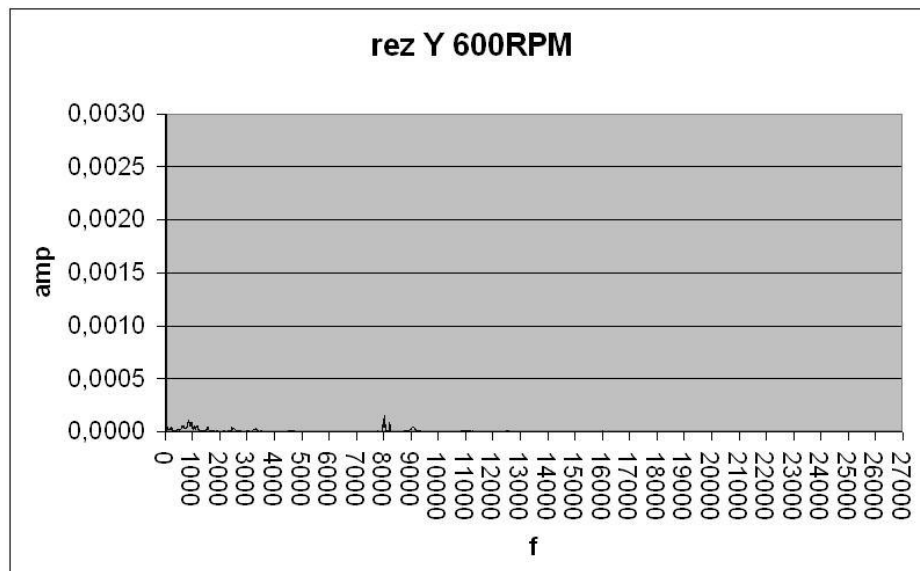
Příloha 4 – frekvenční analýza ložisek na ose Y při 600 rpm



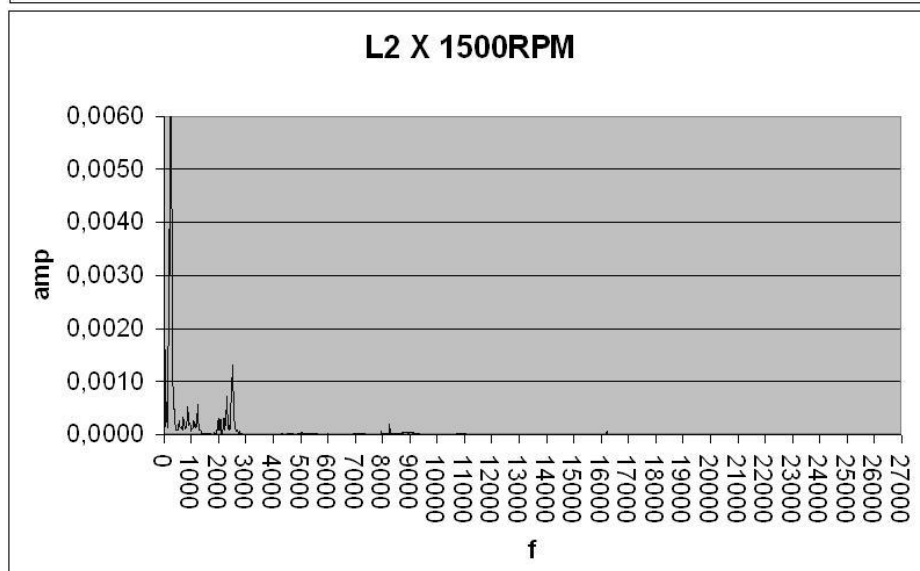
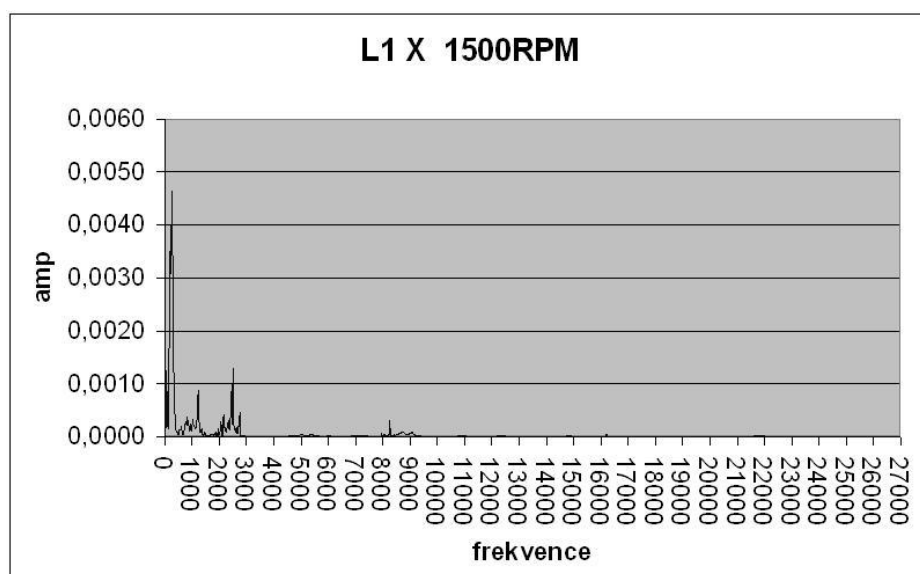
Přílohy



