



ZÁKLADNÍ PŘÍČINY POŠKOZENÍ VALIVÝCH LOŽISEK A JEJICH DIAGNOSTIKA

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství

Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství

Autor práce: **Pešek Daniel**

Vedoucí práce: doc. Dr. Ing. Elias Tomeh



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra vozidel a motorů

Studijní program B2301

Strojní inženýrství

Obor 2301R000

ZÁKLADNÍ PŘÍČINY POŠKOZENÍ VALIVÝCH LOŽISEK A JEJICH DIAGNOSTIKA

Bakalářská práce

Pešek Daniel

Vedoucí bakalářské práce: Doc. Dr. Ing. Tomeh Elias – TUL FS, KVM

Konzultant bakalářské práce: Martin Karhut

Počet stran: 59

Počet obrázků: 42

Počet grafů: 18

Liberec 2015

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá základními příčinami poškození valivých ložisek a jejich diagnostikou. Práce obsahuje několik částí. Úvod je zaměřen na obecné rozdělení a popis linek na výrobu dětských plen nebo dámských vložek. Další část je již věnována ložiskům. Vliv kvality montáže na spolehlivost a trvanlivost ložisek, základní rozdělení příčin poruch ložisek, způsoby detekcí závad valivých ložisek s popisem obálkové analýzy. Závěrečná kapitola je praktická část, kde se zkoumají vibrační spektra mlýnů, ventilátorů a elektromotorů na předem určených strojích.

Klíčová slova

Valivé ložisko, poruchy valivých ložisek, diagnostika, vliv kvality montáže na životnost ložiska, vibrace.

Annotation

The topic of this bachelor work are the basic causes of damage to rolling element bearings and their diagnostics. The work contains several sections. The introduction concentrates on general classification and description of lines for the production of baby`s napkins and women`s towels. The further section is already devoted to bearings – it means the influence of assembly quality at the reliability and service life of bearings, the principal classification of causes of bearing defects, the detection methods of defects in rolling element bearings with the description of envelope analysis. The final chapter is a practical part where vibration scales of mills, ventilators and electrical motors at ahead-specified machines are examined.

Key words

Rolling element bearing, defects in bearings, diagnostics, the influence of assembly quality at service life of bearings, vibrations.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do její skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Daniel Pešek**
Osobní číslo: **S11000044**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Základní příčiny poškození valivých ložisek a jejich diagnostika**
Zadávací katedra: **Katedra vozidel a motorů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Experimentální práce zaměřené na vypracování přehledu současného stavu příčin poškození valivých ložisek a využití metod diagnostiky k indikaci jejich mechanických závad.

1. Vytvořte přehled strojů a zařízení ve společnosti, ve které se bude provádět měření valivých ložisek.
2. Popište vliv kvality montáže valivých ložisek na spolehlivost a životnost strojů a zařízení.
3. Specifikujte příčiny poškození valivých ložisek strojů a zařízení s jejich projevy ve spektrech vibrací. Popište způsoby detekce závad valivých ložisek strojů a zařízení.
4. Popište vlastní návrh řešení, systém řešení poškození valivých ložisek a zhodnoťte dosažené výsledky a praktickou použitelnost v podniku.
5. Proveďte měření valivých ložisek pro Vámi vybrané dva stroje vzhledem k možným odlišnostem uměle a přirozeně vytvořeného poškození a proveďte analýzu naměřených frekvenčních spekter.
6. Cílem bakalářské práce je použitelnost výsledků v laboratoři KVM.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **cca 40 stran textu**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- [1] **TOMEH, Elias. Diagnostic Methodology of Rolling Element and Journal Bearings. /Skripta TU v Liberci/, TUL Liberec, 2007.**
- [2] **VASS, Jiří. Přehled metod detekce mechanického poškození. ČVUT [online]. 2004 [cit. 2011-03-17]. Dostupný z www: http://noel.feld.cvut.cz/sbornik05/data/007_slajdy.pdf;**
- [3] **SKF Hlavní katalog.**
- [4] **Příručka SKF pro údržbu ložisek.**
- [5] **Časopisy a katalogy firem.**
- [6] **ORHAN, S., AKTÜRK, N., VELIK, V. Vibration Monitoring for Detect Diagnosis of Rolling Elements Bearings as a Predictive Maintenance Tool: Comprehensive Case Studies. NDT&E International. Vol. 39, No. 4, 2006, pp. 293-298.**

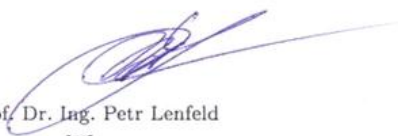
Vedoucí bakalářské práce:

doc. Dr. Ing. Elias Tomeh


Katedra vozidel a motorů

Datum zadání bakalářské práce: **6. března 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **6. června 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




Ing. Robert Voženílek, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 6. března 2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: **Pešek Daniel**

Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**

Ve smyslu zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách se Vám určuje bakalářská práce na téma:

ZÁKLADNÍ PŘÍČINY POŠKOZENÍ VALIVÝCH LOŽISEK A JEJICH DIAGNOSTIKA

Zásady pro vypracování:

(uveďte hlavní cíle bakalářské práce a doporučené metody pro vypracování)

Experimentální práce zaměřené na vypracování přehled současného stavu příčin poškození valivých ložisek a využití metod diagnostiky k indikaci jejich mechanických závad.

- 1) Vytvořte přehled strojů a zařízení ve společnosti, v které se bude provádět měření valivých ložisek.
- 2) Popište vliv kvality montáže valivých ložisek na spolehlivost a životnost strojů a zařízení.
- 3) Specifikujte příčiny poškození valivých ložisek strojů a zařízení a jejich projevy ve spektrech vibrací. Popište způsoby detekce závad valivých ložisek strojů a zařízení.
- 4) Popište vlastní návrh řešení, systém řešení poškození valivých ložisek a zhodnoťte dosažených výsledků, praktickou použitelnost v podniku.
- 5) Provedte měření valivých ložisek pro Vámi vybrané dva stroje vzhledem k možným odlišnostem uměle a přirozeně vytvořeného poškození a provedte analýzu naměřených frekvenčních spekter.
- 6) Cílem bakalářské práce je použitelnost výsledků v laboratoři KVM.

Poděkování

Poděkování patří především vedoucímu této BP panu docentu Eliasu Tomehovi, dále konzultantovi panu Martinu Karhutovi, panu Ing. Janu Fojtíkovi, panu Ing. Pavlu Zlevorovi, panu Ing. Martinu Hyškovi a dalším spolupracovníkům společnosti Ontex s.r.o. za vstřícnost, poskytnutí informací a užitečné konzultace problémů této BP. Zvláštní poděkování patří celé mé rodině všem blízkým kamarádům za duševní i finanční podporu nejenom při psaní BP, ale i v průběhu studia na Technické univerzitě v Liberci.

Seznam symbolů a jednotek

Značka	Význam	Jednotka
a_{ef}	efektivní hodnota zrychlení	$[mm \cdot s^{-2}]$
a_0	amplituda zrychlení	$[mm \cdot s^{-2}]$
C	základní dynamická únosnost ložiska	$[N]$
D	průměr vnějšího kroužku ložiska	$[mm]$
d	průměr vnitřního kroužku ložiska	$[mm]$
d_0	průměr valivého tělesa ložiska	$[mm]$
d_s	střední průměr ložiska	$[mm]$
F_r, F_a	Zatížení ložiska radiální, axiální	$[N]$
f_{Li}	frekvence vad vnitřního oběžného kroužku ložiska	$[Hz]$
f_{Lk}	frekvence vad klece valivého ložiska	$[Hz]$
f_{Lo}	frekvence vad vnějšího oběžného kroužku ložiska	$[Hz]$
f_{Lop}	frekvence vady lopatek	$[Hz]$
f_{Lv}	frekvence vad valivého tělíska ložiska	$[Hz]$
f_r	rotorová frekvence	$[Hz]$
$f_{\dot{R}}$	řemenová frekvence	$[Hz]$
L	délka řemene	$[mm]$
L_{10}	životnost ložiska	$[mil. otáček]$
L_{h10}	životnost ložiska	$[hod.]$
n	otáčky	$[min^{-1}]$
P	ekvivalentní dynamické zatížení	$[N]$
p	exponent trvanlivosti	(1)
T	doba měření	$[s]$
V_r, V_a	vůle ložiska radiální, axiální	$[\mu m]$
z	počet kuliček nebo válečků	(1)
z_L	počet lopatek ventilátoru	(1)
α	úhel dotyku	$[rad]$
δ_r, δ_a	pružná deformace radiální, axiální	(1)
Δs	změna vůle	$[mm]$
Δs_L	změna vyvolaná lícováním	$[mm]$
Δs_T	změna vyvolaná rozdílem teplot	$[mm]$
FFT	rychlá Fourierová transformace	

OBSAH

1	ÚVOD.....	12
2	PŘEHLED STROJŮ A ZAŘÍZENÍ VE SPOLEČNOSTI ONTEX.....	13
2.1	Obecné informace o lince na výrobu dámských vložek SV4	13
2.2	Obecné informace o lince na výrobu dětských plen DP14	16
2.3	Obecné informace o linkách na výrobu dětských plen DP11, DP12, DP13	18
3	VLIV KVALITY MONTÁŽE VALIVÝCH LOŽISEK NA SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	20
3.1	Axiální a radiální vůle u radiálních valivých ložisek.....	20
3.2	Provozní vůle	21
3.3	Vliv vůle na přesnost uložení.....	21
3.4	Vliv vůle na trvanlivost ložiska.....	22
4	PŘÍČINY POŠKOZENÍ VALIVÝCH LOŽISEK STROJŮ A ZAŘÍZENÍ	23
4.1	Selhání ložisek a jejich příčiny	23
4.2	Trvanlivost ložiska	24
4.3	Jednotlivé typy poškození ložisek.....	25
4.3.1	Opotřebení	26
4.3.2	Vtisky.....	27
4.3.3	Prokluzování	29
4.3.4	Porušení povrchu	29
4.3.5	Koroze.....	30
4.3.6	Poškození způsobená průchodem elektrického proudu	31
4.3.7	Odlupování.....	32
4.3.8	Trhliny	33
4.3.9	Poškození klece.....	34
4.4	Způsoby detekce závad valivých ložisek strojů a zařízení.....	34
4.4.1	Metody diagnostiky valivých ložisek	34

4.4.2	Projevy ve spektrech vibrací.....	36
4.4.3	Etapy poruch ložisek.....	37
5	VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNOT	40
5.1	Výpočty potřebných hodnot ložisek, řemenic, řemenů a chybových frekvencí 40	
5.2	Grafické znázornění naměřených hodnot.....	42
5.2.1	Umělá porucha.....	42
5.2.2	SV4	45
5.2.3	DP14	47
5.2.4	DP11	49
5.2.5	DP12	51
5.2.6	DP13	53
5.2.7	Porovnání strojů DP11, DP12, DP13.....	55
6	ZÁVĚR.....	58
	LITERATURA	59

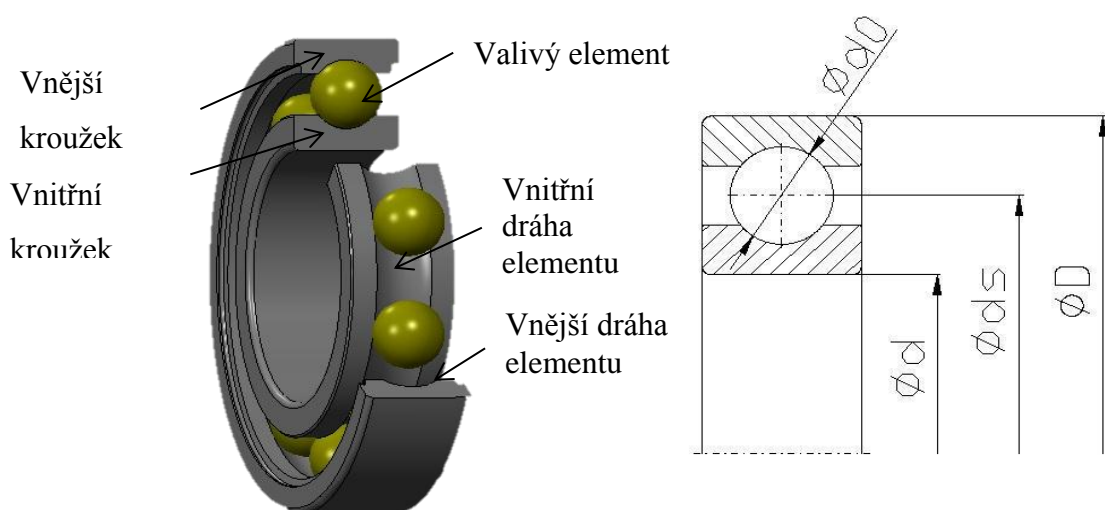
1 ÚVOD

Ložisko je strojní součást, která umožňuje uložení rotační součásti do součástí nerotační, plní funkci podpor na hřídelích a v neposlední řadě přenáší síly v různých směrech.

Člověk má od pradávna tendence a schopnosti usnadňovat si práci. Už Egypťané se několik tisíc let př. n. l. chtěli například přemístit těžké věci, kde používali množství kůlů, jež postupně vkládali pod danou věc a mohli jí tak pohybovat. Potřebovali též dopravovat různé životu potřebné suroviny mezi osadami, městy. Proto vynalezli první vozíky s koly, které byly nejprve ze dřeva později z kovu. Protože při rotačním pohybu kola vzniká poměrně velké tření v uložení, tím pádem vzrůstá i teplota a kola se dříve opotřebovala, bylo nutné vymyslet způsob, jak tento problém eliminovat. Z tohoto důvodu byli lidé nuceni přemýšlet a vynalézt první ložiska. [11]

Postupně se ložiska vyvíjela, objevovaly se různé materiály, typy a v současné době je ložisko nenahraditelnou součástí technických zařízení a můžeme se s nimi setkat prakticky ve všech možných odvětvích průmyslu.

V této bakalářské práci je kladen důraz především na základní příčiny poškození valivých ložisek, nicméně je zde popsán obecný přehled o objektu Ontex. Další kapitola je věnována vlivu kvality montáže valivých ložisek na spolehlivost a životnost strojů a zařízení.



Obrázek 1: Jednořadé kuličkové ložisko SKF 6209

2 PŘEHLED STROJŮ A ZAŘÍZENÍ VE SPOLEČNOSTI ONTEX

Firma Ontex s.r.o. byla založena v roce 1979 v Belgii [3] a specializuje se na výrobu hygienických potřeb, jako jsou dámské vložky, dětské pleny, inkontinenční pleny, vlhčené ubrousky atd.

V roce 1997 byla česká výroba soustředěna do vybudovaného komplexu v Turnově a postupně se rozšiřovala až do současnosti. V turnovské pobočce jsou linky na výrobu dětských plen, dámských vložek a inkontinenčních plen [3]

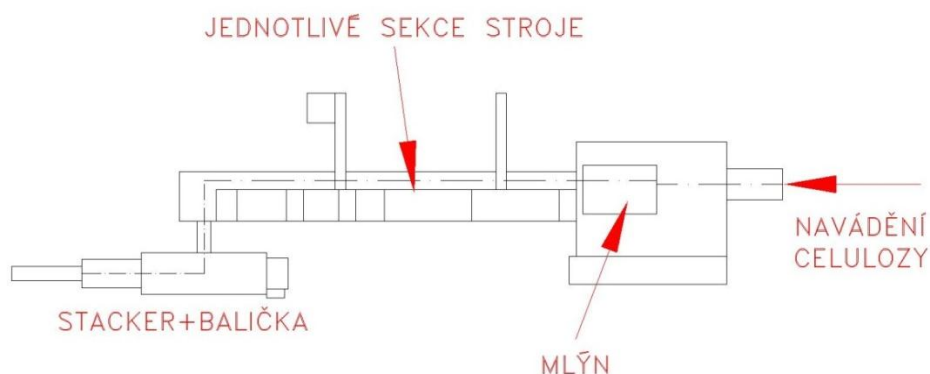
Uvedené rotační linky se skládají hlavně z hřídelů, valivých ložisek a ozubených kol. Údržba takového množství strojů jak na základě neplánovaných odstávek (reaktivní údržba), tak na základě plánování pravidelných odstávek k provedení generálních oprav (preventivní údržba) je časově náročná a nákladná.

Proto firma Ontex s.r.o. přestoupila k metodám prediktivní a proaktivní údržby, kde je stav strojů posuzován pomocí metod vibrační diagnostiky. Odstávky jsou plánované na základě predikce opotřebení a slouží k identifikaci prvotních příčin strojních a procesních problémů. Jejich hlavní cíl je výrazné snížení neplánovaných odstávek a řešení základních příčin vzniku poruch.

Tato bakalářská práce je zaměřena na ložiska mlýnů, ventilátorů a elektromotorů na strojích SV4, DP11, DP12, DP13, DP14 a INCO.

