

Vibrodiagnostika průmyslových strojů

Vibration Diagnostics of Industrial Machines

Bc. Martin Strachoně

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav aplikované informatiky
akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Martin STRACHOŇ**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Informační technologie**

Téma práce: **Vibrodiagnostika průmyslových strojů**

Zásady pro vypracování:

1. Vypracujte literární rešerši na dané téma.
2. Popište senzory pro měření vibrací.
3. Zpracujte metody vyhodnocování vibrací.
4. Popište analýzu vibrodiagnostického signálu v časové a frekvenční oblasti.
5. Provedte praktické měření analyzátozem vibrací Adash 4101 s následným zpracováním a vyhodnocením naměřených hodnot.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

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

Seznam odborné literatury:

1. Technické normy ČSN

2. Kreidl M., Šmíd R.: *Technická diagnostika*, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6

3. Smetana C.: *Hluk a vibrace, Sdělovací technika*, Praha 1988, ISBN 80-901936-2-5

4. Janoušek I., Kozák J., Taraba O.: *Technická diagnostika*, SNTL, Praha 1988,
04-236-88

5. Navrátil M., Pluhař O.: *Měření a analýza mechanického kmitání*, SNTL, Praha 1986,
04-214-86

6. Odborné časopisy *Automa a Elektro*. URL:<<http://www.odbornecasopisy.cz>>.

7. Průmyslová firma zabývající se problematikou ložisek skf.
URL:<<http://www.skf.com>>.

8. Firma Adash zabývající se vibrodiagnostikou. URL:<<http://www.adash.cz>>.

9. Firma Brüel & Kjr zabývající se vibrodiagnostikou. URL:<<http://www.bksv.com>>.

Vedoucí diplomové práce:

doc. RNDr. Vojtěch Křesálek, CSc.

Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání diplomové práce:

20. února 2009

Termín odevzdání diplomové práce:

27. května 2009

Ve Zlíně dne 13. února 2009


prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan




doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá měřením a vyhodnocováním vibračního signálu. Měření vibrací je jednou z nejdůležitějších činností pro správný a plynulý provoz průmyslových strojů nejen z hlediska ekonomického, ale i bezpečnostního, stejně tak jako i vibrace působící na okolí v podobě hluku a vibrací. Monitorování je klíčem k detekování poškozených částí, čímž se předejde neočekávaným výpadkům a haváriím ve výrobě. Jsou zde opsány teoretické pojmy a zásady měření vibrací. V praktické části je provedeno a vyhodnoceno měření vibrací na generátoru napětí v provozu teplárny.

Klíčová slova: vibrace, diagnostika, monitorování stavu vibrací

ABSTRACT

This work is involved in measurement and evaluation of vibration signals. Measurement of vibration is one of the most important activities for the proper and fluent operation of industrial machinery, from the economic and security point of view, as well as the environmental vibration especially noise and vibration. Monitoring is the key to detect damaged parts, thus preventing accidents and unexpected losses in manufacturing. Notions and theoretical concepts and principles of vibration measurements are explained here. The measurements of vibration on the generator voltage in the heating operation are implemented and evaluated in the practical part.

Keywords: Mechanical vibration, diagnostic, Vibration condition monitoring

Děkuji vedoucímu mé diplomové práce doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi poskytoval při řešení úkolů.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské 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 právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	9
I TEORETICKÁ ČÁST	10
1 ZÁKLADY MĚŘENÍ VIBRACÍ	11
1.1 ZÁKLADNÍ POJMY VIBRODIAGNOSTIKY	12
1.2 MĚŘENÉ VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ VIBRACE	14
1.2.1 Výchylka.....	14
1.2.2 Rychlost.....	15
1.2.3 Zrychlení	15
2 METODY VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ	17
2.1 OBÁLKOVÁ ANALÝZA (ENVELOPE SPEKTRUM)	17
2.2 METODA RÁZOVÝCH PULZŮ (SHOCK PULSE METHOD)	18
2.3 METODA BCU (BEARING CONDITION UNIT)	19
2.4 METODA Činitele výkmitu (CREST FACTOR).....	19
2.5 METODA SEE (SPECTRAL EMITTED ENERGY).....	20
2.6 KURTOSIS FAKTOR.....	20
3 ANALÝZA V ČASOVÉ A FREKVENČNÍ OBLASTI	22
3.1 ANALÝZA V ČASOVÉ OBLASTI.....	22
3.1.1 Veličiny popisující časový signál	23
3.2 FREKVENČNÍ ANALÝZA	25
3.2.1 Spektrální analýza pomocí Fourierovy transformace	26
4 SNÍMAČE MĚŘENÍ VIBRACÍ	30
4.1 CITLIVOST SNÍMAČŮ VIBRACÍ	30
4.2 VOLBA SPRÁVNÉ MONTÁŽE	31
4.3 ROZDĚLENÍ SNÍMAČŮ	31
4.3.1 Absolutní snímače vibrací	32
4.3.2 Relativní snímače vibrací	34
4.4 SNÍMAČE VÝCHYLKY, POLOHY A POSUVU.....	34
4.5 ABSOLUTNÍ SNÍMAČE RYCHLOSTI	35
4.6 ABSOLUTNÍ SNÍMAČE ZRYCHLENÍ - AKCELEROMETRY	36
4.6.1 Piezoelektrické snímače	37
4.6.2 Piezorezistivní snímače	38
4.6.3 Kapacitní snímače	38
4.6.4 Laserové interferometrické vibrometry	38
II PRAKTICKÁ ČÁST	40
5 MĚŘENÍ VIBRACÍ	41

5.1	ČINNOSTI SOUVISEJÍCÍ S VIBRODIAGNOSTIKOU	42
5.2	ANALYZÁTOR MĚŘENÍ VIBRACÍ A4101	43
5.3	VYHODNOCOVACÍ SOFTWARE DDS 2007	44
5.3.1	Typy zpracování signálu.....	45
5.3.1.1	LF (Low Frequency)	45
5.3.1.2	HF (High Frequency)	45
5.3.1.3	LIN	46
5.3.1.4	Spektrum rychlosti	46
5.3.1.5	Spektrum zrychlení signálu.....	46
5.3.1.6	ENV	46
5.3.2	Způsoby zpracování dat.....	46
6	PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VIBRACÍ NA GENERÁTORU.....	48
6.1	MĚŘENÍ EFEKTIVNÍ HODNOTY NA PŘEDNÍM A ZADNÍM LOŽISKU.....	51
6.2	MĚŘENÍ ŠPIČKOVÉ HODNOTY NA PŘEDNÍM A ZADNÍM LOŽISKU.....	52
6.3	MĚŘENÍ ČASOVÉHO ZÁZNAMU	53
6.3.1	Časový záznam na předním ložisku	54
6.3.2	Časový záznam na zadním ložisku.....	55
6.4	MĚŘENÍ SPEKTRA SIGNÁLU	56
6.4.1	Spektrum signálu na předním ložisku	56
6.4.2	Spektrum signálu na zadním ložisku.....	59
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ.....	62
	ZÁVĚR	63
	RESUMÉ	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	65
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	67
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

Měření, záznam a analýza mechanického kmitání jsou nedílnou součástí diagnostického systému pro sledování provozních stavů strojů v celém průmyslovém odvětví. Snahou je najít příčiny vzniku kmitání a možnosti jejich odstranění.

Cílem diplomové práce je seznámení s pojmy týkajícími se měření vibrací a to jak z pohledu teoretického, tak i praktického měření v reálném provozu. V teoretické části popisují základní pojmy týkající se vibrací, dále metody měření vibrací, frekvenční a časovou analýzu a v závěru různé typy senzorů vibrací. V praktické části jsem provedl vibrodiagnostická měření v provozu teplárny na turbogenerátoru napětí s následným zpracováním a vyhodnocením výsledků.

Vibrace měříme jednak proto, že ovlivňují životnost strojů a konstrukcí, ale také posouzení jeho škodlivého vlivu na člověka, ať už v podobě hluku či vibrací, které spolu úzce souvisí. Zvýšené vibrace ve většině případů generují hluk, který se šíří do okolí. Hluk je původním jevem vibrací, které u technických zařízení způsobuje namáhání materiálu vedoucí až k přímé poruše.

Měření vibrací se obvykle kombinuje s měřením dalších diagnostických veličin jako jsou otáčky, teplota, kroutící moment, provozní tlak, parametry rozběhů a doběhů stroje.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 ZÁKLADY MĚŘENÍ VIBRACÍ

Měřením vibrací se zabývá vibrační diagnostika, sloužící jako nástroj moderních prediktivních a proaktivních metod údržby. Vibrace úzce souvisí s technickým stavem stroje, se stavem jeho částí a jejich dynamickým namáhání. Dávají nám objektivní informace potřebné k určení technického stavu strojů. [1]

Vibrace si lze představit jako kmitání (oscilace) mechanické soustavy, které představuje pohyb pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Jejich monitorování a vyhodnocení patří k základním a rozhodujícím metodám technické diagnostiky. Včasná detekce možné závady je pak základním předpokladem pro strategické plánování nápravných opatření. Vibrace je možné popsat amplitudou a fází v daném časovém okamžiku. [13]

Vibrace mají většinou náhodný charakter a jsou složeny z mnoha kmitočtových složek, což popisuje spektrální výkonová hustota, která je vždy vztažena na určitou šířku pásma. Účinky vibrací lze posuzovat z jejich amplitudy, časového průběhu, frekvence či spektra.

V rozsahu akustických kmitočtů (slyšitelných) označujeme vlnění v plynném či kapalném prostředí jako zvuk, mechanické vlnění (kmitání) v tuhých látkách jako vibrace. [2]

Při mechanickém kmitání se v čase neustále mění hodnoty určujících veličin kmitání (výchyly, rychlosti, zrychlení) a dochází při tom k přeměně energií. Říkáme proto, že mechanické kmitání je dynamický děj.

Jestliže nás zajímá časový průběh kmitání určitého tělesa, musíme vyšetřit jeho kinematické poměry. Když nás zajímají příčiny kmitání, musíme vyšetřit rovnici rovnováhy sil a momentů působících na soustavu. Polohu tuhého tělesa, nebo hmotného bodu v prostoru určuje jeho polohový vektor. Jestliže určíme v kterémkoliv okamžiku amplitudu (velikost) a fázi tohoto vektoru, jsme schopni popsat i jejich mechanické kmitání. K mechanickému kmitání počítáme i rázy. Při nich jde o střetnutí dvou navzájem se pohybujících těles, přičemž toto střetnutí vyvolá přechodový jev, otřes. [4]

1.1 Základní pojmy vibrodiagnostiky

- Kmitočet

Kmitočet (frekvence) f [Hz] určuje počet celých kmitů za sekundu, které vykoná kmitající hmotný bod. Doba kmitu (perioda) T [s] je určena časem mezi dvěma sousedícími kladnými maximálními výchylkami. Perioda určuje úhlový kmitočet ω [s^{-1}], a tím i samotný kmitočet harmonického děje. Pokud v náhodně zvoleném časovém okamžiku počátku sledovaného děje není uvažovaná částice prostředí v klidové poloze, říkáme, že periodický děj má počáteční fázový úhel φ [rad].

- Fáze

Fáze (fázový posun) je dána posunem dvou periodických veličin, přičemž posun o 360° (2π) je považován za nulový posun. U rotačních součástí se měří fáze vůči vztažnému bodu, např. na hřídeli a slouží k lokalizaci poškození. Fázový posun je dán posunem dvou periodických veličin. Probíhají-li dva děje se shodným kmitočtem f , ale mají různé fázové úhly φ_1 a φ_2 , označujeme rozdíl jako fázový posun mezi oběma ději, určující současně i časový rozdíl, o který jsou oba děje posunuty. Fáze je měřena jako úhlový, nebo časový rozdíl jednoho sinusového vibračního signálu vůči jinému signálu, nebo jako rozdíl vibračního signálu. [1, 4]

- Vlnoplocha

Vlnoplocha se označuje množina (plocha) bodů prostoru, které při vlnění kmitají se stejnou fází a ve stejném okamžiku.

Pro dvě sousední vlnoplochy při vyzařování jednoduchého signálu s kmitočtem f [Hz] od sebe vzdáleny o vlnovou délku λ [m] vyzařovaného rozruchu a při rychlosti šíření vlnění c [m/s] platí

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (1)$$

- Rychlost šíření rozruchu

Rychlost šíření rozruchu ve vzduchu je závislá na hustotě prostředí ρ [kg. m⁻³], teplotě δ [°C] a dalších veličinách. V homogenním prostředí je rychlost nezávislá na směru šíření, v nehomogenním prostředí je i směrově závislá.

K šíření vlnění dojde vlivem silového působení budícího kmitání, kde rozruch (přenášena energie) se šíří od buzené částice (zdroje) rychlostí šíření c . Rychlost šíření rozruchu prostředím je ve vzduchu $c = 340$ m/s, v oceli $c = 5200$ m/s, v betonu $c = 3000$ m/s, ve vodě $c = 1440$ m/s. [2]

- Mechanické kmitání (vibrace)

Mechanické kmitání, nebo-li vibrace je dynamický jev, při němž hmotné body nebo tuhá tělesa vykonávají vratný pohyb kolem klidové rovnovážné polohy. Hodnoty veličin mechanických vibrací jsou dány budící silou, jejím směrem a kmitočtem. Vibrace lze popsat amplitudou a fází v daném časovém okamžiku. Mechanické kmitání se měří na víku ložisek nebo na štítech ložisek, a to ve třech navzájem kolmých směrech.

Hlavní příčiny vibrací jsou dynamické síly, které doprovázejí výrobní nepřesnosti, vůle pohybových součástí, styk dílů se třením a odvalováním, nevyváženost součástí s rotačním kmitavým pohybem. Mechanické chvění vyvolává rezonanci ostatních součástí, a tak se stává zdrojem dalšího mechanického kmitání. Kmitající systém je obvykle popisován pomocí diferenciální rovnice nebo soustavy diferenciálních rovnic. [1]

- Složené vibrace

Složené vibrace vznikají součtem různých časových průběhů složených harmonických vibrací a dle vztahu (2) jsou vibrace dané superpozicí různých nesinusových časových průběhů.

$$x = x_{01} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) + \dots x_{0n} \sin(\omega_n t + \varphi_n) \quad (2)$$

Složený signál může být buď periodický, opakuje-li se průběh shodně po době periody T , nebo neperiodický, neopakuje-li se nikdy totožně. Neperiodickými signály jsou např. šумы, jednorázové děje (bouchnutí, akustický třesk apod.), lopatka turbíny při turbulenci, ale i řeč nebo hudba. [2]

- Celkové vibrace

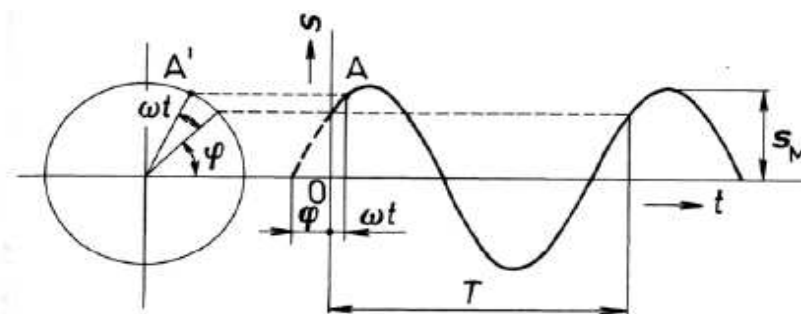
Celkové vibrace stroje jsou měřítkem energie, která souvisí se všemi frekvencemi vibrací v daném bodě. Hodnota celkových vibrací se porovnává s měřeními provedenými při bezporuchovém technickém stavu, srovnává se s nastavenými kritickými úrovněmi a vyhodnocují se časové trendy veličin. Měří se efektivní hodnota rychlosti v horizontálním, axiálním a vertikálním směru.

1.2 Měřené veličiny charakterizující vibrace

Sledováním hmotného bodu elementu prostředí můžeme určit v časovém okamžiku jeho výchylku z rovnovážné polohy, rychlost kmitání nebo zrychlení tohoto pohybu. Určujícími veličinami vibrací jsou tedy výchylka, rychlost a zrychlení.

1.2.1 Výchylka

Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze. Pravidelným, periodickým vychýlením částice z klidové polohy je vyvoláno harmonické kmitání, kde okamžité hodnoty výchylky odpovídají v časovém rozložení průběhu sinusové funkce obr.1. Harmonické vibrace jsou periodické, pravidelné vibrace obsahující pouze jednu frekvenci.



Obr. 1. Časové rozvinutí harmonického kmitání [2]

Kde

S_M je amplituda výchylky,

ω je úhlový kmitočet,

φ je fázový posuv.

Výchylka s [m] z nulové polohy (klidové) dosáhne své maximální hodnoty s_{\max} a vrací se přes klidovou polohu do své záporné maximální výchylky a takhle osciluje kolem své rovnovážné polohy. Výchylka je dána nejen velikostí, ale je určena i směrem.

Značíme-li běžící čas t [s], kmitočet f [Hz], dobu kmitu (perioda) T [s] a úhlový kmitočet ω [s^{-1}] jsou tyto veličiny vzájemně vázány vztahy

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3)$$

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (4)$$

$$s = s_{\max} \cdot \sin(\omega t + \varphi) \quad (5)$$

Výraz $(\omega t + \varphi)$ se nazývá fáze harmonicky proměnné veličiny. [2]

1.2.2 Rychlost

Měří se pohybovou rychlostí v [m/s] a je definována jako rychlost změny výchylky vibračního signálu. Je to nejběžnější způsob měření vibrací. Nejčastěji se používají poměrně levné akcelerometry, z nichž se hodnota rychlosti získá integrováním hodnot zrychlení. Pro okamžitou rychlost platí vztahy [2]

$$v = \frac{ds}{dt} = \omega s_{\max} \cos(\omega t + \varphi) = v_{\max} \cos(\omega t + \varphi) = v_{\max} \sin(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}) \quad (6)$$

ze kterých vyplývá, že fáze rychlosti kmitání je proti fázi výchylky posunuta o $\frac{\pi}{2}$ [rad] = 90°.