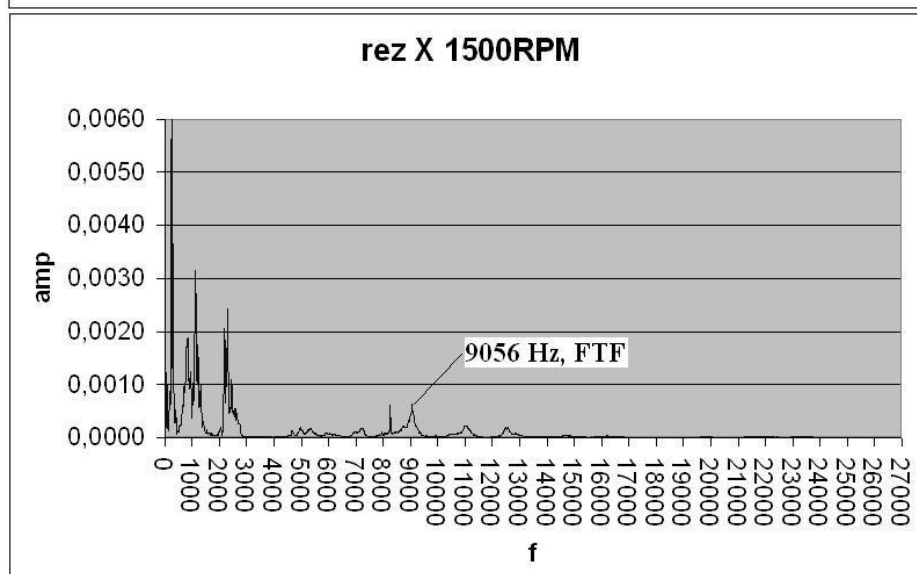
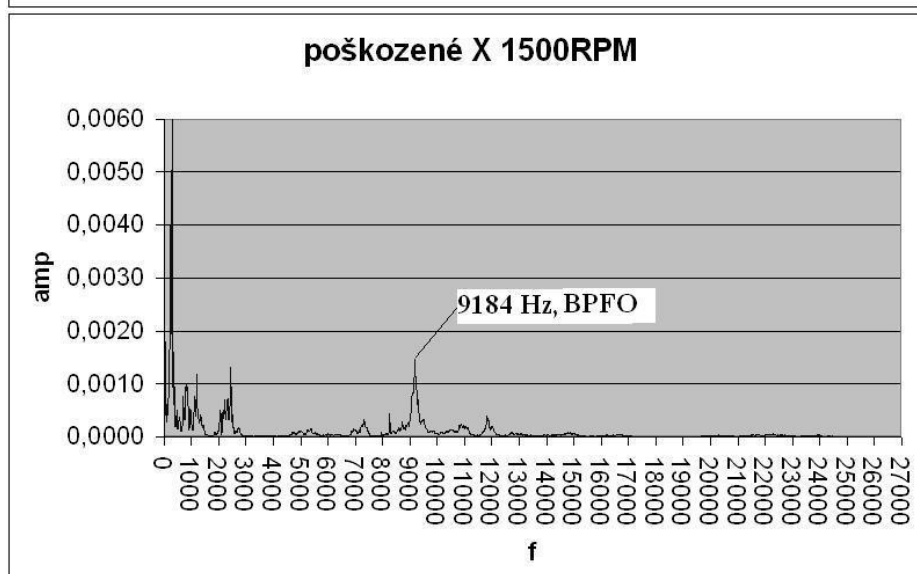
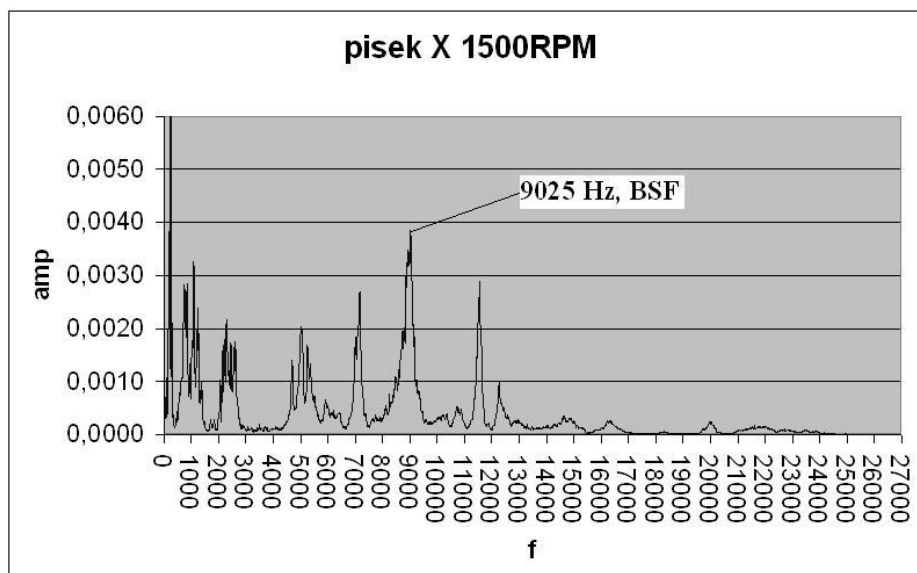
Přílohy