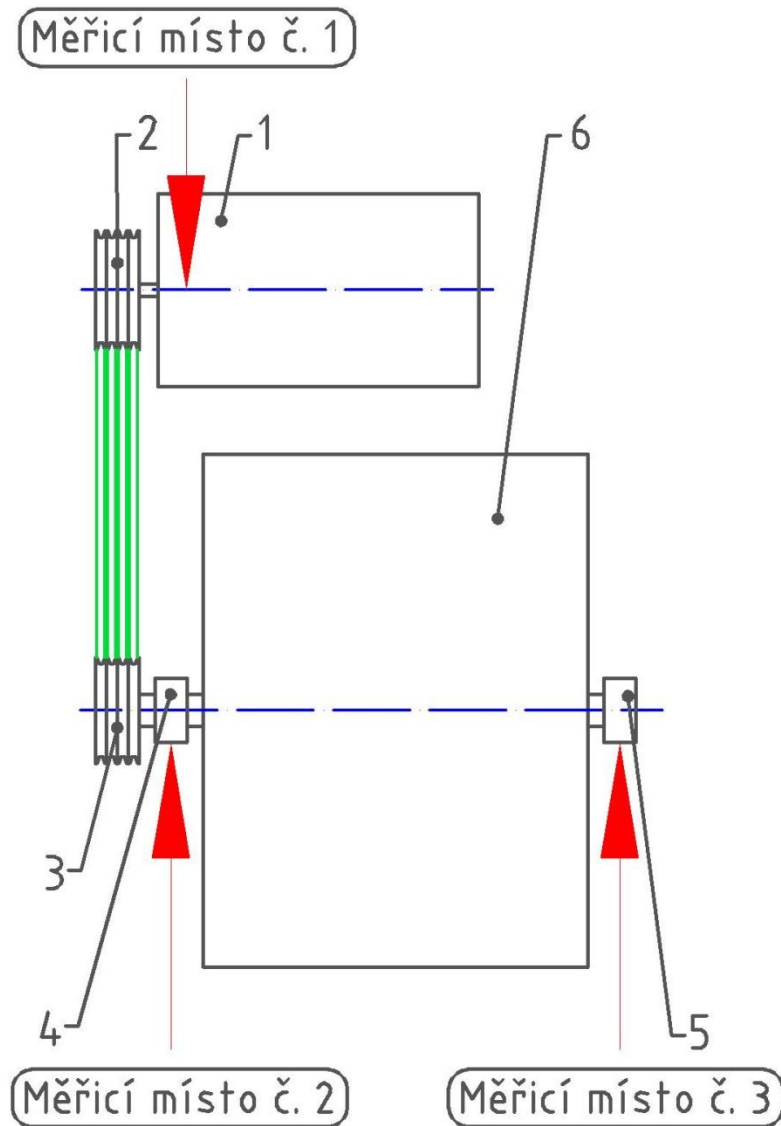
2.1 Obecné informace o lince na výrobu dámských vložek SV4

- Označení: SV4 [5]



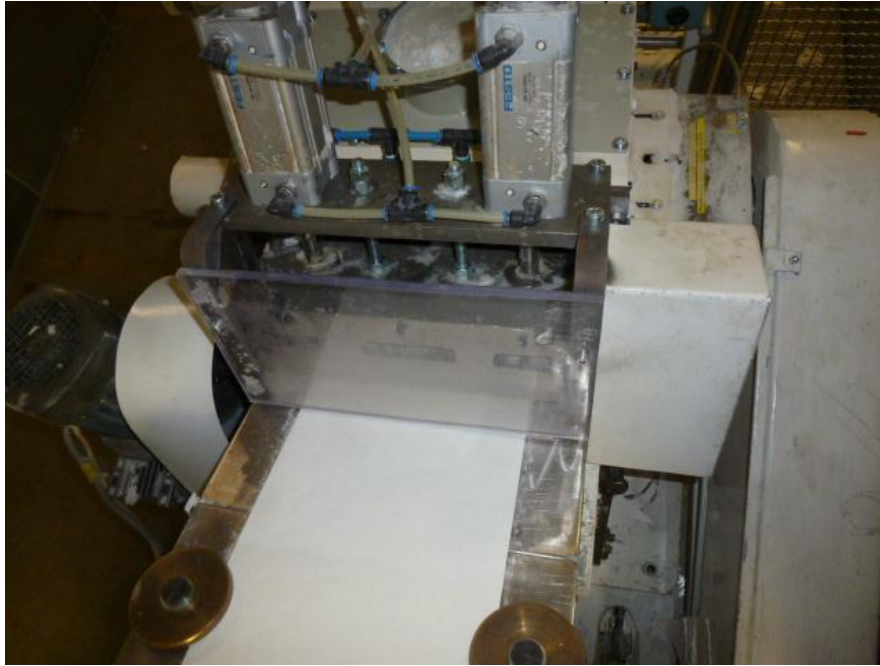
Obrázek 2: Schéma linky SV4

Obrázek 2 ukazuje schéma linky na výrobu dámských vložek, jež je tvořena několika propojenými sekcemi [5]. Na tomto stroji byla vyměněna ložiska ve mlýně a výstupem bakalářské práce je porovnání vibračních spekter před a po výměně ložisek včetně ložisek v elektromotoru. Na obr. 3 je pro názornost kinematické schéma mlýnu s elektromotorem, kde bylo provedeno měření.



Obrázek 3: Schéma mlýnu linky SV4

1 - Elektromotor, 2 - Hnací řemenice, 3 - Hnaná řemenice, 4 - Ložisko 1, 5 - Ložisko 2,
6 - Mlýn



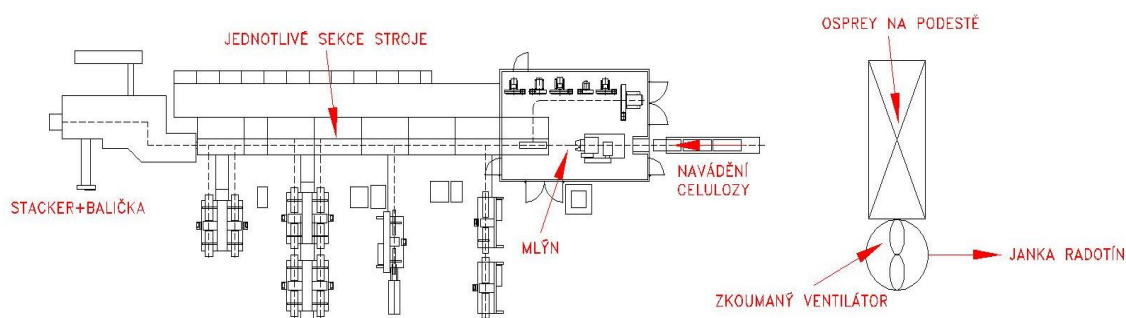
Obrázek 4: Mlýn SV4

Technické informace:

- Použitá ložiska ve mlýně: 2316 MC3
- Použitá ložiska na elektromotoru: 6209 2ZC3 [1]
- Otáčky na mlýně: 3294 ot./min.
- Otáčky elektromotoru: 2940ot./min.
- Převodový poměr: 0,89
- Výkon elektromotoru: 18,5 kW
- Průměr hnací řemenice: Ø186 mm
- Průměr hnané řemenice: Ø166 mm
- Délka řemenu: 2360 mm

2.2 Obecné informace o lince na výrobu dětských plen DP14

- Označení: DP14 [5]



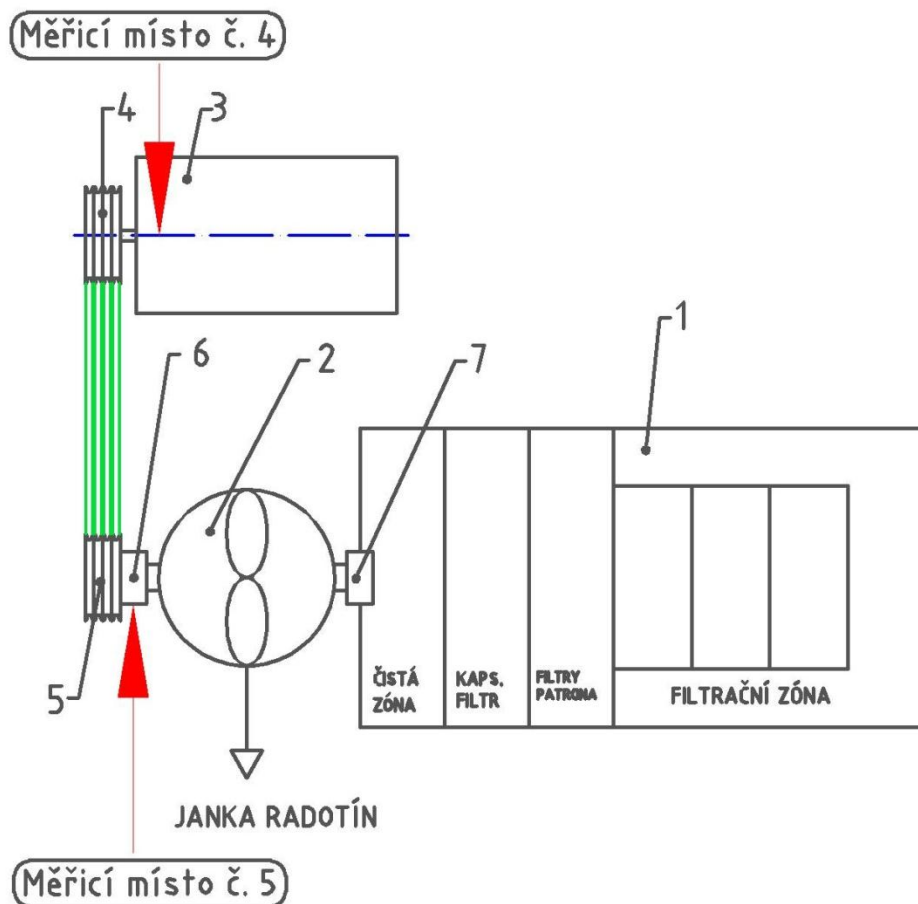
Obrázek 5: Schéma linky DP14

Schéma linky ukazuje obrázek 5. Celá linka je tvořena z několika vzájemně propojených sekcí [5], výroba je velmi podobná jako na stroji SV4, ale je rozšířena o několik sekcí, neboť výroba dětských plen je technologicky náročnější a vyžaduje si větší propracovanost.

Na stroji DP14 se bakalářská práce zaměřuje na ložiska, která jsou umístěna za bubnovým vzduchovým filtrem na ventilátoru, který odvádí vzduch do JANKA RADOTÍN, jež se následně vhná vyústěním do haly nebo mimo Ontex jako čistý vzduch. Proběhla série měření, kdy jsou porovnávána vibrační spektra v intervalu několika měsíců.



Obrázek 6: Ventilátor linky DP14



Obrázek 7: Schéma ventilátoru linky DP14

1 - Osprey, 2 - Ventilátor čistého vzduchu, 3 - Elektromotor, 4 - Hnací řemenice, 5 - Hnaná řemenice, 6 - Ložisko 1, 7 - Ložisko 2

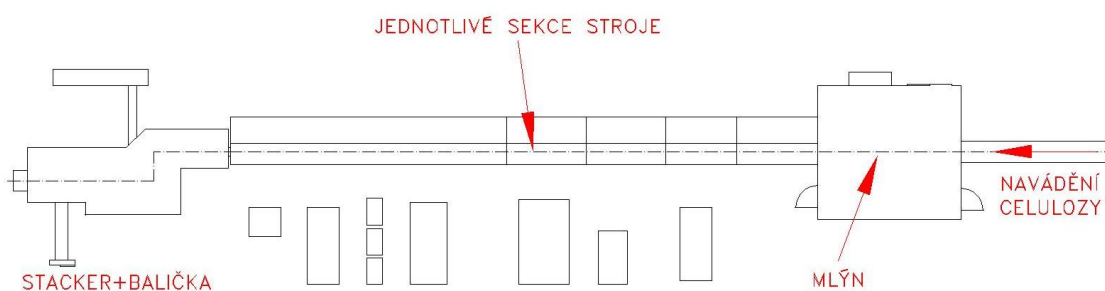
Technické informace:

- Použitá ložiska na ventilátoru: 1-15/16 (palcové ložisko firmy Link-Belt)
- Použitá ložiska na elektromotoru: 6212 ZC3 [1]
- Otáčky ventilátoru: 2497 ot./min.
- Otáčky elektromotoru: 1465 ot./min.
- Převodový poměr: 0,59
- Výkon elektromotoru: 30 kW
- Průměr hnací řemenice: 352 mm
- Průměr hnané řemenice: 210 mm
- Délka řemenu: 3150 mm

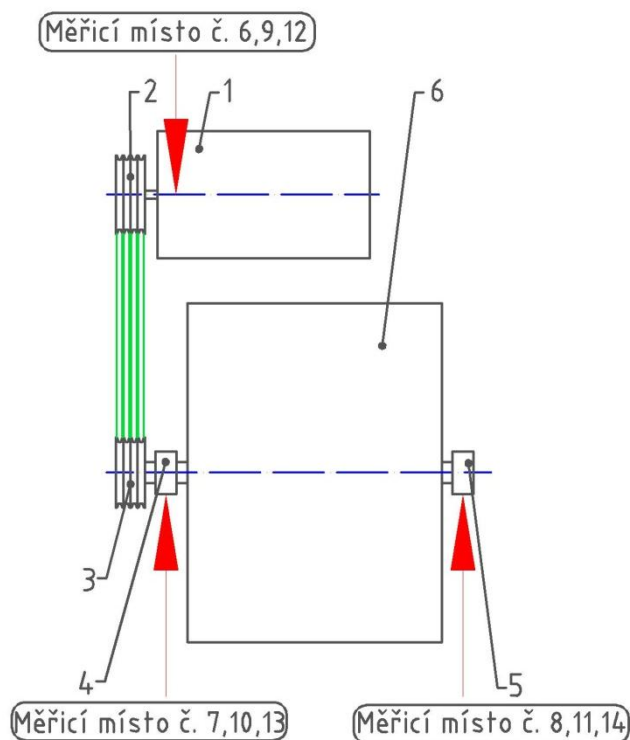
2.3 Obecné informace o linkách na výrobu dětských plen DP11, DP12, DP13

- Označení: DP11, DP12, DP13 [5]

Tyto stroje jsou prakticky totožné s linkou DP14, neboť i zde linka vyrábí dětské pleny. Na těchto strojích bylo provedeno porovnání všech ložisek na mlýně a v elektromotorech, jelikož všechny technické parametry strojních součástí jsou stejné.



Obrázek 8: Schéma linky DP11, DP12, DP13



Obrázek 9: Schéma mlýnu linky DP11, DP12, DP13

- 1 - Elektromotor, 2 - Hnací řemenice, 3 - Hnaná řemenice, 4 - Ložisko 1, 5 - Ložisko 2,
6 - Mlýn



Obrázek 10: Měření ložiska mlýnu DP11, DP12, DP13

Technické informace:

- Použitá ložiska ve mlýně: 2316 MC3
- Použitá ložiska na elektromotoru: 6213 ZC3 [1]
- Otáčky mlýnu: 3300 ot./min.
- Otáčky elektromotoru: 2960 ot./min.
- Převodový poměr: 0,9
- Výkon elektromotoru: 45 kW
- Průměr hnací řemenice: 243 mm
- Průměr hnané řemenice: 219 mm
- Délka řemenu: 2240 mm

3 VLIV KVALITY MONTÁŽE VALIVÝCH LOŽISEK NA SPOLEHLIVOST A ŽIVOTNOST STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

Na trvanlivost ložiska mají vliv aspekty, jako jsou přesnost výroby, zatížení ložiska (statické, dynamické) v provozu, použité mazivo ložiska, nedokonalé těsnění. Dále má na skutečnou trvanlivost, spolehlivost a životnost ložiska také vliv kvality montáže.

3.1 Axiální a radiální vůle u radiálních valivých ložisek

Všechna ložiska mají určité vnitřní axiální a radiální vůle, které mohou ovlivňovat například dynamické poměry. [10]

Dělí se na:

- vnitřní vůle nezamontovaného ložiska [10]
- vnitřní vůle zamontovaného ložiska v klidu [10]

Pochopitelně nejdůležitější je pro chod stroje vnitřní vůle namontovaného ložiska za ustálených provozních podmínek, která je nazývána jako provozní vůle. [10]

Na vnitřní radiální vůli je závislá vnitřní axiální vůle ložiska, která se vypočítá dle empirických vztahů: [10]

- pro jednořadá kuličková ložiska

$$V_a = \sqrt{(0,14 \cdot V_r \cdot d_0)} \quad (1)$$

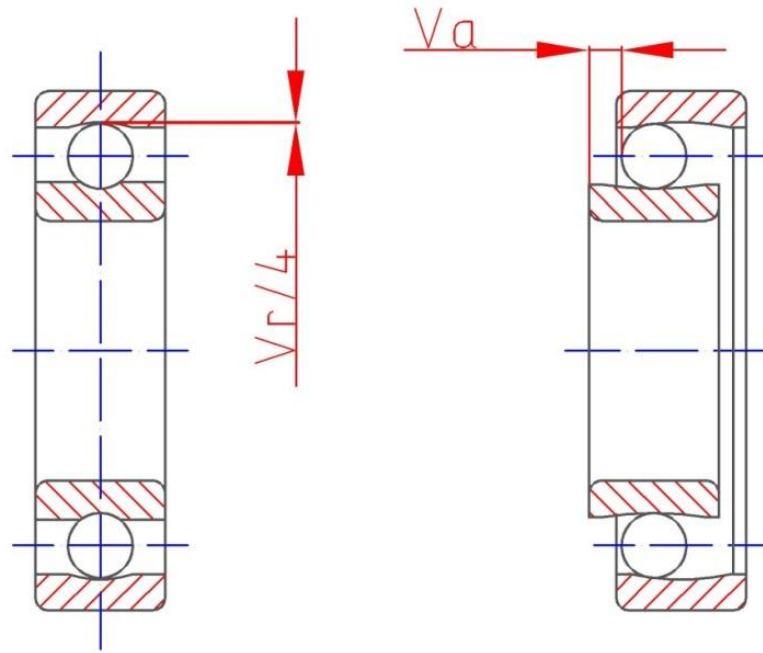
- pro dvouřadá kuličková ložiska

$$V_a = \cot \alpha = V_r \cdot \left(\frac{1,5}{e}\right) \quad (2)$$

- pro dvouřadá soudečková ložiska

$$V_a = V_r \cdot \left(\frac{1,5}{e}\right) \quad (3)$$

Vzorce (1) – (3) dle zdroje [2]



Obrázek 11: Axiální a radiální vůle ložiska [2]

3.2 Provozní vůle

Provozní vůle je chápána jako hodnota, o kterou se hřídel přenášející výkon může posunout proti vnějšímu kroužku namontovaného ložiska v radiálním směru. [10]

Provozní vůle je určena odečtením změny vůle Δs od vnitřní radiální vůle namontovaného ložiska. Změna vůle Δs je dána součtem změny vyvolané rozdílem teplot a změny vyvolané lícováním, tedy: [10]

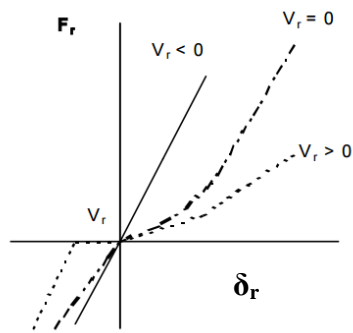
$$\Delta s = \Delta s_T + \Delta s_L, \text{ dle zdroje [2]} \quad (4)$$

Jedná-li se o provozní vůli za standardních podmínek, jako je rovnoměrné rozložení teplot, správné uložení vnitřního a vnějšího kroužku s přesahem, nulový průhyb hřídelů či sousost hřídelů, mluvíme o tzv. normální provozní vůli. V ostatních případech se provozní vůle volí větší nebo menší dle daných podmínek, jež se nedají označit jako normální podmínky. [10] [7]

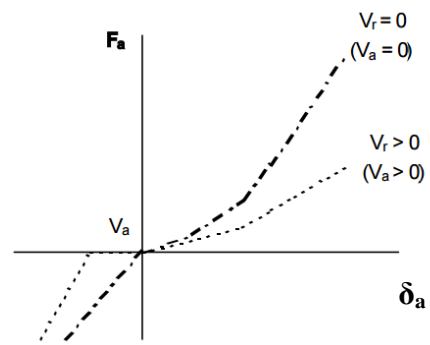
3.3 Vliv vůle na přesnost uložení

Časový průběh zatížení v radiálním a axiálním směru není konstantní, což zapříčiňují dynamické poměry v provozních teplotách. Vliv vůlí na uložení znázorňuje následující obr. 12. [2]

