

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

VIBRODIAGNOSTIKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTERE'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

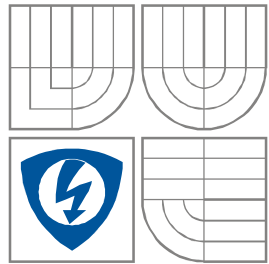
Bc. DOMINIK MAŠIN

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

VIBRODIAGNOSTIKA ASYNCHRONNÍHO MOTORU

Vibrodiagnostics of induction motor

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

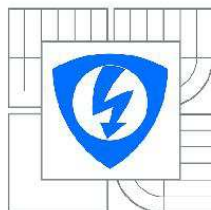
Bc. Dominik Mašin

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.d.

BRNO, 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Dominik Mašin
Ročník: 2

ID: 134554
Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Vibrodiagnostika asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s postupem měření vibrací
2. Provedte měření vibrací na konkrétním typu asynchronního motoru s definovanými chybami
3. Provedte výpočet frekvencí nejčastějších chyb, které mají vliv na vibrační spektrum elektrického stroje
4. Vyhodnoťte výsledky měření a pomocí diagnostických metod identifikujte jednotlivé poruchy

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] JACEK F. GIERAS, Jacek F.Chong Wang. Noise of Polyphase Electric Motors. Hoboken: CRC Press, 2005. ISBN 978-142-0027-730.
- [2] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.

Termín zadání: 22.9.2014

Termín odevzdání: 26.5.2015

Vedoucí práce: Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto práca sa zaoberá meraním a vyhodnotením vibračného signálu. Meranie vibrácií je jednou z najdôležitejších činností pre správnu a plynulú prevádzku strojov nielen z hľadiska ekonomického, ale aj bezpečnostného. Monitorovanie stavu elektrického stroja je kľúčom k zisteniu poškodených častí stroja, čím predídeme neočakávaným výpadkom a poruchám vo výrobe. V práci sú popísané základné pojmy a princípy merania vibrácií. V praktickej časti je vykonané a spracované meranie asynchrónneho motora.

Abstract

This thesis is dealing with measuring and evaluation of vibration signal. Vibration measurement is one of the most important operation for correct and fluent machinery service, not only from economical point of view but also because of security. Status monitoring of electric machine is a key to detect damaged parts and it is giving us an opportunity to avoid unexpected outages and failures in production. My work describes basic concepts and principals of vibration measurement. Asynchronous motor measurement and its evaluation is performed in practical part.

Klíčová slova

vibrácie, meranie, diagnostika, závada

Keywords

vibration, measurement, diagnostics, failure

Bibliografická citace

MAŠIN, D. *Vibrodiagnostika asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2015. 54 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Vibrodiagnostika asynchronního motoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

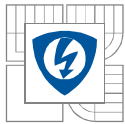
Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne Podpis autora

Poděkování

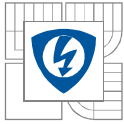
Děkuji vedoucímu diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne Podpis autora