Pro jednoduchý harmonický signál dále platí

$$v = j\omega s = j2\pi f \cdot s \quad (7)$$

1.2.3 Zrychlení

Zrychlení se měří pomocí akcelerometru, který obvykle obsahuje jeden nebo více piezoelektrických krystalů a hmotné těleso. Je-li piezoelektrický krystal deformován, vzniká elektrický signál úměrný zrychlení. Rychlost i zrychlení je udáno velikostí a směrem.

Podle Newtonova zákona je zrychlení měřítkem síly ($F = m \cdot a$), která na částici působí. Okamžité zrychlení je dáno časovou změnou rychlosti, a odvozeně druhou derivací okamžité výchylky podle času, tedy [2]

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2s}{dt^2} = -\omega v_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 s_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = a_{\max} \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

Fáze zrychlení je tedy proti fázi rychlosti posunuta o dalších 90° a proti výchylce o 180°, tzn. že je s ní v protifázi. Pro jednoduchý harmonický signál pak lze stanovit zrychlení

$$a = j\omega v = -\omega^2 s \quad (9)$$

kde

a je zrychlení,

j je imaginární jednotka,

ω je úhlový kmitočet,

v je rychlost,

s je výchylka.

2 METODY VYHODNOCOVÁNÍ VIBRACÍ

Metody měření detekují kinematické frekvence ložisek odpovídající velikosti vibrací. Pro udržení bezporuchového chodu stroje se používají různé diagnostické metody, pomocí kterých je možné nejen detekovat, ale i lokalizovat velikost a rozsah poškození. Pro správné měření vibrací je nutné zvolit vhodný způsob měření a typ snímače.

Detekovaný signál se nejdříve zpracuje analogicky a poté se provede digitalizace pomocí analogově-číslicových převodníků. Dalším krokem jsou analýzy pro popis vlastností signálu z hlediska amplitudy a popis signálu v časové oblasti. Následně se provádí spektrální analýzy převážně pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Souhrnem analýz a zpracováním signálu je možné určit poškození a navrhnout správné opatření vzniklého stavu.

Konkrétní metody byly vyvinuty buď výrobcí ložisek, nebo měřicí techniky. Mezi nejznámější metody vibrodiagnostiky patří: „Obálková analýza, Metoda rázových pulzů, Metoda BCU, Crest factor, Metoda SEE a Kurtosis faktor“.

2.1 Obálková analýza (Envelope Spektrum)

Pro přesné určení aktuálního stavu ložisek jsou vyvinuty speciální obálkové metody zrychlení vibrací. Výhodou obálkové analýzy je její rychlost s následnou identifikací poruchy. Je určena k odhalení poruchy ložiska, kdy v následném spojení s FFT analýzou lokalizuje přesnou část ložiska, která je poškozena (vnitřní kroužek, vnější kroužek, valivý element, klec).

Envelope spectrum je vyhodnocováno v rezonanční oblasti mezi 5 - 20 kHz. Protože každá část ložiska má různou relativní rychlost vzhledem k hřídeli, dají se určit frekvence, na kterých se projevují tyto poruchy. Tato metoda spočívá v měření rázových impulsů, které vzniknou při porušení dráhy průchodem kuličky, válečků nebo záběrem zubů. Odvalováním poškozeného prvku ložiska dochází k nárazům, které vyvolají zvýšené vibrace na frekvenci nárazu. Signál se nejdříve přivede do filtru (pásmové propusti), který propustí jen vysoké frekvence a odstraní většinu šumu. Po usměrnění se změní v tzv. obálku (obalené pulsy). Energie se sníží, ale impulsy se opakují ve stále stejných intervalech, neboť frekvence opakování signálu se filtrováním nezmění. Spektrum obálky získáme pomocí FFT analyzátoru, které obsahuje složku, jejíž frekvence udává

kinematické frekvence ložiska. Pro výpočet kinematické (opakovací) frekvence impulzů za předpokladu čistě valivého pohybu se používají následující vztahy [9, 1]

BPFO (Ball Pass Frequency – Outer Race) – frekvence odpovídající závadě vnějšího kroužku

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos \beta\right) \quad (10)$$

BPFI (Ball Pass Frequency – Inner Race) - frekvence odpovídající závadě vnitřního kroužku

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta\right) \quad (11)$$

BSF (Ball Spin Frequency) neboli frekvence odpovídající závadě kuličky nebo válečku

$$f = \frac{PD}{2BD} f_r \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos \beta\right)^2\right) \quad (12)$$

FTF (Fundamental Train Frequency) neboli frekvence odpovídající závadě klece

$$f = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos \beta\right) \quad (13)$$

kde

BD je průměr kuličky nebo válečku,

PD je roztečný průměr,

B je úhel dotyku,

n je počet kuliček nebo válečků,

f_r je frekvence daná relativními otáčkami vnitřního a vnějšího kroužku.

2.2 Metoda rázových pulzů (Shock Pulse Metod)

Metoda rázových pulzů je patentovaná metoda firmou SPM pro měření a posuzování rázových pulzů z rotačních valivých ložisek. Kromě informace o možném poškození ložiska a stupni poškození, poskytuje metoda informaci o stavu mazání a kvalitě instalace. Výhodou metody je rychlost a spolehlivost vyhodnocení.

Přístroj měří maximální hodnotu pulsů, nebo počet pulsů, jejichž hodnota je větší, než referenční hladina. Vyhodnocují se absolutní velikosti impulsů a měří se střední hodnoty amplitudy kmitání snímače v rezonanční oblasti 30 – 40 kHz. [14]

Metodu lze využít také pro nízkotáčkové aplikace, u kterých je signál rázových pulsů extrémně slabý (od 180 ot/min, výjimečně od 1 ot/min).

2.3 Metoda BCU (Bearing Condition Unit)

Metoda je založena na využití rezonanční frekvence snímače (36 až 38 kHz) k zesílení signálu způsobeného poškozením ložiska. Vyhodnocuje se různá doba odezvy, vnitřní energie a četnosti rázů, ze kterých se vytváří hodnota BCU, což závisí na energii buzení a rozměrech ložiska. Metoda se využívá pro detekci mikrotrhlin, které jsou velmi citlivé na ostré impulzy se širokým spektrem signálu a je patentovaná firmou Schenk. [5]

2.4 Metoda činitele výkmitu (Crest Factor)

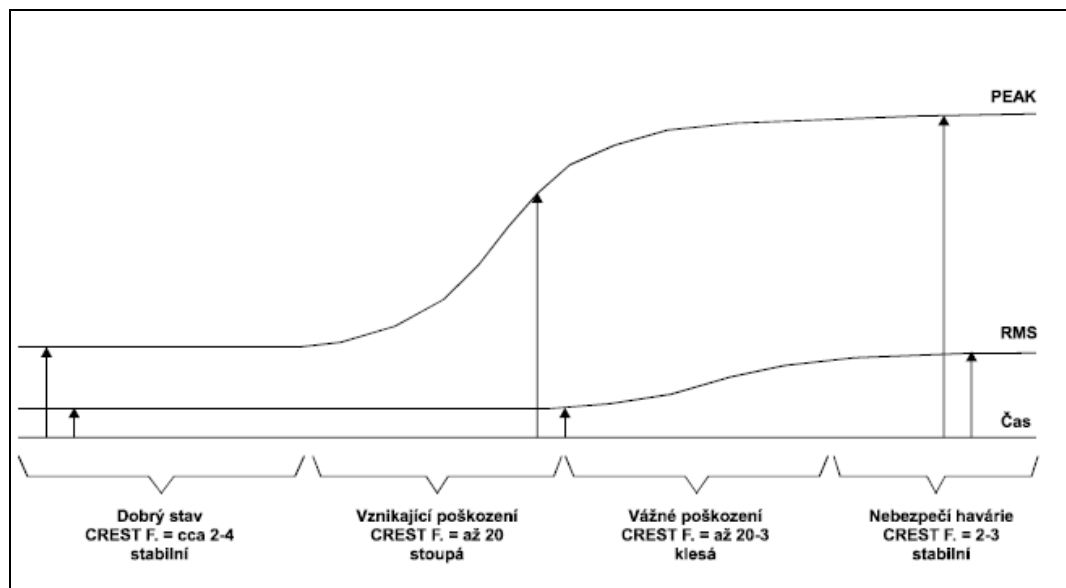
Měření hodnoty Crest faktor patří mezi rozšířené metody diagnostiky valivých ložisek a bývá využíván jako doplňkový parametr o stavu ložiska v pásmu 10 Hz až 10 kHz. Crest faktor je poměrová záležitost umožňující velmi brzké odhalení poškození ložiska. Je také vhodným pomocným indikátorem poruch mazání. Je velmi citlivým parametrem a je vždy větší než jedna. Crest faktor je typicky v rozmezí 3 až 3,5.

Princip metody spočívá v měření efektivní a špičkové hodnoty vibrací a ve výpočtu jejich poměru. Protože se vyhodnocuje poměr dvou hodnot, je tato metoda zcela nezávislá na typu ložiska i na otáčkách hřídele.

Poměr výkmitu k efektivní hodnotě zrychlení

$$CREST\ FAKTOR = \frac{Peak}{RMS}$$

Crest faktor definuje schopnost přenosu nezkresleného signálu, který udává kolikrát je maximální hodnota signálu větší než jeho hodnota efektivní. Tato hodnota je rozhodující pro správný a věrohodný přenos měřicím řetězcem (tj. bez limitace nebo zkreslení). U jednoduchého signálu je činitel výkmitu = 1,41, u složených signálů dosahují až desítkových hodnot. Měřicí řetězce připouštějí činitel výkmitu až 5, výjimečně 8. [9, 2].



Obr. 2. Hodnocení Crest faktoru [9]

2.5 Metoda SEE (Spectral Emitted Energy)

Metoda SEE (Spektrální vyzařovaná energie) je založena na principu snímání vysokofrekvenčního signálu získaného s použitím speciálně vyvinutého senzoru patentovaného firmou SKF. Zpracováním vibračního signálu zajišťuje včasnou detekci kovového styku při porušení mazací vrstvy od poškození ložiska nebo ozubení.

Střední hodnota, efektivní hodnota a směrodatná odchylka se porovnávají s referenční hodnotou. Od ostatních metod se odlišuje tím, že kombinuje vysokofrekvenční akustiku s obálkovou analýzou v pásmu 250 – 350 kHz. [1, 15]

2.6 Kurtosis faktor

Kurtosis faktor je doplňující parametr, který analyzuje stav ložiska pomocí statistického přístupu. Měří efektivní hodnoty rychlosti chvění ložiska v pěti frekvenčních pásmech 2,5 – 80 kHz.

Metoda vychází z úvahy, že náhodný vibrační signál má Gausovo normální rozdělení, tj. nevyskytují se v něm harmonické ani vysokofrekvenční pravidelné složky. Jestliže potřebujeme určit, zda vibrační signál tuto podmínku splňuje, musí se vypočítat dva parametry, podle kterých se určí, zda je rozdělení skutečně Gausovo. Mezi parametry, které popisují tvar rozdělení, a jsou určeny z momentových popisů, patří šikmost a špičatost.

Šikmost rozdělení je definováno jako míra asymetrie rozdělení vůči průměru. Špičatost popisuje šířku rozdělení vůči normálnímu rozdělení. Pro účely vibrační diagnostiky se používá především špičatost. V praxi se tento parametr nazývá Kurtosis parametr. [9]

Tab. 1 Mezní hodnoty Kurtosis faktoru [9]

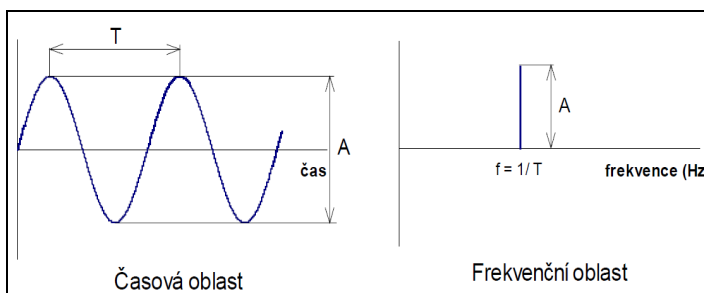
Vypočtená hodnota	Stav ložiska
menší než 3	špatně zvolené pásmo, nebo náhodný šum
3 - 4	dobrý stav
5 - 8	začínající poškození
9 - 13	vážné poškození
větší než 13	nebezpečí havárie

3 ANALÝZA V ČASOVÉ A FREKVENČNÍ OBLASTI

Existuje celá řada různých způsobů sledování provozního stavu ložisek, které mohou pomoci stanovit, kdy ložisko pravděpodobně havaruje, a tím předejít nákladným opravám stroje.

Způsob analýzy vibrodiagnostického signálu vychází ze stanovení typických závad ložiska.

Při analýze signálů měříme vibrace při jmenovitých otáčkách stroje v jednom nebo více bodech na testovaném mechanickém zařízení.



Obr. 3. Grafické znázornění časové a frekvenční oblasti [7]

3.1 Analýza v časové oblasti

Je založena na vyhodnocení parametrů časových průběhů signálů určujících veličin (výhylky, rychlosti, zrychlení). Metody výpočtů v časové oblasti pracují obvykle s časovým průběhem signálu nebo jeho obálkou a snaží se popsat vlastnosti signálu příznaky, které jsou odvozené od integrálních veličin, jako jsou střední a efektivní hodnota signálu, energie nebo činitel výkmitu. V případě převládající náhodné složky signálu (náhodné vibrace) lze pro analýzu aplikovat vybrané statistické výpočty deskriptorů jako je směrodatná odchylka, koeficient špičatosti (kurtosis), koeficient šikmosti (skewness), činitel výkmitu (crest factor) a další. [1]

Analýza vibrodiagnostického signálu v časové oblasti je vhodná pro přechodové jevy (rozběhy a doběhy motorů, rázové odezvy) a tehdy, existuje-li dominantní zdroj vibrací, který zamezí ztrátě informace v šumu signálu. Výhodou časového průběhu je velké množství informací o jednotlivých zdrojích. Pro analýzu časových signálů se využívá frekvenční analýza, ve které frekvenční složky obsahují spoustu informací o stavu rotačního stroje. [1]

Nejjednodušší periodický signál v časovém rozložení lze znázornit sinusoidou, která určuje časový průběh sledované veličiny. Poté, co jsou časové signály zaznamenány, tak jsou zpracovány pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT). Výsledkem je velmi široké spektrum budícího signálu a odezvové spektrum je váženo dynamikou struktury. Podělením těchto dvou spekter vznikne frekvenční odezvová funkce, která popisuje vlastnosti samotné struktury a ne vlastnosti vnějšího prostředí. [1]

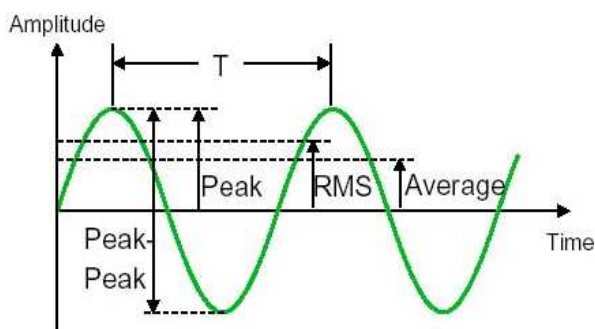
V časové oblasti lze signály rozdělit na vyhodnocení časových průběhů a vyhodnocení celkového kmitání. Celkové kmitání souvisí se všemi frekvencemi kmitání v daném měřicím bodě. Porovnává se naměřená hodnota celkového kmitání s předchozím měřením, kdy stroj pracoval bez poruchy. Další srovnání je s nastavenými kritickými hodnotami.

3.1.1 Veličiny popisující časový signál

Maximální hodnota neboli špička (Peak, také špičková hodnota, výkmit, vrcholová hodnota) popisuje amplitudy krátkodobých jevů, mechanických rázů a určuje vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní. Indikuje pouze přítomnost špičky, ale neukazuje na časový průběh ani kmitočtové složení hodnoceného kmitání.

Hodnota špička - špička (Peak – Peak, nebo-li rozkmit) udává největší rozkmit hodnoceného sinusového kmitu a její použití je vhodné tam, kde pro hodnocení chvění je závazná výchylka chvění.

Efektivní hodnota RMS (Root Mean Square) ukazuje jeho časový průběh, a je tedy měřítkem nebezpečnosti a škodlivosti mechanického kmitání. Z hlediska kvantitativního hodnocení amplitud mechanického kmitání je nejdůležitější hodnotou, která má přímý vztah k energii vibrací. RMS popisuje schopnost hodnoty veličiny konat užitečnou (efektivní) práci. Počítá se jako odmocnina z integrálu druhé mocniny veličiny v čase.[1]



Obr. 4. Znázornění hodnot popisující signál [17]

V praxi nepoužíváme pro signály při běžných výpočtech jejich amplitudy vrcholové hodnoty y_M , ale nejčastěji hodnoty efektivní y_{ef} (RMS), které jsou měřítkem energie přenášené signálem. Obecně je efektivní hodnota určité veličiny y definována vztahem [2]

$$y_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) \cdot dt} \quad (14)$$

kteřá je pouze pro jednoduchý sinusový průběh dána hodnotou

$$y_{ef} = 0.707 \cdot y_M \quad (15)$$

Pro složený signál je efektivní hodnota podle zákona superpozice určena vztahem [2]

$$y_{ef} = \sqrt{(y_{1ef})^2 + (y_{2ef})^2 + \dots + (y_{nef})^2} \quad (16)$$

Stejnoseměrná složka y_{ss} složeného signálu může nabývat nenulových hodnot a je určena jeho střední hodnotou [2]

$$y_{ss} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) \cdot dt \quad (17)$$

kteřá je u jednoduchých, tj. sinusových signálů, nulová.