Vliv provozní vůle na přesnost



Vliv vůle na uložení



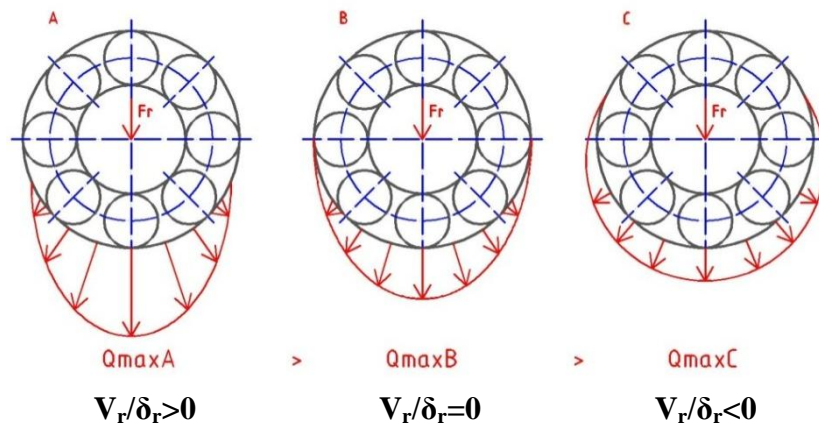
Obrázek 12: Vliv provozní vůle V_r a V_a radiálního kuličkového ložiska na jeho charakteristiku v radiálním a axiálním směru. [2]

$V_r < 0$ - ložisko s předpětím

3.4 Vliv vůle na trvanlivost ložiska

Vliv radiální vůle na trvanlivost ložiska se nejvíce projevuje u menších zatížení společně s většími radiálními vůlemi. [2]

Jestliže je radiální vůle $v_r > 0$, pak vnější radiální zatížení radiálního ložiska přenáší menší počet valivých elementů než je polovina všech valivých těles. Je-li radiální vůle $v_r < 0$, pak vnější radiální zatížení radiálního ložiska přenáší větší počet valivých elementů než je polovina všech valivých těles, a proto klesá největší zatížení valivého tělesa Q_{max} , které udává, maximální dotykové napětí a trvanlivost ložiska, viz obr. 13. [2]



Obrázek 13: Vliv provozní radiální vůle radiálního valivého ložiska na rozložení sil na valivá tělesa při stejném vnějším radiálním zatížení. [2]

δ_r – radiální pružná deformace

4 PŘÍČINY POŠKOZENÍ VALIVÝCH LOŽISEK STROJŮ A ZAŘÍZENÍ

4.1 Selhání ložisek a jejich příčiny

Vzhledem k tomu, že jsou ložiska použita ve většině strojních zařízení, je kladen velký důraz na jejich kvalitu, spolehlivost a životnost ze strany zákazníka. Proto bylo postupem let vynalezeno mnoho druhů ložisek, a tak má zákazník velké množství výběru, což na druhou stranu zapříčiňuje obtížnost volby a tudíž musí konstruktér při navrhování strojních součástí proniknout do problematiky ložisek, která se tím stává vědním oborem. Pochopitelně díky velkému využití této strojní součásti vzniklo spoustu konkurenčních firem, které na trhu bojují o své potenciální zákazníky a to je nutí k neustálému rozvíjení a vylepšování ložisek. [6]

Přes všechny pokroky a rozvoj nemohou být ložiska dokonalá a postupem času se všechna ložiska opotřebí. Mimo to se ložiska mohou opotřebit či porušit ještě dříve než je vypočítaná a předpokládaná doba správného chodu ložiska. Tento problém způsobuje mnoho faktorů jako např. příliš velké zatížení (statické, dynamické), přesnost výroby, špatná montáž, manipulace, nevhodně zvolené mazání, nedokonalé těsnění. Proto je nutné ložiska pravidelně kontrolovat, analyzovat a tím tak předejít předčasnému poškození, které může vést nejenom k poškození stroje, kde je ložisko namontováno, ale také k ohrožení života obsluhy. [6]



Obrázek 14: Porušené ložisko SKF 22213 EK/C3. Úplné zadření ložiska důsledkem defektu klece a následného vyosení soudečků z axiální polohy.

4.2 Trvanlivost ložiska

Valivá ložiska mají omezený čas provozu a funkčnosti, jež je ovlivňován dodržováním správným dodržováním provozních podmínek v chodu. Při špatných provozních podmínkách ložisko dosáhne mezní únavové zatížení a projeví se tím únava materiálu, záleží především na velikosti zatížení a otáčkách. Avšak i při ideálních podmínkách se ložisko postupem času opotřebuje a je nutné ho vyměnit. [6]

K únavě materiálu dochází procesem v důsledku dynamického dotykového napětí. Proto se po určité době v materiálu vytvoří trhlinky, které se dále šíří směrem k povrchu. U valivých ložisek, kdy dochází ke střetnutí valivého elementu s trhlínkou, vzniká odlamování materiálu, které nazýváme odlupování. U takto poškozeného ložiska se tak zvyšují vibrace, teplota, hluk a odporový moment a nakonec je porucha v takovém rozsahu, že se musí vyměnit. [6] [4]

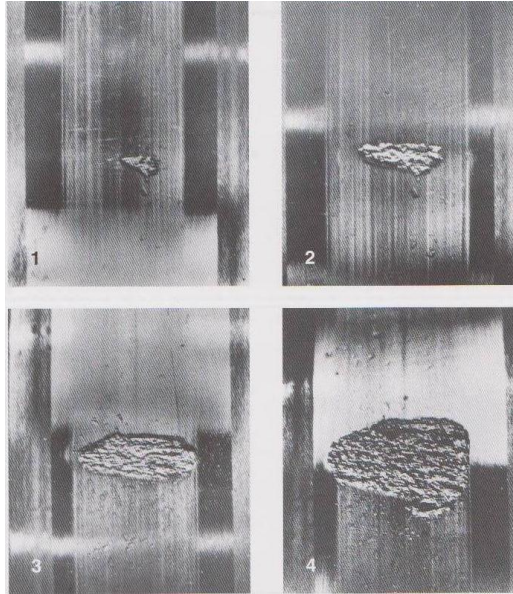
Trvanlivost ložiska, označovaná jako L nebo L_h je určena počtem otáček do té doby, dokud nezačne odlupování. Je vyjadřována buď počtem otáček, nebo dobou chodu v jednotkách času, nejčastěji hodinách. Po uplynutí trvanlivosti však zpravidla bývá dostatek času pro přípravu výměny za nové ložisko. [4]

Laboratorními zkouškami je však zjištěn velký rozptyl trvanlivostí při použití stejného typu ložiska i jejich zatížení. Proto se v praxi udává trvanlivost pomocí počtu pravděpodobností. Je zavedena základní trvanlivost L_{10} (L_{h10}), která určuje pravděpodobnost 10%, že se ložisko může porušit ještě před základní vypočítanou dobou trvanlivosti. [4]

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p, \text{ dle zdroje [4]} \quad (5)$$

nebo v hodinách

$$L_{h10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \cdot \frac{10^6}{60 \cdot n}, \text{ dle zdroje [4]} \quad (6)$$



Obrázek 15: Progresivní průběh odlupování [6]

4.3 Jednotlivé typy poškození ložisek

Typy poškození ložisek se dají rozdělit na primární a sekundární. Nejprve vznikne primární porucha, která má za následek poruchu sekundární. Pochopitelně zvýšený hluk či zvýšenou teplotu nebo vnitřní vůli může způsobovat pouze primární poškození, avšak nejčastěji donutí provozovatele vyměnit porušené ložisko, které vykazuje kombinaci primárních a sekundárních poškození. Typy poškození valivých ložisek se dají tedy rozdělit na: [6]

1. Primární poškození [6]
 - Opotřebení
 - Vtisky
 - Prokluzování
 - Porušení povrchu
 - Koroze
 - Poškození elektrickým proudem

2. Sekundární poškození [6]
 - Odlupování
 - Trhliny

4.3.1 Opotřebení

4.3.1.1 Poškození abrazivními částicemi

Příčinou je nedokonalá čistota před a během montáže, neúčinné těsnění, znečištěné mazivo, ale mohou vznikat i během chodu ložiska v provozu. Malé abrazivní částice, jako např. piliny, třísky uvnitř valivého ložiska způsobují trvalé nežádoucí opotřebení oběžných drah, valivých elementů a klece. Povrchy se tak zdrsňují a dostanou matný vzhled. Velikost poruchy záleží nejenom na otáčkách ložiska, působících silách ale také na mechanických a chemických vlastnostech abrazivních částic (nečistot). Opotřebení součástí ložiska se progresivně zvyšuje, neboť vzrůstá počet částic otěru, a tak se poškození neustále urychluje až do bodu, kdy je žádoucí ložisko vyměnit. Pokud je tato závada diagnostikována včas, kdy jsou hodnoty teploty a vibrací relativně mírně zvýšené, může se ložisko odstavit, správně vyčistit a opětovně namontovat na stroj, kde bude provozováno. Poškození tohoto typu se dá jednoduše předejít několika opatřeními před namontováním, například vybalením ložiska z výrobního obalu těsně před montáží, udržováním čistoty v dílně, používáním čistých nástrojů a v neposlední řadě otřením mazacích hlavic, přefiltrováním oleje a pečlivým zkontrolováním těsnění použitého ložiska. [6]



Obrázek 16: Vnější kroužek soudečkového ložiska s oběžnými drahami opotřebovanými abrazivními částicemi. Hranici mezi opotřebovanými a neopotřebovanými plochami lze rozpoznat hmatem. [6]

4.3.1.2 Opotřebením nedostatečným mazáním

Jestliže je v ložisku příliš málo maziva nebo mazivo ztratí mazací účinky, pak dochází k degradaci součástí ložiska. Zpočátku se stykem kov na kov obrousí mikroskopické vrcholky nerovností funkčních ploch, které jsou pozůstatkem výrobních procesů. Některé z nich jsou rozválcovány a některé jsou odtrženy, čímž přispívají opotřebením způsobené abrazivními částicemi, viz kapitola 4.3.1.1. Po vypotřebování veškerého maziva se ale exponenciálně zvýší teplota a materiál změní svou barvu na modrou nebo hnědou. Při extrémním nárůstu teploty se může i poškozené ložisko zadřít. Ložiska je tedy nutné častěji kontrolovat a domazávat. [6]

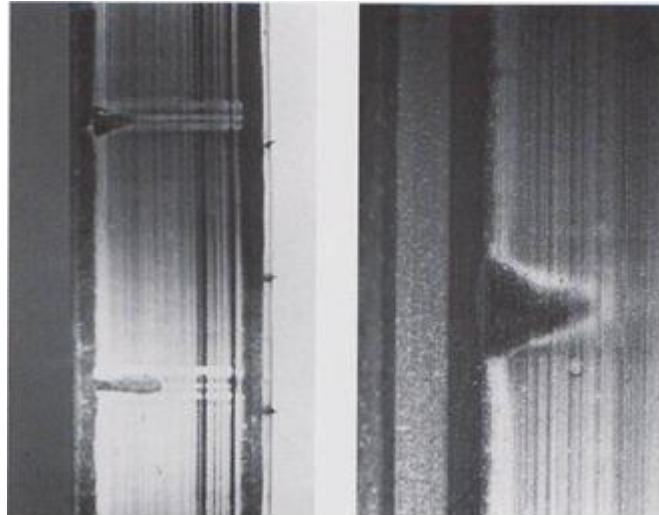
4.3.1.3 Opotřebením vibracemi

Je-li ložisko odstaveno a leží na podložce dobře přenášející vibrace, vytvářejí se na oběžných drahách otisky po valivých tělesech. Je totiž odstraněn mazací film v místě elementu a dochází ke styku kov na kov. V místě vtisku se může objevit i koroze. Jako příklad lze uvést elektromotor, na němž namontovaná ložiska neporušeně fungovala řádově několik let. Po opotřebování a výměně za nová ložiska připravená na podložce elektromotoru špatně absorbující vibrace, vydržela přibližně několik dnů. Předjetí tomuto problému se dá použitím vhodně absorbujícího základu, záměnou za kuličková ložiska, která toto opotřebením snáší lépe. [6]

4.3.2 Vtisky

4.3.2.1 Vtisky způsobené chybnou montáží nebo přetížením

Vtisky způsobuje montážní síla působící na nesprávný kroužek, příliš velká montážní síla nebo velké zatížení nepohybujícího ložiska, což je spjato s předchozí kapitolou, viz 4.3.1.3. Pro vyloučení možnosti poruchy vtiskem je nutné dodržovat, aby montážní síla působila na správný kroužek s přesahem, působením menšího zatížením případně použitím ložiska s vyšší statickou únosností. [6]



Obrázek 17: Příklad poškození způsobeného nesprávnou manipulací. Vlevo snímek valivého ložiska ukazuje dva vtisky umístěné na obvodu proti sobě. Na snímku vpravo váleček naopak způsobil vtisk na oběžné dráze vnitřního kroužku. [6]

4.3.2.2 *Vtisky způsobené cizími částicemi*

Toto poškození vzniká průnikem cizích částic do konstrukce ložiska během montáže nebo chodu, jako jsou otřepy, nečistoty, třísky, útržky tenkého papíru, celulózy, bavlněného odpadu atd. Je tedy nutné dodržovat čistotu v montážní dílně, používat čisté nástroje a čisté textilie sloužící k otření ložiska. [6]



Obrázek 18: Vtisky způsobené částicemi nečistot na jedné oběžné dráze ložiska s čárovým stykem - zvětšeno 50x. [6]

4.3.3 Prokluzování

4.3.3.1 Prokluzování valivých těles na oběžných drahách

Při nerovnoměrném zatížení, či větších vůlích ložiska se valivý element v nezatížené části může otáčet méně než v místě, které je zatížené. Dochází zde ke zrychlení a tím těleso prokluzuje. Zvolením vhodnějšího maziva nebo zmenšením vnitřní vůle zamezíme prokluzování. [6]

4.3.3.2 Místa poškozená oděrem

Může se stát, že při montáži je kroužek s valivými elementy a klecí namontován šikmo vůči druhému kroužku a zamezí se otáčení ložiska. Valivá tělesa vytvoří rýhy na oběžných drahách po celém obvodu a kroužek či valivé těleso je tak namáháno otěrem. Žádoucí je přesnost při montáži. [6]



Obrázek 19: Válečkové ložisko s pruhy otěru na oběžné dráze vnitřního kroužku a na válečcích. Oděr byl vyvolán válečky, které byly namontovány našikmo, přičemž nebylo otáčeno ložiskem. [6]

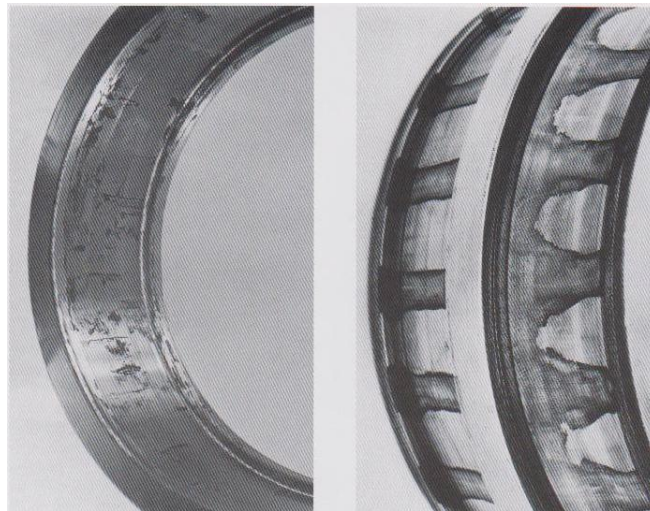
4.3.4 Porušení povrchu

Na rozdíl od únavy materiálu, kde vznikají podpovrchové trhlinky, jsou tyto trhlinky na povrchu. Jsou vyvolány malým množstvím mazivového filmu. Povrchové trhlinky se postupem času zvětšují, podporují také růst podpovrchového porušení. Častějším domazáváním tuto poruchu lze odstranit. [6]

4.3.5 Koroze

4.3.5.1 Hlubková koroze

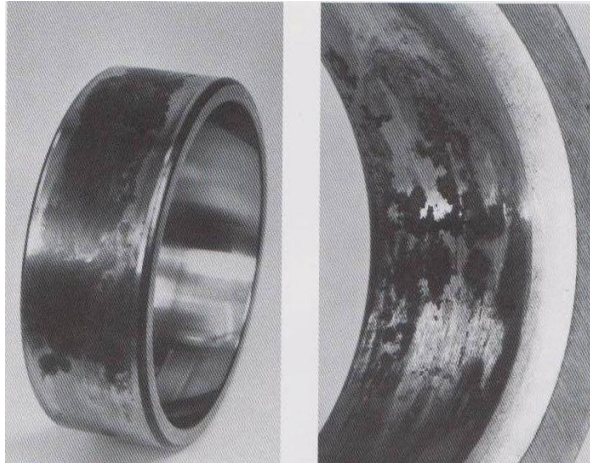
Přestože se na ložisku vytvoří vlivem oxidů obsažených ve vzduchu tenká ochranná vrstva, voda nebo korozivní látky v provozu tento ochranný film překonají a vyvolají na materiálu vyleptaná místa a postupně se změní na hloubkovou korozi. Kyselé kapaliny mají větší dopad na rychlost koroze, než jsou kapaliny zásadité. Problematická je také slaná voda (např. mořská voda), kde sůl společně s vodou vytvoří elektrolyt a vyvolají galvanickou korozi. Je tak důležité ložiska v těsném kontaktu s kapalinami co nejlépe utěsnit a použít maziva, které odolávají proti korozi. [6]



Obrázek 20: Vlevo hloubková koroze na vnějším kroužku válečkového ložiska. Vpravo rozsáhlé poleptání vodou na vnitřním kroužku soudečkového ložiska. [6]

