

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Kontinuální měření vibrací ventilátorů pro kupolovou pec a
rekuperátor

Continuous Measurement of Fan Vibration for Cupola and
Recuperator

Student:
Vedoucí diplomové práce:

Kamil Fedor
Ing. Jan Blata, Ph.D.

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra výrobních strojů a konstruování

Zadání bakalářské práce

Student: **Kamil Fedor**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R023 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Kontinuální měření vibrací ventilátorů pro kupolovou pec a rekuperátor**
Continuous Measurement of Fan Vibration for Cupola and Recuperator

Zásady pro vypracování:

Vibrační diagnostika je jednou z nejvýznamnějších metod pro určování technického stavu strojních zařízení. Využijte proto vhodné nástroje této metody a také dostupného zařízení pro určování technického stavu strojních zařízení. V rámci bakalářské práce se zabývejte problematikou identifikace vznikající závady, možnostmi použití vhodných metod s důrazem na vibrodiagnostiku. Změřená data analyzujte a proveďte následná vyhodnocení.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte konkrétní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce nebo firma ROCKWOOL, a.s.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

KOPÁČEK, J. *Technická diagnostika hydraulických mechanismů*. Praha : SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1990. 159 s. ISBN 80-03-00308-3.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

MILÁČEK, S.: *Měření a vyhodnocování mechanických veličin*. ČVUT v Praze 2001, 231 s., ISBN 80.01-02417-2

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr.Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevydělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....
podpis

Kamil Fedor

Frýdecká 609\7, 73932 Vratimov

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

FEDOR, K. Kontinuální měření vibrací ventilátorů pro kupolovou pec a rekuperátor: *Bakalářská práce*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2014, 51 s. Vedoucí práce: Ing. Jan Blata, Ph.D.

Tématem bakalářské práce je kontinuální měření vibrací ventilátorů pro kupolovou pec a rekuperátor. V úvodu práce se zabývám základním popisem technické diagnostiky a základními možnostmi vibrodiagnostiky, jako je rozdělení a popis snímačů, základní poruchy a jejich projevy na zařízení. Další kapitola se týká společnosti, ve které se měření uskutečnilo, krátký popis a nastínění výrobního procesu. Následuje příprava vibrodiagnostiky v podobě určení měřicích míst, stanovení senzoru a stanovení měřicího přístroje. V dalším bodě bakalářské práce zpracovávám naměřená data, a vyhodnocuji frekvenční spektra vibrací. Závěrem práce zhodnocuji celkové měření.

ANNOTATION OF THESIS

FEDOR, K. Continuous Measurement of Fan Vibration for Cupola and Recuperator: *Bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production machines and design, 2014, 51 s. Thesis head: Ing. Jan Blata, Ph.D.

The theme of the thesis is the continuous measurement of fan vibration for cupola and recuperator. The introduction deals with the basic description of the essential technical and diagnostic capabilities Vibrodiagnostics such as classification and description of sensors, the base disorders and their effects on the device. The next chapter concerns the company in which the measurements took place, brief description and outline of the production process. The following preparation Vibrodiagnostics as determining measuring points, setting the sensor and setting the meter. In another respect, bachelor thesis processing measured data, and evaluate the frequency spectrum of vibration. Finally, work evaluate overall measurement.

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval panu Ing. Davidu Závadovi a jeho spolupracovníkům z firmy ROCKWOOL a. s. za jejich maximálně vstřícný a trpělivý postoj při zpracování této bakalářské práce. Dále děkuji svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Janu Blatovi, Ph.D. za cenné podněty a připomínky při psaní této práce.

Kamil Fedor

Obsah

1	Příprava diagnostiky ventilátorů	12
1.1	Ekonomika v technické diagnostice	12
1.2	Technická diagnostika v údržbě	13
2	Vibrodiagnostika	14
2.1	Možnosti vibrodiagnostiky	14
2.2	Měření a vyhodnocení vibrací	16
3	Základní poruchy a jejich projevy	20
3.1	Nevyváženost	20
3.2	Nesouosost	24
3.3	Valivá a kluzná ložiska	26
3.3.1	Kluzná ložiska	26
3.3.2	Valivá ložiska	26
4	O společnosti ROCKWOOL a.s.	29
4.1	Postup výroby minerální vlny	29
4.2	Produkty společnosti	30
4.3	Vliv na životní prostředí	31
5	Návrh měření	33
5.1	Volba měřicích míst	33
5.2	Výpočet budících frekvencí	33
5.3	Stanovení druhu a uchycení snímače	34
5.4	Popis měřícího zařízení	35
5.5	Vyhodnocení vibrací	36
5.5.1	Kritérium první	36
5.5.2	Kritérium druhé	36
6	Analýza naměřených dat	37
6.1	Ventilátor 1	38

6.2	Ventilátor 2.....	41
6.3	Ventilátor 3.....	45
7	Závěr	48
8	Použitá literatura	49
9	Přílohy.....	51

Seznam základního značení a použitých zkratk

a	-	Zrychlení	[m.s ⁻²]
B _d	-	Průměr valivého elementu	[m]
ENV	-	Envelope (obálka zrychlení)	[gE]
f _o	-	Základní otáčková frekvence	[Hz]
f _L	-	Lopatková frekvence	[Hz]
P	-	Výkon	[W]
P _d	-	Střední průměr	[m]
t	-	Čas	[s]
n _L	-	počet lopatek	[-]
v	-	Rychlost	[m.s ⁻¹]
n	-	Počet valivých elementů	[-]
φ	-	Kontaktní úhel	[°]
RPM	-	Otáčky hřídele	[1/mm]
atd.	-	A tak dále	
apod.	-	A podobně	
a.s.	-	Akciová společnost	
s.r.o.	-	Společnost s ručením omezeným	
COS	-	Centrální osa setrvačnosti	
OR	-	Osa rotace	
BPMI	-	Frekvence závady vnitřního kroužku ložiska	
BPMO	-	Frekvence závady vnějšího kroužku ložiska	
BSF	-	Frekvence závady valivého tělesa ložiska	
č.	-	Číslo	
ČSN	-	Česká státní norma	
ISO	-	Mezinárodní organizace pro normalizaci	
Obr.	-	Obrázek	
FFT	-	Rychlá Fourierova transformace	
RMS	-	Efektivní hodnota	
Tab.	-	Tabulka	

Úvod

V dnešní složité situaci na trhu, se každá společnost snaží vyrábět své produkty za optimální finanční náklady. Tento jev velice úzce souvisí s údržbou. Údržba se zabývá bezpečností a spolehlivostí strojních zařízení. Pro prevenci těchto oprav slouží technická diagnostika, která si klade za cíl prodlužovat životnost, zvyšovat spolehlivost, předvídat poruchy, plánovaně odstranit závady a snižovat náklady na servis i na náhradní díly, které se mnohdy zbytečně vyměňují. Důležitým aspektem u technické diagnostiky je periodicky provádět pravidelné kontroly, za pomoci měřicí techniky, se kterou jsme schopni sledovat stav stroje. Technická diagnostika má řadu oborů jako je vibrodiagnostika, akustika, termografie, tribologie, nedestruktivní testování, a další.

Mým úkolem bakalářské práce bude měřit vibrace u ventilátoru pro kupolovou pec a rekuperátor, za pomoci měřicího přístroje A4400-VA4Pro od společnosti Adash spol. s.r.o. Měření bude probíhat ve společnosti ROCKWOOL a.s., která se nachází v Bohumíně. Základní prioritou bakalářské práce bude provedení praktických měření, následné analýzy měření a vyhodnocení naměřených frekvenčních spekter. Na konci bakalářské práce bude celkové zhodnocení měření a doporučené postupy řešení. Práce a návrhy budou prezentovány zástupci firmy ROCKWOOL.

1 Příprava diagnostiky ventilátorů

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal se zdrojů [2], [3]. Ventilátory patří mezi rotační, lopatkové stroje. Ventilátory rozvádí a dopravují vzdušinu na určené místo, pomocí mechanické energie z elektromotoru, která se mění na energii kinetickou (energii vzdušiny). Za tento jev může dynamické působení lopatek oběžného kola.

Základní části ventilátoru jsou lopatky, oběžné kolo, elektromotor, hnací a hnaná hřídel, ložisková tělesa a další součásti dle druhu ventilátoru. Celkový stav zařízení určíme pomocí různých diagnostických metod, podle různorodosti zařízení. Diagnostickými metodami se zabývá obor s názvem technická diagnostika.

Nezákladnější rozdělení technické diagnostiky (TD)

- Technická bezdemontážní diagnostika (TBD)
- Technická nedestruktivní diagnostika (TND)

U ventilátorů se nejvíce jedná o technickou nedestruktivní diagnostiku. V našem případě se zabýváme vibracemi ventilátorů. Podle vibrací určíme technický stav zařízení.

1.1 Ekonomika v technické diagnostice

Z ekonomického hlediska má každá údržba za úkol vynakládat optimální náklady a zajišťovat stav stroje v dobrém a provozuschopném stavu. Problémem údržby je, že spotřebovává finanční prostředky, pracovní sílu, snižuje časový fond apod., a druhá věc je taková, že odstraňuje následky opotřebení, prodlužuje životnost a zajišťuje provozuschopnost. V praxi je hlavním vlivem revizní a kontrolní činnost, která dokáže vadu predikovat a přizpůsobit rozsah dané opravy na zařízení. Důležité je zvolení vhodného diagnostického systému. Nevhodný diagnostický systém může mít za důsledek nesprávné určení dat a nevhodné určení stavu stroje, což může vest k poruše.

Ekonomika v technické diagnostice se zaměřuje:

- Snahu minimalizovat náklady a provoz
- Snahu minimalizovat nebezpečí havárií
- Snahu minimalizovat spotřebu energie
- Snahu prodloužit životnost zařízení
- Snahu minimalizovat odstávky na údržbu

1.2 Technická diagnostika v údržbě

V diagnostice máme mnoho projevů vad, určit se dají různými metodami, které zkoumají např. mechanické vibrace, snímají hlučnost, měří teplotu části zařízení, atd. Technická diagnostika využívá přítomnosti změn a zjišťuje postup změn ve strojním zařízení. Poruchy mohou být:

- Náhlé – nastávají nezávisle na délce provozu a technickém stavu.
- Postupné – nastávají opotřebením součásti z důvodů dlouhodobého provozu zařízení.

Technická diagnostika zkoumá také vznik poruch. Závady mohou vznikat za standartních podmínek (tzn. dodržování zásad správné údržby popsanych v návodu k obsluze a údržbě zařízení) a nestandardních podmínek (tzn. nesprávná činnost pracovníka nebo nevhodné vnější podmínky).

Po zjištění poruchy také čelíme rozhodnutí zda:

- Provést opravu ihned
- Dodržet termín plánovaných oprav
- Vyčkat na další diagnostickou kontrolu
- Proměřit jiný diagnostický parametr a tím zvýšit pravděpodobnost poruchy

Základní rozdělení úkolů diagnostiky:

- Detekce – snaží se odhalovat přítomnost a vznik poruchy
- Lokalizace – určí vadné místo a vznikající poruchu
- Specifikace – určí důvod poruchy a vyhodnotí diagnostický signál
- Predikce – určí zbytkovou životnost

Časové rozdělení:

- Cyklické
- Trvalé
- Na objednávku

Nasazení:

- Před demontáží
- Před uvedením do provozu – finální kontroly a zkušební provoz
- Za provozu – servis, inspekční kontroly, monitoring

2 Vibrodiagnostika

K tvorbě kapitoly a podkapitol jsem čerpal se zdrojů [1], [2], [3], [4], [5], [6], [11]. Mezi metody bezdemontážní nedestruktivní diagnostiky rotačních strojních zařízení patří vibrodiagnostika jinak také řečeno vibrační diagnostika. Jako zdroj informací se snaží využívat vibrace způsobené zařízením v provozu. Vibrodiagnostika určuje skutečný stav strojních zařízení a proto mnohdy odpadají nepotřebné preventivní opravy strojních zařízení, což má za důsledek úspory ve formě náhradních dílů a času potřebného k opravě. Na pravidelně monitorovaných zařízeních se prodlužuje čas odstávek, které se dají naplánovat s dostatečně velkým předstihem.