Oproti střední hodnotě můžeme určit střídavou střední hodnotu (Average) [2]

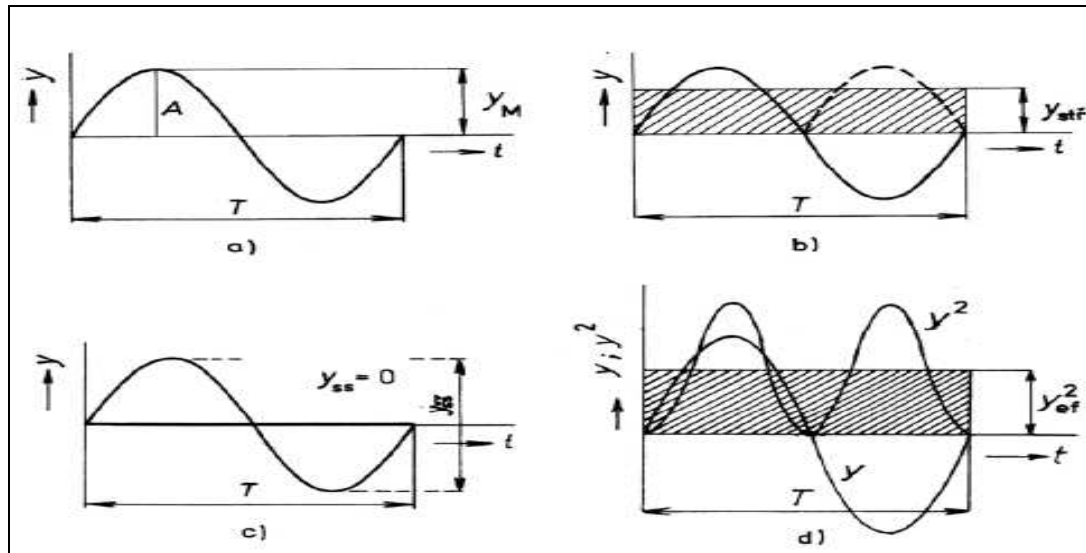
$$y_{str} = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| \cdot dt \quad (18)$$

kteřá má pro jakýkoliv signál nenulovou hodnotu. Pro jednoduchý signál je

$$y_{str} = 0.637 \cdot y_M \quad (19)$$

Pro složený signál platí pouze nerovnost [2]

$$y_{str} \leq y_{1-str} + y_{2-str} + \dots + y_{n-str} \quad (20)$$



Obr. 5. Grafické znázornění jednoduchého signálu: a) špičkové hodnoty, b) střídavé střední hodnoty, c) střední hodnoty, d) efektivní hodnoty. [2]

U měření mechanického kmitání se doporučuje používat efektivních hodnot veličin charakterizujících kmitání [6]

$$v_{ef} = \frac{v_0}{\sqrt{2}} = y_{ef} \omega \quad (21)$$

$$a_{ef} = \frac{a_0}{\sqrt{2}} = v_{ef} \omega = y_{ef} \omega^2 = y_{ef} \omega^2 \quad (22)$$

kde je

y_{ef} [m] efektivní hodnota výchylky kmitání,

v_{ef} [m/s] efektivní hodnota rychlosti kmitání,

a_{ef} [m/s²] efektivní hodnota zrychlení kmitavého pohybu.

3.2 Frekvenční analýza

Mezi nejdůležitější nástroje pro nalezení periodických jevů ve vibračním signálu je frekvenční analýza, která bývá používána jako hlavní nástroj pro nalezení a trendování zdrojů.

Metody výpočtů ve frekvenční oblasti jsou obvykle založeny na použití diskretní Fourierovy transformace. Mezi hlavní nevýhody takto extrahovaných příznaků patří

nemožnost postihnout chování nestacionárních signálů. Frekvenční analýza v principu provádí rozklad původního časového průběhu (jeho omezeného časového záznamu) na jednotlivé harmonické (sinusové nebo kosinusové) složky. Součtem všech analyzovaných harmonických složek vzniká pak původní časový průběh. Ze spektra signálu jsou obvykle vybrány jen určité frekvenční složky nesoucí požadovanou diskriminativní informaci. Jiným přístupem k výpočtu příznaků ve frekvenční oblasti je použití filtrů a výpočtu integrálních popisů signálů na jejich výstupech. Výhoda vyhodnocení signálů ve frekvenční oblasti je v tom, že jednotlivé jevy jsou od sebe odděleny, kdežto v časové oblasti jsou jednotlivé jevy promíchány. [1]

Grafickým zobrazením frekvenční analýzy je frekvenční spektrum, které poskytuje detailní informace o zdrojích signálu, které není možné získat z časového signálu. Pokud se posuzují veličiny ve frekvenční oblasti, tak pro nízké frekvence (řádově Hertz) je vhodné vyhodnocovat amplitudu a pro vysokofrekvenční složky kmitání vyhodnocovat efektivní hodnotu zrychlení.

Frekvenční analýza je založena na matematickém teorému, že každá periodická křivka může být určena jako součet sinusových křivek, které jsou harmonickými složkami daného průběhu (viz vzorec 2).

Úplná frekvenční analýza je dána jak amplitudovým spektrem (tj. amplitudovou spektrální hustotou), tak i fázovým spektrem. Frekvenční (fázové) spektrum tvoří podklad pro rozlišení závad na rotujícím stroji. [3, 7]

3.2.1 Spektrální analýza pomocí Fourierovy transformace

Cílem spektrální analýzy je popsat rozložení složek signálu ve frekvenční oblasti, tedy vyjádřit analyzovaný signál pomocí ortogonálních (navzájem kolmých) bázevých funkcí.

U Fourierovy transformace je bázevou funkcí komplexní exponenciála ve tvaru $e^{j2\pi ft}$.

Pomocí Fourierovy transformace analyzujeme především periodické a neperiodické signály. Pro náhodné signály je Fourierova transformace nepoužitelná. Reálné signály při kmitočtové analýze vibračních a akustických soustav jsou však většinou neperiodické.

Pro výpočet kmitočtových složek se používá Fourierova transformace, která je dána spojitým analytickým integrálem definovaným jako přímá Fourierova transformace [1]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (23)$$

Pro Fourierovu transformaci inverzní (zpětná) pak platí dle [1]:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (24)$$

kde

$x(t)$ je spojitý signál,

f odpovídá frekvenci,

j je imaginární jednotka.

Fourierova transformace je vhodná pro neperiodické spojitě signály a poskytuje spojitě neperiodické spektrum $F(f)$, které bývá obvykle komplexní (má reálnou a imaginární složku). Obsahuje informace o amplitudách $|F(f)|$ (amplitudové spektrum, nebo amplitudová spektrální hustota) a fázích ($\varphi(f)$, fázové spektrum) všech harmonických frekvencí, které jsou obsaženy v $x(t)$ a lze je vyjádřit jako [1]

$$F(f) = \text{Re}(f) + j \cdot \text{Im}(f) = |F(f)| \cdot e^{j\varphi(f)} \quad (25)$$

Spojitě periodické signály lze vytvořit sečtením konečného počtu harmonických funkcí s různými frekvencemi. Spektrum těchto signálů má tedy čárový (diskrétní) charakter a odpovídá vyjádření signálu pomocí Fourierovy řady. Pro vzájemný vztah ve frekvenční a časové oblasti lze usoudit, že pokud je vyjádření signálu v jedné oblasti periodické (časová nebo kmitočtová oblast), je v druhé oblasti diskrétní (kmitočtová nebo časová oblast).

Periodičnost spektra diskrétního neperiodického signálu se dá získat pomocí Fourierovy transformace diskrétních signálů označované FTD (Fourier Transform of Discrete Signal) nebo lépe DTFT (Discrete Time Fourier Transform) a definované vztahem [1]

$$F(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j2\pi fn} \quad (26)$$

Inverzní transformace

$$x(n) = \int_{-f_{\text{vz}}/2}^{f_{\text{vz}}/2} F(f)e^{j2\pi fn} df \quad (27)$$

Posledním typem transformace diskretního signálu, která poskytuje diskretní spektrum je diskretní Fourierova transformace (DFT, Discrete Fourier Transform), která pracuje s konečnými posloupnostmi v časové i frekvenční oblasti.

DFT je vhodná pro analýzu stacionárních signálů (parametry se nemění v čase). DFT je nejvhodnější pro praktickou realizaci, neboť pro diskretně vyjádřený signál (vzorky signálu) poskytuje diskretně vyjádřený výsledek (vzorky spektra), který je možné dál číslicově zpracovávat. DFT je definována následujícími vztahy. [1]

Pro přímou transformaci

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (28)$$

kde

$k=0, 1, \dots, N-1$.

Pro zpětnou transformaci

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (29)$$

kde

$n=0, 1, \dots, N-1$,

N – počet vzorků.

Rozlišitelnost frekvenční analýzy udává interval, tj. rozestup mezi spektrálními čarami a je dána vztahem:

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} = \frac{1}{NT} \quad (30)$$

kde

T je časový interval mezi vzorky,

NT je tedy celková délka signálu v čase,

Δf - rozestup frekvencí výsledného diskretního spektra (frekvenční rozlišení),

rozsah získaného spektra je $\langle 0; f_{\max} \rangle$.

Platí základní vztah mezi délkou vzorku T , počtem diskretních hodnot N , vzorkovací (digitalizační) frekvencí f_s a rozsahem frekvenčního spektra ($f_{\max}, \Delta f$)

$$f_{\max} = \frac{f_{vz}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{T} \quad (31)$$

kde

f_{vz} je vzorkovací frekvence,

f_{\max} je Nyquistova frekvence.

Pro výpočet DFT je k dispozici několik rychlých algoritmů nazývaných FFT (Fast Fourier Transform). Dosud nejrychlejší metodou výpočtu DFT je algoritmus zvaný FFTW (Fastest Fourier Transform in the West).

Nejpoužívanějším algoritmem výpočtu spektrální analýzy je rychlá Fourierova transformace (FFT). Všechny FFT výpočty předpokládají lineární systém. Délka výpočtu klasické FFT je závislá na délce vstupního signálu a nejkratší je pro délky mocnin dvou. Doba výpočtu klasické FFT je závislá na délce vstupního signálu, který je nejkratší pro délky mocnin dvou. Ideou algoritmu je vhodně rozložit problém výpočtu FFT pro signál libovolné délky na několik problémů, pro jejichž řešení existují rychlé metody. [1]

FFT vypočítává jednotlivé kmitočtové složky změřeného časového komplexního signálu, podle předem stanovených požadavků na frekvenční rozsah a rozlišení. Počet hodnot kmitočtového spektra je poloviční vzhledem k počtu hodnot časového signálu, přičemž f_{\max} je rovna polovině vzorkovací frekvence $f_{vz} = 1/\Delta t$. To souvisí se Shannonovým vzorkovacím teorémem, podle kterého musí být vzorkovací frekvence alespoň dvakrát větší (Nyquistova frekvence), než je frekvence nejvyšší harmonické složky, obsažené v měřeném signálu. [7]

4 SNÍMAČE MĚŘENÍ VIBRACÍ

Výstupní signál z vibračního snímače musí odpovídat časovému průběhu vibrací. K získání správné poruchové charakteristiky se musí pro měření vibrací zvolit vhodný způsob měření a typ snímače.

Snímání diagnostických signálů se děje při elektronickém zpracování dat senzory, které převádějí mechanickou veličinu na elektrický signál. Snímač na stroji zachytí signál, který obsahuje široké spektrum frekvencí od nízkých až po vysoké.

Elektrické snímače chvění se konstruují nejčastěji na piezoelektrickém principu, starší konstrukce využívají elektrodynamický princip. [2]

Snímače měří signály, které lze rozdělit do tří skupin na nízkofrekvenční (0-2 kHz), vysokofrekvenční (2 – 50 kHz) a velmi vysoké frekvence (přes 50 kHz).

Výběr odpovídajících snímačů závisí na dané aplikaci. Snímače pro monitorování stavu jsou dle ČSN [11]

- akcelerometr, jehož výstup může být zpracován tak, aby dával libovolný ze tří parametrů (zrychlení, rychlost, výchylka),
- snímač rychlosti, jehož výstup lze integrovat na výchylku,
- bezdotykový snímač, jehož výstup je přímo úměrný relativní výchylce mezi rotujícími a nerotujícími elementy stroje.

4.1 Citlivost snímačů vibrací

Důležitým údajem u snímačů vibrací je udání jeho absolutní citlivosti, vyjádřené přímo v kmitočtové závislosti.

Citlivost snímačů vibrací udává poměr výstupního napětí snímače na elektrické straně ke vstupní hodnotě zrychlení na straně mechanické.

Jednotkou citlivosti při snímání zrychlení je $[V/m \cdot s^{-2}]$. V praxi se používají častěji údaje v $[mV/m \cdot s^{-2}]$; nebo $[mV/g]$ (kde g je tíhové zrychlení $= 9.80665 m \cdot s^{-2}$). [2]

4.2 Volba správné montáže

Správné měření vibrační strojů je v rozhodující míře závislé na správném přenosu pohybu na snímač. Technika připevnění snímače musí být vždy optimalizována s ohledem na požadovaný kmitočtový rozsah měření, odhadované hladiny zrychlení vibrací, velikosti budících sil a mechanické vlastnosti posuzovaného zařízení.

Snímač je schopen správně měřit vibrace na co nejvyšších frekvencích pokud je co nejméně hmotný a co nejpevněji spojen s měřenou plochou. Se zvyšující se hmotností a snižující tuhostí spojení klesá i maximální frekvence, na které lze správně měřit amplitudu signálu.

Nejpřesnější frekvenční odezvu snímače a maximální využití jeho kmitočtového rozsahu poskytuje upevnění pomocí šroubů. Velká tuhost šroubového spojení je výhodná i z hlediska vysokého rezonančního kmitočtu 15 - 40 kHz. Přilepený snímač má základní rezonanci obvykle nad 10 kHz, u špičkových lepidel až 28 kHz. Obvyklé je spojení magnetem pro max. frekvence do 5 kHz. Pro připevnění méně hmotných snímačů je možné použít také včelí vosk nad 20 kHz nebo oboustranně lepicí pásku. Nejméně přesné jsou dotykové přenosné přístroje, ty však mají význam pro vyhledání vhodného místa snímání dat s maximální frekvencí 700 Hz. Plocha pod snímačem by měla být čistá a měla by mít odpovídající rovinnost a rozměry. [2]

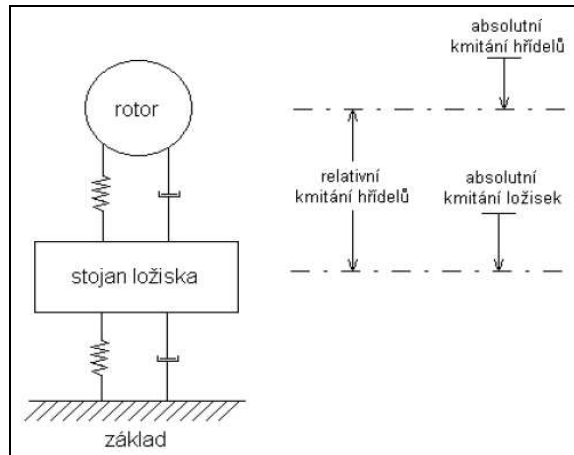
Připevnění vibračního snímače vyplývá z jeho vlastností, a to především velký dynamický rozsah, široký kmitočtový rozsah, zanedbatelný účinek rušivých vlivů (teplota, hluk, elektromagnetická pole aj.), nízké zkreslení výstupního signálu a stabilita v čase. Rezonanční kmitočet by měl být minimálně 5x vyšší, než horní mezní kmitočet měření. Hmotnost snímače včetně jeho úchytu musí být nejméně 10x nižší než hmotnost měřeného zařízení. Těžiště připevnění snímače má být nad těžištěm zdroje vibrací. [2]

4.3 Rozdělení snímačů

Rozdělení snímačů lze provést podle různých hledisek.

- Aktivní snímače jsou samy o sobě zdrojem signálu, čímž nepotřebují ke svému provozu zdroj elektrické energie. Využívají přímé přeměny mechanické energie na energii elektrickou (např. elektrodynamické, piezoelektrické snímače).