4.3.5.2 Styková koroze

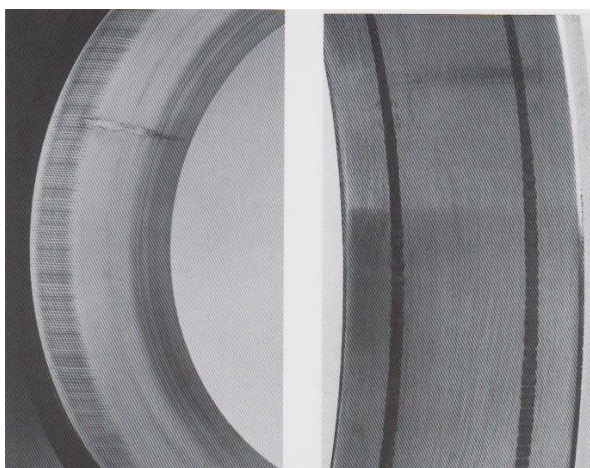
Nejčastěji ji způsobuje uložení ložiska, které je příliš volné, proto dochází k relativně velkým pohybům mezi kroužkem a hřídelí či tělesem. Opět může docházet k uvolňování mikroskopických abrazivních částic a celý proces se více urychluje, viz 4.3.1.1. Toto porušení má špatný vliv i na rozložení zatížení, a pokud provozovatel nezlepší dosedací plochy, ložisko bude nepoužitelné. [6]



Obrázek 21: Vlevo styková koroze na vnějším kroužku soudečkového ložiska. Vpravo rozsáhlá styková koroze v díře naklápěcího kuličkového ložiska. [6]

4.3.6 Poškození způsobená průchodem elektrického proudu

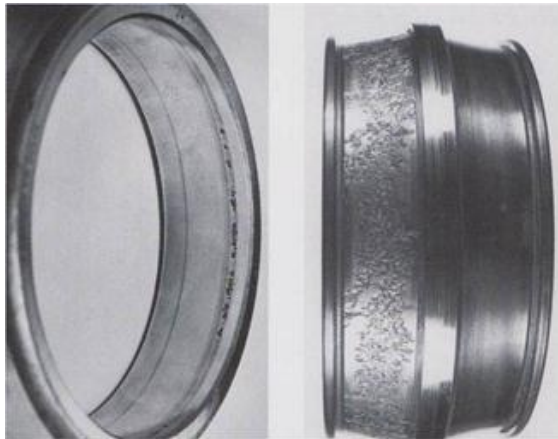
Projde-li elektrický proud z jednoho kroužku přes valivý element do druhého kroužku, vytvoří se na oběžných drahách drážky a valivá tělesa v místě průchodu změni svou barvu. Toto porušení je tak snadno zaměnitelné s poškozením vibracemi. Rozdíl je v nezbarvené drážce a valivý element je porušený. Při průchodu elektrickým proudem dojde k velkému teplotnímu šoku a v zasaženém místě se materiál ohřeje na teplotu tavení a vzniknou zde drážky nebo krátery. Pro odstranění průchodu elektrického proudu se může vhodněji svést elektrický proud nebo použitím izolovaného ložiska. [6]



Obrázek 22: Vlevo drážkování způsobené průchodem elektrického proudu na vnějším kroužku soudečkového ložiska. Vpravo vnější kroužek naklápěcího kuličkového ložiska poškozený průchodem elektrického proudu. [6]

4.3.7 Odlupování

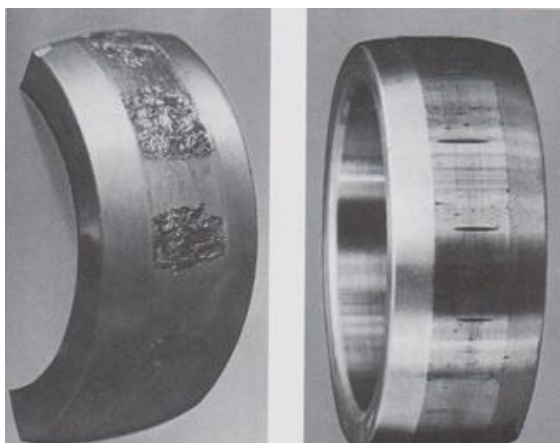
Odlupování patří mezi sekundární poruchy a signalizuje tak konec své životnosti důsledkem únavy materiálu. Dalšími důsledky jsou primární poruchy, např. průchodem elektrického proudu (4.3.6.), korozí (4.3.5.), prokluzováním (4.3.3.), vtisky (4.3.2.) atd. Takto poškozené ložisko ještě není zcela nepoužitelné, jestliže je odhaleno v raném stádiu degradace, proto se musí každé ložisko často analyzovat, měřit vibrace, neustále kontrolovat teplotu a hlučnost. [6]



Obrázek 23: Vlevo. Na vnější kroužek naklápačícího kuličkového ložiska působí nadměrné axiální zatížení. Odlupování materiálu v zatížené oblasti. Vpravo vnitřní kroužek soudečkového ložiska poškozený odlupováním materiálu. Rozsah poškození na celé oběžné dráze napovídá, že axiální zatížení bylo velmi vysoké v porovnání s radiálním zatížením. [6]



Obrázek 24: Odlupování (tmavá plocha) způsobené sousedními vtisky – 100x zvětšení [6]



Obrázek 25: Vlevo vnitřní kroužek válečkového ložiska s rozsáhlým poškozením odlupováním způsobeným oděrem. Vpravo vnitřní kroužek válečkového ložiska se stopami oděru v místech, jejichž vzdálenost odpovídá rozteči valivých těles.

Poškození bylo způsobeno nesprávnou montáží. [6]

4.3.8 Trhliny

Nejčastější spouštěč je nesprávná manipulace při montáži nebo demontáži, kdy je na některý z kroužků vyvinuto příliš velké zatížení a vytvoří se tak mikrotrhliny. Po uvedení ložiska do chodu se trhlinky rozšiřují, zvýší odpor valení, vzniknou rázy těles, teplota stoupne a vibrační analýza graficky znázorní vyšší hodnoty frekvencí. Ložisko je pak nutné vyměnit. Opatřením je častější a pečlivější kontrola. [6]



Obrázek 26: Vlevo prasklý vnitřní kroužek soudečkového ložiska. Vpravo vnitřní kroužek soudečkového ložiska s odlomenou částí vnější příruby. Poškození bylo způsobeno přímým úderem kladiva. [6]

4.3.9 Poškození klece

Zvláštním případem je porucha klece, u které jsou vadné i ostatní součásti ložiska, a proto se obtížně specifikuje příčina. Velmi často jsou na vině vibrace, vysoké otáčky atd. Dále také nesouosost kroužků po montáži. Valivé těleso tak nekoná pohyb po kružnici, ale opisuje elipsu. Proto v určitém místě působí na klec nežádoucí zatížení a způsobí lom. [6]

4.4 Způsoby detekce závad valivých ložisek strojů a zařízení

Ložiska je nutné pravidelně kontrolovat, a protože není reálné ložiska často demontovat a podrobovat detailnímu zkoumání zatímco je strojní zařízení odstavené, existuje mnoho metod, které dokáží ložiska dostatečně přesně diagnostikovat, aniž by byl stroj zastaven a zabránit tak katastrofálním následkům poškozeného ložiska. Přestože je metod hned několik, mají společný základ. Ten spočívá v nárazech poškozeného elementu spolu s dalšími částmi ložiska, jež vytváří vibrace. [9] [10]

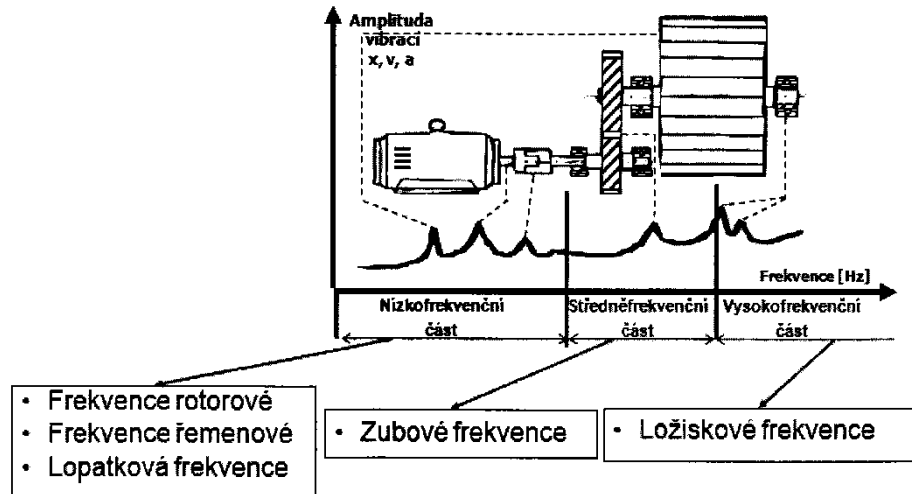
4.4.1 Metody diagnostiky valivých ložisek

- Obálková analýza
- Rázové pulsy (SPM)
- Kinetická dráha hřídele (BCU)
- Kurtosis (K)
- Špičkové energie (SE)
- $K(t)$ parametr
- Činitel výkmitu K_v
- Ultrazvukové emise
- SEE

4.4.1.1 Obálková analýza

Metoda analýzy a detekce závad obálkovou metodou použitá pro tuto bakalářskou práci dokáže indikovat problém prakticky okamžitě. Ve spojení s FFT analýzou je možné přesné určení závady části ložiska, jako je vnější kroužek, vnitřní kroužek, valivý element či klec ložiska, jelikož každá část má svoji unikátní relativní rychlost

vzhledem k hřídeli. Pochopitelně pomocí obávkové analýzy a výpočtu určitých chybových frekvencí součástí stroje je možné odhalit další závady, např. řemenových převodů, ventilátorů, turbín, ozubených soukolí, atd. [10] [9]



Obrázek 27: Hlavní zdroje buzení a místa jejich identifikací ve spektru vibrací [9]

Nejprve se naměřený signál filtruje pásmovou propustí, kde jsou odstraněny nežádoucí šумы a necyklické vibrace. Na počátku defektu sice závada vykazuje sled ostrých impulsů, ty však mají nízkou kinetickou energii. Zde proto může nastat potíž v odhalení poruchy ložiska, jež mohou být ztraceny v šumu. Poté jsou vyšší frekvence odděleny od nízkofrekvenčních vibrací a jsou zvýrazněny a převedeny do formy obálek. Měřicí zařízení následně zobrazí závislost amplitudy zrychlení (a_0) na frekvenci (f) a specializovaný technik může za pomoci vzorců na chybové frekvence určit přesné porušení části ložiska. [10] [9]

Poruchová frekvence odpovídající závadě vnějšího kroužku

$$f_{Lo} = \frac{z}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d_0}{d_s} \cdot \cos \alpha\right), \text{ dle zdroje [9]} \quad (7)$$

Poruchová frekvence odpovídající závadě vnitřního kroužku

$$f_{Li} = \frac{z}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{d_0}{d_s} \cdot \cos \alpha\right), \text{ dle zdroje [9]} \quad (8)$$

Poruchová frekvence odpovídající závadě kuličky nebo válečku

$$f_{Lv} = f_r \cdot \frac{ds}{2d_0} \cdot \left[1 - \left(\frac{d_0}{d_s} \cdot \cos \alpha \right)^2 \right], \text{ dle zdroje [9]} \quad (9)$$

Poruchová frekvence odpovídající závadě klece

$$f_{Lk} = \frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{d_0}{d_s} \cdot \cos \alpha \right), \text{ dle zdroje [9]} \quad (10)$$

Poruchová frekvence řemenice

$$f_{\check{R}} = \frac{\pi \cdot D_1}{L} \cdot f_{r1} = \frac{\pi \cdot D_2}{L} \cdot f_{r2}, \text{ dle zdroje [9]} \quad (11)$$

Poruchová frekvence ventilátoru

$$f_{Lop} = f_r \cdot z_L, \text{ dle zdroje [9]} \quad (12)$$

Efektivní hodnota zrychlení

$$a_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a^2(t) dt}, \text{ dle zdroje [9]} \quad (13)$$

4.4.2 Projevy ve spektrech vibrací

Vady jednotlivých vibrací součástí ložisek se různě projevují v FFT analýze. Každá porucha se vyznačuje specifickým signálem. Může tedy dojít k poruše vnějšího kroužku, vnitřního kroužku, valivého tělesa, klece nebo se zkombinují poruchy několika již zmíněných komponent najednou. Často porucha začíná u vnitřního či vnějšího kroužku. Z ní vzniká porucha valivého tělesa a končí poškozením klece ložiska. [8]

4.4.2.1 Vada vnějšího kroužku

V FFT spektru se vyznačuje vypočtenou poruchovou frekvencí pro vnější kroužek f_{Lo} a její harmonické složky. V časovém průběhu signálu se tato porucha vyskytuje mezi jednotlivými impulsy vady f_{Lo} , která se rovná $1/f_{Lo}$. Impulsy se opakují pokaždé za jednu otáčku hřídele. [8]

4.4.2.2 Vada vnitřního kroužku

V FFT spektru se vyznačuje vypočtenou poruchovou frekvencí pro vnitřní kroužek f_{Li} a její harmonické složky navíc s RPM postranními pásmy. V časovém průběhu signálu se porucha nachází mezi jednotlivými impulsy vady f_{Li} , jež se rovná $1/f_{Li}$. Impulsy se opakují pokaždé za jednu otáčku hřídele. Vada vnitřního kroužku je velmi podobná vadě vnějšího kroužku ložiska a harmonický obsah může sloužit jako přibližné určení velikosti vady. Pokud se otáčí vnitřní kroužek a vada je mimo oblast zatížení, mohou se přestat otáčet valivá tělesa. [8]

4.4.2.3 Vada valivého tělesa

V FFT spektru se vyznačuje vypočtenou poruchovou frekvencí pro valivé těleso f_{Lv} a její harmonické složky navíc s postranními pásmy klece. Impulsy se opakují pokaždé za jednu otáčku hřídele a v časovém průběhu signálu se porucha nachází mezi jednotlivými vadami f_{Lv} , jež se rovná $1/f_{Lv}$. Zprvu se vada projevuje poruchovou frekvencí f_{Lv} . Jestliže se vada valivých těles zvětšuje, rostou i postranní pásma. Jestliže je porušeno více valivých těles, tak se frekvence rovná součinu počtu valivých elementů a poruchové frekvence. [8]

4.4.2.4 Vada klece

Stejně jako u výše zmíněných se ve FFT spektru vyznačuje vypočtenou poruchovou frekvencí pro klec FTF. Amplituda této frekvence je zpočátku poměrně nízká, avšak následující amplitudy jsou postupně vyšší. Defekt klece se nemusí vždy jevit jako vypočtená poruchová frekvence pro klec, nýbrž může často vypadat jako postranní pásmo f_{Lv}, f_{Li}, f_{Lo} . [8]

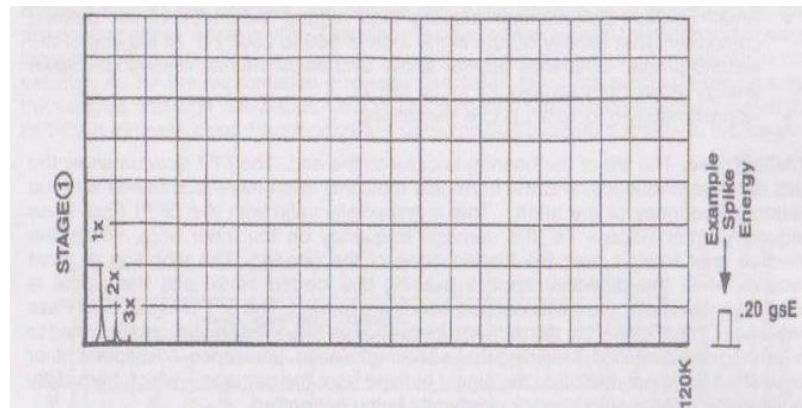
4.4.3 Etapy poruch ložisek

Při poruše prochází ložisko čtyřmi etapami, které mají sestupnou tendenci od etapy, která je únosná až po etapu, jež je kritická a zaleží na rozhodnutí mechanika, kdy správně rozpozná poruchu a včas ložisko zamění za nové. [8]

4.4.3.1 Etapa 1

Na ultrazvukovém frekvenčním pásmu se porucha ložiska nachází v intervalu přibližně od 250 kHz do 350 kHz. Frekvence v tomto rozsahu jsou zaznamenávány

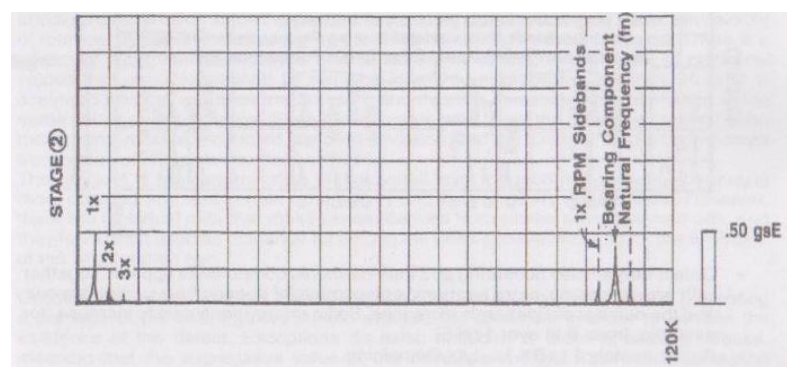
metodou Spike Energy (gSE), HFD (g), Shock pulse (dB). První etapa poruchy se objevuje především na oběžných drahách valivých těles, kde vznikají malé krátery, avšak vibrace, které tyto krátery generují, jsou tak malé, že nejsou zatím měřitelné. Pomocí technologie, kterou má firma SKF patentovanou, můžeme první etapu rozpoznat. Technologie zobrazuje detekovatelné signály, které jsou odvozovány z opakovaného místa dotyku na povrchu. Pokud se stav ložiska nadále zhoršuje, v FFT spektru se zobrazují harmonické násobky frekvence poškození. [8]



Obrázek 28: První etapa poruchy. Zbývá přibližně 10-20% trvanlivosti. [8]

4.4.3.2 Etapa 2

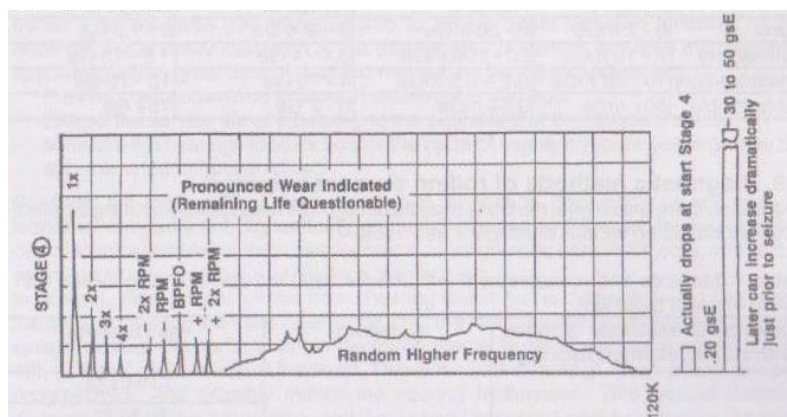
V této etapě stále není nutné ložisko měnit, je však důležité tomuto ložisku zvýšit pozornost a kontrolovat ho častěji. Dochází k postupné degradaci, jež se nazývá odlupování na oběžných drahách. Porucha je v první fázi stále lineární, ale ke konci se změnila na nelineární a projevuje se zvoněním ložiska, jelikož vytvářejí frekvence součástí ložiska, které se pohybují v rozmezí od 500 Hz do 2000 Hz. [8]