2.1 Možnosti vibrodiagnostiky

Základním měřením je zjišťování celkových vibrací generovaných zařízením. Určujeme především mechanické stavy jako nevyvaha, nesouosost, mechanické uvolnění, ohnutí hřídel, rezonance, atd. Měření je definováno za pomoci norem popisujících dovolené mohutnosti kmitání na určených zařízeních (ČSN 105041 – kompresory, ČSN ISO 10816 – obecná norma pro většinu strojních zařízení). Měříme rychlost vibrací mm/sec v pásmu 10 – 1000 Hz v detekci RMS. Pro obráběcí stroje je vytvořena výjimka posuzující mohutnost vibrací. Ve výjimce jsou přísnější kritéria, kde dlouhodobým sledováním byly zjištěny doporučené hodnoty mohutnosti vibrací.

Při vhodně nastavených frekvenčních rozsazích, provádíme měření zrychlení vibrací pro zjišťování stavu mazání v kluzných i valivých ložiscích, detekování elektrických problémů na elektromotorech, ověřování stavu ozubení a mazání v převodovkách. Kvůli zjišťování přesného stavu ložisek jsou vyvinuty speciální tzv. „obálkové technologie“ zrychlení vibrací.

Vybrodiagnostiku můžeme rozdělit do několika kategorií:

- Periodická pochůzková diagnostika – manuální měření s danou periodou (měsíčně až kvartálně), vhodné pro určení budoucího stavu stroje.
- Jednorázové měření stavu strojního zařízení – zaznamenání okamžitého stavu, pro určení budoucího stavu stroje velmi obtížné.
- Kontinuální měření ON-LINE – neustálý dohled nad strojním zařízením, mnohdy napojeno na ochranu, při překročení povolených limitů dochází k odstavení nebo varovnému hlášení.

Diagnostikovatelné poruchy:

Vibrace elektromotorů se dají rozdělit podle vzniku:

- Vibrace mechanického původu
- Vibrace elektromagnetického původu
- Vibrace ventilačního původu

V elektrických a magnetických obvodech rotoru, statoru nebo jeho mechanických částech mohou vznikat uvedené vibrace.

Vibrace mechanického původu:

- Nevývaha – statická a dynamická excentricita
- Nesouosost
- Ohnutý hřídel
- Mechanické uvolnění
- Poruchy ozubených a řemenových převodů
- Poruchy ložisek

Vibrace elektromagnetického původu:

- Statická a dynamická excentricita
- Přerušené rotorové tyče
- Ložiskové proudy
- Zkratky v magnetických obvodech
- Vibrace sběracího ústrojí
- Negativní vliv drážkování rotoru a statoru
- Přesycení některých částí magnetického obvodu
- Nesymetrie magnetických obvodů

Závady na strojích, které nejčastěji zvyšují vibrace:

- Nevyváženost rotorů
- Nesouosost spojek, ložisek, převodů
- Různá mechanická uvolnění

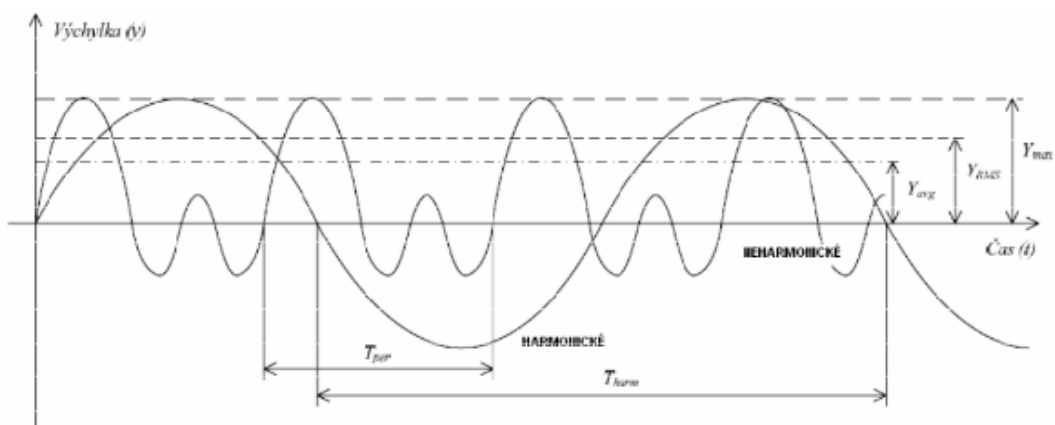
- Poškození valivých ložisek
- Opatření převodů
- Hydraulické a aerodynamické problémy
- Zadírání
- Rezonance
- Deformace

2.2 Měření a vyhodnocení vibrací

Základním jevem vibrodiagnostiky je tedy pozorování mechanického kmitání, které stroj vykonává, kmitavý (výchozí klidové) pohyb rovnovážné polohy. Kmitání je dynamický jev, související s nevyvážeností rotačních částí. Kmitání lze zapsat určitým polohovým vektorem.

Rozdělení kmitání:

- Periodické – dělí se na harmonické a neharmonické
- Neperiodické
- Náhodné – dělí se na stacionární a nestacionární



Obr. 2-1 Průběhy harmonického a neharmonického kmitání [5]

Pro měření vibrací jsou určeny různé typy senzorů.

Senzory pro určení výchylky, polohy a posuvu:

Dnes se nejvíce používají indukční senzory, využívajících závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vysokofrekvenční magnetické pole vytvoří vířivé proudy v elektricky vodivém materiálu a zde se vytvoří sekundární magnetické pole. Intenzita vytvořeného pole působí proti intenzitě pole budící cívky tj. v závislosti budící cívky od vodivého povrchu se intenzita pole cívky více nebo méně zeslabí. Bude-li budící cívka současně s cívkou oscilačního obvodu, dochází při kmitavém pohybu měřného objektu k amplitudové modulaci oscilačního napětí. Odpovídající časový průběh výchylky získáme pomocí amplitudové demodulace. Tyto senzory jsou dosti náchylné na parazitní vlivy z důvodů vysokofrekvenčního principu, jako je například délka kabelu k měřícím obvodům, vnějším elektromagnetickým polím atd. Kvůli těmto důvodům se senzory vyrábějí jako integrované, v kovovém stínícím obalu je mimo cívku nainstalována také základní část elektroniky.

Senzory rychlosti:

K měření rychlosti kmitání se užívá senzor zrychlení, výstupní signál senzoru se integruje nebo použijeme senzor elektrodynamický. Elektrodynamický senzor je v podstatě absolutním senzorem amplitudy kmitání, ale z důvodů vnitřního uspořádání je při mechanicko-elektrické transformaci signálu přímo vyhodnocována rychlost kmitání pouzdra. Senzor má horní kmitočet v rozmezí 2000 až 3000 Hz. Při překročení hranice frekvence nastávají parazitní mechanické rezonance dané tuhosti upevnění vnitřních dílů senzoru.

Akcelerometry:

Jedná se o nejvíce používané seismické zařízení. Výstupní hodnota zařízení je zpracovávána abychom dokázali měřit zrychlení, rychlost nebo výchylku vibrací. Umisťují se na nerotující části stroje. Jsou přizpůsobené různým rezonančním frekvencím, dají se umístit na malou montážní plochu, dokáží odolat vysokým teplotám a odolávají silným magnetickým polím. V akcelerometrech je zabudován jeden nebo více piezoelektrických krystalových elementů, které utváří elektrický náboj. Akcelerometr je tlakový nebo smykový.



Obr. 2-2 Akcelerometr [10]

V praxi se snímače nejvíce využívají v technické diagnostice, ale není tomu vždy, můžeme je vidět například také v automobilovém průmyslu, slouží pro aktivaci airbagů, systémů jízdní stability a podobně. Velké zastoupení snímačů uvidíme i v měření a detekci seismické aktivity, měření odstředivé síly, měření akcelerace apod.

Při měření bychom měli dodržovat stanovené zásady. Jednou z základních věcí je zvolení vhodného snímače a vhodného měřicího zařízení, dalším z nejdůležitějších kritérií je umístění snímačů. Nesmíme zapomenout zvolit správné měřicí místo, neboli místo pro umístění snímače. Snímač by měl být umístěn co nejbližší měřenému místu, se zvětšující se vzdáleností dochází k útlumu signálu. Snažíme se měřit na konstrukčních částech a ne na přechodech mezi materiály aby nedocházelo ke zkreslení signálu. Z toho vyplývá, že je důležité znát konstrukci stroje. Musíme dbát také na čistotu plochy, kde umístíme snímač. Různé nečistoty jako je například prach nám mohou měření zkreslovat. Při měření se snažíme nejprve snímač umístit šikmo k měřené ploše a poté jej přiložit na celou plochu, je to z důvodů zabránění klepnutí nebo zničení snímače.

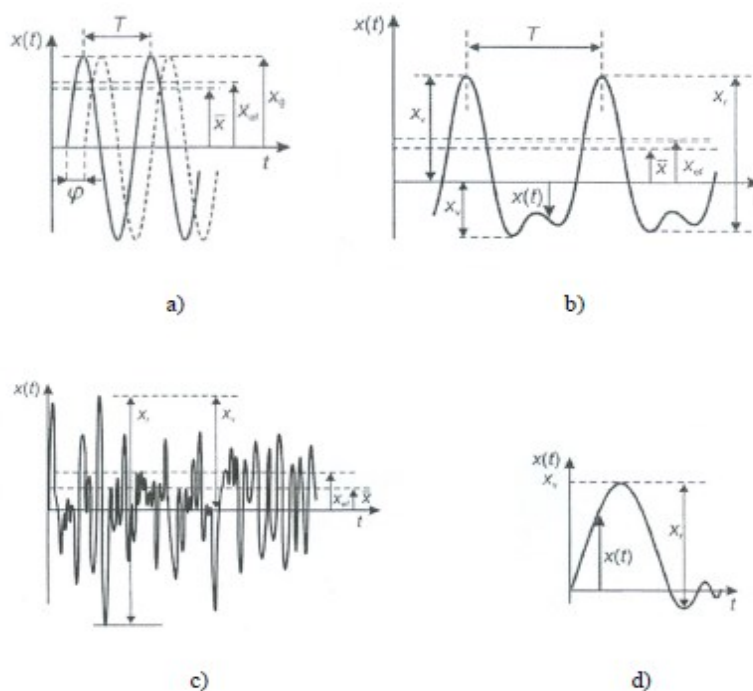
K měření patří i dostatečná bezpečnost. Snímače připevňujeme dostatečně vhodných vzdálenostech od rotujících částí stroje.

Možnosti upevnění snímačů:

- Pevným šroubovým spojem
- Izolovaným šroubovým spojem
- Přilepení tuhým lepidlem
- Přilepení měkkým epoxidem
- Za pomoci magnetu
- Ruční sonda se snímačem

Rozdělení signálů:

- a) Harmonický signál
- b) Periodický signál
- c) Náhodný signál
- d) Přechodový



Obr. 2-3 Časové průběhy signálů

Rychlá Fourierova transformace FFT

Jedná se o jednu z nejpoužívanějších analytických metod. Vyhledává ve vibračním signálu opakující se děje, které zobrazí ve frekvenčním spektru a přiřadí signálu odpovídající frekvenci. Využívá se u strojů s periodickým rotačním pracovním cyklem. FFT rozkládá časové signály na množství sinusových signálů s odpovídající amplitudou a počáteční fází, tento proces se nazývá frekvenční spektrum neboli frekvenční rozklad. Pomocí frekvenčního spektra diagnostik identifikuje technický stav měřeného strojního zařízení. Výhody metody jsou rychlost zpracování dat, přesnost a srozumitelné nastavení parametrů.

3 Základní poruchy a jejich projevy

3.1 Nevyváženost

Užité zdroje pro tuto kapitolu [1], [3]. K nevyváženosti dochází u samotné výroby. Jedná se o nesouměrné umístění hmoty mimo osu rotace. U velké nevyváženosti dochází k namáhání celého stroje, způsobuje vznik mechanického kmitání. Jedním s nejvíce vyskytujících se problémů je nevyváženost součástí, což má v praxi za následek dynamické namáhání, které nám způsobuje zkrácení životnosti celého stroje. Hodnota vibrací, které způsobuje nevyváženost je velice závislá na otáčkách. Pokud zdvojnásobíme otáčky, mohou se vibrace zvýšit až o čtyřnásobek. Z těchto důvodů musíme brát také ohledy na pracovní otáčky zařízení.