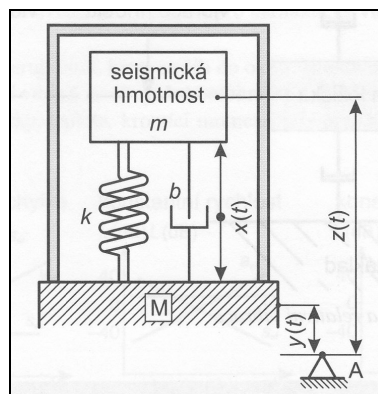
- Pasivní snímače ke své funkci potřebují napájení z vnějšího zdroje elektrické energie, který moduluje (např. indukčnostní a kapacitní snímače).
- Dotykové jsou v přímém kontaktu s objektem.
- Bezkontaktní měří bez dotyku s objektem.
- Jedno ze základních rozdělení je na absolutní a relativní



Obr. 6. Absolutní a relativní snímač vibrací [1]

4.3.1 Absolutní snímače vibrací

U absolutních vibrací tělesa je pohyb vztahován ke gravitačnímu poli Země neboli k pevnému fixnímu bodu. Absolutní snímač měří veličinu mechanických vibrací vzhledem k vlastní setrvačné tzv. seismické soustavě. Používá se tam, kde není k upevnění vhodný relativní pevný bod vztažného bodu senzoru (velké motory, ložiskové skříně, jedoucí vozidla, letadla apod.). [1]



Obr. 7. Absolutní senzor vibrací

Kde je

M – hmota tělesa,

m – hmotnost setrvačné hmoty,

k – tuhost pružiny[$N \cdot m$],

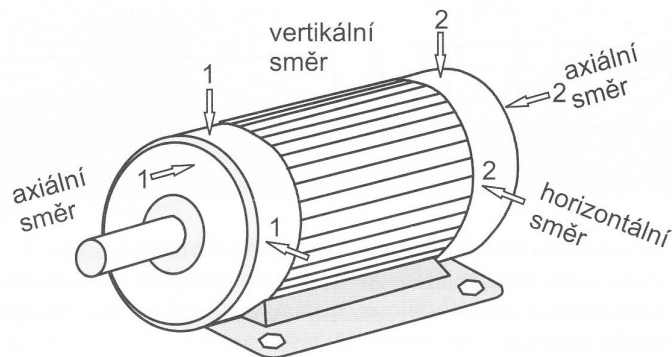
b – tlumič s koeficientem tlumení [$kg \cdot s^{-1}$].

Absolutní snímač je uzpůsoben tak, že hmota m se může pohybovat jen v jednom směru, což znamená, že snímač je schopen měřit pouze jednu složku pohybu. Pružné prvky soustavy jsou charakterizovány tuhostí k . Tuhost je poměr síly a odpovídající změny deformace pružného prvku. Součinitel lineárního tlumení b je parametrem tlumiče u soustavy s jedním stupněm volnosti a je definován silou při jednotkové rychlosti tj. $F = b \cdot v$. Vibrující těleso M vykonává časově proměnný pohyb $y(t)$ vůči fiktivnímu klidovému bodu a toto vibrující těleso je budičem síly mechanické soustavy. Pohyb tělesa M tedy měříme vzhledem k hmotě m . Hmota m zůstává v absolutním klidu a lze ji tedy využít jako pevného bodu, vůči němuž měříme pohyb tělesa M . Abychom mohli zanedbat vliv hmotnosti snímače na měřenou soustavu, musí platit $m \ll M$. [1]

Absolutní vibrace by měly být měřeny co nejbližší ložiska, pokud možno ve třech směrech.

- V axiálním (A) směru jsou v ideálních podmínkách vibrace malé, avšak např. nesouosost nebo nevyváženost letmo uloženého rotoru způsobuje značné vibrace v axiálním směru.
- V horizontálním (H) směru jsou obvykle největší vibrace, což je způsobeno tím, že stroj je v tomto směru poddajnější.
- Ve vertikálním (V) směru jsou obvykle menší vibrace než v horizontálním směru.

Velikost amplitud těchto složek spektra v těchto směrech spolu s fází, poskytují informace o příčině nadměrných vibrací. [5]



Obr. 8 Směry měření vibrací [1]

4.3.2 Relativní snímače vibrací

Relativní snímače kmitání se používají pro měření relativního pohybu dvou bodů kmitající soustavy. Kmitání je vyhodnocováno vůči zvolenému reálnému bodu (např. jiná část stroje, základová deska stroje, náprava vozidla apod.), tj. bodu, který může být také v pohybu (pohyb jedné části zařízení vůči druhé, např. vibrace hřídele vůči víku ložiska).

Relativní snímače lze použít i jako snímače absolutního pohybu, je-li v blízkosti měřeného tělesa pevné místo, na které lze uchytit těleso snímače nebo jeho držák. Relativní pohyb vyšetřovaného tělesa vůči místu upevnění držáku je pak totožný s absolutním pohybem měřeného místa. Relativní snímač je vhodný pouze pro měření výchylek, nikoliv zrychlení. V současnosti se nejvíce používají bezdotykové senzory. [1]

Relativní výchylka se nejlépe měří při použití dvou bezdotykových snímačů, uspořádaných pro měření radiálního relativního pohybu mezi rotujícím hřídelem nebo elementem a stacionárním elementem ve stejné příčné rovině. [11]

Pro diagnostiku rychloběžných strojů s kluznými ložisky se používají relativní snímače, které sledují výchylky rotoru vzhledem k ložiskům. To platí také u rotorů s valivými ložisky, jejichž vnější kroužky jsou uloženy v pryžových tlumicích elementech.

4.4 Snímače výchylky, polohy a posuvu

Snímače výchylky, polohy a posuvu realizujeme na indukčním, indukčnostním, kapacitním, magnetickém a optickém principu. Snímače polohy umožňují určit okamžitou polohu zkoumaného tělesa.

Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které může přímo měřit vibrační výchylku rotujícího hřídele vůči stacionárnímu ložisku nebo skříně stroje. Snímač výchylky dává

střídavou složku pro vibrační pohyb a stejnosměrnou složku pro polohu. U rotačních strojů, zejména u velkých turbínových strojů může být nezbytné měřit relativní výchylku mezi rotorem a konstrukcí statoru. [11]

Většina používaných snímačů výchylky pracuje na principu vířivých proudů. Cívka, kterou prochází vysokofrekvenční střídavý proud, generuje vysokofrekvenční magnetické pole. Pokud jsou do tohoto pole vloženy elektricky vodivé materiály (např. hřídel stroje), jsou v materiálu generovány vířivé proudy, které berou energii z vysokofrekvenčního magnetického pole. Obvod oscilátoru, který je vázán na cívku, generuje napětí, které je úměrné vzdálenosti mezi snímačem a hřídelem. Typický frekvenční rozsah je od 0 Hz do 10 kHz s rozsahem měření od 1 mm do 10 mm a pro teploty od -50 °C do 200 °C dle provedení. [11]

Výchylka určuje změnu vzdálenosti nebo polohy objektu vzhledem k referenční poloze a je důležitou veličinou tam, kde je nutné sledovat malé vůle a tolerance strojních dílů. Při měření výchylky, budou zdůrazněny složky s nízkými kmitočty. Snímač výchylky je bezdotykové zařízení, které měří relativní vzdálenost mezi dvěma povrchy. Nejrozšířenějšími jsou indukčnostní senzory využívající závislosti indukčnosti cívky na proudové hustotě vířivých proudů. Vzhledem k vysokofrekvenčnímu principu jsou tyto senzory náchylné na parazitní vlivy (např. délka kabelu k měřicím obvodům, vnější elektromagnetické pole). Proto se vyrábějí jako integrované, kde v kovovém stínícím krytu je kromě vyčnívající cívky zabudována základní část elektroniky.

Snímače výchylky kmitů zpravidla vynikají vysokou hmotností oproti nízké tuhosti a tlumení. Jejich využití v diagnostice je omezené pro svou vysokou hmotnost, velikost a složitost konstrukce. Používají se především v seismologii a stavebnictví, neboť jsou velmi citlivé v nízkých frekvencích. [1]

4.5 Absolutní snímače rychlosti

Snímač rychlosti je seismické zařízení, které generuje napěťový signál úměrný mechanické vibrační rychlosti měřeného tělesa. Obecně se snímače rychlosti montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Když je požadovaným parametrem výchylka, je obvyklé integrovat výstup ze snímače rychlosti tak, aby dával výstup úměrný výchylce. Typický frekvenční rozsah je od 1 Hz do 3500 Hz a rozsah teploty od -50 °C do 125 °C. Snímače rychlosti jsou zvláště vhodné pro měření nízkofrekvenčních vibrací. Většina snímačů

rychlosti používaných pro monitorování má rezonanční frekvenci nad 10 Hz. Výhodou snímačů rychlosti je relativně vysoké výstupní napětí při nízkém odporu zdroje. Snímače jsou proto relativně necitlivé na poškození izolace a na elektrická pole. [11]

Snímače rychlosti vycházejí z principu Faradayova zákona elektromotorické indukce. Snímač je tvořen cívkou s pohyblivým jádrem tvořeným permanentním magnetem.

Snímač rychlosti kmitů je charakteristický vysokým tlumením oproti nízké hmotnosti a tuhosti. Pro měření rychlosti vibrací se používají senzory zrychlení s tím, že hodnotu rychlosti vibrací získáme následnou integrací (akcelerometry se zabudovaným integračním členem), a nebo absolutní elektrodynamický snímač, u kterého je přímo vyhodnocována rychlost kmitání pouzdra. Absolutní elektrodynamický senzor vibrací je založen na senzoru amplitudy vibrací, u kterého je pracovní oblast kmity nad kmity vlastních netlumených kmitů. Senzor ve své podstatě měří výchylku vibrací, ale vzhledem k vnitřnímu uspořádání dochází při vzájemném pohybu magnetu a cívky k indukci napětí na cívce u . Magnetický tok se mění v závislosti na výchylce vibrací a výstupní napětí na cívce je úměrné derivaci proměnného magnetického toku a tedy rychlosti vibrací.

Pro indukované elektrické napětí na cívce pak platí [1]

$$u = B \cdot l \cdot v, \quad (32)$$

kde

B je indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře,

l je délka vodiče cívky,

v je rychlost kmitání pouzdra senzoru.

4.6 Absolutní snímače zrychlení - akcelerometry

Akcelerometr je seismické zařízení, které generuje výstupní signál úměrný mechanickému vibračnímu zrychlení měřeného tělesa. Obecně se akcelerometry montují na stacionární (nerotující) konstrukci stroje. Výstup z akcelerometru je možné integrovat tak, aby dával signál úměrný rychlosti a opětovnou integrací polohu. Jsou charakterizovány velkým dynamickým rozsahem a širokým frekvenčním rozsahem od 0,1 Hz do 30 kHz. Teplotní rozsah je dle provedení zesilovače na interní do 125 °C a externí do 250 °C. Přednostně

jsou používány v aplikacích s malými objekty majícími malou montážní plochu, při vysokých teplotách prostředí. [11]

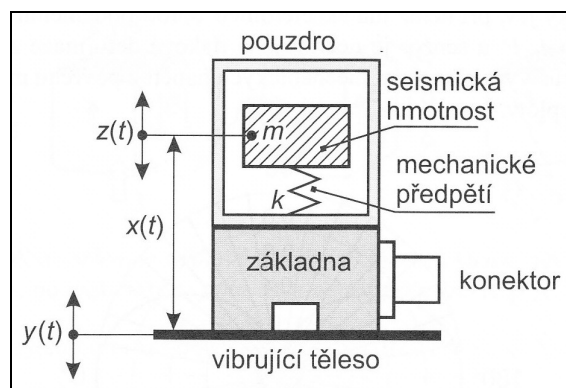
U akcelerometrů není vztažná seismická hmota v klidu. Pracovní oblast je pod kmitočtem vlastních netlumených kmitů. Velké hodnoty kmitočtu vlastních kmitů se u absolutních senzorů zrychlení dosahuje velkou hodnotou tuhosti k a malou hodnotou seismické hmotnosti m . Existuje celá řada fyzikálních principů využívaných pro realizaci akcelerometrů (piezoelektrický, piezorezistivní, kapacitní, elektrodynamický). [1]

V naprosté většině moderních diagnostických systémů se používají piezoelektrické akcelerometry s integrovanou elektronikou.

4.6.1 Piezoelektrické snímače

U piezoelektrických snímačů, je základem piezoelektrický materiál, seismická hmota a pouzdro. Piezoelektrický krystal generuje náboj, úměrný působící deformující síle, čímž vznikne napětí, které je přímo úměrné zrychlení seismické hmoty. Vztažná seismická hmotnost není v absolutním klidu. Jakmile mechanické napětí zmizí, dostává se dielektrikum do původního stavu. Hmotnost diagnostikovaného objektu musí být podstatně větší než hmotnost akcelerometru.

Výhodami piezoelektrických snímačů jsou nízká hmotnost (i pod 1 gram), díky které snímače tolik nezatěžují měřený objekt, jednoduchá konstrukce, necitlivost na parazitní magnetické pole, vysoká mechanická odolnost a velký dynamický rozsah od 5 kHz do 10 kHz, speciálně od 0,01 Hz do 20 kHz. Pokrývají prakticky všechny potřeby technické praxe. Piezoelektrické snímače mohou pracovat i za teplot okolo 450°C, a to podle použitého piezoelektrického prvku. [1, 8]



Obr. 9. Model piezoelektrického snímače [1]

4.6.2 Piezorezistivní snímače

Piezorezistivní snímače využívají mikrokřemíkovou mechanickou strukturu, kde zrychlení odpovídá změně odporu. Při namáhání ohybem se mění rezistivita piezorezistivních elementů uspořádaných obvykle do Wheatstoneova můstku. Výhodou piezorezistivních akcelerometrů proti piezoelektrickým je, že mohou měřit i stálou akceleraci, tedy frekvenci změn od 0 Hz.

Frekvenční rozsah je od 0 - 7 kHz. Ze všech typů akcelerometrů mají nejvyšší poměr citlivosti (do 25 mV/g) vůči hmotnosti a vzhledem ke stabilitě napěťové citlivosti jsou vhodné k dlouhodobým testům. Nevýhodou je teplotní závislost. [1]

4.6.3 Kapacitní snímače

U kapacitních snímačů je výchylka závislá na vzdálenosti elektrod snímače. Kapacitní snímače využívají přímého přenosu posunutí nebo otočení na jednu z desek kondenzátoru nebo na dielektrikum. Jsou přesné a velmi citlivé, ale vhodné pro nízké dynamické rozsahy zrychlení. Při pohybu seismické hmotnosti se jedna kapacita zvětšuje a druhá zmenšuje. Vyhodnocuje se diference hodnot kapacit. Používají se pro měření rychlých jevů.

Parametry kapacitních akcelerometrů mají frekvenční rozsah od 0 Hz až do 6 kHz, teplotní rozsah od -55 °C až +250°C, citlivost od 20 mV/g do 1000 mV/g. [1]

V dnešní době mají malé vyžití kvůli odchylkám způsobených změnou okolní teploty. Mohou mít velmi malé rozměry a dříve byly používány pro měření relativních výchylek u malých rychloobrátkových strojů.

4.6.4 Laserové interferometrické vibrometry

Využívá se laserového paprsku, který se odráží od měřeného objektu. Výhodou těchto snímačů je vysoká rozlišovací schopnost při poměrně značném měřicím rozsahu. Nevhodné je použití v prašných a špatně viditelných podmínkách, kde hrozí nebezpečí znečištění optočlenu (fotoodpory, fotodiody, fototranzistory). Zdrojem světla může být například žárovka, LED dioda nebo výbojka.

Mezi nejpoužívanější optické snímače vibrací patří laserové interferometrické vibrometry. Používají se v bezdotykových měřeních, kde standardní akcelerometry nedosahují požadovaných parametrů, nebo kde je nelze z provozních a rozměrových důvodů použít.

Mohou měřit vibrace do 30 MHz s velmi malou nejistotou měření a lineární fázovou odezvou.

Princip laserových vibrometrů je založen na interferenci dvou koherentních, lineárně polarizovaných světelných paprsků. Jako zdroj záření se používají nízkovýkonové lasery. Pomocí laserových interferometrů lze bezdotykově přímo měřit amplitudu kmitů čítáním interferenčních proužků. Tyto přístroje se ve vibrodiagnostice využívají jen pro nízké rychlosti vibrací a pro metrologii akcelerometrů. [1]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

5 MĚŘENÍ VIBRACÍ

Význam sledování stavu stroje za provozu je jednou z nejdůležitějších činností ve výrobním procesu. Monitorování a vyhodnocení patří k základním a rozhodujícím metodám provozní diagnostiky, která je stále více využívána v oboru preventivní údržby.

Cílem vibrodiagnostiky je poskytnutí informací o vnitřních stavech jednotlivých dílů, ale i údaje o místě a příčině poruchy s vysokou přesností. Součástí je i hodnocení stavu a průběhu vibrací za dobu dosavadního provozu (vytváření, analyzování a uchovávání trendů).

Vibrace jsou považovány za jeden z nejdůležitějších provozních parametrů pro zjištění dynamického stavu stroje z hlediska stavu ložisek, vyváženosti a napětí v jednotlivých součástech vyhodnocovaného zařízení. Zvýšená pozornost je věnována především ložiskům, protože ty představují nejdůležitější část všech rotujících strojů. Jejich funkcí je přenášet silové zatížení z rotujících součástí na konstrukci a tím pádem snížit tření. Měření se provádí za plného provozu stroje a včasná detekce poškození umožní vyměnit ložisko při plánované údržbě zařízení, čímž se předejde havárii ložiska.

Neobvyklý stav ložiska většinou doprovází zvýšená teplota. Pokud ložisko pracuje delší dobu při teplotách vyšších, než 120 °C zkracuje se tím jeho životnost. Příčinou vysoké teploty může být nedostatečné, nebo naopak příliš velké množství maziva, nečistoty v mazivu, přetížení, poškození ložiska a malé vůle částí stroje, jiné otáčky, prostorová teplota, dynamické namáhání a jiný typ ložiska než stanovený.

Velké stroje pracující nepřetržitě (turbogenerátory), jsou chráněny trvalým (on-line) monitoringem provozního stavu, doplněným o automatickou signalizační a odstavovací funkci, která upozorní, případně odstaví stroj při překročení nastavených mezí vibrací.

Diagnostická informace o poškození se ztrácí v šumu, který je způsoben vibracemi jiných částí stroje. Vliv vibrací z hlediska přenosu energie a jejich mohutnost nejlépe popisuje efektivní hodnota rychlosti. Chceme-li zvýraznit vysokofrekvenční složky vibrací, je vhodné vyhodnocovat efektivní hodnotu zrychlení a naopak pro zvýraznění nízkých kmitočtů je optimální vyhodnocovat efektivní hodnotu výchylky. [1]

Celková efektivní hodnota rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10Hz až 1kHz jsou považovány za nejlepší parametr pro určení rotačních a strukturálních problémů, jako jsou nevyváha, rezonance, nesouosost, uvolnění a napětí v komponentech.