Příloha 5 – frekvenční analýza ložisek na ose X při 1500 rpm

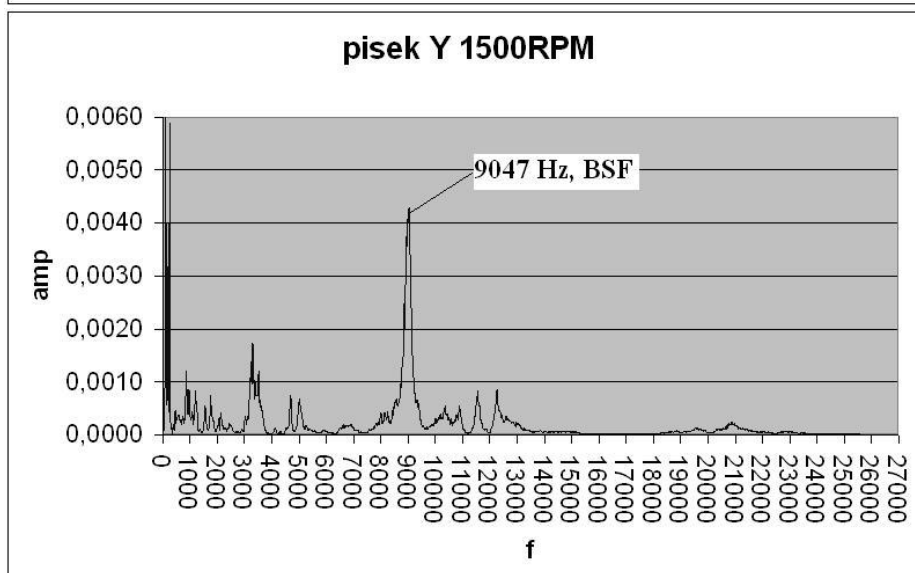
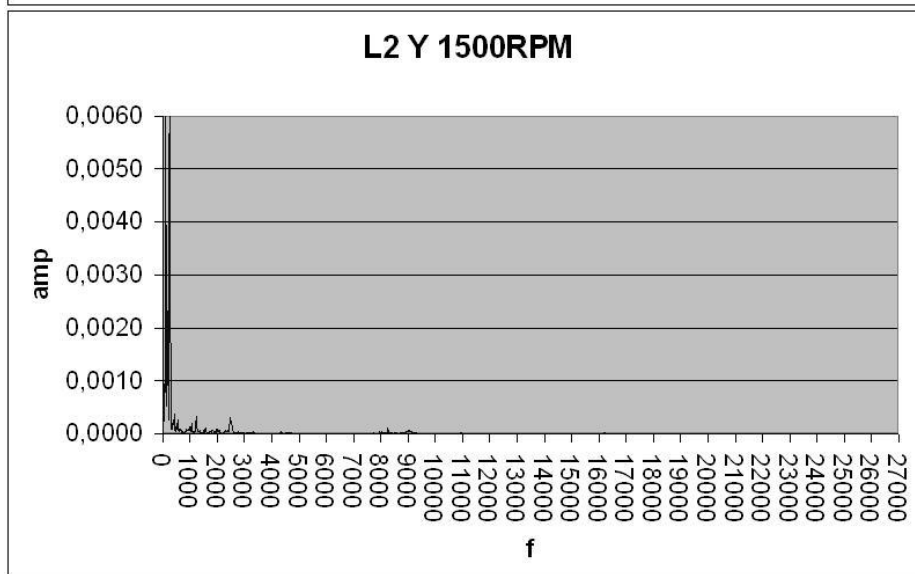
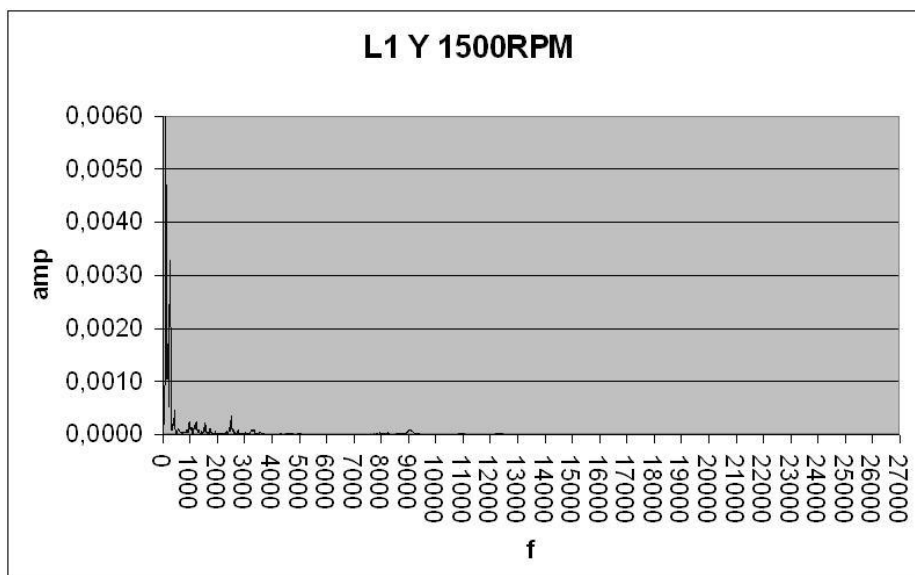