Rozdělení nevyvážeností:

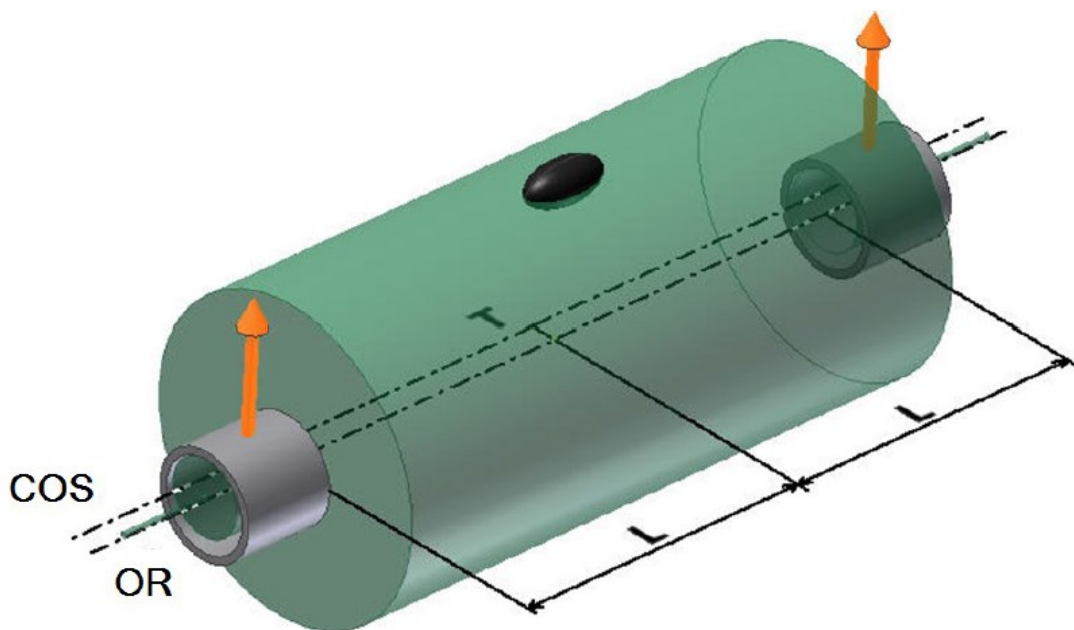
- Statická nevyváženost
- Momentová nevyváženost
- Dynamická nevyváženost

Statická nevyváženost:

Tento typ nevyváženosti se vyskytuje pouze výjimečně. Nejvíce se vyskytuje u rotujících kotoučů, kde průměr kotouče je mnohem větší než jeho šířka (tenké kotouče pil, brzdy atd.). U statické nevyváženosti se jedná o posunutou centrální osu setrvačnosti (COS) oproti ose rotace (OR), jak je zřejmé z níže uvedeného obrázku, osy jsou na sebe rovnoběžné.

Znázornění ve frekvenčním spektru vibrací:

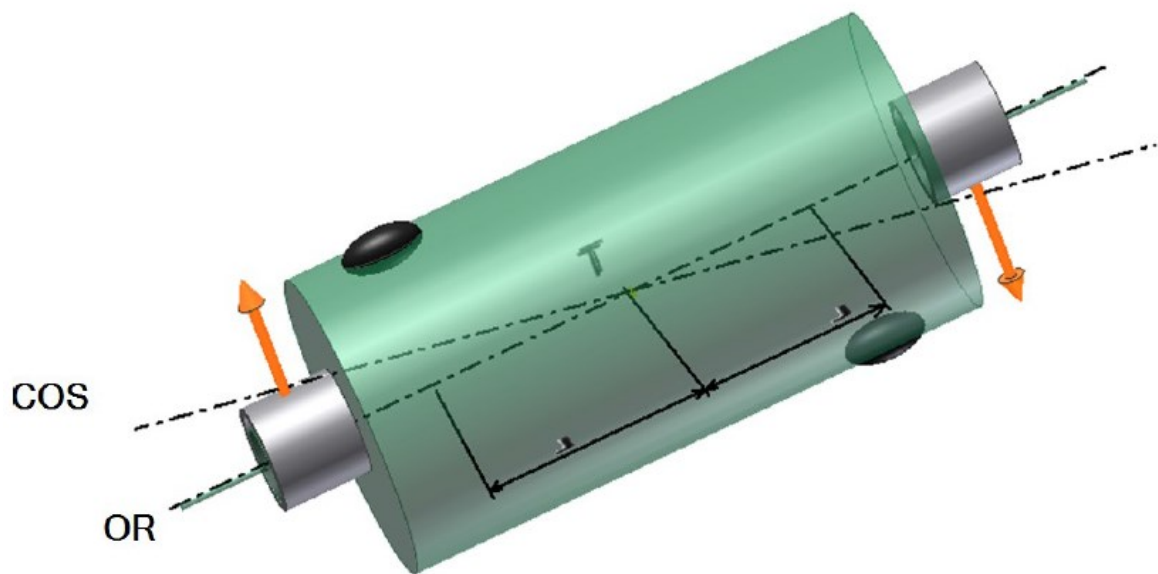
Pokud dochází k statické nevyváženosti, znázorňuje se výraznou amplitudou na otáčkové frekvenci v radiálním směru na obou ložiskách s nulovým nebo minimálním fázovým posuvem ($\pm 30^\circ$). Na základní rotorové frekvenci je tato amplituda viditelná a u většiny případů je převládající. U horizontálního a vertikálního směru je fázový rozdíl přibližně 90° ($\pm 30^\circ$). Vidíme-li ve frekvenčním spektru harmonické násobky otáčkové frekvence, jedná se o vysokou nevyváženost nebo na vymezování vůlí v ložiskách.



Obr. 3-1 Statická nevyváženost [3]

Momentová nevyváženost:

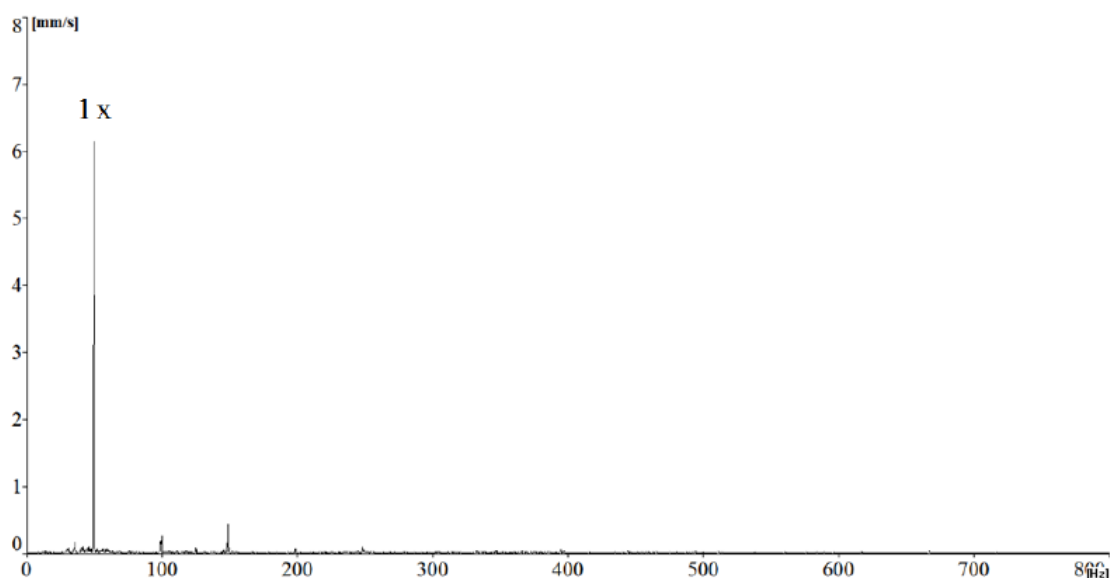
Momentová nevyváženost nebo také v některé literatuře mluvíme o dvojicové nevyváženosti. Projevem momentové nevyváženosti je, že osa rotace (OR) a centrální osa setrvačnosti (COS) jsou různoběžné, ale protínají se v těžišti rotoru. Vibrace se projevují při otáčení rotoru od dvojice setrvačných sil od nevyvážku na rotoru. Pokud je rotor v klidném stavu (netočí se) chová se jako vyvážený, po roztočení se projevív nevyváha, která způsobuje momentové namáhání.



Obr. 3-2 Momentová nevyváženost [3]

Znázornění ve frekvenčním spektru vibrací:

Pokud dochází k momentové nevyváženosti, znázorňuje se výraznou amplitudou v radiálním směru na obou ložiskách s nulovým nebo minimálním fázovým posuvem ($\pm 30^\circ$). Na základní rotorové frekvenci je tato amplituda viditelná a u většiny případů je převládající. U horizontálního a vertikálního směru je fázový rozdíl přibližně 90° ($\pm 30^\circ$). Vidíme-li ve frekvenčním spektru harmonické násobky otáčkové frekvence, jedná se o vysokou nevyváženost nebo na vymezování vůlí v ložiskách.



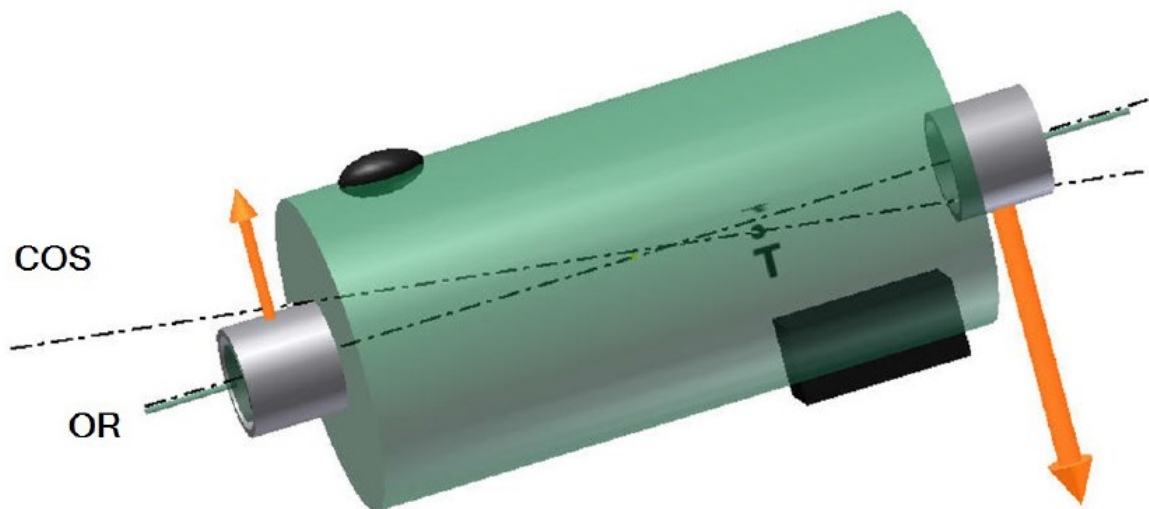
Obr. 3-3 Příklad frekvenčního spektra s nevyváhou statickou nebo momentovou [3]

Dynamická nevyváženost:

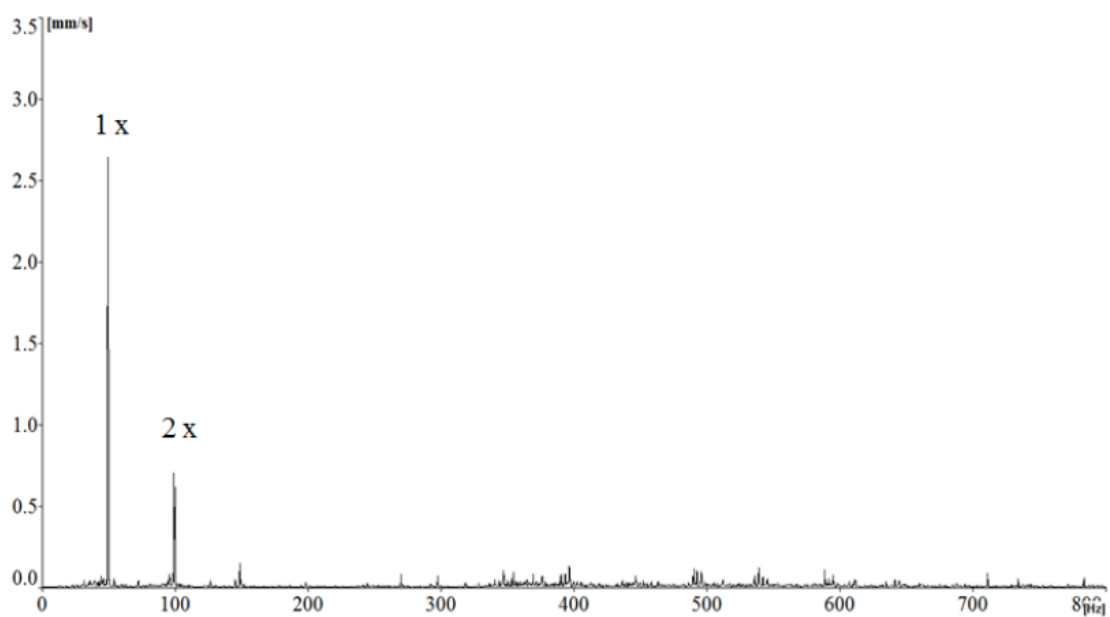
Dynamická nevyváženost je v praxi nejčastěji se vyskytující případ. Je to kombinace statické nevyváženosti s momentovou nevyvážeností. Centrální osa setrvačnosti (COS) neprotíná osu rotace (OR) v těžišti. K protnutí os dochází mimo těžiště.