Základním měřením je zjišťování celkových vibrací generovaných zařízeními, které jsou příčinou mnoha problémů strojů. Zjišťovány jsou hlavně mechanické stavy jako nevyváha, nesouosost, mechanické uvolnění, ohnutý hřídel, rezonance, problémy řemenových převodů apod.

Nesouosost způsobuje v rotačním stroji přídavné síly, které se projevují jako vibrace. Nesouosost často způsobuje (nebo i mění) harmonické složky vibrací a to otáčkovou (1x), druhou harmonickou (2x) nebo třetí harmonickou (3x) v závislosti na závažnosti nesouososti i vyšších harmonických násobků (násobky otáčkové frekvence se označují 2x, 3x, 4x atd.). Vibrace na otáčkové frekvenci rotoru se označuje 1x.

Pro zjišťování stavu mazání v kluzných i valivých ložiscích, detekování elektrických problémů na elektromotorech, ověřování stavu ozubení a mazání v převodovkách se úspěšně aplikuje měření zrychlení vibrací ve vhodně zvolených frekvenčních rozsazích.

Z hlediska legislativy se oborem vibrodiagnostiky zabývá mezinárodní norma ČSN ISO 13380 z roku 2002. Tato norma obsahuje návod pro monitorování stavu a diagnostiku strojů. Je částí řady norem, které byly zpracovány pod společným názvem Monitorování stavu a diagnostika strojů. ČSN ISO 13373 je dokument popisující monitorování stavu vibrací. ČSN ISO 10816 se zabývá vibracemi s názvem Hodnocení vibrací stroje na základě měření na nerotujících částech. Požadavky pro měření vibrací na rotujících hřídelích a kritéria hodnocení jsou předmětem norem ISO 7919-1 a ISO 7919-3.

5.1 Činnosti související s vibrodiagnostikou

Vzniklé vibrace zkracují životnost ložisek, namáhají konstrukci a základy daných zařízení. Odstraňováním příčin vibrací se zabývají různé provozní metody.

- Provozní vyvažování se zabývá nejčastější příčinou vibrací a to nevyváhou. Provozním vyvažováním v jedné, nebo více rovinách, lze vzniklou nevyváhu odstranit, a tak snížit vibrace na přijatelnou úroveň. Podmínkou pro vyvažování je zpřístupnění vyvažovacího členu a odstranění rezonance z provozních otáček.
- Provozní ustavování řeší příčinu vibrací z hlediska nesouososti. Vzniklé vibrace mají podobný vliv jako u nevyváhy a navíc přímo poškozují spojku. Nesouosost lze odstranit moderními laserovými přístroji.

- Provozní tvary kmitů je zviditelnění vibrací za chodu stroje. Jedná se o počítačovou animaci pohybu konstrukcí nebo částí stroje v závislosti na jeho provozních otáčkách. Provádí se při zjišťování slabých uzlů na stroji jako uvolněné základy, rezonance, nedostatečná tuhost konstrukce, posuzování vlivu vibrací na namáhání jednotlivých komponent stroje apod.

Závady strojních částí z hlediska vývoje vibrací v čase lze obecně rozdělit na 4 fáze poškození [1]

První fáze poškození je opotřebením ložiska s povrchovými defekty (mikrometry), kdy při nárazech se šíří akustická emise ve frekvencích až do několika MHz. Závady lze detekovat pomocí metod SEE (Spectral Emitted Energy).

Druhá fáze poškození je nejvčasnější indikací problému ložiska v ultrazvukové oblasti při frekvencích od 25 kHz do 60 kHz. Pro měření se používají speciální akcelerometry s vysokou hodnotou vlastní rezonanční frekvence. Tyto frekvence jsou hodnoceny na základě rozkmitu rázových impulzů (metody Spike Energy, High Frequency Detection, Shock Pulse apod.). Uvedené metody jsou vhodné pro detekci mikrotrhlin, neboť jsou citlivé na ostré impulzy se širokým spektrem signálu.

Třetí fáze poškození je u malých ložiskových vad, které začínají budit vlastní frekvence komponent ložiska. Převážně se vyskytují v oblasti 500 Hz až 8 kHz. Objevují se postranní pásma nad a pod rezonanční špičkou. Pro detekování závady je možné použít akcelerometry.

Čtvrtá fáze poškození se indikuje jako poruchová frekvence závady s jejich harmonickými složkami. S opotřebením se objevuje více harmonických složek ložiskové frekvence a počet postranních pásem roste. Nastává kritické poškození elementů ložiska a lze již registrovat vibrační spektrální složky v oblasti nízkých kmitočtů. Dochází i k nárůstu otáčkových spektrálních složek. Hodnoty vibrací strmě narůstají a široká oblast spektra má náhodný charakter.

5.2 Analyzátor měření vibrací A4101

Snímání vibrací jsem provedl pomocí analyzátoru vibrací od firmy Adash A4101, který je vybaven konektorem BNC pro připojení snímače, kterým byl piezoelektrický snímač zrychlení – akcelerometr s vestavěným nábojovým předzesilovačem a vlastním zdrojem

napájení. Jednotkou měření je $[m/s^2]$ nebo $[g]$. Celková doba měření pro výpočet statistických hodnot pro každou ze 4 signálových cest (LF, HF, LIN, ENV) je 1 sekunda a reprezentuje asi 43000 vzorků. Propojení s PC je řešeno přes sériové rozhraní RS232, sloužící pro obousměrnou datovou komunikaci.

Analyzátor nabízí možnost měření TRUE-RMS a TRUE-PEAK hodnot, časového záznamu a spektra signálu rychlosti ve frekvenčním pásmu LF a zrychlení ve frekvenčním pásmu LIN. Další metodou je řadová analýza, poskytující pole hodnot amplitud a fází na otáčkové frekvenci a jejích harmonických násobcích.

Pro diagnostiku stavu ložiska se využívají zejména cesty HF, ENV a LIN. Pro diagnostiku mechanických závad pak zejména cesty LF a LIN.

Nabízené typy měření:

- On Line Měření - pro měření v reálném čase
- On Line Metr – měření statické hodnoty a její zobrazení v grafické i číselné podobě
- Časový záznam – měření a zobrazení časového signálu (2001 vzorků)
- FFT analýza – spektrální i řadová analýza měřeného signálu (řadová analýza – pro přesné vyhodnocení amplitudy a fáze na otáčkové frekvenci a jejích násobcích. Princip spočívá ve vzorkování signálu závislém na frekvenci otáčení. Odpadá volba signálové cesty jako u měření spektra, neboť řadová analýza se provádí vždy přes vlastní signálovou cestu (mm/s), frekvenční rozsahy jsou 100 Hz, 200 Hz, 1 kHz, 16 kHz, s maximálním počtem vykreslených čar 800 a typem okna Hanning.
- Základní statické měření – měření statických hodnot, používané u pochůzkových měření

Pro diagnostiku stavu ložiska se využívají zejména cesty HF, ENV a LIN, pro diagnostiku mechanických závad pak zejména cesty LF a LIN. [12]

5.3 Vyhodnocovací software DDS 2007

Naměřené hodnoty vibrací jsem zpracovával pomocí programu DDS 2007. Je to uživatelský software od firmy Adash, který slouží pro vytváření měřících pochůzek s jejich uložením do paměti analyzátoru, archivaci a vyhodnocení dat naměřených analyzátozem A4101.

V systému DDS existují dva hlavní typy měřených dat. Jsou to statická data, která jsou reprezentována jedinou hodnotou (reálnou nebo komplexní). Příkladem je měření širokopásmových hodnot vibrací (TRUE RMS, TRUE PEAK), nebo měření otáček. Při měření statických hodnot je výsledek měření zobrazen v číselné i grafické podobě. Grafické zobrazení má charakter grafického sloupce, jehož délka odpovídá naměřené hodnotě. Rozsah (maximum) grafických sloupců pro každou signálovou cestu lze individuálně nastavit.

Druhým typem dat jsou dynamická data, která jsou tvořena polem naměřených hodnot. Typickým příkladem je měření spektra nebo časového signálu. [12]

5.3.1 Typy zpracování signálu

Vstupní signál lze zpracovávat a upravovat podle různých typů datových buněk.

5.3.1.1 LF (Low Frequency)

LF-ISO standard je signál rychlosti v pásmu 10 Hz až 1 kHz (jednotka mm/s) s připojením snímače přes integrátor a vyhodnocením pomocí metod RMS, PEAK, CREST, KURTOSIS.

Slouží k detekci mechanického stavu stroje, tzn. na trendu vývoje jsou sledovány jevy jako mechanická uvolnění (uvolnění spojů konstrukce soustrojí, špatné uložení stroje – volné kotevní šrouby, vadné podloží základů stroje, apod.), nevyvaha, nesouosost (vzájemné posunutí či vychýlení hnacího a hnaného hřídele). [12]

5.3.1.2 HF (High Frequency)

Měření parametru HF je základní metoda pro analýzu valivých ložisek signálem zrychlení v pásmu 5 kHz – 16 kHz s přímo připojeným snímačem. Vychází z poznatku, že při začínajícím poškození narůstá energie vibrací ve vyšších frekvencích (v řádu kHz). Tento parametr je také velmi citlivý na poruchy mazání. Indikuje jak nedostatečné mazání, tak také přítomnost mechanického znečištění v mazivu. Metoda HF je výsledkem zkoumání poruch ložisek. Emitovaná vysokofrekvenční energie je vyhodnocena do efektivní hodnoty a vyjádřena v jednotce g (9.81 m/s^2). [12]

5.3.1.3 LIN

LIN je měření širokopásmových hodnot vibrací v pásmu 0,8 Hz – 16 kHz (RMS PEAK hodnota zrychlení vibrací). Jednotka: g ($1g = 9.81 \text{ m/s}^2$).

5.3.1.4 Spektrum rychlosti

Spektrum rychlosti signálu (mm/s, RMS) v pásmu 1 Hz - 1 kHz. Používá se především pro mechanické závady (uvolnění spojů konstrukce soustrojí, špatné uložení stroje jako volné kotevní šrouby, vadné podloží základů stroje, nevyváha a nesouosost (vzájemné posunutí či vychýlení hnacího a hnaného hřídele). Zatímco širokopásmová hodnota nás upozorní na změnu stavu, spektrum nám umožní určit přesnou příčinu. [12]

5.3.1.5 Spektrum zrychlení signálu

Spektrum zrychlení signálu v pásmu 1Hz - 16 kHz se používá v případě potřeby informací o jevech vyskytujících se v pásmu nad 1000 Hz jako přidírání hřídele, nebo poškození ozubení převodu. [12]

5.3.1.6 ENV

ENV je obáلكově modulovaný signál zrychlení v pásmu 5 Hz - 16kHz (m/s^2), připojení snímače přes obáلكový modulátor.

5.3.2 Způsoby zpracování dat

- měření efektivních (TRUE RMS) a špičkových (TRUE PEAK) hodnot vibrací pro signálové cesty LF, LIN, HF, ENV
- širokopásmové HFE a obáلكová analýza stavu ložisek (vyhodnocení rázových impulsů v pásmu 5 kHz-16kHz)
- vyhodnocení Crest faktoru pro LF, LIN, HF a ENV
- vyhodnocení Kurtosis faktoru pro LF, LIN, HF a ENV
- analýza časového signálu
- spektrální analýza FFT (spektrum amplitudové i komplexní)
- řadová analýza

- vyvažování v jedné a dvou rovinách
- měření otáček

6 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VIBRACÍ NA GENERÁTORU

Měření jsem provedl v teplárně Atel Energetika Zlín na turbogenerátoru TG32. Jedná se o odběrovou kondenzační turbínu Škoda o elektrickém výkonu 30 MW. V době měření měla turbína 5500 ot/min a generátor měl výkon 28 MW při 1500 ot/min. Generátor má pružné uložení a je osazen kluznými ložisky.

Generátor je rotační stroj, který mění mechanickou energii na elektrickou. Je složen ze vstupní spojky pro přívod mechanické energie, rotoru, statoru, budicího, regulačního a pomocného zařízení.

Měřicí místa byla volena ve stejných místech, jako jsou umístěna stávající čidla vibrací, která slouží obsluze turbogenerátoru k trvalému monitoringu o aktuálním stavu ložisek a převodovky.

Měření byla provedena ve třech směrech:

- H – ve směru měření horizontálním vzhledem k ose otáčení,
- V – ve směru měření vertikálním vzhledem k ose otáčení,
- A – ve směru měření axiálním vzhledem k ose otáčení.

Účelem měření bylo potvrzení nebo vyloučení vysokých hodnot vibrací na turbogenerátoru s vyhodnocením naměřených dat a následným určením příčiny vibrací.

Pomocí mezinárodní databáze výsledků měření celkového kmitání bylo pro potřeby vibrodiagnostiky sestaveno doporučení mezních hodnot efektivních rychlostí kmitání v kmitočtovém pásmu 10 Hz až 1 kHz. Dle normy ČSN ISO 10816-3 je dána klasifikace pásem mohutnosti vibrací pro velké stroje jmenovitým výkonem od 300 kW do 500 MW podle tabulky 2.

Limity se vztahují na širokopásmové efektivní hodnoty rychlosti a výchylky vibrací. Ve většině případů postačí pouze měření rychlosti vibrací. Pokud se předpokládá, že spektrum vibrací obsahuje složky o nízkých frekvencích, mělo by hodnocení být založeno na širokopásmových měřeních jak rychlosti, tak výchylky.

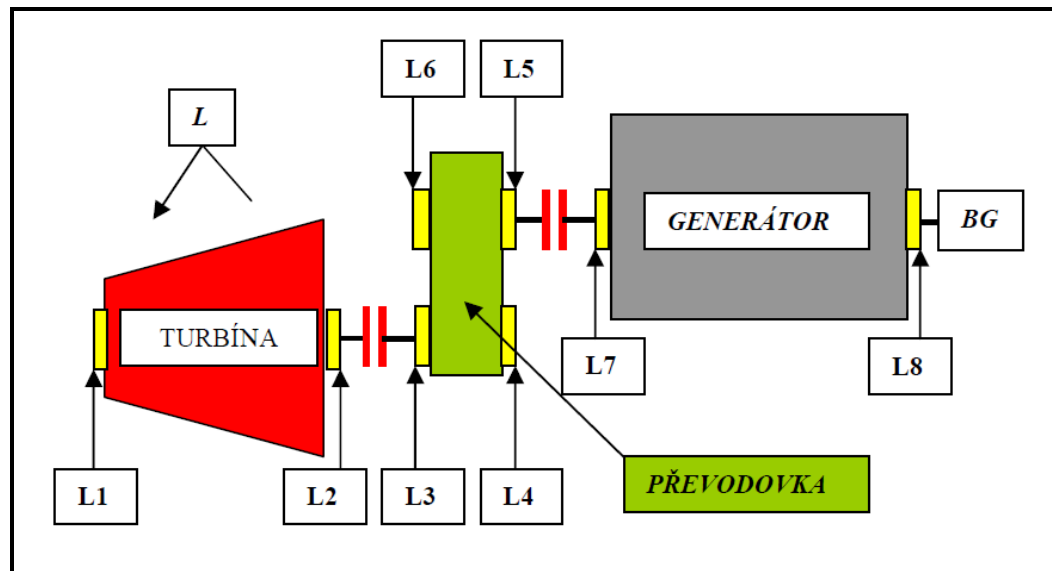
Tab. 2. Pásma klasifikace stavu strojů dle vibrací RMS (rychlost 10-1000Hz) [18]

Třída uložení	Hranice pásma	Efektivní hodnota výchylky [μm]	Efektivní hodnota rychlosti [mm/s]
Tuhé	A/B	29	2,3
	B/C	57	4,5
	C/D	90	7,1
Pružné	A/B	45	3,5
	B/C	90	7,1
	C/D	140	11,0

Nejvyšší velikost sledovaných vibrací na každém ložisku nebo stojanu se posuzuje vzhledem ke čtyřem pásmům hodnocení, která jsou stanovena na základě mezinárodních zkušeností. Výstraha je pro pásma B/C, přerušení provozu pro pásma C/D.