Přílohy

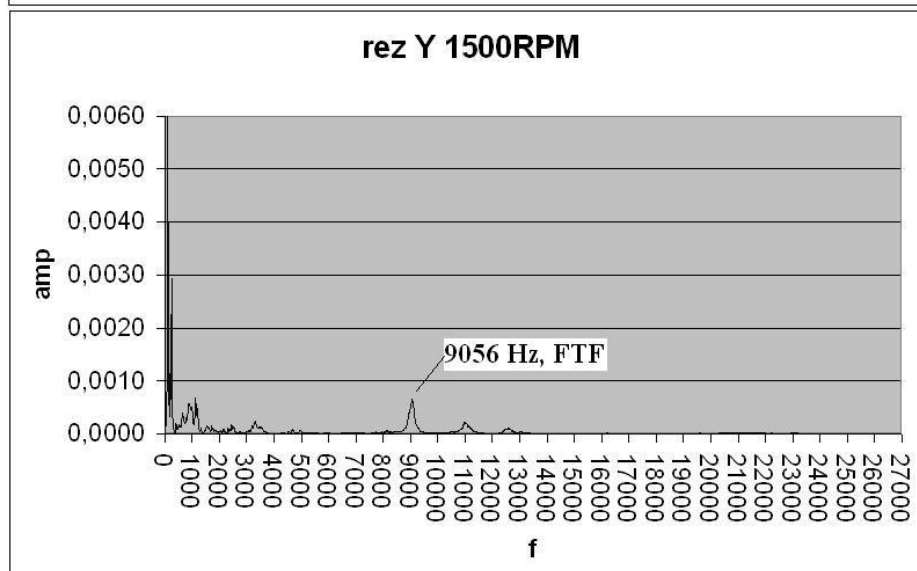
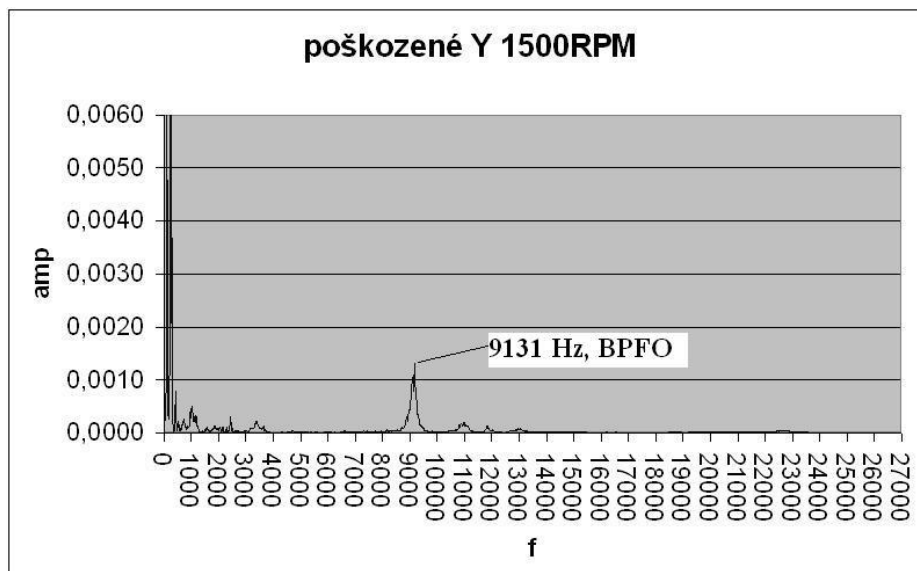