Znázornění ve frekvenčním spektru vibrací:

Pokud dochází k dynamické nevyváženosti, znázorňuje se výraznou amplitudou na otáčkové frekvenci v radiálním směru na obou ložiskách. Jedná-li se o velkou nevyváženost, vytvoří se amplituda na druhém násobku otáčkové frekvence. K dosažení vyváženosti musíme vyvažovat ve dvou rovinách. V horizontálním směru fázový rozdíl mezi vibracemi pro vnitřní a vnější ložisko může mít přípustné hodnoty od 0° do 180° . V horizontálním a vertikálním směru musí být fázový rozdíl totožný.



Obr. 3-4 Dynamická nevyváženost [3]



Obr. 3-5 Příklad frekvenčního spektra s dynamickou nevyvážeností [3]

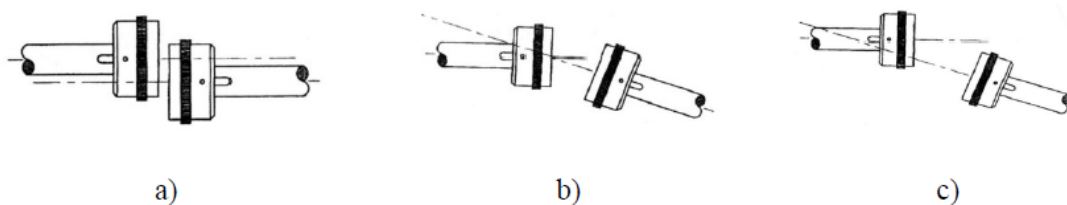
3.2 Nesouosost

Jeden z největších problémů u strojních zařízení je, že pracují za špatného ustavení. Ustavení má velice velký vliv na spojku, pokud je nekvalitní dochází k velkému tepelnému a silovému namáhání spojky, deformaci hřídelů, zvyšování namáhání ložisek, převodovek

a to má za důsledek zvyšování vibrací. Vibrace se přenáší celým strojem a mohou způsobit poškození celého systému.

Druhy nesouososti:

- a) Rovnoběžná nesouosost
- b) Úhlová nesouosost
- c) Rovnoběžná a úhlová nesouosost



Obr. 3-6 Druhy nesouososti

Rovnoběžná nesouosost

Původní osy rotací hřídelí byli před smontováním rovnoběžné, provede se sestavení hřídelí a dojde k výraznému namáhání součástí případně spojky. Závadu poznáme podle velkých radiálních vibrací. Stává se také, že druhý harmonický násobek je často větší než otáčková složka. Pokud roste přesazení hřídelů, generují se ve spektru amplitudy s čtvrtým až osmým harmonickým násobkem.

Úhlová nesouosost

Původní osy rotací hřídelí byli před smontováním nerovnoběžné, ale docházelo k jejich protínání. Důsledkem jsou velké axiální vibrace. U spektra se projeví amplituda na první, druhé nebo třetí harmonické frekvenci. Nastává opačný fázový rozdíl na obou stranách spojky, proto je fázový rozdíl 180° .

3.3 Valivá a kluzná ložiska

Jedná se o jedny z nejpoužívanějších strojních součástí. Pro plánování a řízení údržby se stávají ložiska jedním z nejdůležitějších problémů k zajištění spolehlivosti zařízení.

Dělení z konstrukčního hlediska:

- Kluzná ložiska
- Valivá ložiska
- Ložiska se speciální konstrukcí (elektromagnetická, atd....)

3.3.1 Kluzná ložiska

V některých případech také nazývána hydrodynamická ložiska. Ložiska fungují na principu vytvoření mazacího filmu mezi rotujícím čepem a stacionární pánví kluzného ložiska.

Kluzná ložiska dělíme:

- Válcová kluzná ložiska
- Citrónová kluzná ložiska
- Kluzná ložiska s naklápěcími segmenty

3.3.2 Valivá ložiska

V praxi jsou valivá ložiska jedním z nejpoužívanějších prvků pro přenos síly mezi komponentami rotujících strojů. U ložisek se neustále zdokonaluje konstrukce technologie, což má za následek zmenšení únavy ložisek a zvýšení její životnosti. I když technologie jde stále kupředu, může mít porucha ložiska nedozírné následky na celkový chod zařízení. Ložisko se snažíme monitorovat a zabránit poruše tak aby bylo možno:

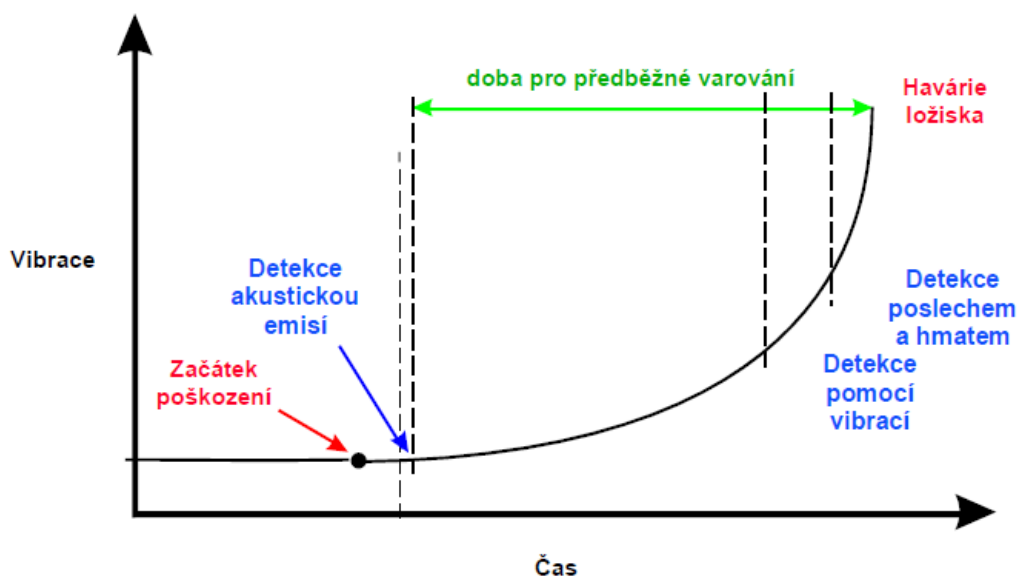
- Zabránit nepředvídatelným poruchám a tímto minimalizovat náklady odstávky
- Prodloužit životnost ložiska do doby únavové životnosti
- Zbytečně nenakupovat ložiska do skladu, počítat s časem výměny

Možné závady na ložisku mohou být způsobeny z mnoha příčin.: špatné mazání (málo maziva nebo mnoho maziva), znečištěné mazivo, přílišné přetěžování ložiska (může být způsobeno nevyváhou, nesouosostí, ohnutý hřídel apod.), špatná montáž, nekvalitní uskladnění a v neposlední řadě stáří ložiska. Ve většině případů vadné ložisko vydává zvukové a vibrační signály, pokud se tedy provozují údržbou pravidelné prohlídky, je

dostatek času vadu naplánovat výměnu či opravu. Pokud dojde k výměně ložiska, není problém zcela vyřešen. Diagnostik musí určit “základní příčinu“ poškození ložiska a to kvůli tomu aby nedošlo k opakovanému poškození ložiska.

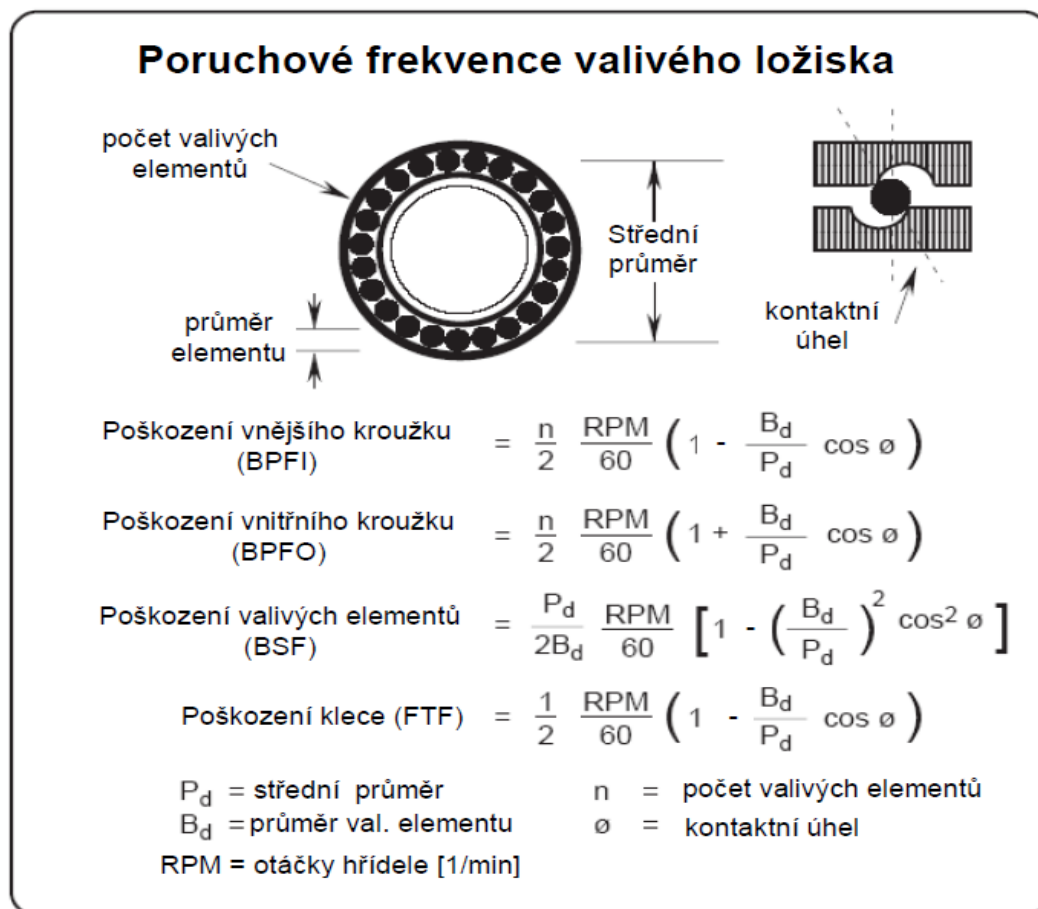
Průběh poškození valivého ložiska:

Velice málo dochází u ložisek k poruchám už při jejich spuštění. Poruchy začínají přicházet až po určité době provozu, s následným časem poruchy více a více narůstají, až dojde ke katastrofické poruše. Pokud ložisko začne vykazovat trend k poruše je potřeba zvýšit četnost sběru dat, z důvodů určení spolehlivosti stroje. Systém údržby má za úkol detekovat poškození včas, aby došlo k nejefektivnější opravě.