Obrázek 29: Druhá etapa poruchy. Zbývá přibližně 5-10% trvanlivosti. [8]

4.4.3.3 Etapa 3

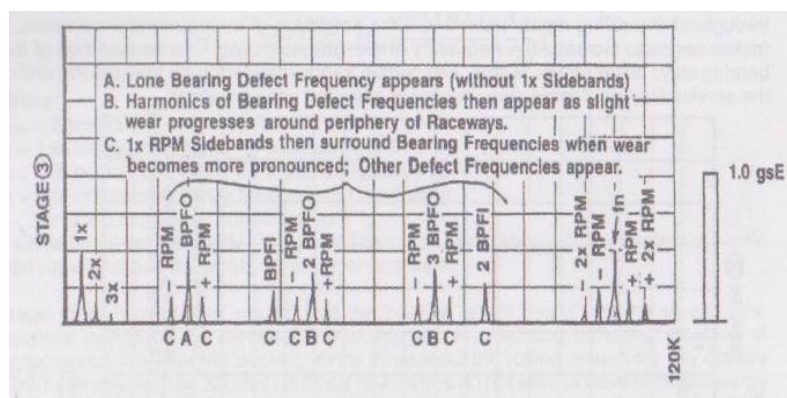
V této fázi se v FFT spektru již objevují chybové frekvence (BPFO, BPFI, FTF, BSF) společně s jejich harmonickými násobky a pochopitelně s rostoucím opotřebením se zvyšují i počty harmonických násobků chybových frekvencí včetně postranních pásem. Poruchy ve zmíněné etapě jsou již viditelné a ložisko se dostává do stavu, kdy je nutné ho vyměnit za nové. [8]



Obrázek 30: Třetí etapa poruchy. Zbývá přibližně 1-5% trvanlivosti. [8]

4.4.3.4 Etapa 4

Čtvrtou etapou se dostáváme do kritických hodnot a můžeme tím riskovat nejen vážnější závadu na strojním zařízení ale i zdraví zaměstnanců a ložisko musíme bezpodmínečně vyměnit. Vada je již dobře viditelná a zahřátí ložiska je vysoké. Převládají zde širokopásmové vysokofrekvenční šумы a jsou snadno rozpoznatelné frekvence poškození. [8]



Obrázek 31: Čtvrtá etapa poruchy. Zbývají přibližně hodiny-1% trvanlivosti. [8]

5 VYHODNOCENÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČÍTANÝCH HODNOT

5.1 Výpočty potřebných hodnot ložisek, řemenic, řemenů a chybových frekvencí

Pro výpočet chybových frekvencí ložiska (f_{Li} , f_{Lk} , f_{Lo} , f_{Lv}) je nutné určit průměr kuličky ložiska, roztečný průměr ložiska, počet kuliček ložiska, frekvenci, kontaktní úhel. Pro výpočet chybových frekvencí řemenic ($f_{\bar{R}}$) je potřeba znát vnější průměr řemenice, frekvenci, délku řemene. Pro výpočet chybové frekvence ventilátoru (f_{Lop}) je nutné určit frekvenci a počet lopatek. Dané hodnoty jsou zaneseny do následujících tabulek:

Tabulka 1: Potřebné hodnoty pro výpočet chybových frekvencí ložiska

LOŽISKA	SV4		DP11, DP12, DP13		DP14		Umělá porucha
	Elmotor	Mlýn	Elmotor	Mlýn	Elmotor	Ventilátor	Elmotor
Ložisko	6209 2ZC3	2316MC3	6213 ZC3	2316MC3	6212 ZC3	1 15/16	6204-2Z
Průměr kuličky [mm]	12,303	26,194	15,875	26,194	15,875	11,2	7,938
Roztečný průměr [mm]	65	125	92,5	125	85	63,875	33,5
Počet kuliček	10	13	11	13	10	14	8
Frekvence [Hz]	49	54,9	49,333	55	24,416	41,622	25
Kontaktní úhel [rad]	0	0,242	0	0,242	0	0	0

Tabulka 2: Chybové frekvence ložisek

CHYBOVÉ FREKVENCE	SV4		DP11, DP12, DP13		DP14		Umělá porucha
	Elmotor	Mlýn	Elmotor	Mlýn	Elmotor	Ventilátor	
f_{Li} [Hz]	291,373	429,450	317,898	430,232	144,880	342,441	123,696
f_{Lk} [Hz]	19,863	21,865	20,433	21,905	9,928	17,162	9,538
f_{Lo} [Hz]	198,627	284,250	224,765	284,768	99,280	240,267	76,304
f_{Lv} [Hz]	249,605	125,572	278,986	125,801	126,171	230,077	99,581

Tabulka 3: Potřebné hodnoty pro výpočet chybových frekvencí řemenic

ŘEMENICE, ŘEMEN	SV4		DP11, DP12, DP13		DP14	
	Hnací řem.	Hnaná řem.	Hnací řem.	Hnaná řem.	Hnací řem.	Hnaná řem.
Vnější průměr [mm]	186	166	243	219	352	210
Frekvence [Hz]	49	54,9	49,333	55	24,416	41,622
Převodový poměr	0,89		0,9		0,59	
Délka řemenu [mm]	2360		2240		3150	

Tabulka 4: Chybové frekvence řemenic

CHYBOVÉ FREKVENCE	SV4		DP11, DP12, DP13		DP14	
	Hnací řem.	Hnaná řem.	Hnací řem.	Hnaná řem.	Hnací řem.	Hnaná řem.
$f_{\text{Ř}}$ [Hz]	12,132		16,813		8,571	

Tabulka 5: Potřebné hodnoty pro výpočet chybových frekvencí lopatek ventilátoru

VENTILÁTOR	DP14
Výrobce	Howden
Označení	QBCA - 245
Počet lopatek	9
Frekvence [Hz]	41,622

Tabulka 6: Chybová frekvence lopatek ventilátoru

CHYBOVÁ FREKVENCE	DP14
f_{Lop} [Hz]	374,598

5.2 Grafické znázornění naměřených hodnot

Amplitudy zrychlení (a_0) byly zaznamenány na měřicím přístroji Microlog firmy SKF metodou obáلكové analýzy.



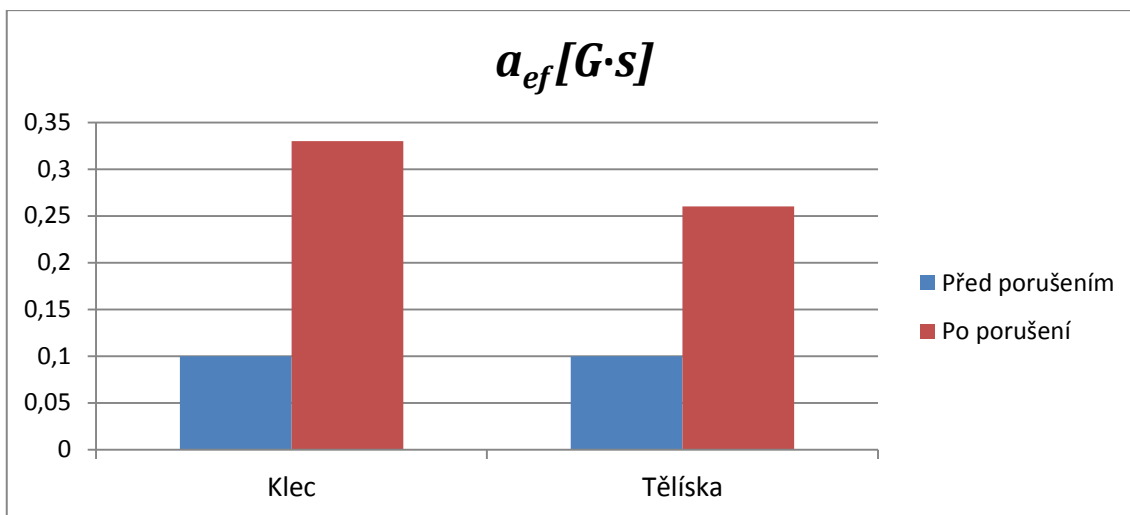
Obrázek 32: Měřicí přístroj Microlog firmy SKF

5.2.1 Umělá porucha

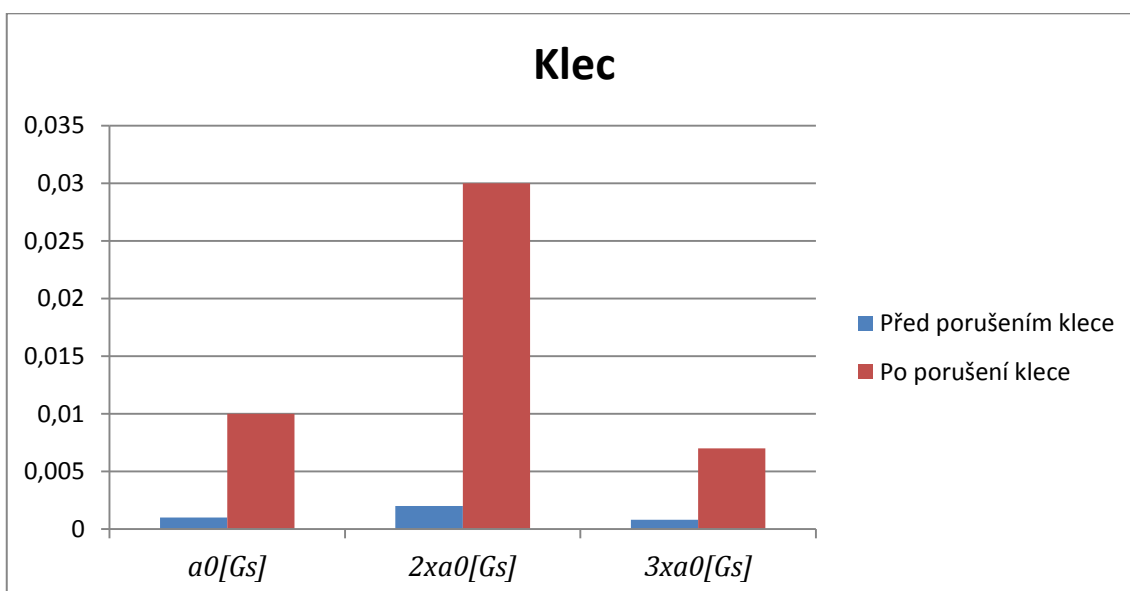
Nejprve bylo ložisko elektromotoru (Easymotors 750W) naměřeno bez všech okolních zásahů. Posléze se v ložisku za pomoci kladiva a klínu vytvořily umělé poruchy, které se projeví na kleci a tělískách.

Tabulka 7: Efektivní hodnota zrychlení a amplitudy zrychlení ložiska v elektromotoru před a po umělé poruše

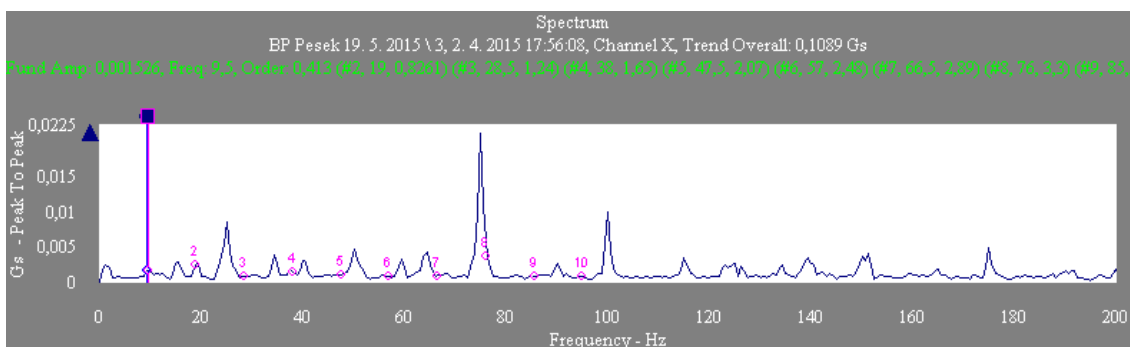
Umělá porucha	Klec			Tělíska		
	Před	Po	Zýšení [%]	Před	Po	Zýšení [%]
$a_{ef}[G\cdot s]$	0,1	0,33	30,3	0,1	0,26	38,46
$a_0[G\cdot s]$	0,001	0,01	10	0,0005	0,046	1,09
$2xa_0[G\cdot s]$	0,002	0,03	6,67	0,0005	0,017	2,94
$3xa_0[G\cdot s]$	0,0008	0,007	11,43	0,001	0,01	10



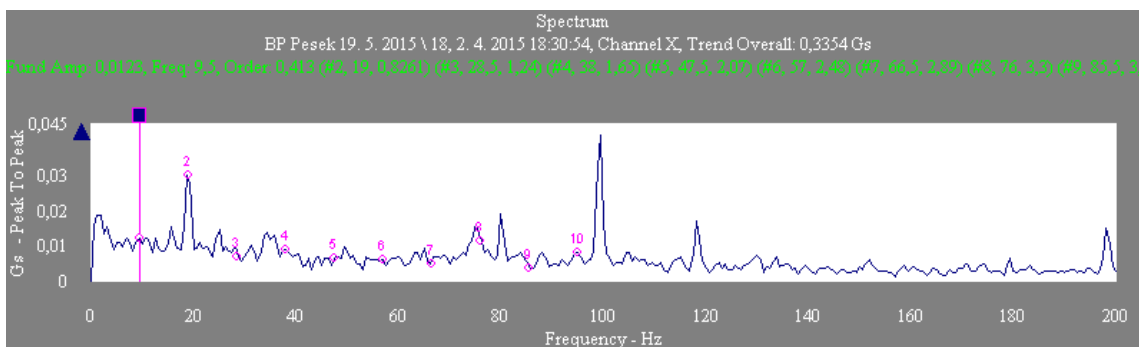
Graf 1: Efektivní hodnota zrychlení před a po umělé poruše pro klec a tělíska



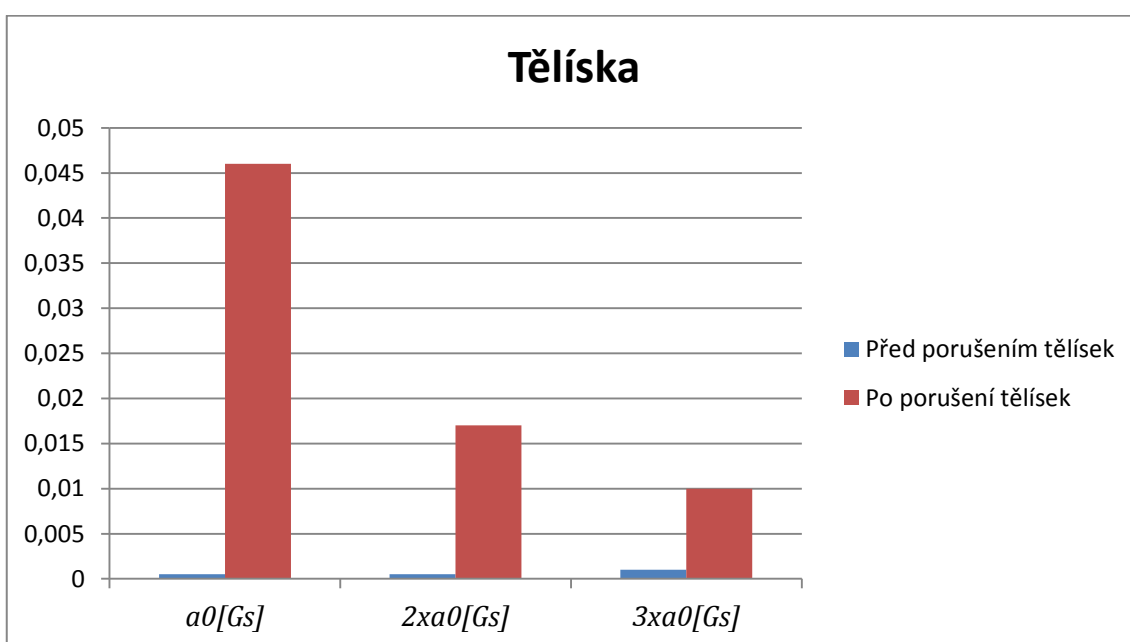
Graf 2: Amplitudy zrychlení před a po umělé poruše pro klec



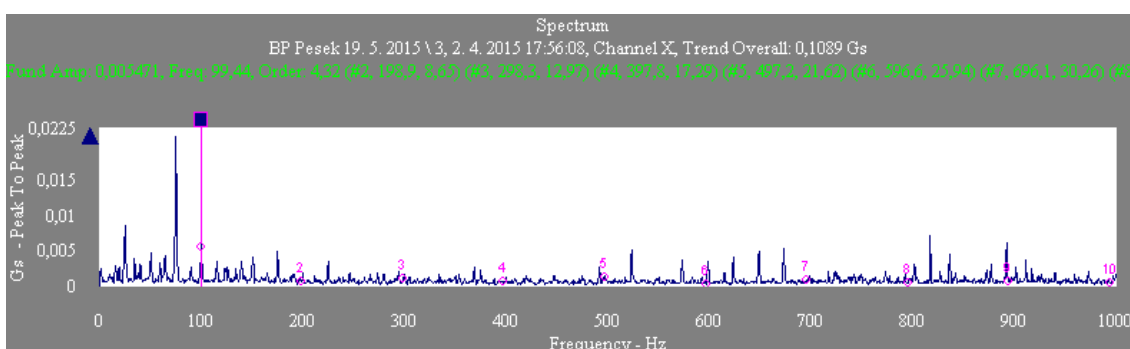
Obrázek 33: Obálková analýza zrychlení vibrací před poškození klece valivého ložiska. Efektivní hodnoty zrychlení a amplitudy zrychlení viz tabulka 7.