Přílohy

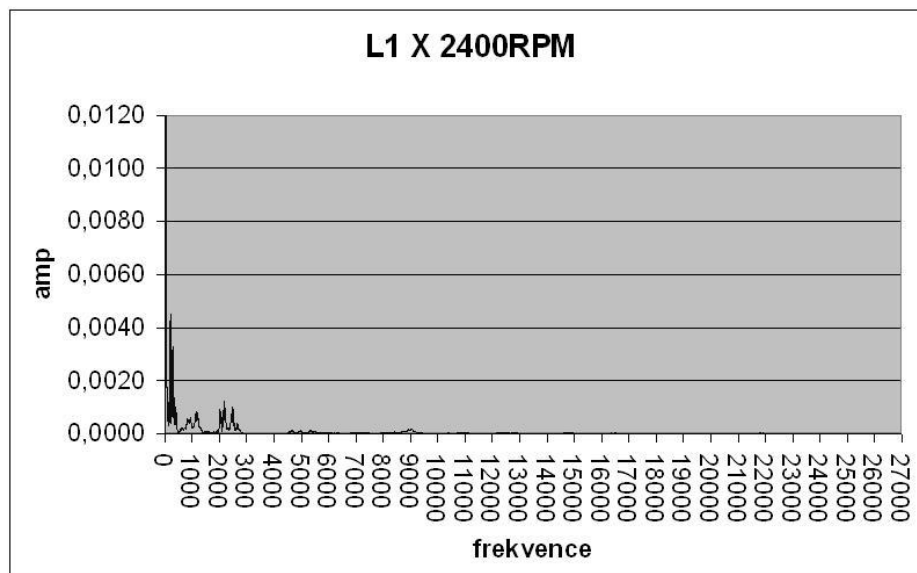
Příloha 6 – frekvenční analýza ložisek na ose Y při 1500 rpm