Obr. 3-7 Trendování měřených vibrací valivých ložisek [1]

K nalezení poškození určitých dílů na ložisku nám slouží charakteristické poruchové frekvence, určených z rozměrů vnějšího a vnitřního průměru kroužku, roztečného průměru, průměru valivého elementu, úhlu dotyku valivého elementu a stěny kroužku (viz Obr. 3-8).



Obr. 3-8 Poruchové frekvence valivého ložiska [1]

Diagnostika obálkovou metodou:

Obálková metoda je často využívána pro zjišťování detekce poškození ložiska. Má za úkol zvýraznit malé signály dvousložkovým procesem. Za pomoci pásmového filtrování oddělí ložiskové signály o vyšších frekvencích od nízkofrekvenčních vibrací. Filtrování zobrazí sérii špiček, které odpovídají rázům jednotlivých ložiskových elementů při průchodu přes vadu. Impuls od vady je v časovém oboru velmi úzký, elementy se rozloží na velmi široký frekvenční rozsah, amplitudy harmonických složek frekvence vady jsou ponořeny v šumu. Za pomoci Fourierovy transformace spektrum signálu ukazuje ložiskové poruchové frekvence a jejich harmonické složky.

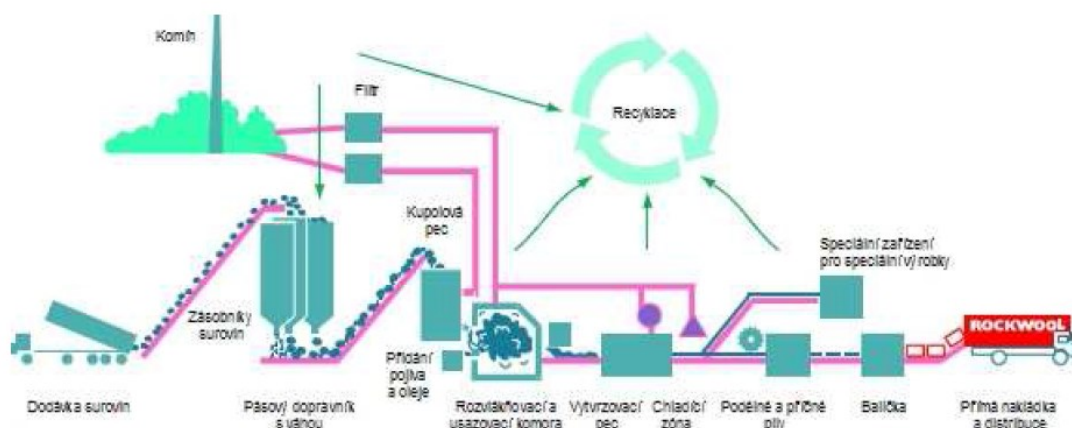
4 O společnosti ROCKWOOL a.s.

Pro kapitolu jsem čerpal se zdroje [7]. Výrobou kamenné minerální vlny se zabývá společnost ROCKWOOL, a.s. Skupina nabízí řadu různých výrobků pro stavebnictví od zateplovacích systémů až po akustické podhledy a poradenské služby. Firma buduje zelená řešení pro oblast zahradnictví, pro průmyslové aplikace, lodní průmysl, nabízí řešení na minimalizaci hluku a vibrací v oblasti infrastruktury. Skupina ROCKWOOL byla založena v roce 1909. V dnešní době má společnost přes 9300 vysoce kvalifikovaných zaměstnanců. Společnost ROCKWOOL provozuje 27 továren na třech kontinentech, ve více než 40 zemích. Společnost má zastoupení v ČR od roku 1993. Firma ROCKWOOL začala vyrábět kamennou vlnu v ČR od roku 1998. V ČR má společnost v dnešní době okolo 150 pracovníků. ROCKWOOL, a.s. má sídlo v Bohumíně, kde se také nachází výrobní závod s jednou výrobní linkou. Největší prodejní zastoupení má společnost v síti stavebnin.

4.1 Postup výroby minerální vlny

Základními surovinami výrobního procesu kamenné minerální vlny jsou především čedič, nebo gabro případně diabas. Základním procesem je správné určení poměrů přírodního kamene a příměsí (vysokopecní struska, vápenec, speciální brikety) a jejich umístěním do speciální kupolové pece, ve které jsou vysoké teploty kolem 1400 – 1500 °C, které zajišťuje koks, užívaný jako palivo. Při těchto teplotách vzniká z minerálního kamene tekutá láva. Hmota vzniklá tavením vytéká z pece a stéká na rozvlákňovací kotouč. Otáčky kotouče jsou velmi vysoké, pohybují se v řadech tisíců otáček za minutu. Za pomoci kotouče se rozstříkne tavenina, mění se na vlákna, která jsou ochlazována vzduchem a sbírána v usazovací komoře v podobě koberce vlny. Dále vlněný koberec putuje po technologické lince, kde je následně tvarován, stlačován a proplétán vlákny v mnoha směrech podle určené technologie. Následně kamenná minerální vlna prochází přes vytvrzovací komoru. V komoře je kamenná minerální vlna zahřívána na teploty kolem 200 °C, aby v konečném procesu došlo k plné polymerizaci syntetické pryskyřice a stabilizaci materiálu. Vlněný koberec se následně ochlazuje. Na konci linky se nachází pily, které vlněný koberec

rozřezávají na požadovaný rozměr a dále balí na desky, pásy nebo role, což je konečný stav před vyskladněním.



Obr. 4-1 Schéma linky pro výrobu kamenité vlny

4.2 Produkty společnosti

Společnost ROCKWOOL má v nabídce velký výběr produktů z kamenné minerální vlny. Nejčastěji dodávané výrobky jsou izolace řezané na desky, v rolích nebo jako potrubní pouzdra. S produkty izolujeme v oblastech:

- Rodinných a bytových domů
- Sportovních hal a stadionů
- Administrativních budov a nákupních center
- Průmyslových objektů
- Vzduchotechniky a vytápění
- Protipožární ochrany

4.3 Vliv na životní prostředí

ROCKWOOL, a.s. jako výrobce izolací z kamenné minerální vlny přispívající k ochraně životního prostředí a trvale udržitelnému rozvoji, cítí povinnost pečovat o životní prostředí v každé fázi své činnosti. Bere v úvahu zlepšování ekologické rovnováhy v rámci celého životního cyklu výrobků i během naší každodenní činnosti.

Společnost se snaží:

- plnit všechny právní požadavky spojené s ochranou životního prostředí, snaží se zavádět stále vyšší standardy
- pracovat na vývoji výrobků a systémů z kamenné minerální vlny takovým způsobem, aby v maximální míře chránily životní prostředí:
 - zvyšováním energetické udržitelnosti
 - snižováním emisí CO₂
 - minimalizací následků požárů, díky nehořlavosti a protipožárním vlastnostem
 - snižováním hluku
- minimalizovat dopad na životní prostředí zaváděním a zdokonalováním málo – a bezodpadního hospodářství
- aktivně rozvíjí otevřený dialog se zákazníky, dodavateli, úředníky, zaměstnanci a sousedy
- aby výrobní závody minimálním způsobem zatěžovaly životní prostředí

Při konzultaci ve společnosti ROCKWOOL a.s. mi představili svůj systém na monitorování výrobní linky. Tento systém pracuje na principu online měření teplot a vibrací ventilátoru. Teploty u ventilátorů se měří na vinutí motoru, na ložiscích u motoru (přední, zadní ložisko) a ložiska ventilátorů. Vibrace snímají pomocí jednoho senzoru na celém ventilátoru (viz Obr. 6-2). Více informací mi nebylo poskytnuto, jedná se o ochranu firemního tajemství.

Vibrace a teploty											
Zarizeni [Uroveň] SEKCE - Komponenta	ID Info	Aktualni Stav	Motor - vinuti			Motor - loziska		Ventilator - loziska		Vibrace	
			U	V	W	Predni	Zadni	Predni	Zadni	Mereni 1	Mereni 2
			[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[mm/s]
[+0m] SP - Ventilator Levy spinner	11		69	68	67	54	34	45	46		0.9
[+0m] SP - Ventilator Pravy spinner	10		70	70	69	58	39	46	50		0.8
[+0m] SC - Ventilator Usazovaci komory	24		86	85	85			57	57		3.0
[+0m] CU - Ventilator Cirkulacniho horaku	15		118	115	116	89	59		71		1.4
[+0m] CU - Ventilator Nahrevu horniho pasu	16										0.5
[+0m] CU - Ventilator Chladici zony	19		63	64	62	54	39		57		3.9
[+0m] CU - Ventilator Odtahovy	17										5.9
[+0m] CU - Ventilator Odtahu horniho doprav.	18										0.3
[+0m] CO - Ventilator V5, podtlak ve filtru	9				59						4.3
[+4m] CO - Ventilator V2, foukání do pece	7				67						0.6
[+4m] CO - Ventilator V4, spal.vzduch horaku	8				46						0.8
[+16m] CO - Ventilator V7, odtah spalin	1				59						0.7
[+16m] CO - Ventilator V1, chladici vzduch rek.	2				47						3.5
[+16m] CO - Ventilator V3, redeni CO	3										
[+4m] CO - Ventilator Ohrevu filtru Simatek	4										
[+4m] CO - Ventilator Odpadniho tepla	5										
[+4m] SC - Ventilator Odsavani z digestore	6										
[+0m] SC - Ventilator Suseni sita c. 1	12										
[+0m] SC - Ventilator Suseni sita c. 2	13										
[+0m] SC - Ventilator Zvedani koberce	14										
[+0m] RE - Ventilator cyklonovy	20										
[+0m] RE - Ventilator dopravní Schrotter	21										
[+0m] Line - Ventilator Moldow	22										
[+0m] OFF-line - Ventilator Moldow	23										

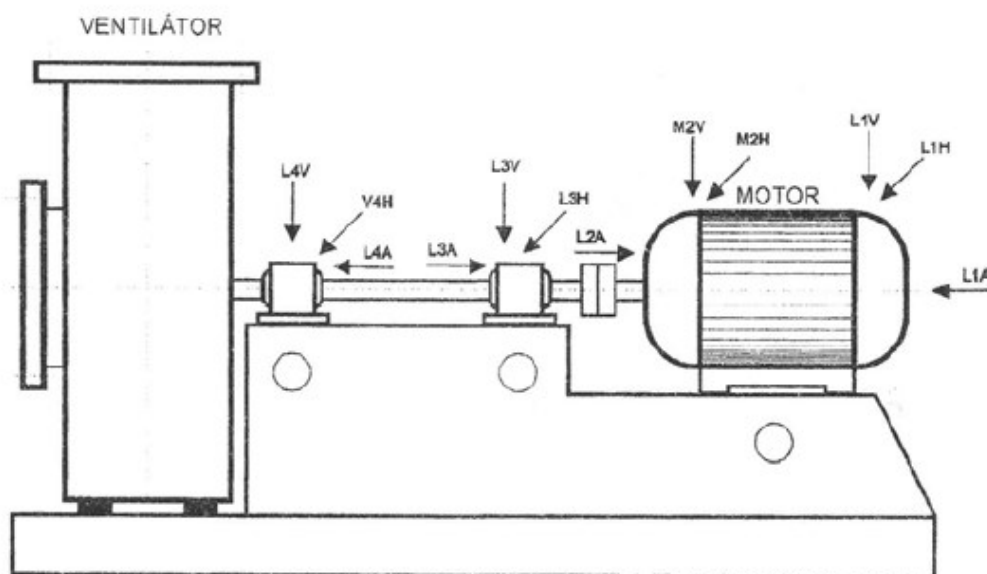
Obr. 4-2 Vibrace a teploty výrobní linky

5 Návrh měření

V této kapitole se především zaměřím na analýzu signálu. Dále se budu zabývat popisem měřicího zařízení a přípravě měření. Veškerá měření probíhala ve společnosti ROCKWOOL a.s.