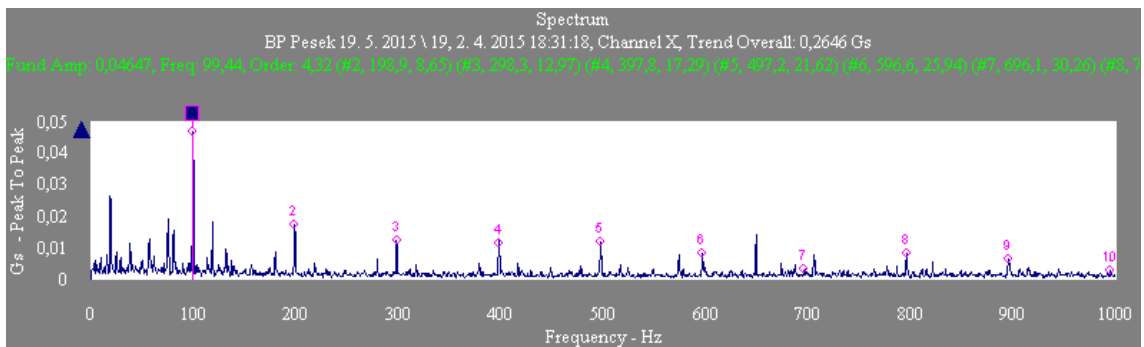
Obrázek 34: Obálková analýza zrychlení vibrací po poškození klece valivého ložiska. Efektivní hodnoty zrychlení a amplitudy zrychlení viz tabulka 7.



Graf 3: Amplitudy zrychlení před a po umělé poruše pro tělíška



Obrázek 35: Obálková analýza zrychlení vibrací před poškození valivých tělísek valivého ložiska. Amplitudy harmonických složek frekvencí valivých tělísek jsou nízké. Efektivní hodnoty zrychlení a amplitudy zrychlení viz tabulka 7.



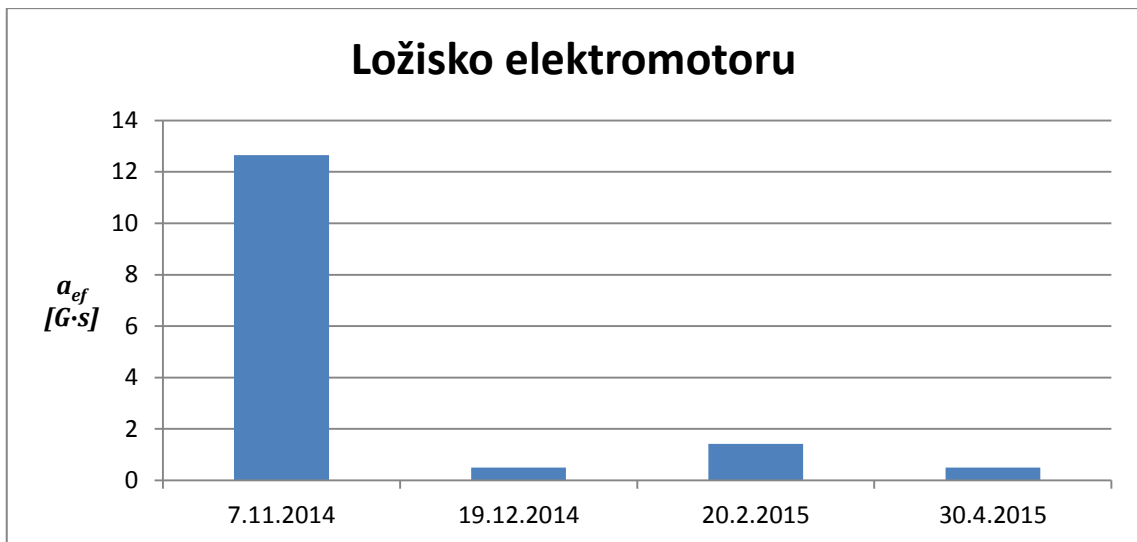
Obrázek 36: Obálková analýza zrychlení vibrací po poškození valivých tělísek valivého ložiska. Vznik harmonické složky frekvencí valivých tělísek. Amplitudy harmonických složek frekvencí valivých tělísek jsou vysoké. Efektivní hodnoty zrychlení a amplitudy zrychlení viz tabulka 7.

5.2.2 SV4

Na SV4 bylo vyměněno ložisko mlýnu po 7. 11. 2014. V grafech 4,5,6 je možné pozorovat změny efektivních hodnot zrychlení před a po výměně ložiska.



Obrázek 37: Staré porušené ložisko ve srovnání s novým ložiskem



Graf 4: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska elektromotoru linky SV4, měřicí místo č. 1
z obr. 3



Graf 5: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska mlýnu u řemene linky SV4, měřicí místo č.
2 z obr. 3



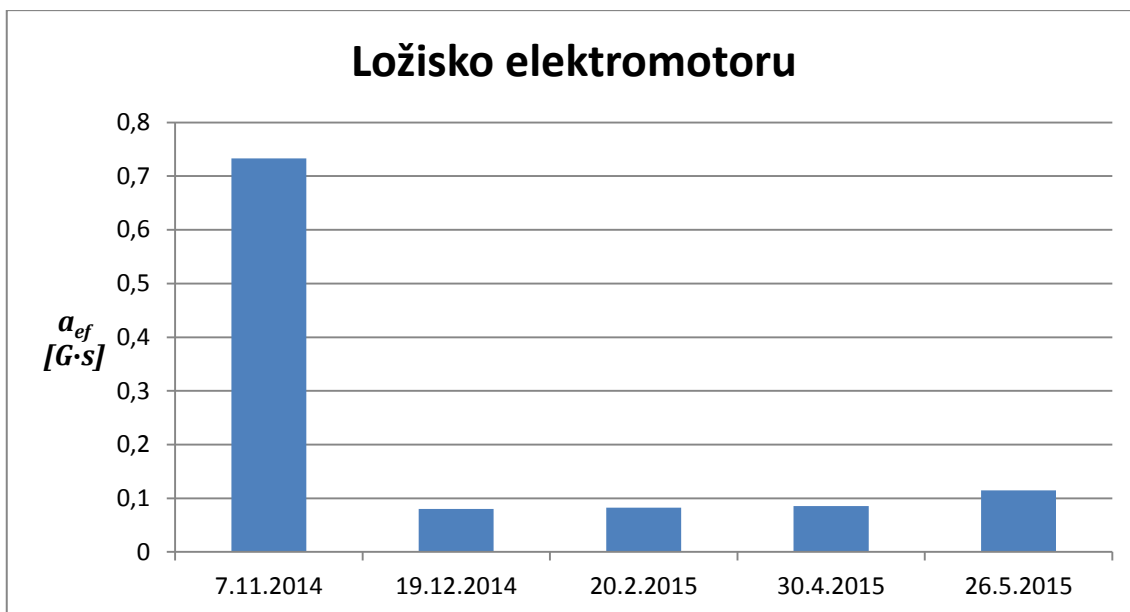
Graf 6: Efektivní hodnoty zrychlení druhého ložiska mlýnu linky SV4, měřicí místo č. 3 z obr. 3. Vyměněné ložisko po prvním měření ze dne 7.11.2014 jasně vykazuje nižší hodnoty vibrací a efektivní hodnota zrychlení se snížila o 99,2% na $a_{ef}=0,1077$ G·s.

5.2.3 DP14

Na lince DP14 v grafu 8 možno pozorovat vzrůstající trend efektivní hodnoty zrychlení, přičemž následně muselo nutně dojít k výměně ložiska, jelikož porucha exponenciálně narostla a ložisko se nacházelo ve 4. etapě poruchy.

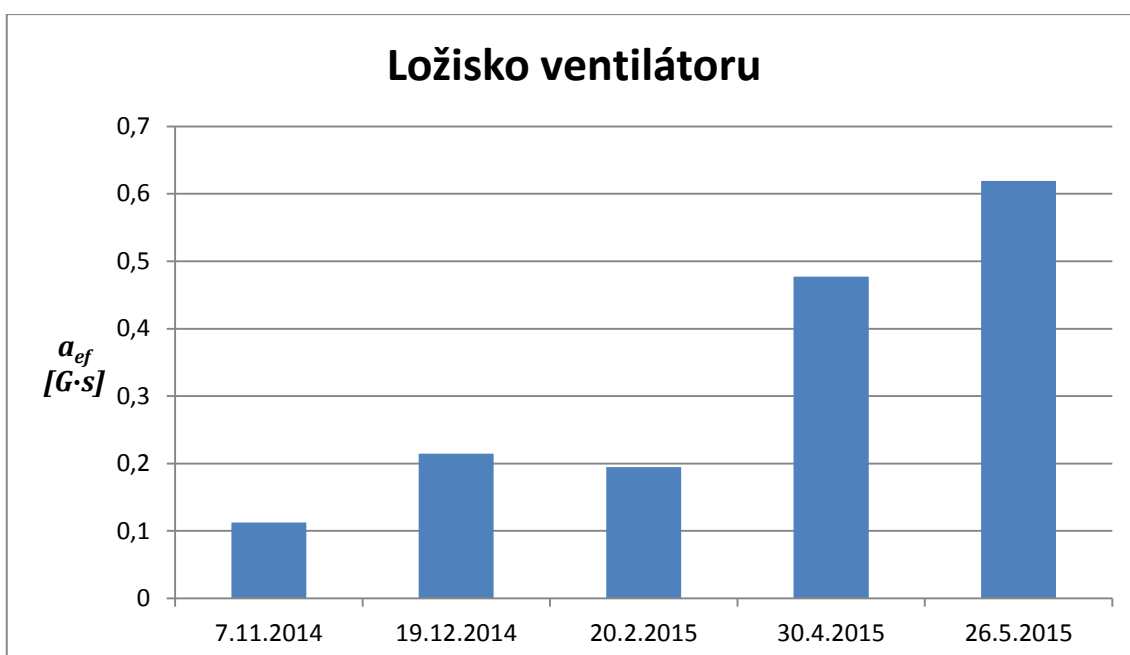


Obrázek 38: Nové ložisko ventilátoru linky DP14

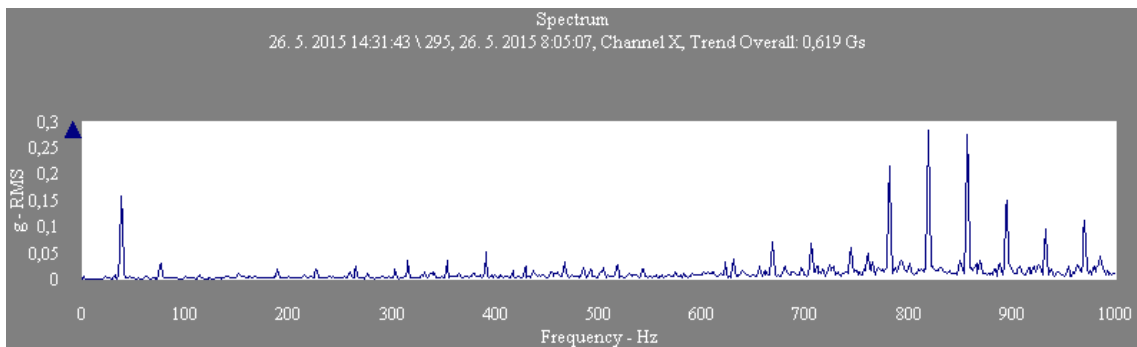


Graf 7: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska elektromotoru linky DP14, měřicí místo č. 4 z obr. 7. Ložisko elektromotoru po 7. 11. 2014 vyměněno. Úroveň vibrace po výměně valivého ložiska klesla o 89,1% na efektivní hodnotou zrychlení

$$a_{ef}=0,08019 \text{ G}\cdot\text{s}$$



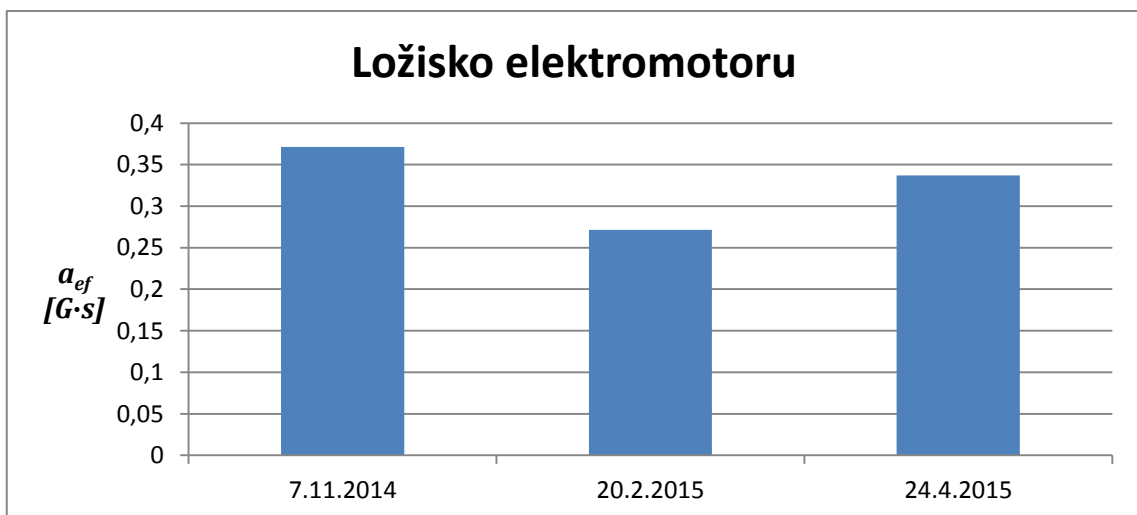
Graf 8: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska ventilátoru linky DP14, měřicí místo č. 5 z obr. 7. Ke dni 26. 5. 2015 byla doporučena výměna ložiska vlivem vzrůstající efektivní hodnoty zrychlení.



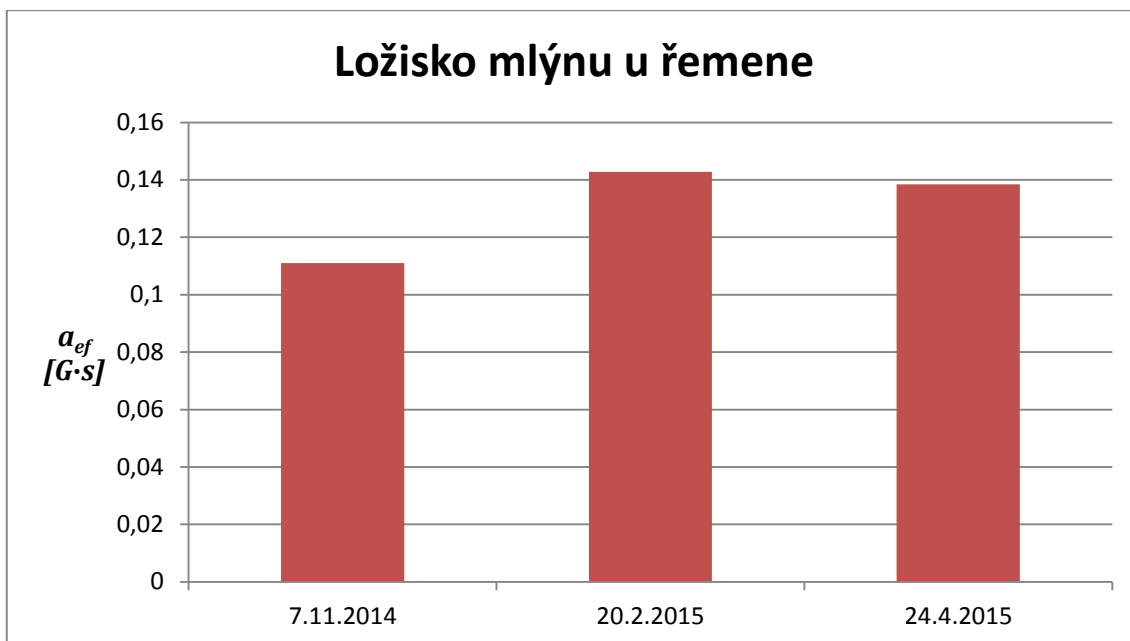
Obrázek 39: Spektrum vibrací zrychlení ložiska ventilátoru linky DP14 ze dne 26.5.2015. Spektrum ukazuje poškození ložiska.

5.2.4 DP11

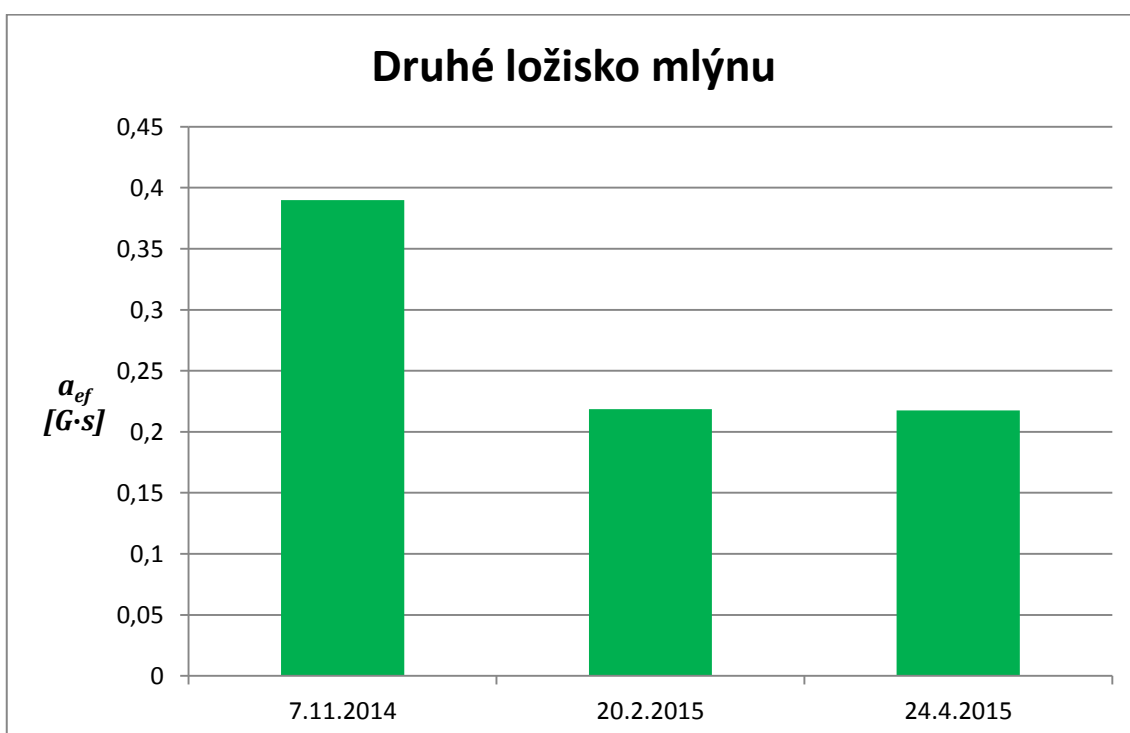
Na strojích DP11, DP12, DP13 nevznikly v průběhu měření žádné závažné závady a případné výchyly jsou následkem konstrukčních vibrací, nebo jde o chybu v měření.