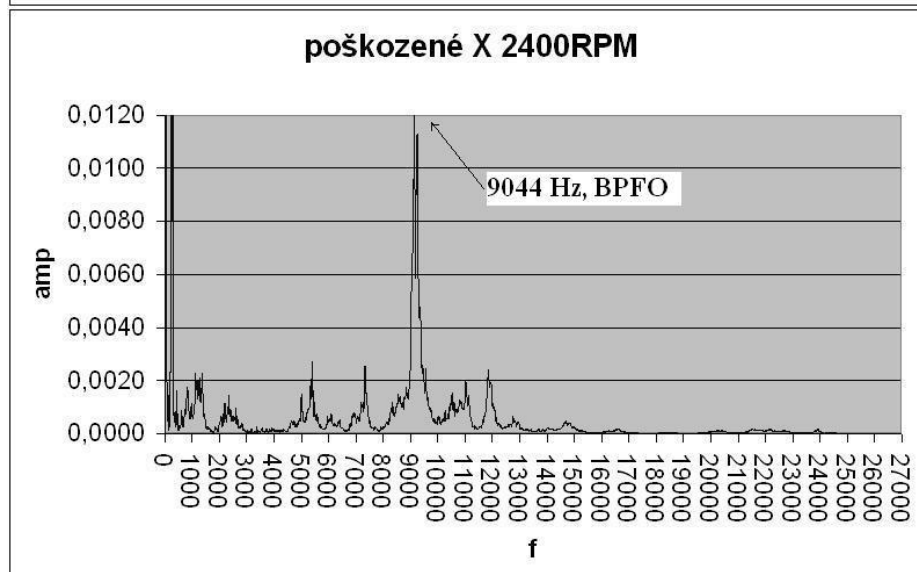
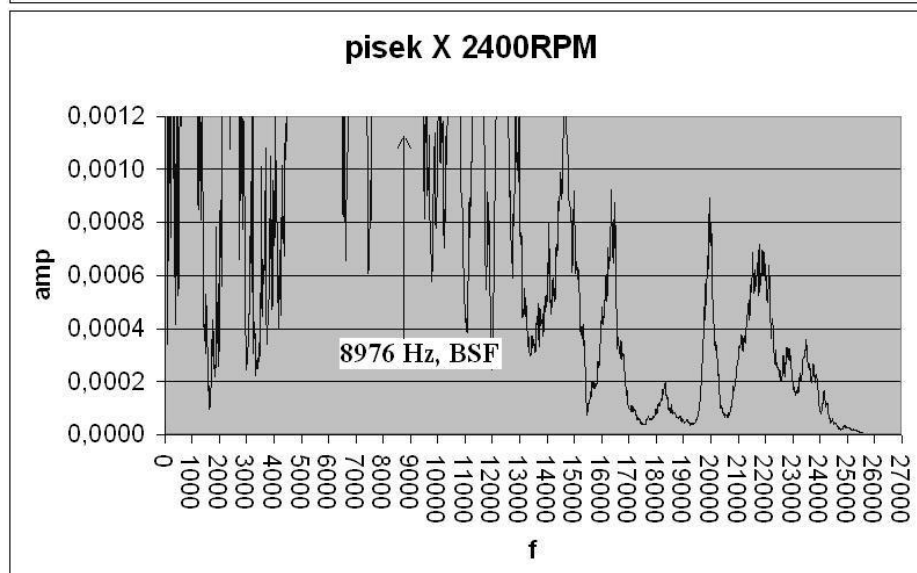
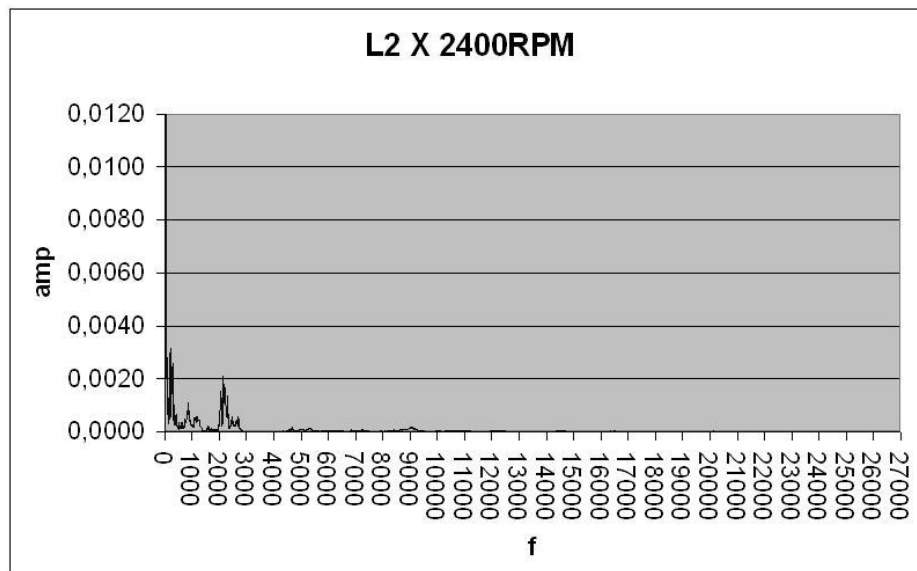
Přílohy



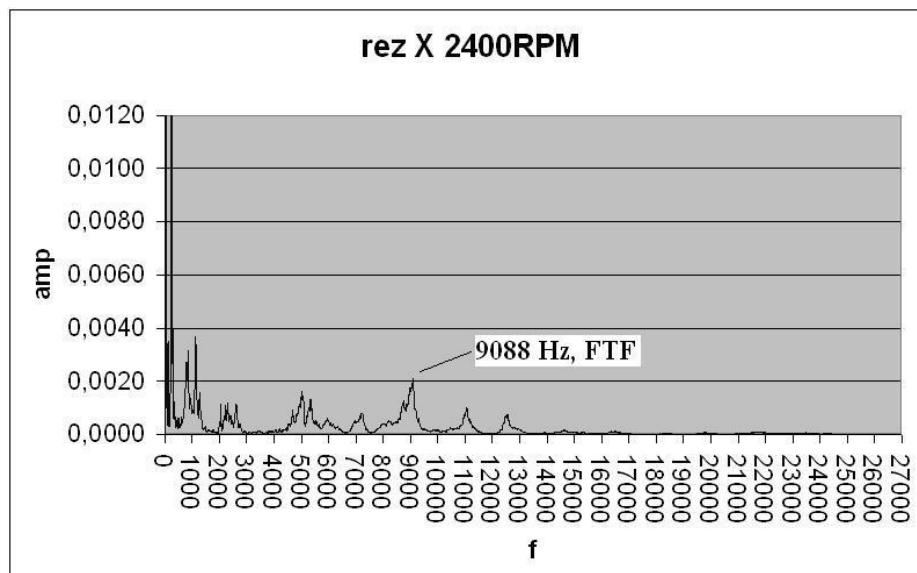
Příloha 7 – frekvenční analýza ložisek na ose X při 2400 rpm