5.1 Volba měřicích míst

Pokud volíme měřicí místa, snažíme se senzory umísťovat tak aby bylo umožněno opakovatelné měření za stejných anebo co nejvíce podobných podmínek jako při předchozím měření. Měření probíhalo za normálních provozních podmínek výroby. Díky dobré připustnosti jsme vibrace měřili vždy ve třech směrech (vertikálním, axiálním, horizontálním). Názorné zobrazení vidíme na obrázku (Obr. 5-1).



Obr. 5-1 Schéma měřicích míst

5.2 Výpočet budících frekvencí

Budící frekvence je důležité znát pro správné vyhodnocení naměřených hodnot na zařízení. Výpočtové vzorce pro poruchové frekvence byly popsány v kapitole 3.3.2. Vzorce základní otáčkové frekvence a lopatkové frekvence jsou:

Základní otáčková frekvence:	$f_0 = \frac{\text{RPM}}{60}$	RPM – otáčky
Lopátková frekvence:	$f_L = f_0 \cdot n_L$	n_L – počet lopatek

5.3 Stanovení druhu a uchycení snímače

Pro měření vibrací budou použity senzory s názvem akcelerometry. Akcelerometry jsou jedny z nejpoužívanějších senzorů v praxi, jelikož výstup může být zpracováván na libovolnou veličinu v podobě výchylky, rychlosti nebo zrychlení vibrací. Akcelerometr připevníme za pomoci permanentního magnetu.

Parametry snímače AC102-1A:

- Citlivost ($\pm 10\%$) – 100mV/g
- Frekvenční rozsah ($\pm 3\text{dB}$) – 0,5 - 15 000 Hz
- Rezonanční frekvence – 23
- Zdroj napětí – 18 – 30 V
- Vnitřní odpor – 100 Ω
- Pracovní rozsah teplot - -50 – 120 °C
- Hmotnost – 90 g



Obr. 5-2 Akcelerometr AC102-1A [8]

5.4 Popis měřícího zařízení

Měření probíhalo s přístrojem A4400-VA4Pro, výrobce firma ADASH spol. s.r.o. Tento přístroj má v nabídce funkce:

- Analyzátor
- Datakolektor - pochůzka
- Měření rozběhů / doběhů
- Záznam signálu - rekordér
- Provozní vyvažování strojů
- Stetoskop - poslech vibračního signálu
- Lubri - kontrola mazání
- FASIT

Režimy měření	Datakolektor, Analyzátor, Balancer, RunUp, Rekordér
Vstupní kanály	4 pro AC s možností ICP napájení, 4 pro DC, 1 pro externí spouštění
Procesor	1,6 GHz
Paměť	max 120 GB
Vstupní rozsahy	AC +/-12 V špička (peak), DC +/-24 V
Dynamický rozsah	120 dB
Vzorkovací frekvence	min 64Hz, max 64 kHz pro synchronní měření na 4 kanálech, max 196 kHz pro 1 kanálové měření
Synchronizace	plně synchronní měření všech 4 AC kanálů
Rozsah FFT	min 100 čar, max 25 600 čar
Zpracování dat	FFT analýza v reálném čase, ENVELOPE - obálková analýza, ACMT - analýza stavu pomaloběžných ložisek, řádová analýza, měření v uživatelských pásmech, měření otáček, měření procesních DC veličin
Zobrazení dat	celkové hodnoty, časové průběhy, spektra, fáze, řádová analýza, pásmo, 3D grafy (kaskáda)
Typ oken	Hanning, rectangular, transient, exponential
Teplotní rozsah	-10°C až +50°C
Krytí	IP65

Obr. 5-3 Technická data přístroje A4400-VA4Pro

5.5 Vyhodnocení vibrací

Pro vyhodnocení naměřených hodnot bude použita norma [10] ČSN ISO 10816-3, udávající postup při měření, provozní podmínky, klasifikaci strojů a hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech. Norma udává rozdělení do dvou kritérií.

5.5.1 Kritérium první

Kritérium určuje meze velikosti vibrací, sleduje velikost širokopásmových vibrací, které jsou ve shodě s přípustným dynamickým zatížením na ložiscích a přípustným přenosem vibrací do okolního prostředí části zařízení. Hodnotí se maximální velikost vibrací dle pásem pro skupinu uložení.

Pásma hodnocení podle normy [10]:

- Pásmo A – zde se nachází většinou vibrace nových přejímaných strojů.
- Pásmo B – zde se většinou nachází vibrace strojů, které jsou provozuschopné po neomezeně dlouhou dobu.
- Pásmo C – stroj s těmito vibracemi je zpravidla posuzován jako neuspokojivý pro dlouhodobý nepřetržitý provoz. Zařízení může být užíváno s omezením, než nastane vhodná příležitost k opravě.
- Pásmo D – v tomto pásmu se už nacházejí vibrace, které mohou poškodit stroj

5.5.2 Kritérium druhé

U tohoto kritéria hodnotíme změnu velikosti vibrací vůči stanovené referenční hodnotě. Změny velikosti vibrací se objevují okamžitě, nebo v průběhu provozu zařízení, postupem času mohou signalizovat poruchy. Porovnávání měření se musí dělat stejným snímačem na stejných měřicích místech a při nejpobožnějších provozních podmínkách stroje. Dojde-li k poklesu nebo ke zvýšení velikosti vibrací o 25% horní hodnoty pásma B, usuzujeme, že změny jsou významné.

6 Analýza naměřených dat

Vyhodnocování naměřených dat bude probíhat podle normy ČSN ISO 10816-3. Měření probíhalo na třech ventilátorech. U každého ventilátoru byla zvolena čtyři měřící místa, kde se měřilo ve třech směrech, vertikální, horizontální, axiální (viz Obr. 5-1). Podle uvedené normy, všechny tři ventilátory spadají do skupiny 2 – stroje o střední velikosti se jmenovitým výkonem větší než 15 kW a menším nebo rovným 300kW.

Tab. 6-1 Rozdělení pásem mohutnosti vibrací

Klasifikace uložení	Hranice pásma	Efektivní hodnota rychlosti [mm/s]
Tuhé	A/B	1,4
	B/C	2,8
	C/D	4,5
Pružné	A/B	2,3
	B/C	4,5
	C/D	7,1

Pro přehlednější zobrazení vždy u ventilátoru vytvořím tabulku naměřených hodnot. Naměřené hodnoty zpracované do tabulky barevně vyznačím, uvedenými barvami.

Tab. 6-2 Barevné značení pásem

Pásmo A	
Pásmo B	
Pásmo C	
Pásmo D	

6.1 Ventilátor 1

Hlavním úkolem tohoto ventilátoru je odtah spalin z kupolové pece do komína. Tento ventilátor jsem zařadil dle normy ČSN ISO 10816-3 do klasifikace uložení s názvem tuhý a to z důvodu, že ventilátor je pevně uchycen šrouby k základně (viz Obr. 6-1) základna pevně stojí na podlaze.



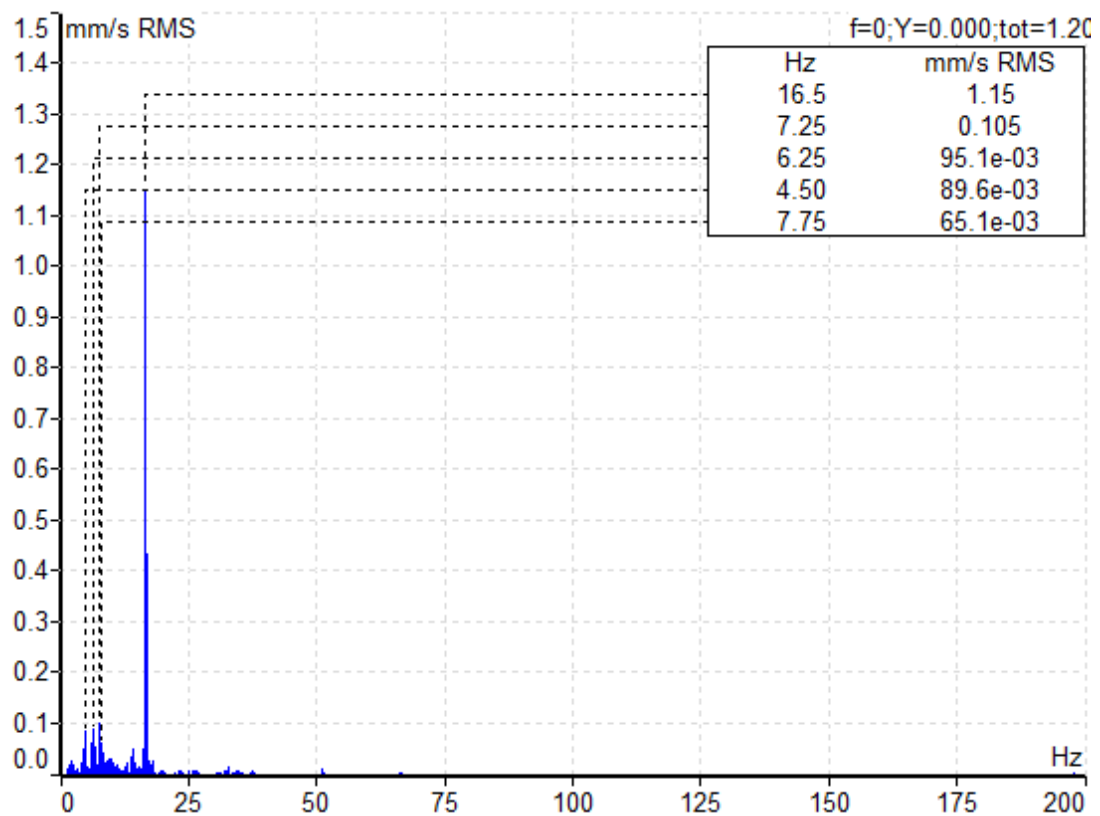
Obr. 6-1 Uchycení ventilátoru

Technická data ventilátoru:

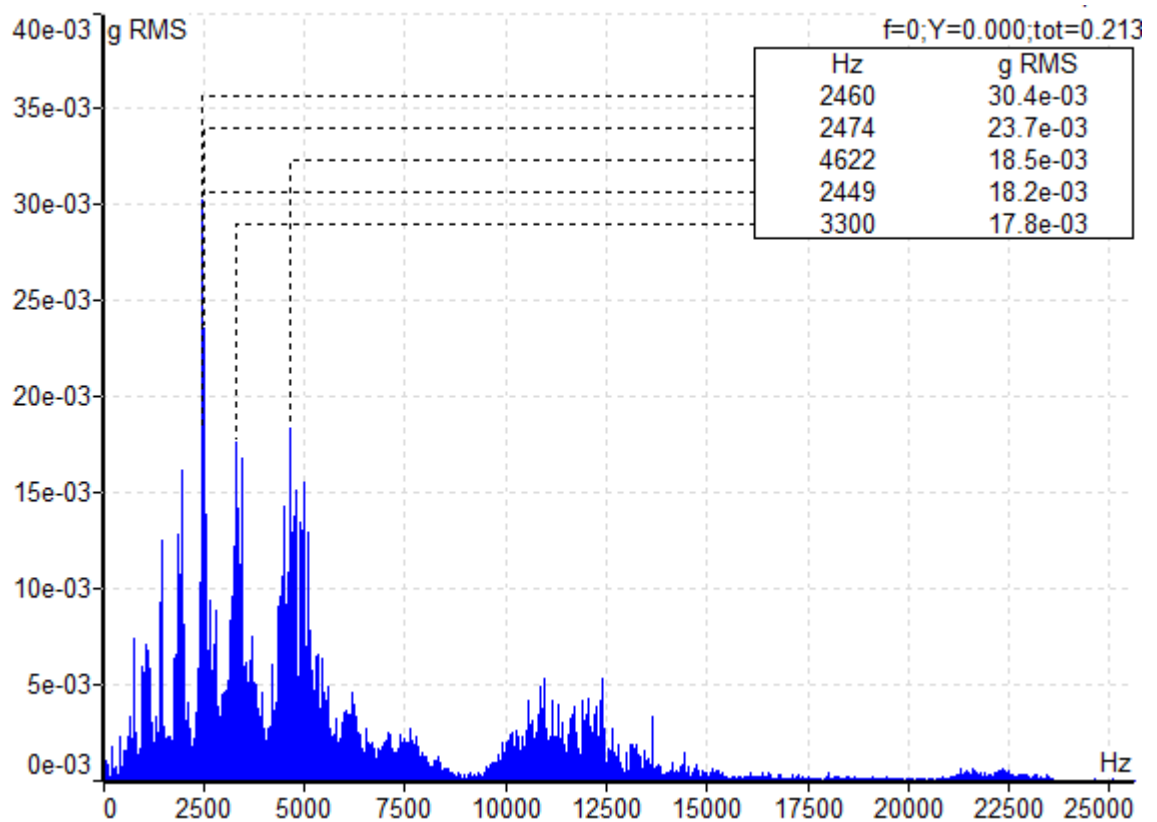
- Typ – 5848 KKX 80800
- Motor – WAG 280S/M-4
- Výkon – $P = 90 \text{ kW}$
- Otáčky – $n = 1485 \text{ min}^{-1}$ (otáčky motoru jsou řízeny frekvenčním měničem)