Tab. 3. Vibrační pásma pro hodnocení stavu strojů [18]

Pásma hodnocení	Výsledný stav
Pásma A	vibrace nových přejímaných strojů
Pásma B	stroje mohou být provozovány po neomezeně dlouhou dobu
Pásma C	neuspokojivý stav pro dlouhodobý a trvalý provoz, nutnost brzké opravy
Pásma D	hodnoty tohoto pásma považovány za nebezpečné, vedoucí až k poškození stroje



Obr. 10 Schéma turbogenerátoru (L1–L8 pořadové čísla ložisek, BG–budič generátoru)



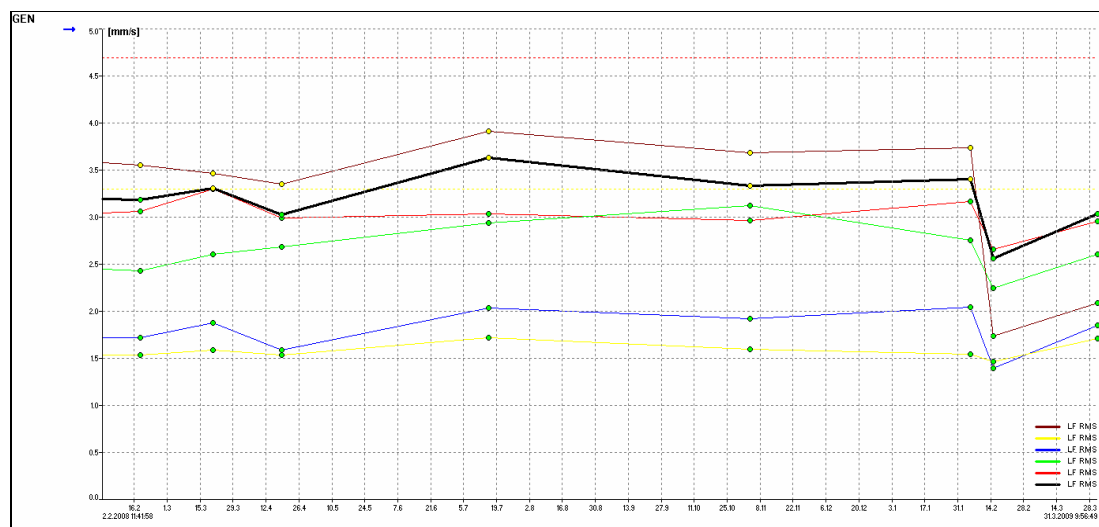
Obr. 11 Snímky měřeného turbogenerátoru

6.1 Měření efektivní hodnoty na předním a zadním ložisku

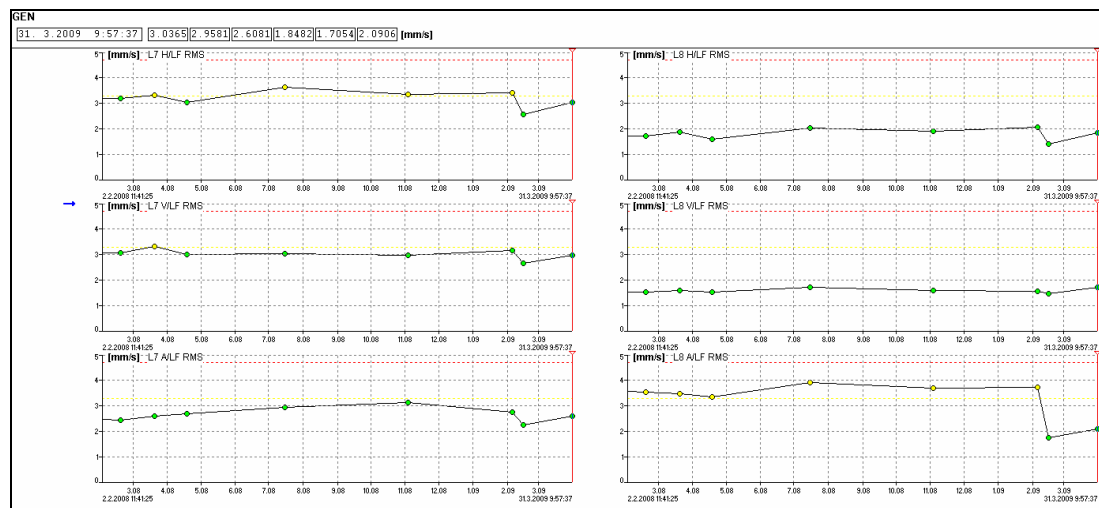
Typ měření LF RMS (Root Mean Square – efektivní hodnota) je měření vibrací ve frekvenčním pásmu od 10 do 1000 Hz. Měřenou statickou veličinou je rychlost vibrací (mm/s), která odpovídá efektivní hodnotě energie signálu.

Měření LF RMS slouží k zjištění mechanického stavu stroje, tedy určení rotačních a strukturálních problémů, jako jsou nevyvaha, rezonance, nesouosost, uvolnění a napětí v komponentách.

Z naměřených hodnot RMS je vidět, že získané hodnoty jsou v hraničním pásmu A/B (do 3,5 mm/s) což dle normy ČSN ISO 10816-3 mohou být stroje provozovány po neomezeně dlouhou dobu, a tedy generátor je možné provozovat bez omezení. Pokles RMS hodnot ze dne 14.2.2009 bylo způsobeno snížením otáček na turbíně a tím následnému odlehčení generátoru, což se projevilo změnou hodnot vibrací. [osa x – datum měření, osa y – efektivní hodnota vibrací]



Obr. 12 Trend LF RMS pro přední ložisko generátoru (L7) a zadní ložisko generátoru (L8) ve směru měření horizontálním, vertikálním, axiálním

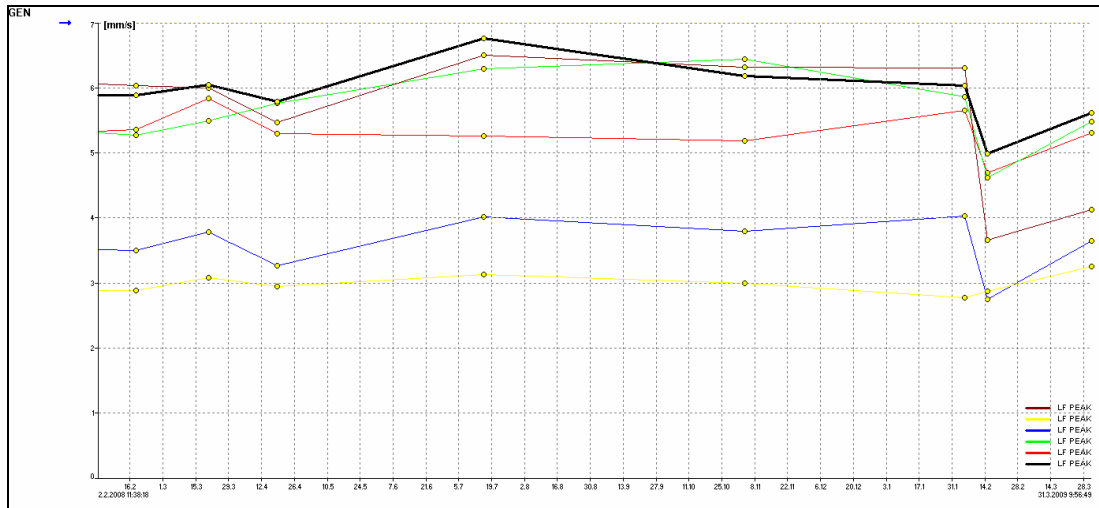


Obr. 13 Trend LF RMS pro přední ložisko generátoru (L7) a zadní ložisko generátoru (L8) ve směru měření (H – horizontální, V – vertikální, A – axiální)

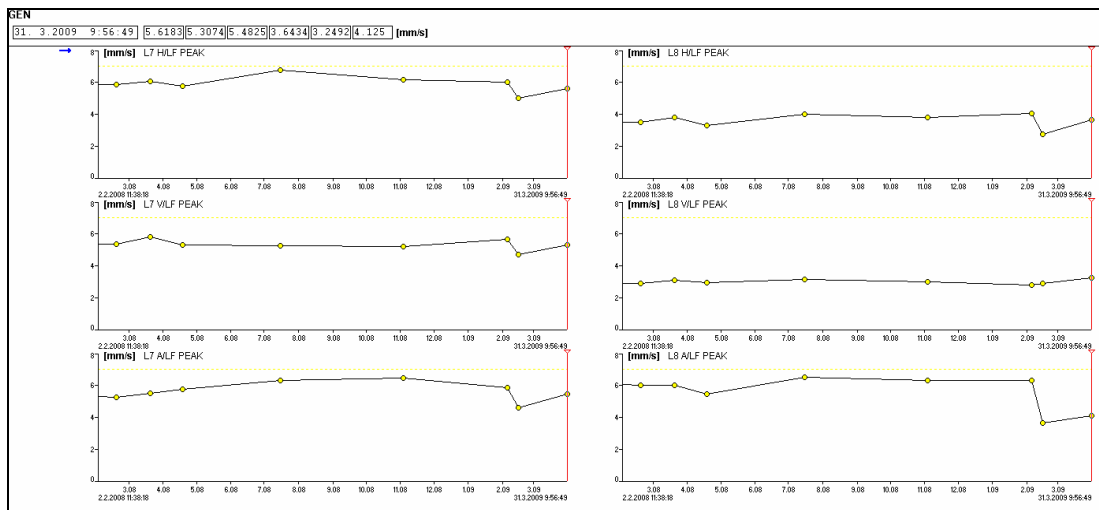
6.2 Měření špičkové hodnoty na předním a zadním ložisku

Typ měření LF PEAK (špičková hodnota L7/L8) je měření rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 1000 Hz. Měřenou statickou veličinou je rychlost vibrací (mm/s), která odpovídá špičkové (maximální) hodnotě signálu vibrací. Maximální hodnota popisuje amplitudy krátkodobých jevů, mechanických rázů apod. Indikuje pouze přítomnost špičky, ale neukazuje na časový průběh, ani kmitočtové složení hodnocených vibrací.

Slouží k určení mechanických závad stroje jako nevyvaha, rezonance, nesouosost, uvolnění a napětí v komponentách. Naměřené hodnoty nepřesahují hranici 7 mm/s a využívají se jako doplňkový ukazatel vibrací např. maximální výkmit při rozběhu, odstavení a neočekávaných událostech apod. [osa x – datum měření, osa y – špičková hodnota]



Obr. 14 Trend LF PEAK pro přední ložisko generátoru (L7) a zadní ložisko generátoru (L8) pro směry horizontální, vertikální, axiální), černá - L7H, zelená - L7A, červená - L7V, fialová - L8A, modrá - L8H, žlutá - L8V



Obr. 15 Trend LF PEAK pro přední ložisko generátoru (L7) a zadní ložisko generátoru (L8) pro směry měření (H – horizontální, V – vertikální, A – axiální)

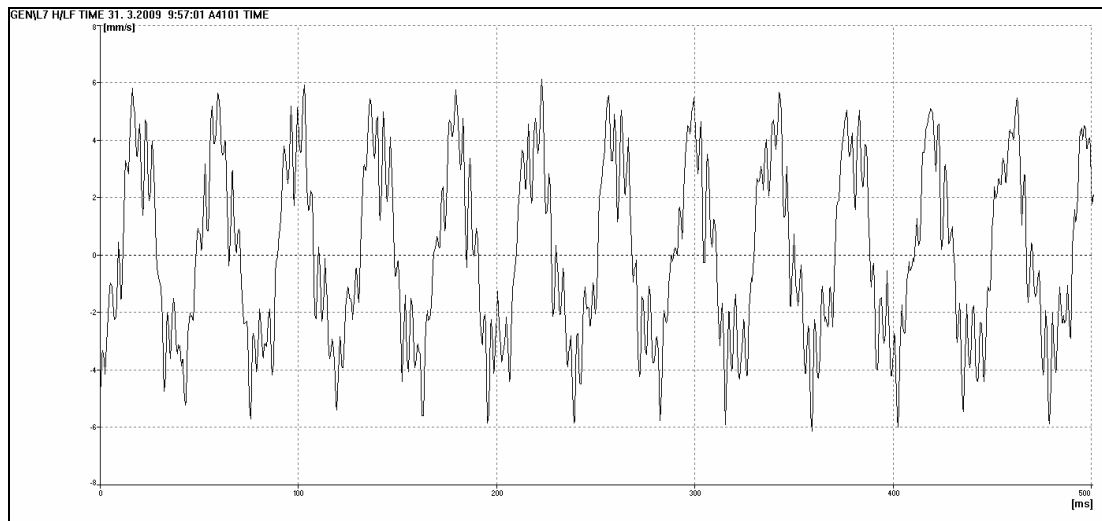
6.3 Měření časového záznamu

Typ měření LF TIME je měření časového záznamu rychlosti vibrací ve frekvenčním pásmu 10 Hz až 1000 Hz. Měření jsou dynamická data tvořená polem hodnot a veličinou je rychlost vibrací (mm/s). Počet odebraných vzorků je 2048 s krokem vzorkování 0,5 ms. Pokud má časový signál naprosto harmonický tvar funkce, jedná se o neváhu. V případě významného zkreslení signálu půjde o přítomnost i jiných problémů.

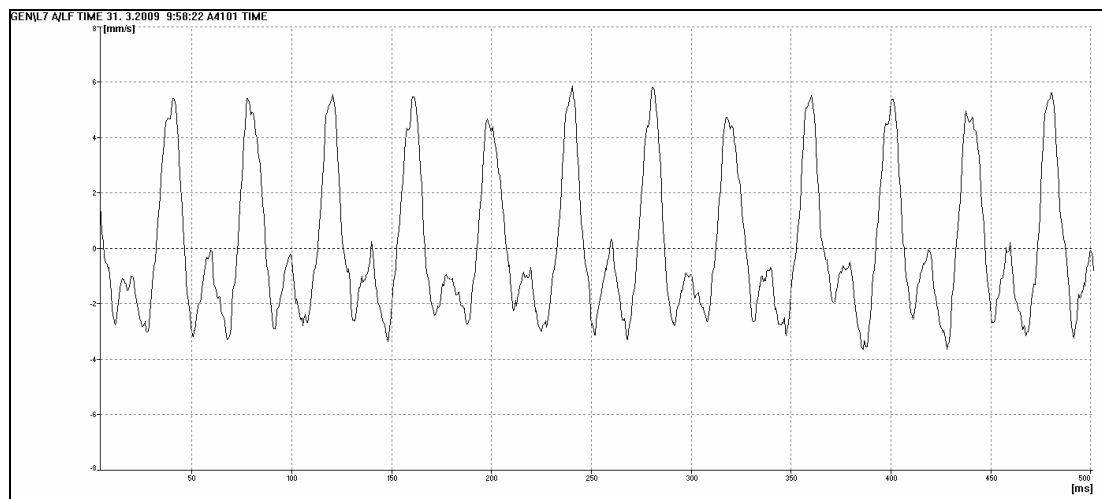
6.3.1 Časový záznam na předním ložisku

Typ měření LF TIME (7 H/A).

Z časového záznamu (L7) vyplývá, že měření v horizontálním směru je chod generátoru ustálený a pohybuje se na obě strany stejně. V axiálním směru z čelního pohledu k rotoru je rozkmit záporné amplitudy menší, což značí kratší dráhu posunu rotoru. Z hlediska provozu jsou tyto stavy v pořádku a generátor lze provozovat bez omezení. [osa x – čas, osa y – rychlost vibrací]



Obr. 16 Časový průběh LF Time (L7) na předním ložisku ve směru horizontálním

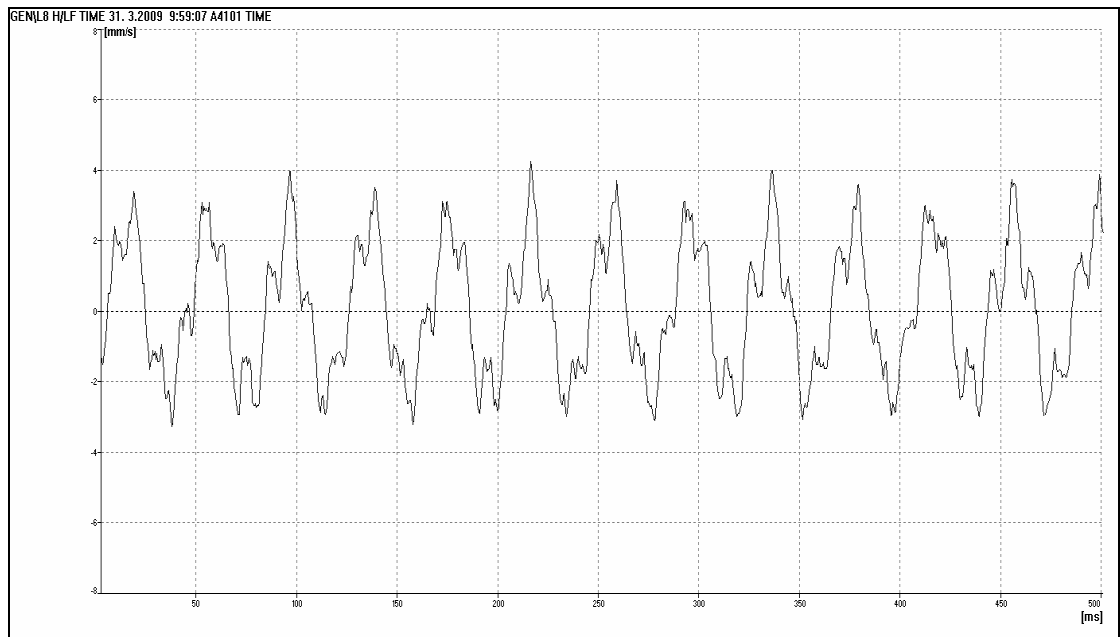


Obr. 17 Časový průběh LF Time (L7) na předním ložisku ve směru axiálním

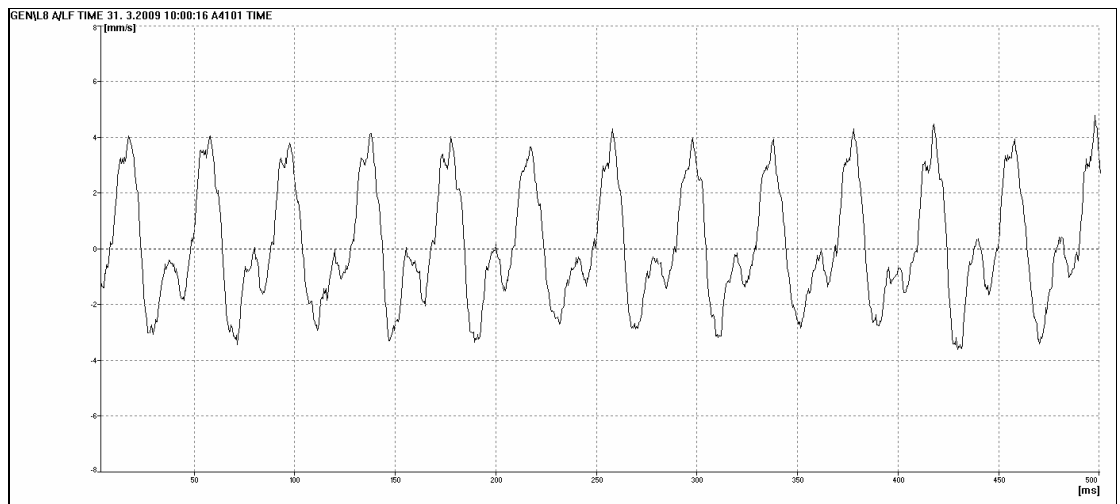
6.3.2 Časový záznam na zadním ložisku

Typ měření LF TIME (8 H/A).