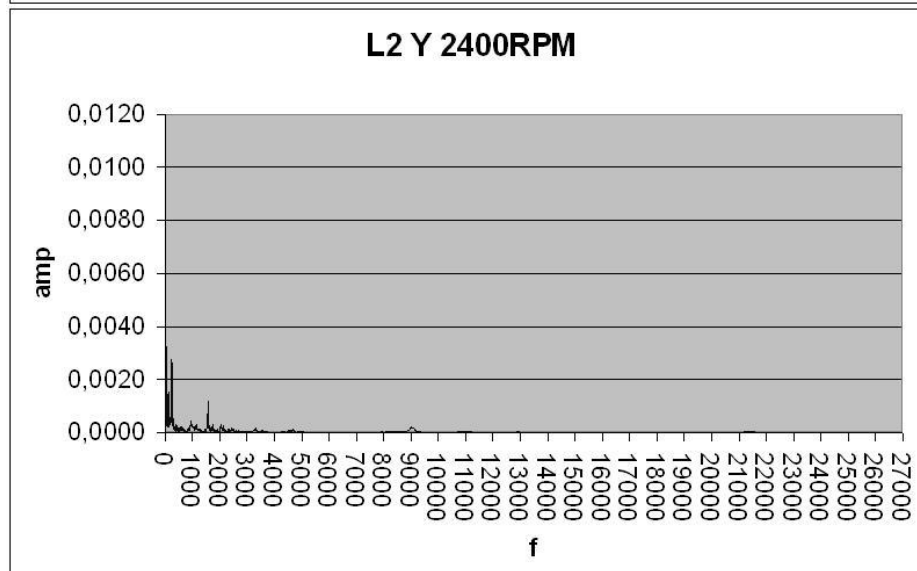
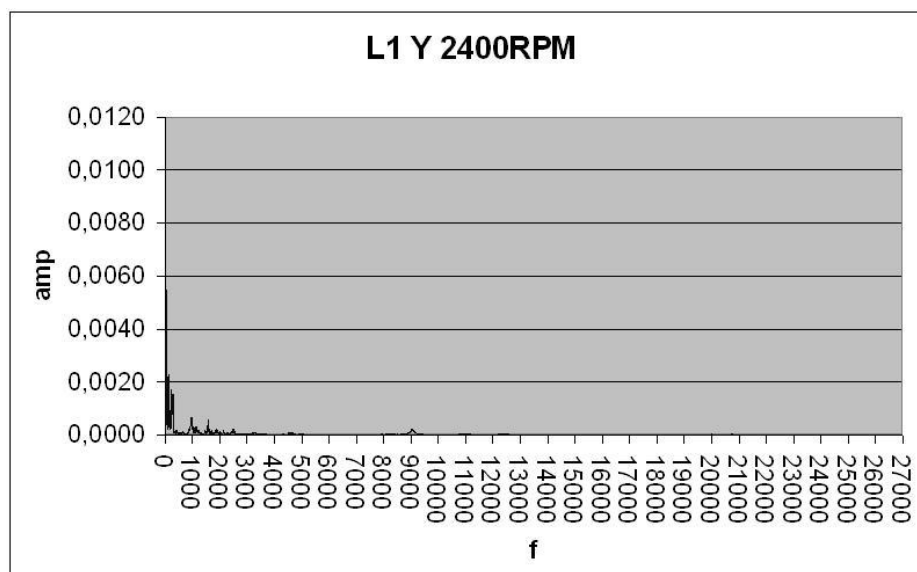
Přílohy