Tab. 6-3 Naměřené hodnoty ventilátoru 1

Veličina	Směr	Místo L1	Místo L2	Místo L3	Místo L4
V_{RMS} [mm/s]	V	0,435	0,229	0,810	1,18
	H	0,416	0,249	0,433	0,479
	A	0,631	0,988	0,742	0,747
a_{RMS} [mm/s ²]	V	0,744	0,663	0,215	0,209
	H	0,671	0,858	0,252	0,261
	A	0,721	0,563	0,177	0,140



Obr. 6-2 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací (vertikální směr, měřící místo L4)



Obr. 6-3 Frekvenční spektrum zrychlení vibrací (vertikální směr, měřící místo L4)

Špička na otáčkové frekvenci $f = 16,5$ Hz je způsobena nevývahou, která vzniká na lopatkách ventilátoru. V pracovním prostředí ventilátoru je velice zvýšená prašnost a to může mít za důsledek pozvolné nalepování prachu na lopatky ventilátoru, jenž vykazuje odhalenou nevývahu. V rámci pravidelné údržby dochází k čištění lopatek, čímž pravděpodobně dojde k podstatnému snížení této amplitudy. Po provedení údržby doporučuji opětovné měření.

6.2 Ventilátor 2

Úkolem ventilátoru je přivádět chladicí vzduch do rekuperátoru, aby nedocházelo k přehřívání. Ventilátor jsem zařadil dle normy ČSN ISO 10816-3 do klasifikace uložení s názvem tuhý a to z důvodu, že ventilátor je pevně uchyten šrouby k základně, základna pevně stojí na podlaze.



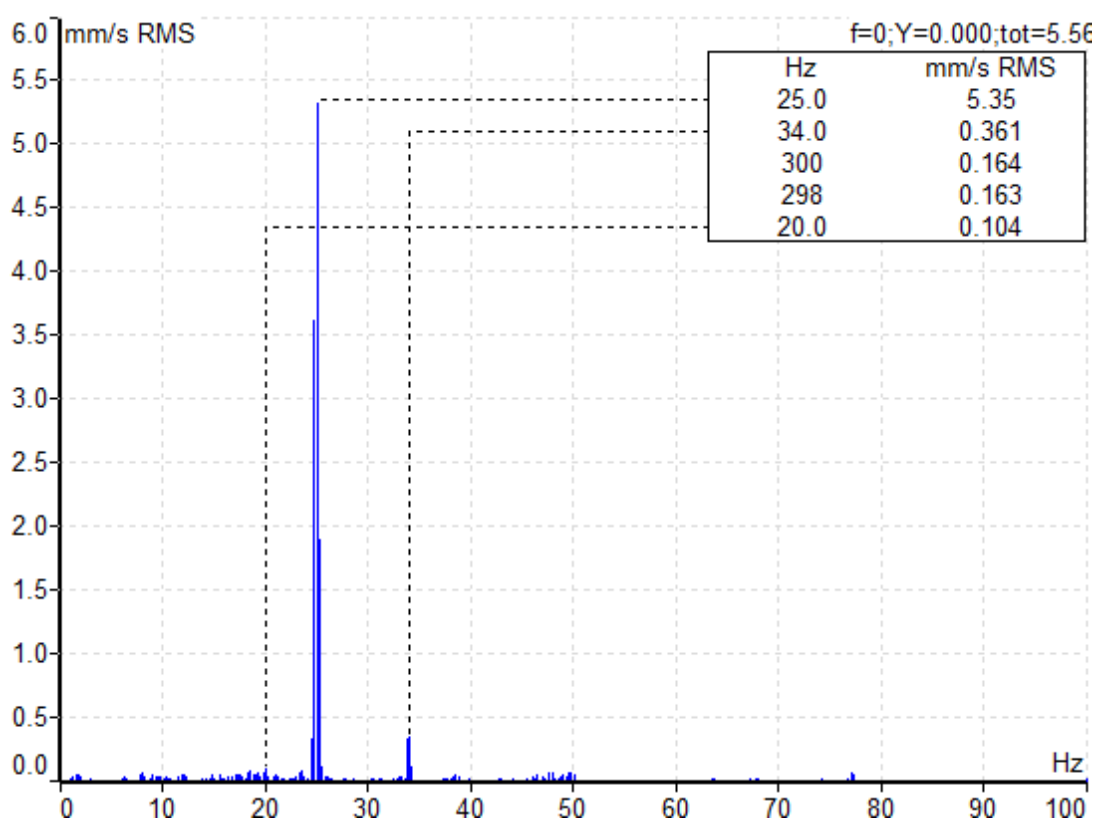
Obr. 6-4 Celkový pohled na ventilátor

Technická data ventilátoru:

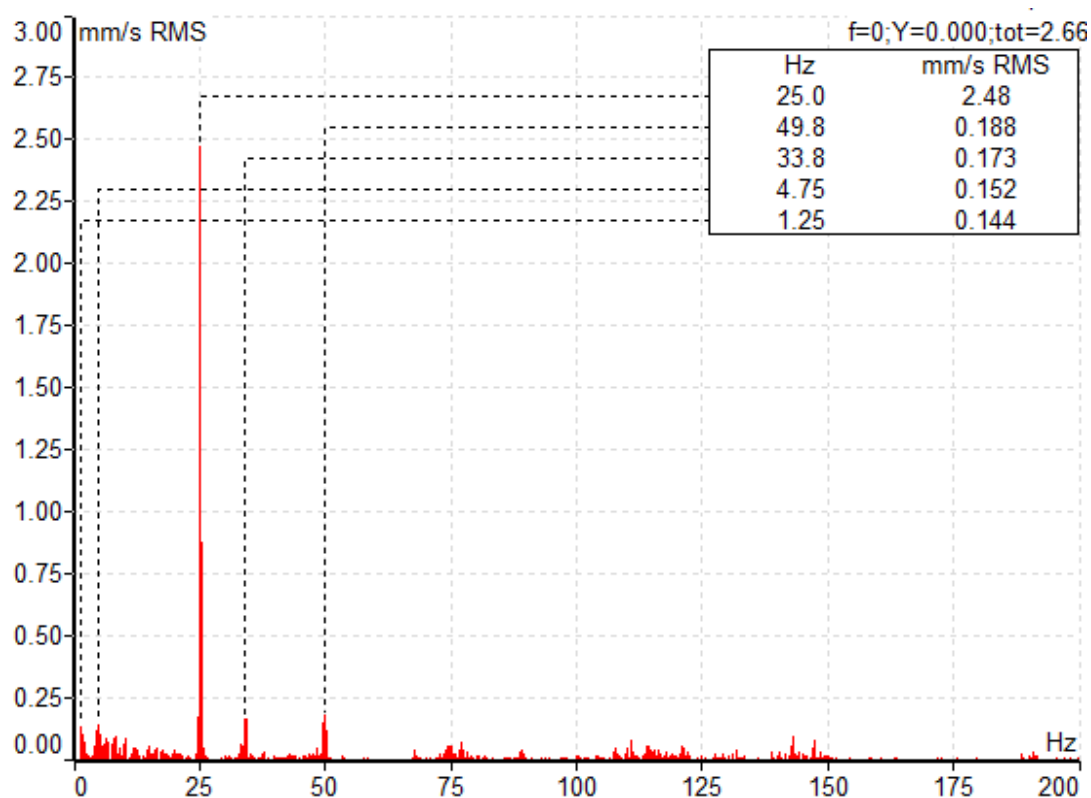
- Typ – 73462 KN 40800
- Motor – Siemens 1LA62804AA60Z
- Výkon – $P = 75 \text{ kW}$
- Otáčky – $n = 1480 \text{ min}^{-1}$ (otáčky motoru jsou řízeny frekvenčním měničem)

Tab. 6-4 Naměřené hodnoty ventilátoru 2

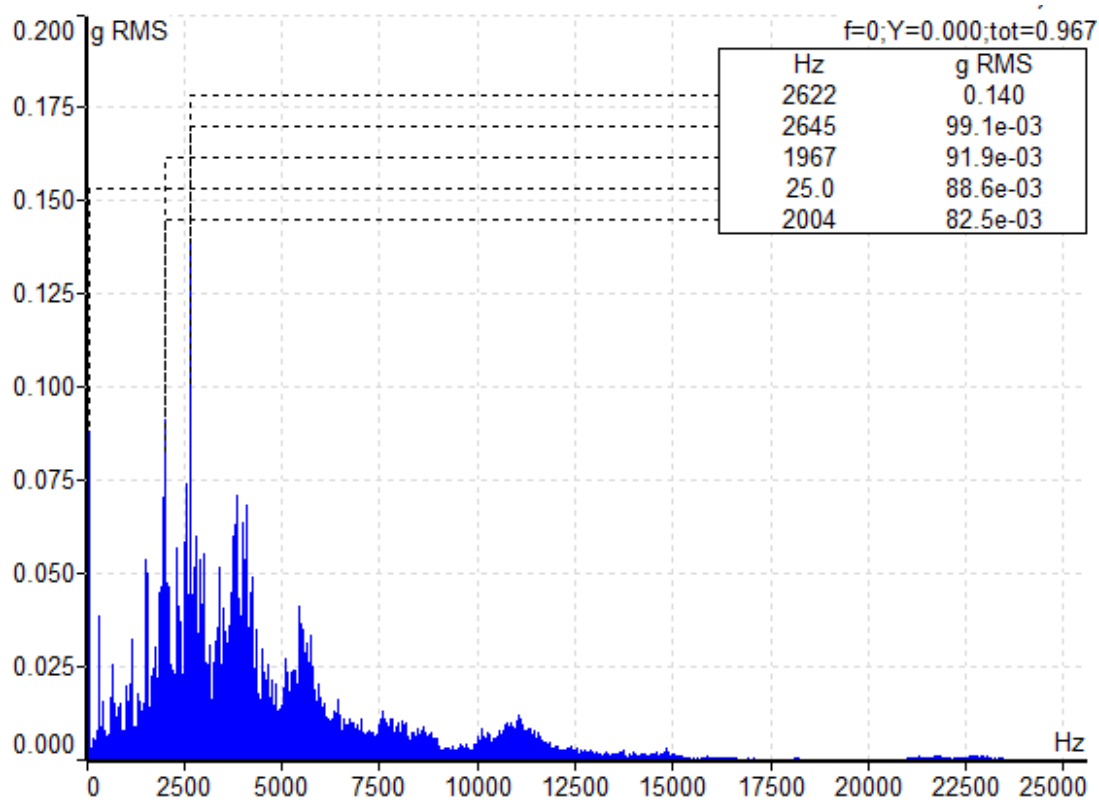
Veličina	Směr	Místo L1	Místo L2	Místo L3	Místo L4
V_{RMS} [mm/s]	V	1,07	2,89	4,26	5,59
	H	0,826	1,55	2,22	2,69
	A	2,36	1,99	1,13	1,11
a_{RMS} [mm/s ²]	V	0,273	0,234	0,969	0,966
	H	0,212	0,195	0,856	0,648
	A	0,187	0,199	0,719	0,844



Obr. 6-5 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací (vertikální směr, měřící místo L4)



Obr. 6-6 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací (horizontální směr, měřící místo L4)



Obr. 6-7 Frekvenční spektrum zrychlení vibrací (vertikální směr, měřící místo L4)

Na uvedených grafech můžeme vidět dvojnásobné rozdíly rychlosti vibrací na otáčkové frekvenci samotná amplituda na této frekvenci je zapříčiněna nevyváhou ventilátoru. Tento dvojnásobný rozdíl mezi vertikálním a horizontálním směrem musí být způsoben špatnou konstrukcí nebo jinou závadou, spojenou s uvolněním. Při ohledání místa se tato teorie potvrdila, bylo nalezeno poškození betonového základu (viz Obr. 6-8). Pro tento případ doporučuji ošetření betonového základu a poté opětovné přeměření vibrací ventilátoru.