Graf 9: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska elektromotoru linky DP11, měřicí místo č. 6 z obr. 9

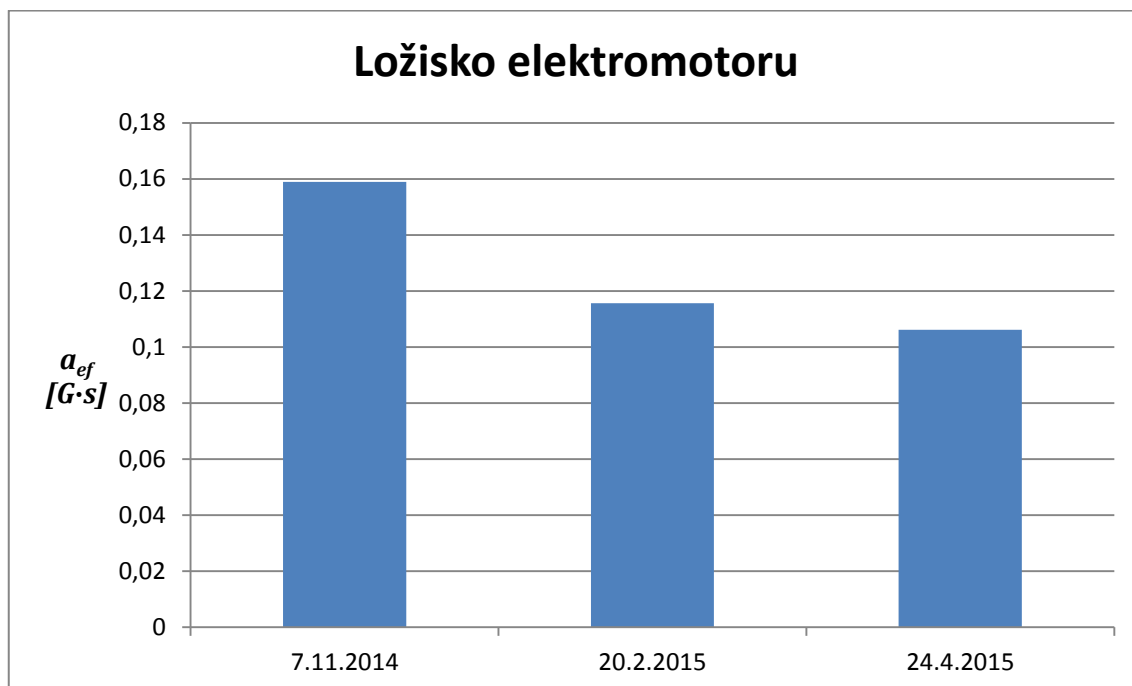


Graf 10: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska mlýnu u řemene linky DP11, měřicí místo č. 7 z obr. 9

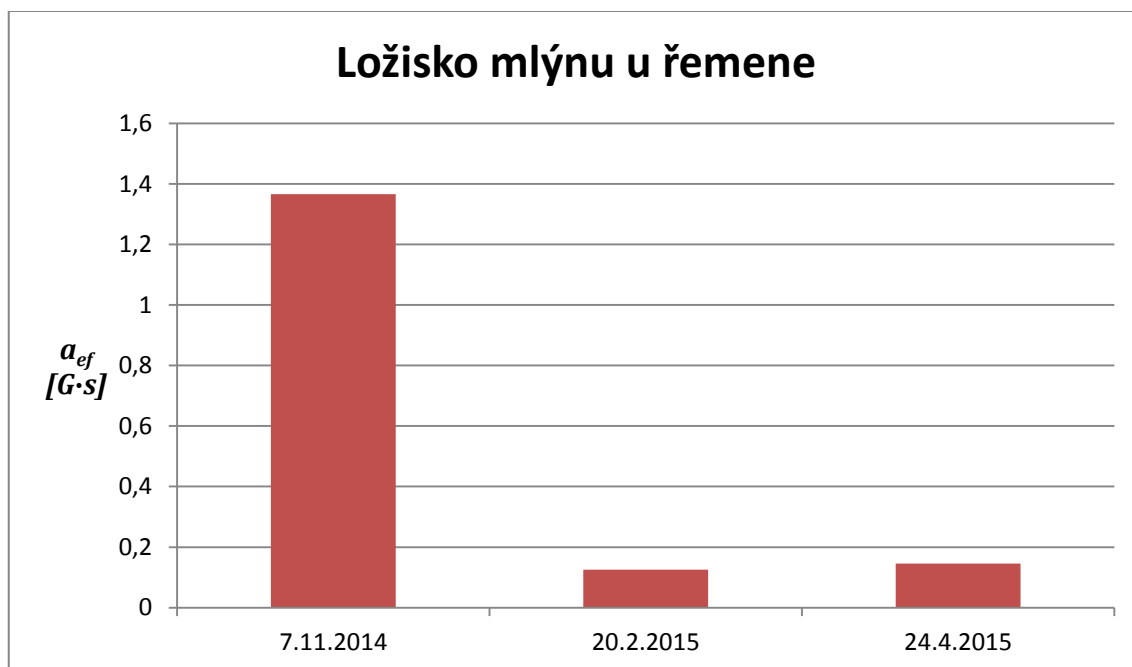


Graf 11: Efektivní hodnoty zrychlení druhého ložiska mlýnu linky DP11, měřicí místo č. 8 z obr. 9

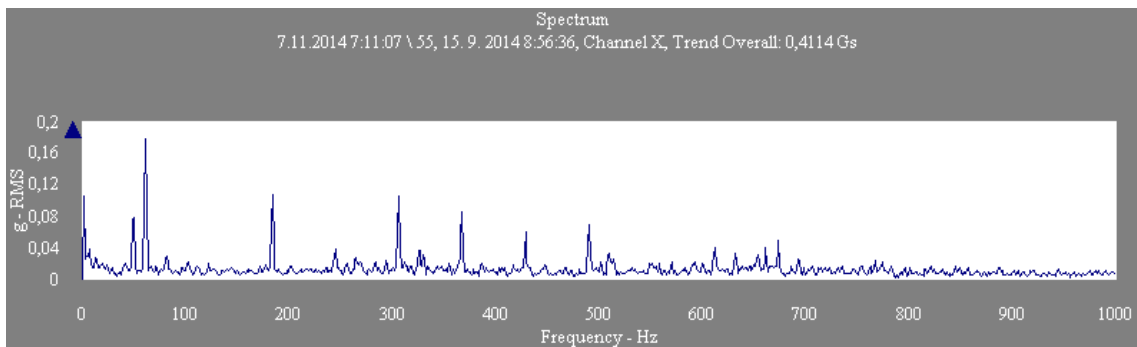
5.2.5 DP12



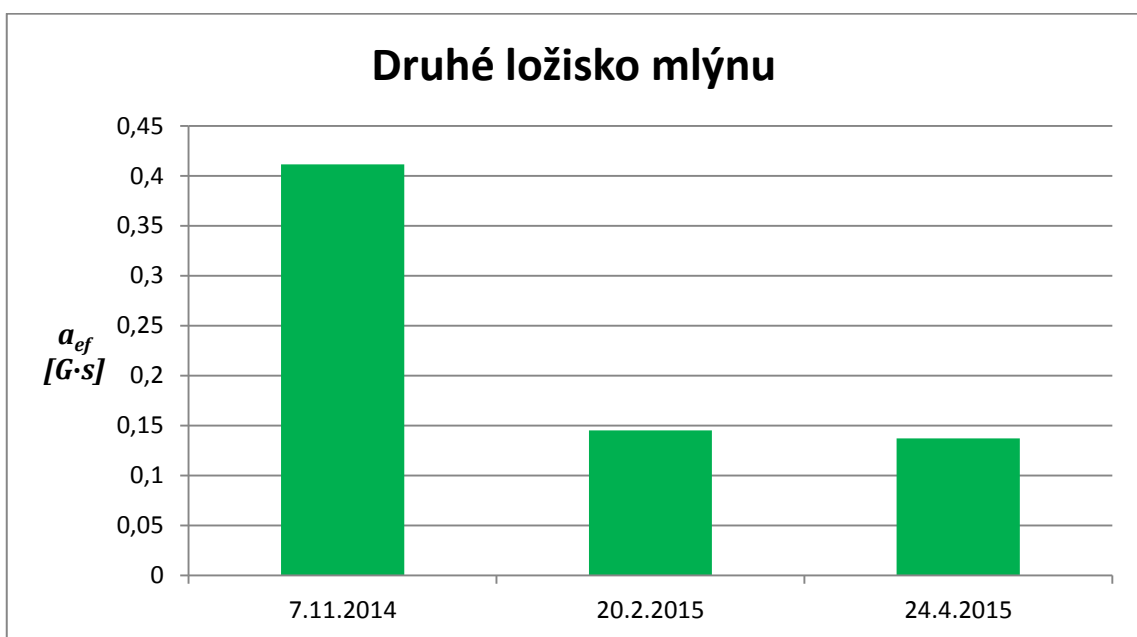
Graf 12: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska elektromotoru linky DP12, měřicí místo č. 9 z obr. 9



Graf 13: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska mlýnu u řemene linky DP12, měřicí místo 10 z obr. 9. Ke dni 7. 11. 2014 byla doporučena výměna ložiska vlivem vysoké efektivní hodnoty zrychlení, která po výměně klesla o 90,8% na $a_{ef}=0,1255$ G·s.

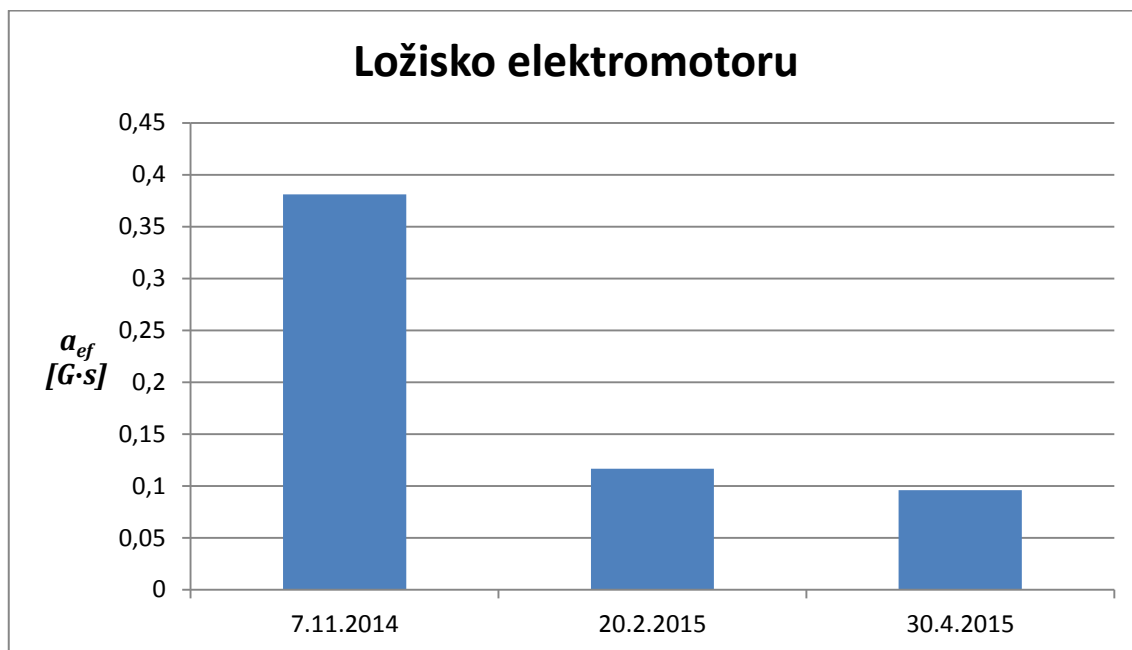


Obrázek 40: Spektrum vibrací zrychlení druhého ložiska mlýnu linky DP12 ze dne 7.11.2014

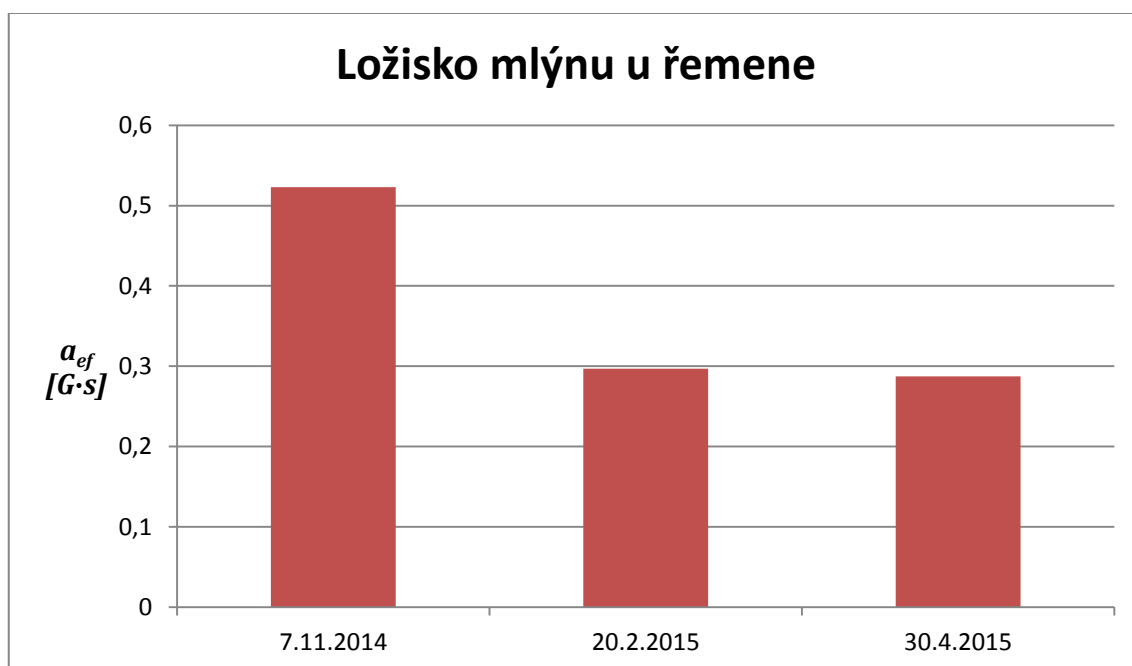


Graf 14: Efektivní hodnoty zrychlení druhého ložiska mlýnu linky DP12, měřicí místo č. 11 z obr. 9. Druhé ložisko mlýnu nepoškozeno, ale zvýšená efektivní hodnota zrychlení je zapříčiněna přenosem vibrací z ložiska mlýnu u řemene. Po výměně ložiska mlýnu u řemene, viz graf 13, klesla efektivní hodnota zrychlení o 64,7% na $a_{ef}=0,1452 G\cdot s$.

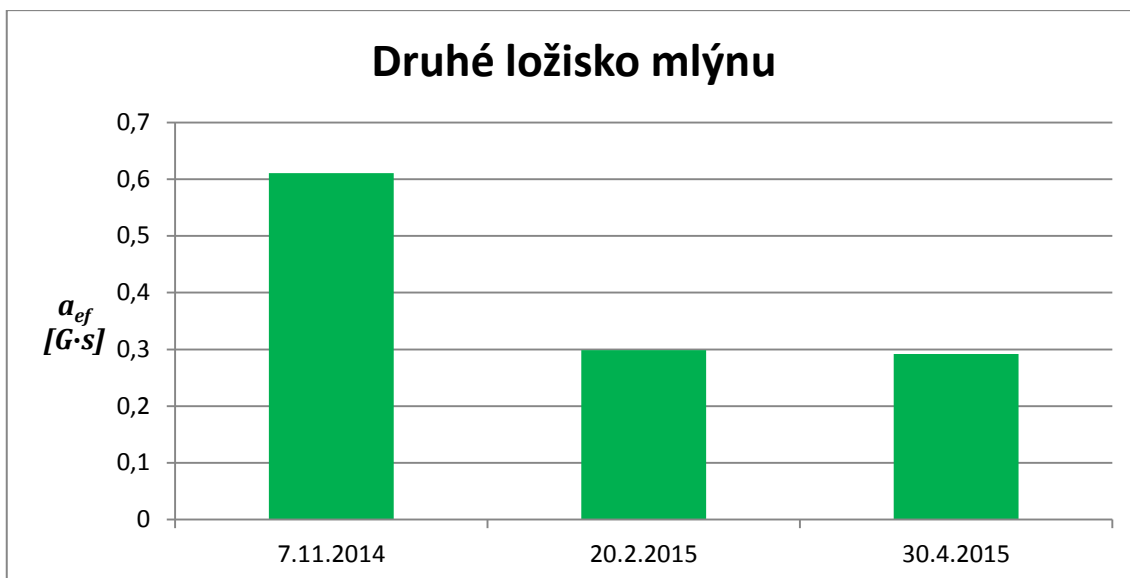
5.2.6 DP13



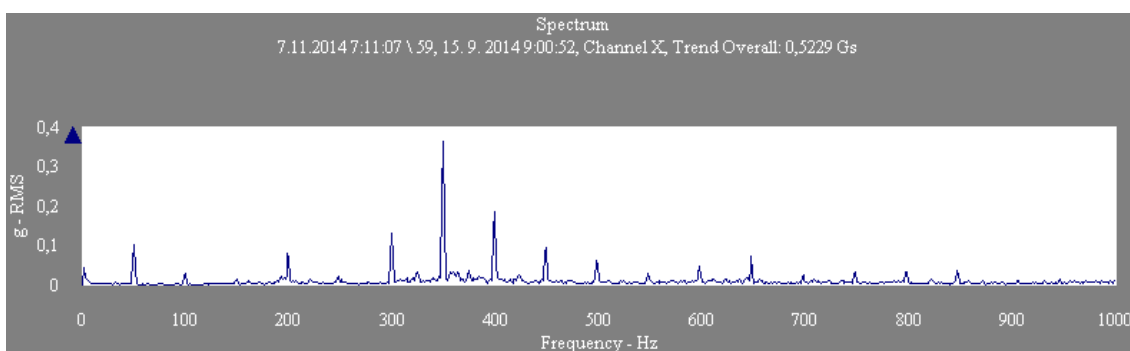
Graf 15: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska elektromotoru linky DP13, měřicí místo č. 12 z obr. 9



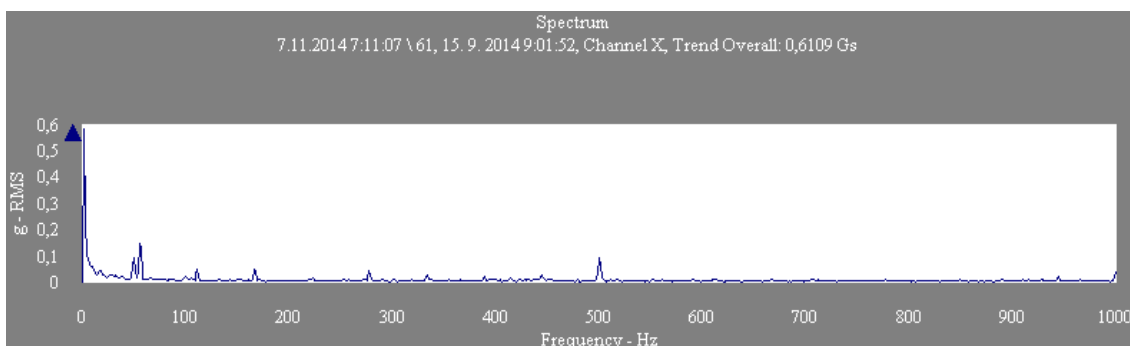
Graf 16: Efektivní hodnoty zrychlení ložiska mlýnu u řemene linky DP13, měřicí místo č. 13 z obr. 9. Zvýšená efektivní hodnota zrychlení ze dne 7. 11. 2014 zapříčiněna nedostatečným mazáním. Po mazání efektivní hodnota zrychlení klesla o 43,2% na $a_{ef}=0,2971$ G·s.