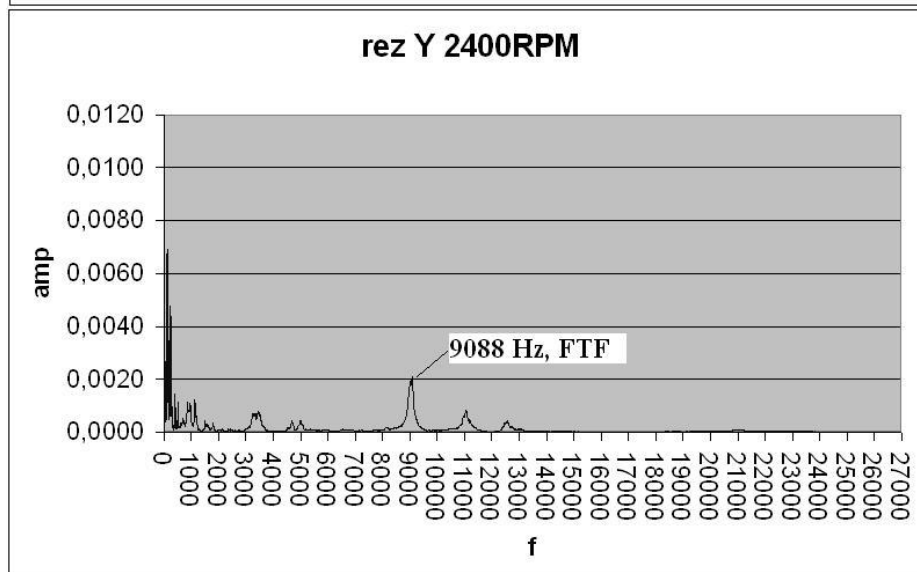
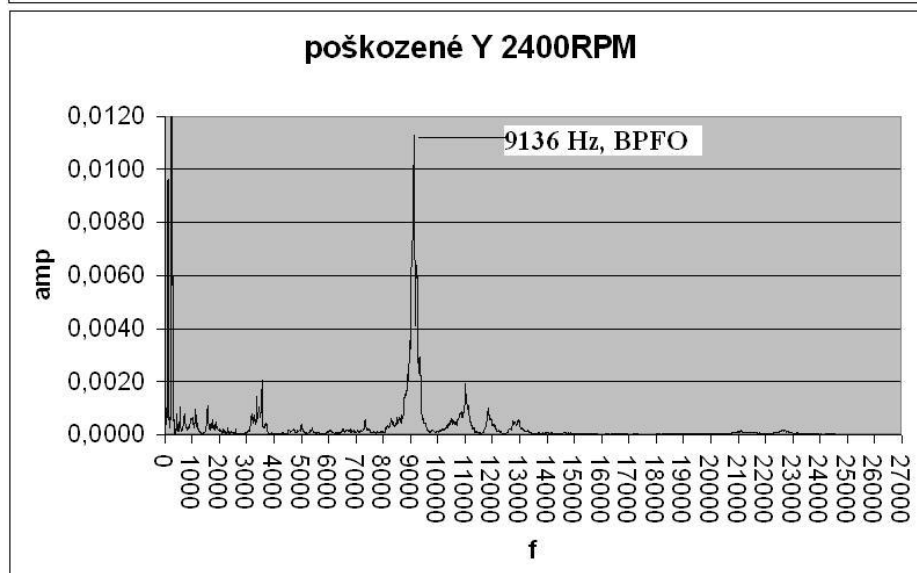
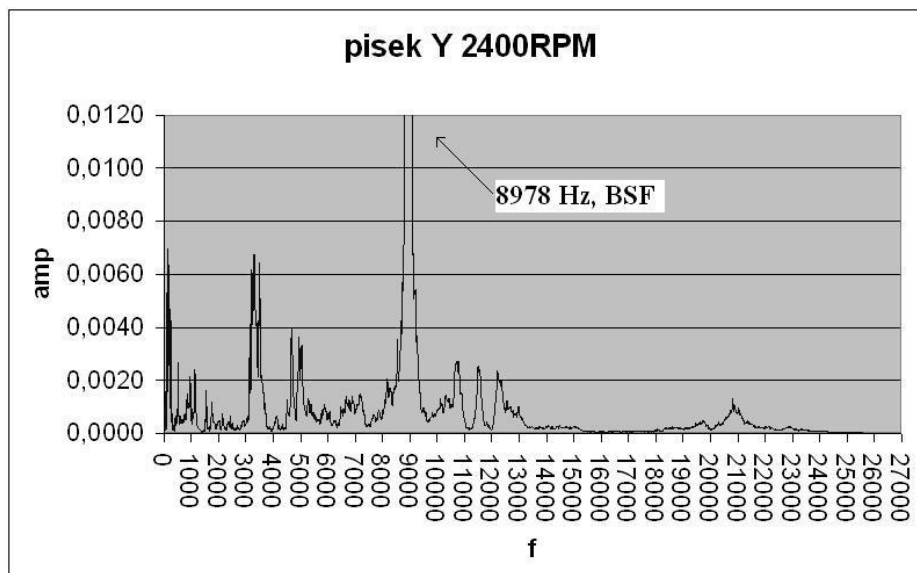
Přílohy



Příloha 8 – frekvenční analýza ložisek na ose Y při 2400 rpm



Přílohy



ÚDAJE PRO KNIHOVNICKOU DATABÁZI

Název práce	Vliv poškození valivých ložisek na diagnostické parametry
Autor práce	Pavel Košťál
Obor	Provozní spolehlivost dopravních prostředků a infrastruktury
Rok obhajoby	2009
Vedoucí práce	Ing. Pavel Kukla
Anotace	Práce je zaměřena na vibrační diagnostiku valivých ložisek. Zkoumá projevy různých druhů poškození a navzájem srovnává vlivy těchto poškození.
Klíčová slova	Technická diagnostika, ložiska, vibrace, amplituda, frekvence, frekvenční analýza, perioda, spektrum, rychlá Fourierova transformace