Obr. 6-8 Snímek vadného betonového základu

6.3 Ventilátor 3

Úloha měřeného ventilátoru je přívod vzduchu do kupolové pece. Vzduch nám slouží k podporování hoření v peci. Ventilátor jsem zařadil dle normy ČSN ISO 10816-3 do klasifikace uložení s názvem tuhý a to z důvodu, že ventilátor je pevně uchycen šrouby k základně, základna pevně stojí na podlaze.



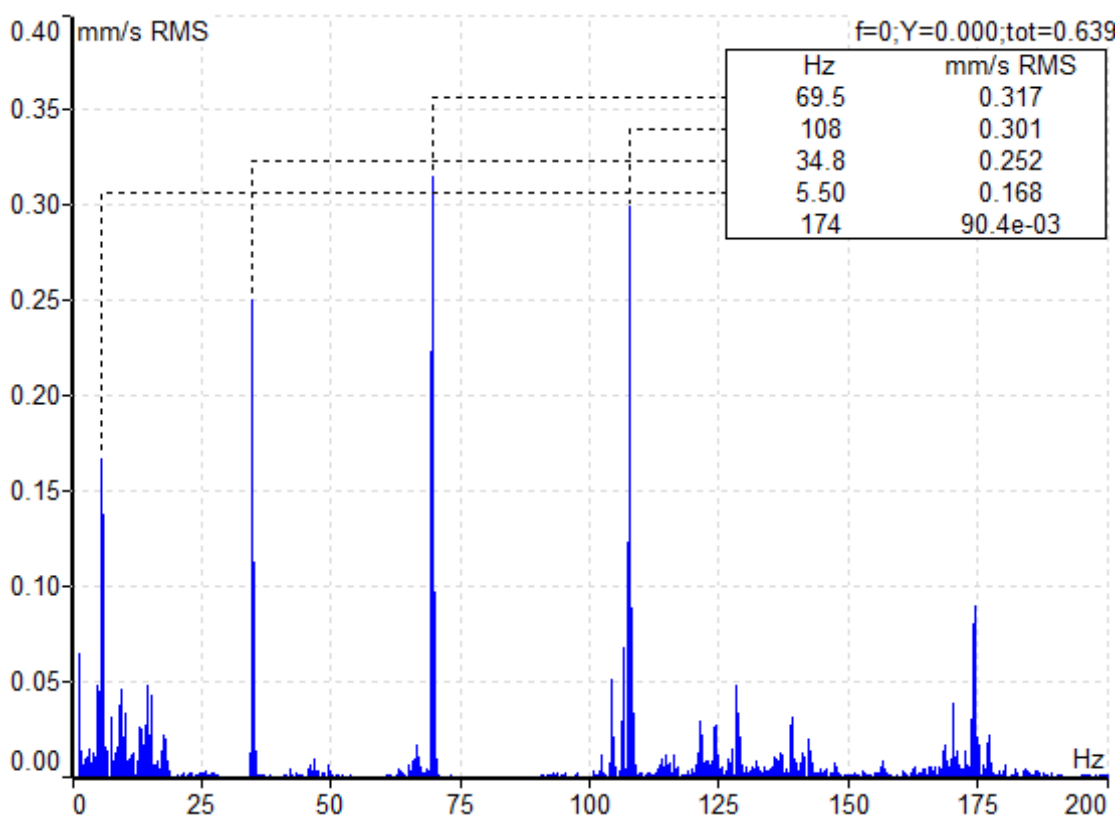
Obr. 6-9 Celkový pohled na ventilátor

Technická data ventilátoru:

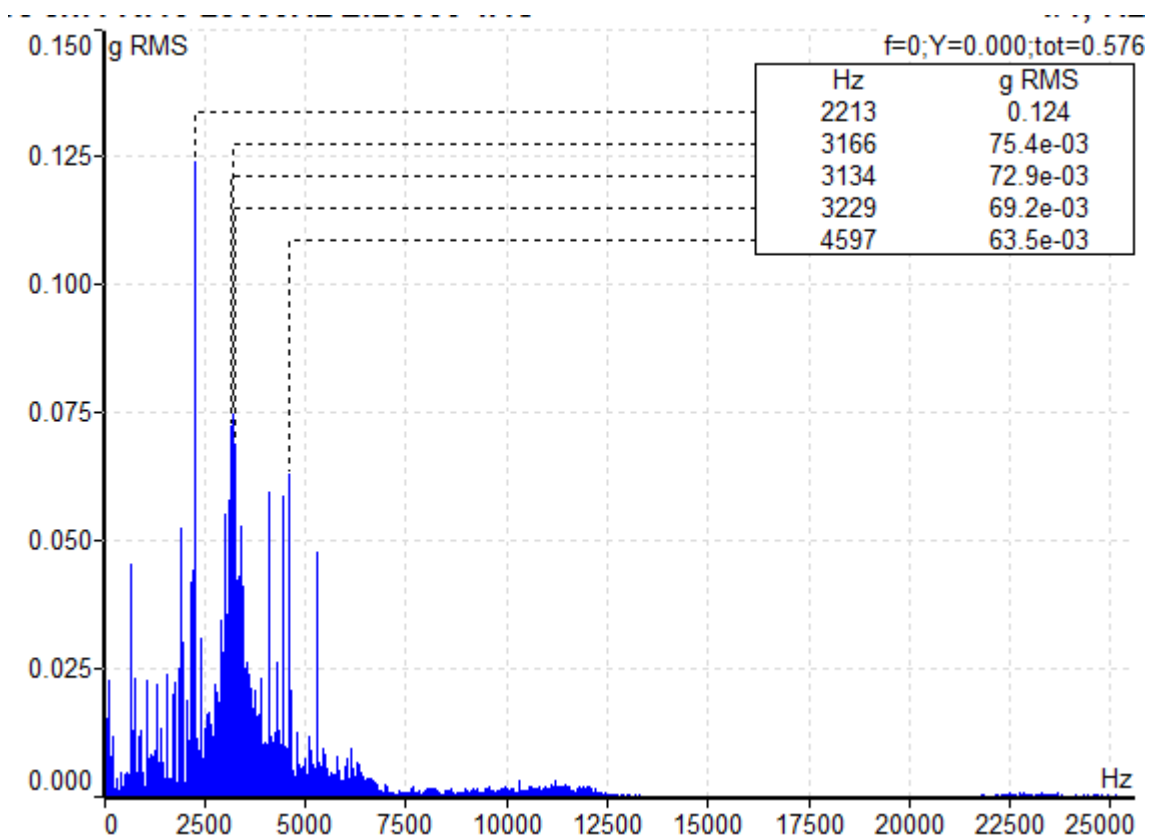
- Typ – 47489 KKK 30355
- Motor – WEG 280S/M-2
- Výkon – $P = 75 \text{ kW}$
- Otáčky – $n = 2970 \text{ min}^{-1}$ (otáčky motoru jsou řízeny frekvenčním měničem)

Tab. 6-5 Naměřené hodnoty ventilátoru 3

Veličina	Směr	Místo L1	Místo L2	Místo L3	Místo L4
V_{RMS} [mm/s]	V	0,551	0,646	0,408	0,495
	H	0,663	0,673	0,390	0,511
	A	1,53	1,55	0,811	0,781
a_{RMS} [mm/s ²]	V	0,363	0,580	0,304	0,292
	H	0,639	0,632	0,301	0,298
	A	0,266	0,812	0,221	0,197



Obr. 6-10 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací (vertikální směr, měřící místo L2)



Obr. 6-11 Frekvenční spektrum zrychlení vibrací (vertikální směr, měřící místo L2)

V případě tohoto ventilátoru se naměřené hodnoty vibrací dle ČSN ISO 10816-3 jeví v pořádku, nacházejí se v pásmu A nebo B což znamená, že stroj je provozuschopný po neomezeně dlouhou dobu. Frekvenční spektrum s uvedeného důvodu neanalyzuji, pouze jej pro úplnost zobrazuji.

7 Závěr

Tématem bakalářské práce bylo měření vibrací ventilátorů pro kupolovou pec a rekuperátor. Měření probíhalo na třech stanovených ventilátorech ve firmě ROCKWOOL a.s. Za pomoci analyzátoru A4400-VA4Pro jsem vyhodnotil frekvenční spektra vibrací.

U všech tří typů ventilátoru měření probíhalo na čtyřech měřicích místech a ve třech směrech, vertikální směr, horizontální směr a axiální směr. Naměřená data byla analyzována a vyhodnocena dle normy ČSN ISO 10816-3 . Podle uvedené normy jsou dva ventilátory zcela v pořádku, naměřené hodnoty se nacházejí se v pásmu A nebo v pásmu B což znamená, že ventilátor může být v provozu po neomezeně dlouhou dobu. Problém nastal u ventilátoru s označením 2, u kterého se projevil velice velké vibrace způsobené nevyváhou. Při podrobnějším ohledání ventilátoru bylo zjištěno poškození betonové desky, na kterou je ventilátor upevněn. Pro tento případ doporučuji poškození ošetřit a následně znovu proměřit zařízení.

Z hlediska údržby a provozu ventilátorů jde jednoznačně určit, že měření za pomoci vibrodiagnostika je nedílnou součástí pro provoz ventilátorů. Pokud se prohlídky provádějí v cyklech, je možné předcházet poruchám na zařízení a ušetřit finanční prostředky spojené s havárií.

8 Použitá literatura

- [1] HELEBRANT, F., ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*, vydala VŠB – Technická univerzita Ostrava 2004, 178 s., ISBN 80-248-0650-9
- [2] HELEBRANT, F.: *Technická diagnostika a spolehlivost IV – Provoz a údržba strojů*, vydala VŠB – Technická univerzita Ostrava 2007, 127 s.,
- [3] BLATA, J., JURASZEK, J.: *Metody technické diagnostiky teorie a praxe*, vydala VŠB – Technická univerzita Ostrava 2013, 133 s., ISBN 978-80-248-2997-5
- [4] MATELA, Z. *Diagnostika radiálních kouřových ventilátorů*. Diplomová práce na Fakultě strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, Katedra výrobních strojů a konstruování. Vedoucí: Blata, J. Ostrava 2011. 61 s.
- [5] VUTBR, *Vibrodiagnostika elektrických strojů*, [online] Dostupné z WWW: http://www.ueen.feec.vutbr.cz/cz/images/stories/images_laboratory/Diagnostika/Files/04_Vibrodiagnostika_elektrickych_stroju.pdf
- [6] KONEČNÝ, P. *Systém diagnostiky stavu ventilátorů odsávání pánvové pece*. Diplomová práce na Fakultě strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava, Katedra výrobních strojů a konstruování. Vedoucí: Hrabec, L. Ostrava 2010. 58 s.
- [7] ROCKWOOL a.s. [online] Dostupné z WWW: <http://www.rockwool.cz>
- [8] INTERTECHNOLOGY [online] Dostupné z WWW: http://www.intertechnology.com/CTC/pdfs/AC102_Series.pdf
- [9] ADASH Spol. s.r.o. [online] Dostupné z WWW: http://www.adash.cz/condition-monitoring/product_a4400_cz.php

[10] AURANET, *eshop* [online], [cit. 2014-5-8] Dostupné z WWW:
http://www.auranet.cz/eshop/index.php?route=product/product&product_id=62

[11] LAMMB, *Vibrodiagnostika*, [online] Dostupné z WWW:
<http://www.lammb.cz/vibro.php>

9 Přílohy

Příloha č. 1 CD obsahující bakalářskou práci