Graf 17: Efektivní hodnoty zrychlení druhého ložiska mlýnu linky DP13, měřicí místo č. 14 z obr. 9. Zvýšená efektivní hodnota zrychlení ze dne 7. 11. 2014 zapříčiněna nedostatečným mazáním. Po mazání hodnota klesla o 51,1% na $a_{ef}=0,2987$ G·s.

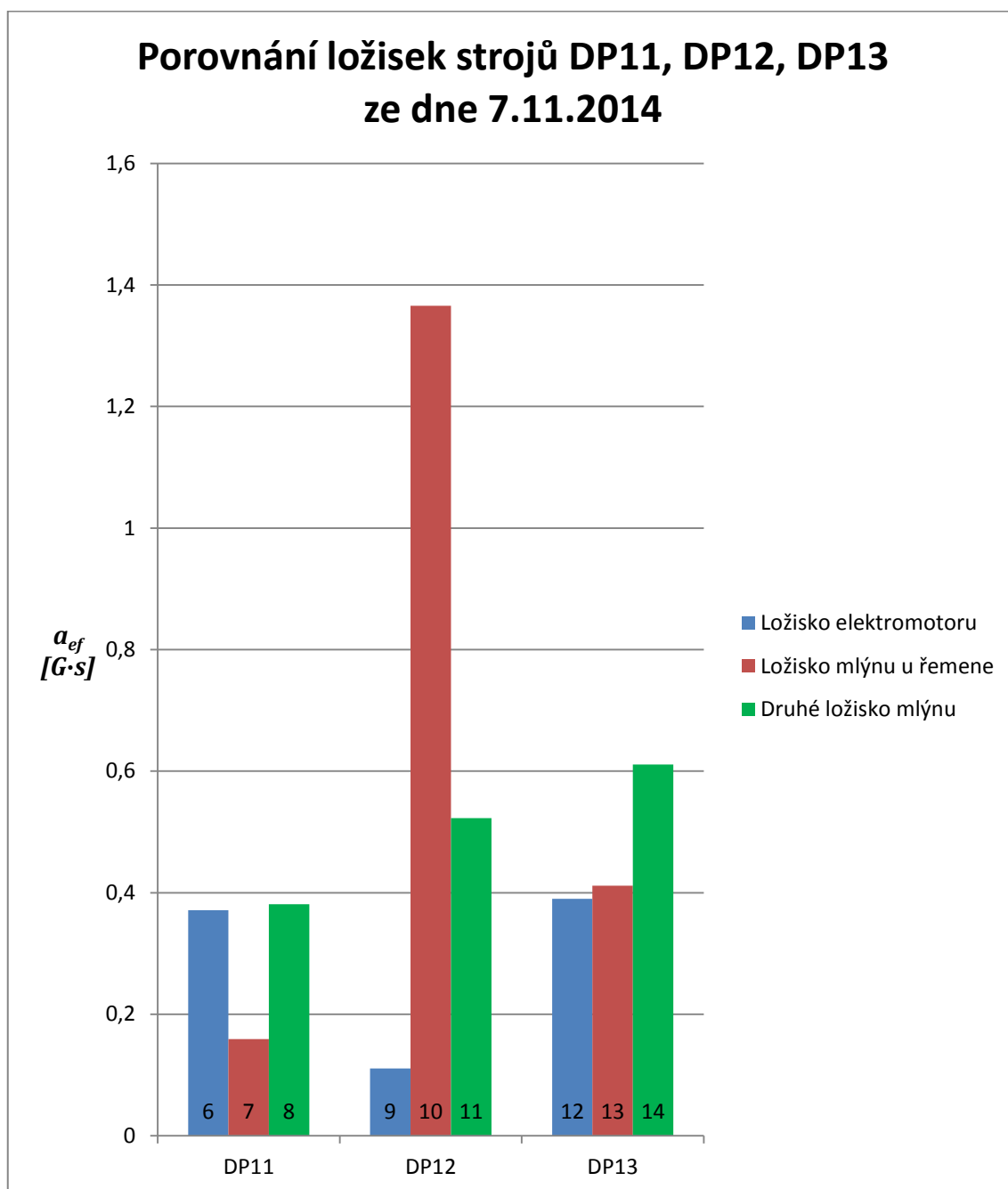


Obrázek 41: Spektrum vibrační zrychlení ložiska mlýnu u řemene linky DP13 ze dne 7.11.2014

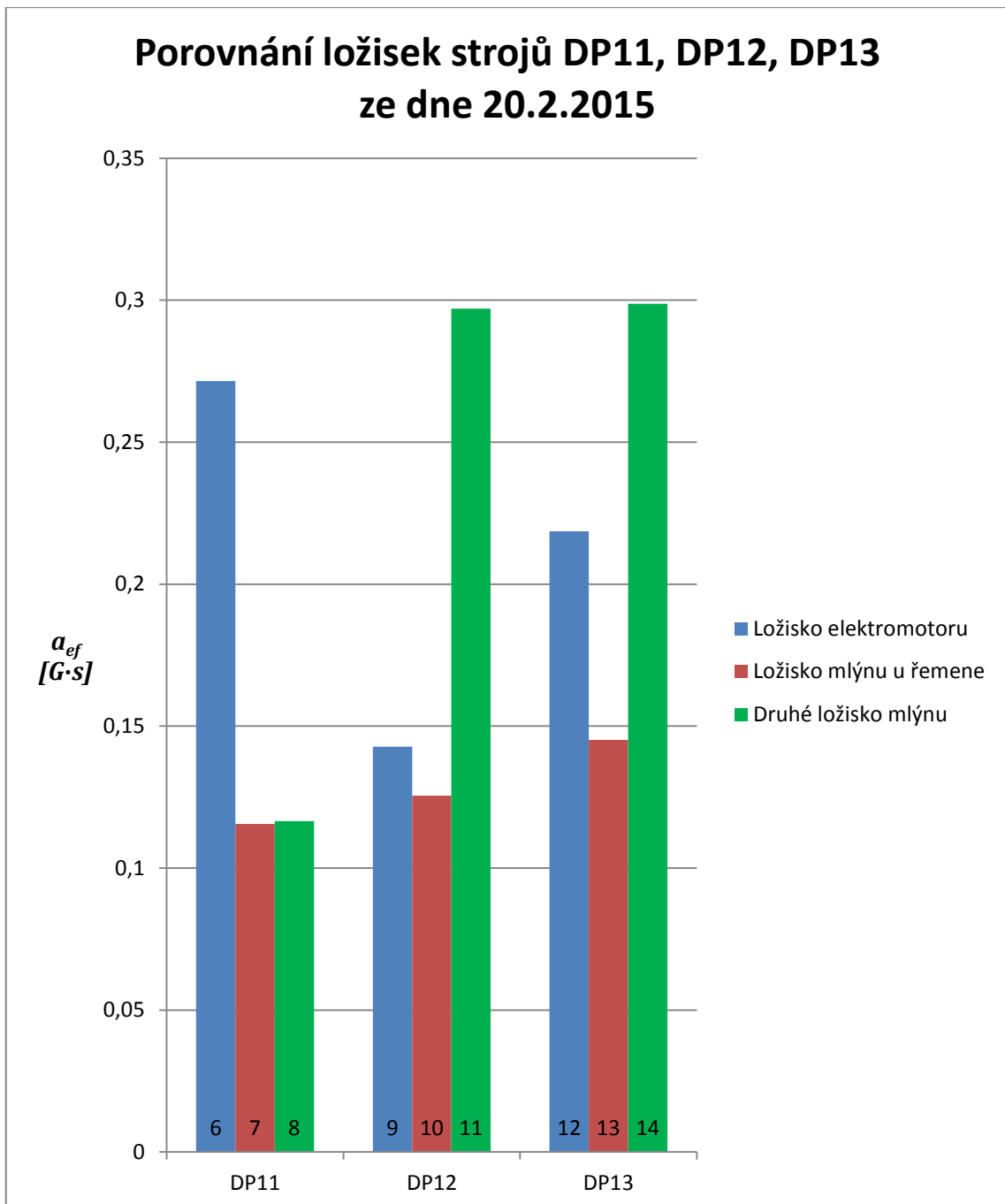


Obrázek 42: Spektrum vibrační zrychlení druhého ložiska mlýnu linky DP13 ze dne 7.11.2014

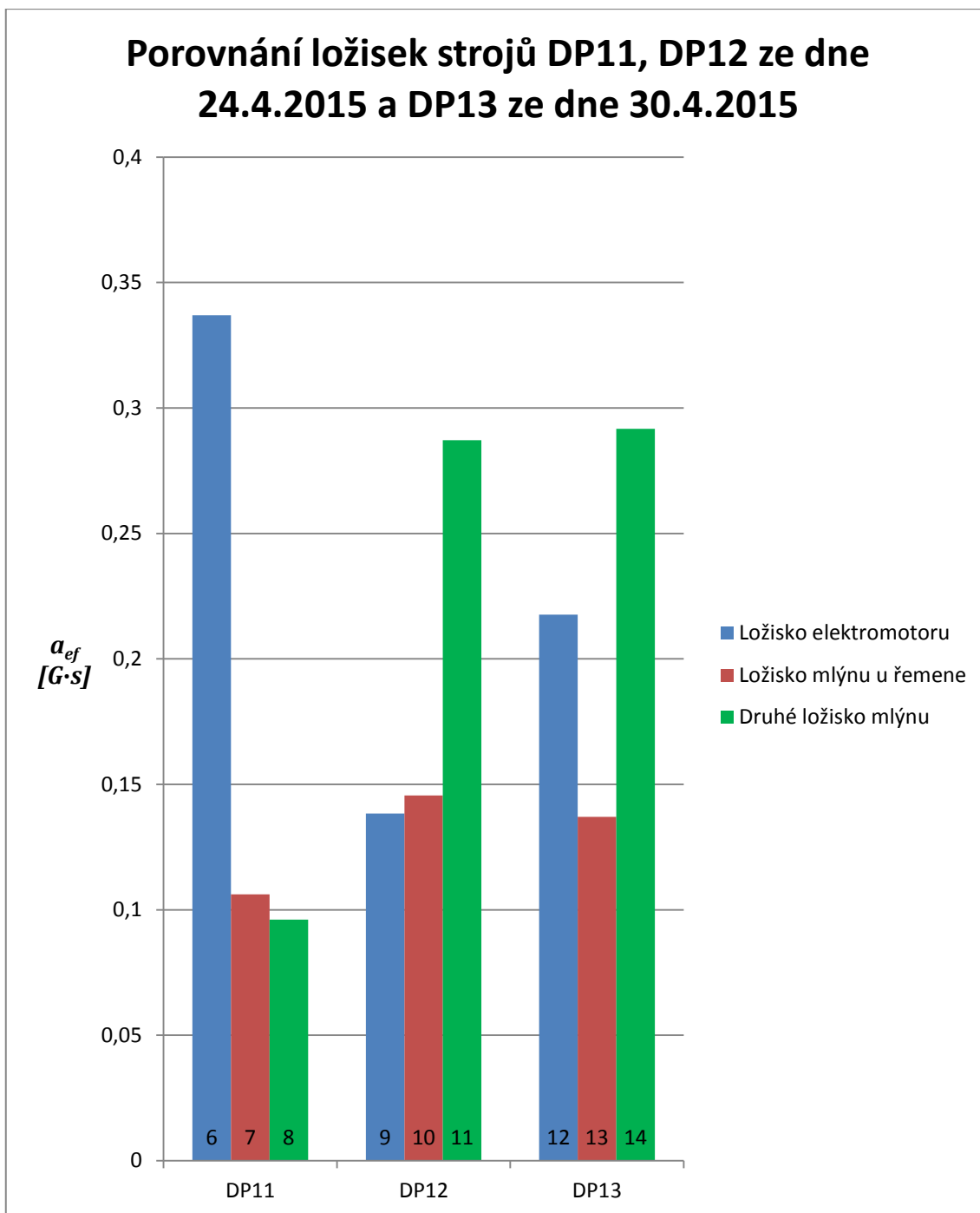
5.2.7 Porovnání strojů DP11, DP12, DP13



Graf 18: Efektivní hodnoty zrychlení ložisek na linkách DP11 (měřicí místo č. 6, 7, 8 z obr. 9), DP12 (měřicí místo č. 9, 10, 11 z obr. 9), DP13 (měřicí místo č. 12, 13, 14 z obr. 9) ze dne 7. 11. 2014



Graf 18: Efektivní hodnoty zrychlení ložisek na linkách DP11 (měřicí místo č. 6, 7, 8 z obr. 9), DP12 (měřicí místo č. 9, 10, 11 z obr. 9), DP13 (měřicí místo č. 12, 13, 14 z obr. 9) ze dne 20. 2. 2015



Graf 18: Efektivní hodnoty zrychlení ložisek na linkách DP11 (měřicí místo č. 6, 7, 8 z obr. 9) ze dne 24. 4. 2015, DP12 (měřicí místo č. 9, 10, 11 z obr. 9) ze dne 24. 4. 2015, DP13 (měřicí místo č. 12, 13, 14 z obr. 9) ze dne 30. 4. 2015

6 ZÁVĚR

V bakalářské práci bylo prokázáno, že pro efektivní údržbu strojů a zařízení v závodě ONTEX, s.r.o. je jedním z významných nástrojů při zjišťování spolehlivosti chodu vibrační diagnostika.

První kapitola bakalářské práce se zaměřuje na stručný popis firmy Ontex, s.r.o., popis a schématické znázornění vybraných linek na výrobu dětských plen či dámských vložek. Bylo vybráno 5 linek, z nichž jedna slouží k výrobě dámských vložek (interní označení SV4) a zbylé čtyři vyrábí dětské pleny (s interním označením DP11, DP12, DP13, DP14).

Následující kapitola popisuje vliv kvality montáže na valivá ložiska, která se významně podílí na jejich trvanlivost. Blíže jsou popsány radiální, axiální vůle, provozní vůle a vliv vůle na přesnost uložení.

V další kapitole jsou rozepsány příčiny poškození valivých ložisek. Nejprve obecný popis selhání, vysvětlení trvanlivosti ložiska. Následuje rozdělení na primární poškození a sekundární poškození valivých ložisek s jejich stručným vysvětlením a příslušnými obrázky. Navazující podkapitola je o metodách diagnostiky ložisek bez vnějších zásahů do chodu stroje s popisem obálkové analýzy, jež je použita k měření ložisek této bakalářské práce. Součástí jsou i důležité poruchové vzorce, které odhalují poškození např. valivého elementu, vnějšího kroužku, vnitřního kroužku, klece ale i řemenového převodu, ventilátoru, atd. Mimo jiné obálková analýza odhalí i poškození ozubeného soukolí a další strojní součásti, ty však nejsou vypsány, neboť nejsou tématem této bakalářské práce. Na závěr této kapitoly jsou vysvětleny jednotlivé průběhy poruch částí valivých ložisek.

Poslední kapitola je praktická. Do tabulek jsou zaneseny již zmiňované poruchové frekvence ložisek, řemenových převodů a ventilátoru z pěti vybraných linek a experiment, kde byla na ložisku vyvolána umělá porucha. Na začátku byly hodnoty naměřeny bez porušení, následovala mechanická porucha s výsledkem úplné destrukce klece a tělísek, viz graf 1 - 3. Série měření linek od 7. 11. 2014 do 30. 4. 2015 zaznamenala hned několik poruch problémových míst. Nejprve poškozené ložisko na lince SV4, kde bylo po 7. 11. 2014 nutné vyměnit ložisko mlýnu, viz graf 4 – 6. Na lince DP14 vzrůstající trend vibrací ložiska ventilátoru, viz graf 8 s doporučením vyměnit ložisko po posledním měření. Porovnání linek DP11, DP12 a DP13 neprokázalo větší rozdíly mezi linkami, což je pro chod firmy dobrý výsledek. Avšak byla odhalena porucha ložiska na lince DP12 s doporučením ložisko vyměnit.

LITERATURA

- [1] MORAVEC, Vlastimil. *www.elektromotory.net*. [Online] Elektromotory Vlastimil Moravec. <http://www.elektromotory.net/siemens/11a7-3000-otacek.html>.
- [2] NĚMEČEK, P., TOMEH, E. *VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA ZÁKLADNÍCH ZÁVAD STROJŮ*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [3] ONTEX CZ, s.r.o. *www.ontex.cz*. [Online] ONTEX CZ, s.r.o. <http://www.ontex.cz/spolecnost/profil-spolecnosti.html>.
- [4] PEŠÍK, Lubomír. *Části strojů, stručný přehled, 1. díl*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN: 978-80-7372-573-0.
- [5] *Podklady ke strojům firmy ONTEX CZ, s.r.o.*
- [6] SKF CZ, a.s., katalog. *Selhání ložisek a jejich příčiny*. místo neznámé : SKF CZ, a.s., 1994.
- [7] SKF CZ, a.s. *www.skf.com/cz/*. [Online] SKF CZ, a.s. <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/bearing-specifics/bearing-internal-clearance/index.html>.
- [8] TOMEH, Elias. *DIAGNOSTIC METHODOLOGY OF ROLLING ELEMENT AND JOURNAL BEARINGS*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN: 978-80-7373-278-4.
- [9] TOMEH, Elias. *TECHNICKÁ DIAGNOSTIKA, VIBRAČNÍ DIAGNOSTIKA STROJŮ A ZAŘÍZENÍ*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN: 978-80-7494-174-0.
- [10] VRBA, Jakub. *DIAGNOSTIKA VALIVÝCH LOŽISEK PŘEVODOVKY MQ 200*. Bakalářská práce. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2007. Vedoucí bakalářské práce doc. Dr. Ing. Elias Tomeh.
- [11] WIKIPEDIE. <https://cs.wikipedia.org/wiki/>. [Online] wikipedie. https://cs.wikipedia.org/wiki/Valiv%C3%A9_lo%C5%BEisko.