Rozkmit amplitudy u zadního ložiska (L8) je menší než u předního ložiska (L7), což je způsobeno tím, že zadní ložisko je více zatlučené z hlediska vibrací, protože se nachází na vzdálenější straně od turbíny a převodovky. Rozkmit amplitudy je v obou směrech stejný, tudíž provoz generátoru je možný bez omezení. [osa x (ms) – čas, osa y – rychlost vibrací (mm/s)]



Obr. 18 Časový průběh LF Time (L8) na zadním ložisku ve směru horizontálním



Obr. 19 Časový průběh LF Time (L8) na zadním ložisku ve směru axiálním

6.4 Měření Spektra signálu

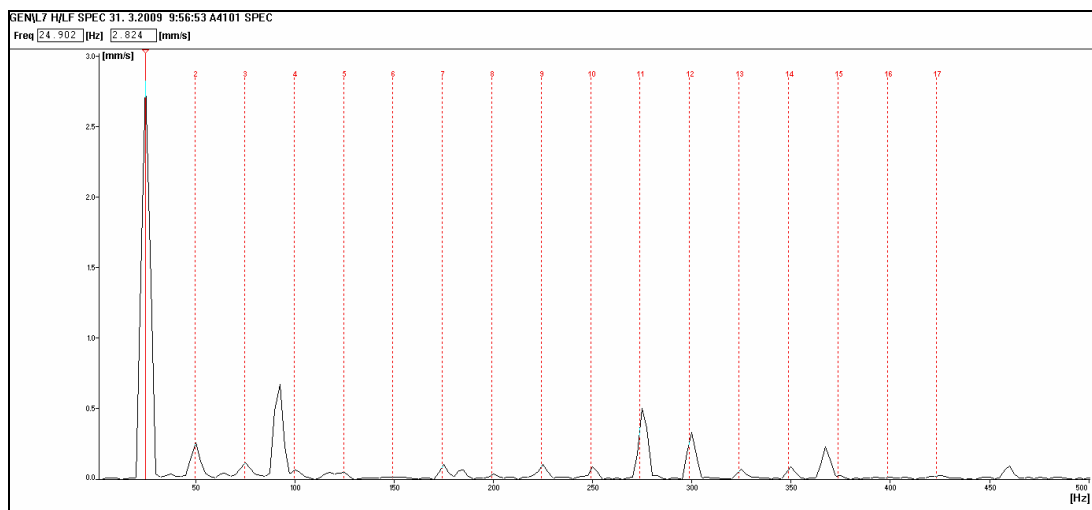
Typ měření: LF Spektrum je závislost měření rychlosti vibrací na frekvenci v pásmu 10 Hz až 1000 Hz. Měřenou veličinou je rychlost vibrací (mm/s). Graf spektra znázorňuje měření dynamických dat tvořených hodnotami vypočtenými pomocí FFT z naměřeného časového záznamu. Při vyhodnocování spekter nás zajímají otáčkové frekvence a její nejbližší harmonické násobky.

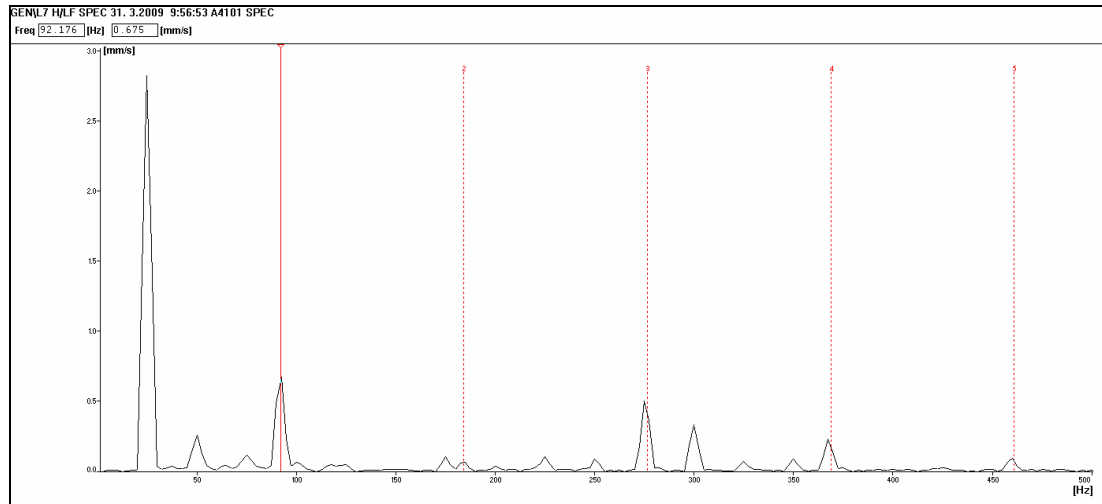
6.4.1 Spektrum signálu na předním ložisku

Typ měření LF Spektrum (L7 H/V/A), [osa x – frekvence (Hz), osa y – rychlost vibrací (mm/s)].

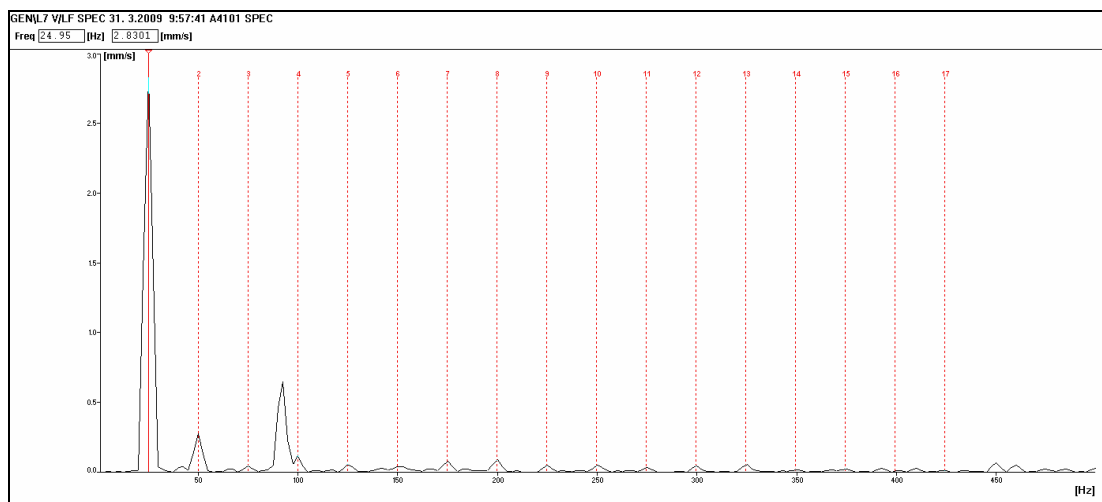
V trendech jsou viditelné dominantní špičky, které odpovídají otáčkové frekvenci generátoru (25 Hz = 1500 ot/min) s příslušnými harmonickými frekvencemi. Druhou méně výraznou špičkou je frekvence způsobená chodem parní turbíny (91,6 Hz = 5500 ot/min), na kterých je provozována.

Na předním ložisku generátoru (L7) v horizontálním, vertikálním a axiálním směru nejsou žádné zvýšené frekvence, které by omezovaly chod generátoru z pohledu vibrací.

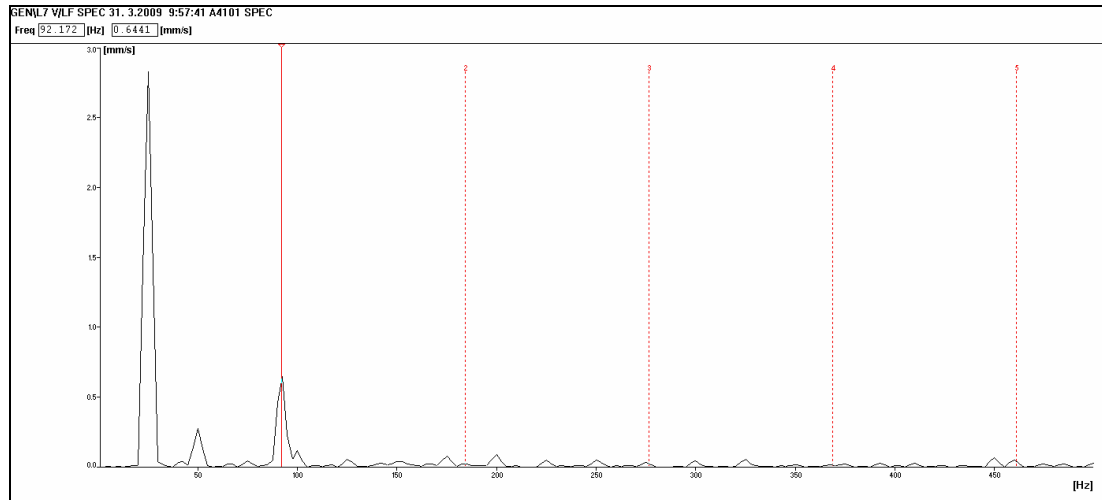




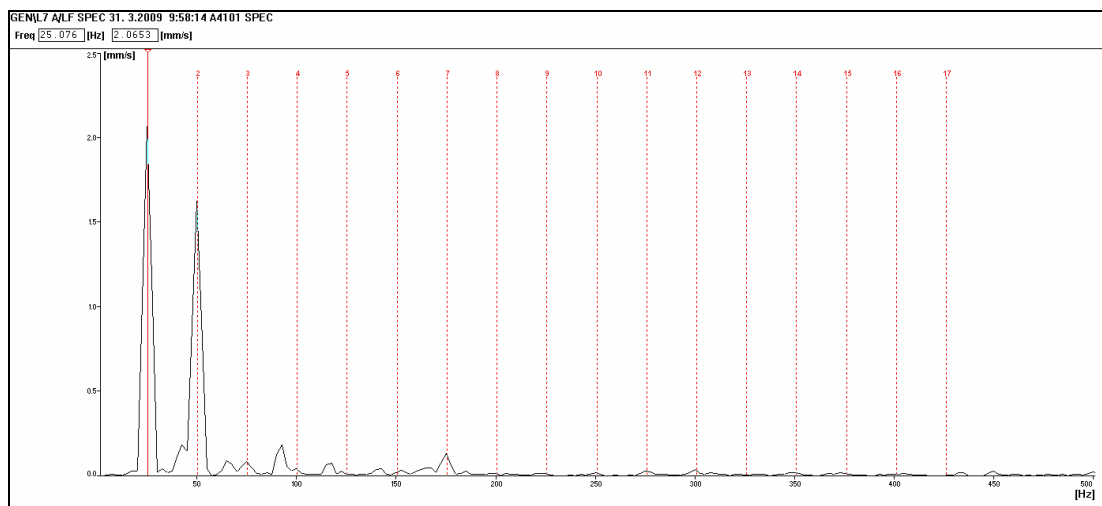
Obr. 21 LF Spektrum (L7 – horizontální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x, 5x) způsobenými otáčkovou frekvencí turbíny (92,176 Hz = 5530 ot/min)



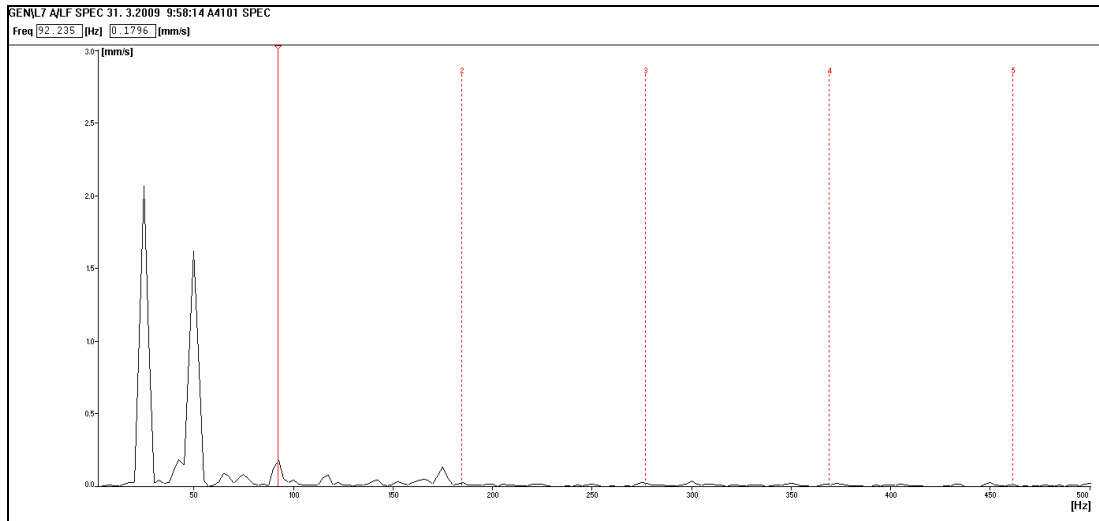
Obr. 22 LF Spektrum (L7 – vertikální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x,...) způsobenými otáčkovou frekvencí generátoru (24,95 Hz = 1497 ot/min)



Obr. 23 LF Spektrum (L7 – vertikální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x, 5x) způsobenými otáčkovou frekvencí turbíny (92,172 = 5530 ot/min)



Obr. 24 LF Spektrum (L7 – axiální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x,...) způsobenými otáčkovou frekvencí generátoru (25,076 Hz = 1504 ot/min)

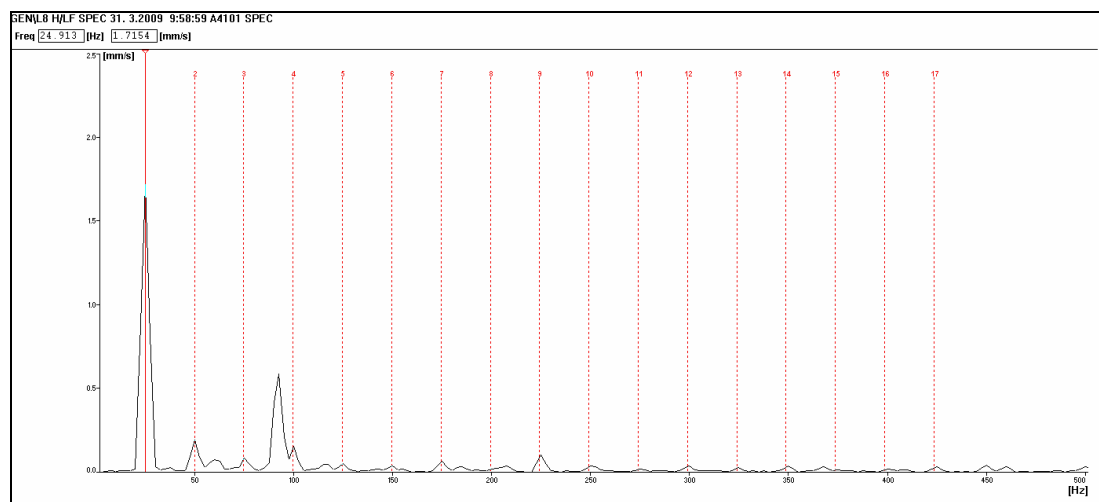


Obr. 25 LF Spektrum (L7 – axiální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x, 5x) způsobenými otáčkovou frekvencí turbíny (92,235 Hz = 5534 ot/min)

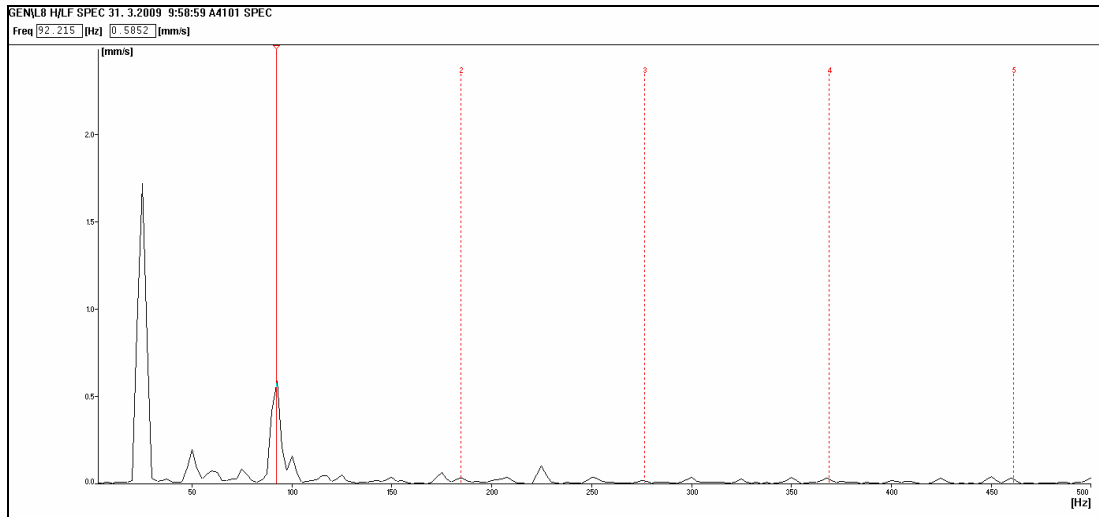
6.4.2 Spektrum signálu na zadním ložisku

Typ měření LF Spektrum (L8 H/V/A), [osa x – frekvence (Hz), osa y – rychlost vibrací (mm/s)].

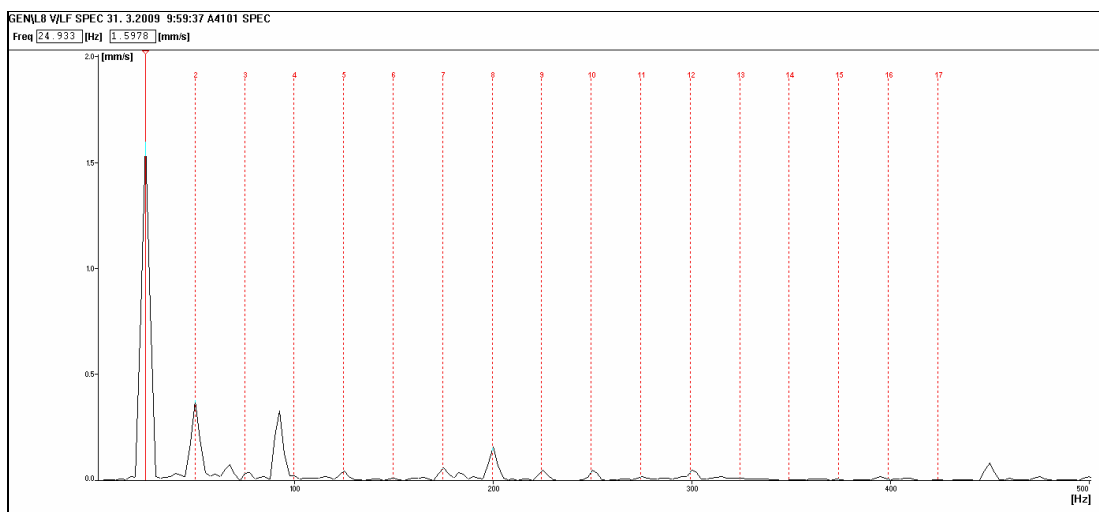
Na zadním ložisku generátoru (L8) v horizontálním, vertikálním a axiálním směru nejsou viditelné žádné poruchové frekvence, které by omezovaly chod generátoru.



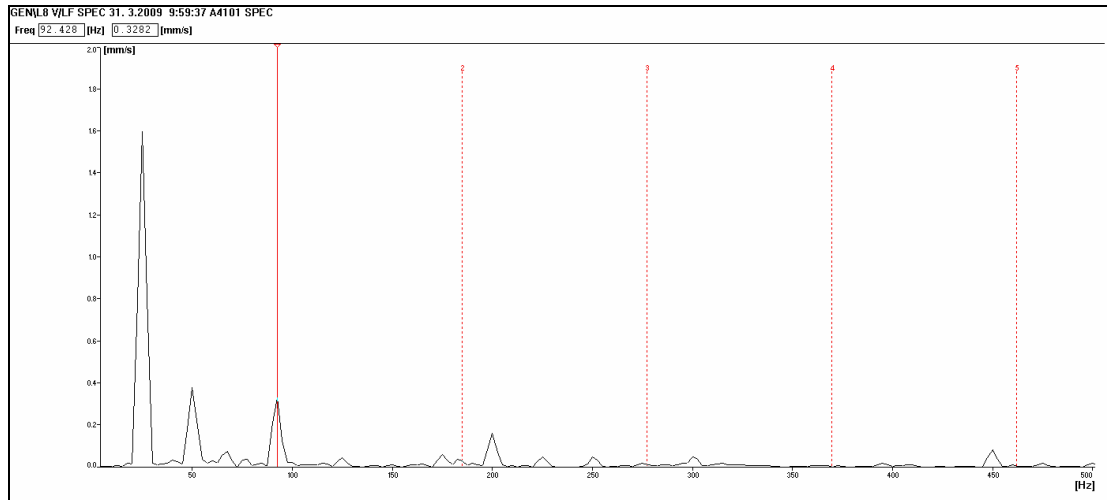
Obr. 26 LF Spektrum (L8 - horizontální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x,...) způsobenými otáčkovou frekvencí generátoru (25,076 Hz = 1504 ot/min)



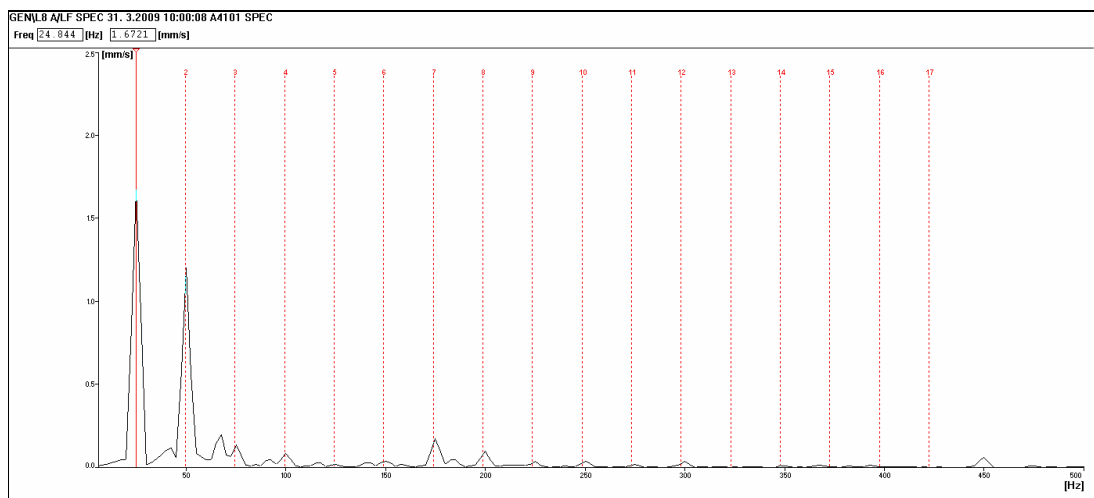
Obr. 27 LF Spektrum (L8 – horizontální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x, 5x) způsobenými otáčkovou frekvencí turbíny (92,215 Hz = 5533 ot/min)



Obr. 28 LF Spektrum (L8 – vertikální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x,...) způsobenými otáčkovou frekvencí generátoru (24,933 Hz = 1496 ot/min)



Obr. 29 LF Spektrum (L8 – vertikální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x, 5x) způsobenými otáčkovou frekvencí turbíny (92,428 Hz = 5546 ot/min)



Obr. 30 LF Spektrum (L8 – axiální směr) s příslušnými harmonickými frekvencemi (2x, 3x, 4x...) způsobenými otáčkovou frekvencí generátoru (24,844 Hz = 1491 ot/min). V axiálním směru na zadním ložisku se neprojevuje otáčková frekvence parní turbíny, což bude důsledkem zatlumení otáčkové frekvence turbíny na předním ložisku generátoru (L7).

7 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Na základě naměřených výsledků vibrací lze konstatovat tyto závěry. Z výsledků je zřejmé, že naměřené hodnoty RMS (obrázek 13) nepřekračují stanovené meze dané normou ČSN. Z hlediska vývoje v čase je z trendů vidět, že ložiska se pohybují v podobných hodnotách, což ukazuje na ustálený a nezhoršující se stav ložisek z pohledu vibrací. Při měření efektivních hodnot (obrázek 13) je vidět, že přední ložisko generátoru (L7) má vyšší hodnoty vibrací proti (L8), což je způsobené tím, že se nachází blíže k převodovce, která může produkovat zvýšené vibrace způsobené nejspíš nesouosostí hřídelí ze strany turbíny a generátoru.

Z naměřených špičkových hodnot je vidět, že se naměřené hodnoty v čase nezhoršují a tedy nevykazují rostoucí hodnoty vibrací. Špičkovou hodnotu je potom možné použít pro výpočet Crest faktoru, který definovaný jako poměr špičkové a efektivní hodnoty umožňuje velmi brzké odhalení poškození ložiska.

Měření časového záznamu je vyhodnoceno pro horizontální a axiální směr. Vertikální směr není uveden, protože vibrace v tomto směru by se projevil výjimečně, což je způsobeno hmotností generátoru (64 tun). Vzniklé vibrace by se určitě projevil v horizontálním nebo axiálním směru (z hlediska váhy je málo pravděpodobné, aby generátor „poskakoval“ jen ve směru nahoru a dolů). Z hlediska provozuschopnosti generátoru jsou naměřené hodnoty časového záznamu v pořádku.

U spektrálního záznamu jsou viditelné různé špičky, které jsou způsobené buď otáčkovou frekvencí generátoru, jedoucím na 25 Hz (1500 ot/min.), nebo druhou frekvencí způsobenou otáčkovou frekvencí turbíny, jedoucí na 91,6 Hz (5500 ot/min.) s jejich příslušnými harmonickými frekvencemi. U zadního ložiska (L8) v axiálním směru (obr. 30) je viditelná jen otáčková frekvence generátoru, ale není zde vidět otáčkovou frekvenci turbíny, což bude dáno zatlumením na předním ložisku generátoru (L7), na kterém je tato frekvence viditelná.

Z provedených měření vibrací jsem dospěl k závěru, že generátor nemá zvýšené vibrace ani na jednom z ložisek a může být provozován bez omezení.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámení se s oborem, který se zabývá měřením, zpracováním a vyhodnocením vibrací. Pojmy nastudované při psaní diplomové práce byly uplatněny při praktickém měření vibrací na generátoru napětí s následným zpracováním naměřených hodnot a vyhodnocením vibrodiagnostického signálu. Z naměřených výsledků bylo zjištěno, že na generátoru napětí nejsou vibrace omezující provoz tohoto zařízení.

Měření, záznam a vyhodnocení vibrací jsou nedílnou součástí sledování provozních stavů strojů v celém průmyslovém oboru především však v energetice, kde je nezbytné, aby zařízení bylo v trvale vyhovujícím stavu, a to jak z hlediska bezpečnostního, tak i ekonomického.

Vibrodiagnostika, stejně jako současná technika prochází neustálým vývojem. Zdokonalování měřících metod je snahou nejen výrobců diagnostických měřidel, ale i samotných provozovatelů zařízení. Použití nejmodernější techniky pak vede k získávání včasných a přesných informací, vypovídajících o aktuálním technickém stavu měřeného objektu.

Pomocí vibrační diagnostiky se plánují opravy strojů dle aktuálního stavu, čímž se minimalizují náklady spojené s údržbou zařízení. Vibrace neměříme jen z hlediska provozuschopnosti strojů, ale i škodlivosti vedlejších účinků na okolí v podobě hluku nebo vibrací.

Správnost a jednoznačnost diagnózy závisí na analýze vybraných možných závad. Nejdůležitější činností je posouzení a rozhodnutí zdali měřený objekt splňuje určitá kritéria funkčnosti a spolehlivosti, nezbytných pro udržení zařízení v bezporuchovém provozu.

RESUMÉ

The aim of this thesis is to become familiar with the branch, which deals with the measurement, processing and evaluation of vibration. Concepts from this thesis were applied in the practical measurement of vibration in the generator voltage with subsequent processing of the measured values and evaluation of vibration diagnostic signal. Measurement, recording and evaluation of vibration are an integral part of monitoring the operating conditions of machines throughout the industry, especially in the energy sector, where it is necessary the equipment is permanently in a satisfactory condition, both in security and economic points of view.

Vibrodiagnostic as well as technology are in constant development nowadays. Perfection of measuring methods is the effort not only producers of diagnostic meters, but also of the users of this equipment. Using the latest technology leads to acquisition of actual and accurate information, referring to the current state of the measured object. With the help of vibration diagnostic the planned machinery maintenance is held according to actual condition, which minimizes costs. Vibration measurements are taken also due to noise side effects on the environment, like noise or vibration.

The diagnosis accuracy and clarity depends on analysis of selected potential defects. The most important activity is the assessment and the decision whether the measured object meets certain criteria of functionality and reliability for safe performance.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Kreidl M., Šmíd R.: Technická diagnostika, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6
- [2] Smetana C.: Hluk a vibrace, Sdělovací technika, Praha 1988, ISBN 80-901936-2-5
- [3] Janoušek I., Kozák J., Taraba O.: Technická diagnostika, SNTL, Praha 1988, 04-236-88
- [4] Navrátil M., Pluhař O.: Měření a analýza mechanického kmitání, SNTL, Praha 1986, 04-214-86
- [5] Beneš Š.: Technická diagnostika, skripta, Liberec 1997
- [6] Nový R.: Hluk a chvění, ČVUT, 2000, ISBN 80-01-02246-3
- [7] Vdoleček F.: Spolehlivost a technická diagnostika, Brno 2002. Dostupné z WWW: <http://autnt.fme.vutbr.cz/lab/a1-731a/FSD.pdf>
- [8] Janalík J.: Měření tekutinových mechanismů, Ostrava 1995. Dostupné z WWW: http://www.338.vsb.cz/PDF/Mereni_tek_mech.pdf
- [9] Diagnostika valivých ložisek: Crest factor, Dokumentace Adash. Dostupný z WWW: http://www.adash.cz/doc/ApplicationNotes/diag_val_lozisek_man_cz.pdf
- [10] Firma Adash zabývající se vibrodiagnostikou. Dostupné z WWW: <http://www.adash.cz>
- [11] Česká technická norma : ČSN ISO 13373-1, 2002, Monitorování stavu a diagnostika strojů – Monitorování stavu vibrací
- [12] Firemní literatura ADASH
- [13] Česká technická norma : ČSN ISO 2041 – Vibrace a rázy - Slovník
- [14] Ložiska – prezentace. Dostupné z WWW : http://www.337.vsb.cz/materialy/vibracni_diagnostika/VIBDI_6.pdf
- [15] webové stránky firmy. SKF. Dostupné z WWW : <http://www.skf.com>
- [16] Firma Brüel & Kjær zabývající se vibrodiagnostikou. Dostupné z WWW <http://www.bksv.com>

- [17] Jandová K.: Vibrodiagnostika, prezentace. Dostupné z WWW
<http://www.cdm.cas.cz/czech/hora/vyuka/tdk/sem2006/VD_JANDOVA.ppt>
- [18] Česká technická norma : ČSN ISO 10816-3, 2001 – Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

T	Doba kmitu (perioda)
ω	Úhlový kmitočet
c	Rychlost šíření vlnění
f	Kmitočet (frekvence)
φ	Fázový úhel
λ	Vlnová délka
t	Čas
ρ	Hustota prostředí
v	Rychlost
a	Zrychlení
j	Imaginární jednotka
F	Síla
y_{ss}	Stejnoseměrná složka složeného signálu
y_M	Vrcholová hodnota
y_{ef}	Efektivní hodnota výchylky kmitání
v_{ef}	Efektivní hodnota rychlosti kmitání
a_{ef}	Efektivní hodnota zrychlení kmitavého pohybu
$x(t)$	Spojité signál
N	Počet vzorků
Δf	Frekvenční rozlišení
f_{vz}	Vzorkovací frekvence
g	Tíhové zrychlení
M	Hmota tělesa

k	Tuhost pružiny
b	Tlumič s koeficientem tlumení
A	Axiální směr
H	Horizontální směr
V	Vertikální směr
B	Indukce magnetického pole
l	Délka vodiče
ms	mili sekund
ČSN	Česká technická norma
ISO	Mezinárodní organizace pro normalizaci
FFT	Rychlá Fourierova transformace
DFT	Diskrétní Fourierova transformace

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Časové rozvinutí harmonického kmitání.....	14
Obr. 2. Hodnocení Crest faktoru.....	19
Obr. 3. Grafické znázornění časové a frekvenční oblasti	21
Obr. 4. Znázornění hodnot popisující signál.....	22
Obr. 5. Grafické znázornění jednoduchého signálu.....	24
Obr. 6. Mechanický model absolutního a relativního snímače vibrací.....	31
Obr. 7. Model absolutního senzoru vibrací.....	31
Obr. 8 Směry měření vibrací.....	33
Obr. 9. Model piezoelektrického snímače	36
Obr.10. Schéma turbogenerátoru	49
Obr.11. Snímky měřeného turbogenerátoru.....	49
Obr.12 Trend LF RMS pro přední ložisko generátoru.....	50
Obr.13. Trend LF RMS pro přední ložisko generátoru.....	51
Obr.14 Trend LF PEAK pro přední ložisko generátoru.....	52
Obr.15. Trend LF PEAK pro přední ložisko generátoru.....	52
Obr.16. Časový průběh LF Time (L7 Horizontál) na předním ložisku	53
Obr.17. Časový průběh LF Time (L7 Axiál) na předním ložisku.....	53
Obr.18. Časový průběh LF Time (L8 Horizontál) na zadním ložisku	54
Obr.19. Časový průběh LF Time (L8 Axiál) na zadním ložisku	54
Obr.20. LF Spektrum (L7 Horizontál)	55
Obr.21. LF Spektrum (L7 Horizontál)	56
Obr.22. LF Spektrum (L7 Vertikál)	56
Obr.23. LF Spektrum (L7 Vertikál)	57
Obr.24. LF Spektrum (L7 Axiál)	57
Obr.25. LF Spektrum (L7 Axiál)	58

Obr.26. LF Spektrum (L8 Horizontál)	58
Obr.27. LF Spektrum (L8 Horizontál)	59
Obr.28. LF Spektrum (L8 Vertikál)	59
Obr.29. LF Spektrum (L8 Vertikál)	60
Obr.30. LF Spektrum (L8 Axiál)	60

SEZNAM TABULEK

Tab. 1. Mezní hodnoty Kurtosis faktoru	20
Tab. 2. Pásma klasifikace stavu strojů dle vibrací TRUE – RMS (rychlost 10-1000Hz)....	48
Tab. 3. Tab. 3. Vibrační pásma pro hodnocení stavu strojů	48