Obsah

ZOZNAM OBRÁZKOV.....	9
ZOZNAM TABULIEK.....	10
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	11
ÚVOD	12
1 ZÁKLADNÉ ROZDELENIE ELEKTRICKÝCH STROJOV	12
1.1 ASYNCHRÓNNY STROJ	13
1.1.1 PRINCÍP FUNKCIE ASYNCHRÓNNEHO MOTORA	13
1.1.2 KONŠTRUKCIA ASYNCHRÓNNEHO MOTORA	14
1.1.3 MAGNETICKÝ OBVOD	14
2 ZÁKLADY MERANIA VIBRÁCIÍ.....	15
3 ZÁKLADNÉ POJMY VIBRODIAGNOSTIKY	16
4 MERANÉ VELIČINY CHARAKTERIZUJÚCE VIBRÁCIE.....	17
4.1 VÝCHYLKA	17
4.2 RÝCHLOSŤ	18
4.3 ZRÝCHLENIE	18
5 ANALÝZA VIBRODIAGNOSTICKÉHO SIGNÁLU	20
5.1 ANALÝZA VIBRODIAGNOSTICKÉHO SIGNÁLU V ČASOVEJ OBLASTI.....	20
5.1.1 VELIČINY POPISUJÚCE ČASOVÝ SIGNÁL	20
5.1.2 CELKOVÉ VIBRÁCIE STROJA	21
5.1.3 METÓDY VYHODNOCOVANIA VIBRÁCIÍ.....	22
5.2 FREKVENČNÁ ANALÝZA VIBRODIAGNOSTICKÉHO SIGNÁLU	22
5.2.1 SPEKTRÁLNA ANALÝZA POMOCOU FOURIEROVEJ TRANSFORMÁCIE.....	23
5.2.2 OBÁLKOVÁ ANALÝZA.....	26
5.2.3 METÓDA Činiteľa výkmitu (CREST FACCTOR)	26
5.2.4 ORBITA.....	27
6 ROZBOR ZÁVAD ROTAČNÝCH SYSTÉMOV PODEĽA KMITOČTOVÉHO SPEKTRA.....	28
6.1 OBLASŤ NÍZKYCH KMITOČTOV	28
6.1.1 NEVYVÁŽENOSŤ HRIADEĽA	28
6.1.2 NESÚOSOSŤ HRIADEĽA	28
6.1.3 STATICKÁ A DYNAMICKÁ EXCENTRICITA VZDUCHOVEJ MEDZERY	28
6.2 OBLASŤ STREDNÝCH KMITOČTOV	30
6.3 OBLASŤ VYSOKÝCH A VEĽMI VYSOKÝCH KMITOČTOV.....	30
6.3.1 LOŽISKÁ.....	30
6.3.2 VYSOKÉ A VEĽMI VYSOKÉ KMITOČTY	32
6.4 PREHLAD FREKVENCÍ CHÝB NA ROTAČNÝCH STROJOCH	34
7 MERANIE.....	35
7.1 POPIS MERANIA	35

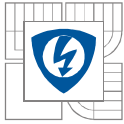


7.2 MERACÍ PRÍSTROJ VIBXPERT	35
7.3 VÝPOČET JEDNOTLIVÝCH CHÝB MOTOROV	37
7.4 FOURIEROVA TRANSFORMÁCIA FFT.....	38
7.5 OBÁLKOVÁ METÓDA.....	43
7.6 CREST FAKTOR	48
7.7 ORBITA	49
8 VYHODNOTENIE MERANIA	51
9 ZÁVER.....	52
LITERATURA	53



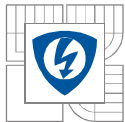
ZOZNAM OBRÁZKOV

<i>Obr. 1. Časové rozvinutie harmonického kmitania</i>	17
<i>Obr. 2. Znázornenie hodnôt popisujúcich signál</i>	20
<i>Obr. 3 Smery merania pri meraní vibrácií stroja</i>	22
<i>Obr. 4 Princíp vytvorenia orbity [13]</i>	27
<i>Obr. 5 Excentricita motora</i>	29
<i>Obr. 6 Valčekové ložisko</i>	31
<i>Obr. 7 VIBXPRT</i>	36
<i>Obr. 8 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 1</i>	39
<i>Obr. 9 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 1</i>	39
<i>Obr. 10 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 2</i>	40
<i>Obr. 11 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 2</i>	40
<i>Obr. 12 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 3</i>	41
<i>Obr. 13 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 3</i>	41
<i>Obr. 14 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 4</i>	42
<i>Obr. 15 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 4</i>	42
<i>Obr. 16 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 1</i>	44
<i>Obr. 17 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 1</i>	44
<i>Obr. 18 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 2</i>	45
<i>Obr. 19 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 2</i>	45
<i>Obr. 20 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 3</i>	46
<i>Obr. 21 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 3</i>	46
<i>Obr. 22 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 4</i>	47
<i>Obr. 23 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 4</i>	47
<i>Obr. 24 Orbita pre motor č. 3</i>	49
<i>Obr. 25 Orbita pre motor č. 4</i>	50

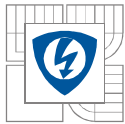


ZOZNAM TABULIEK

<i>Tab. 1 Orientačné hodnoty rýchlostí vibrácií pre rôzne stroje</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2 Tabuľka prehľadu frekvencií chýb na rotačných strojoch</i>	<i>34</i>

**ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK**

B	magnetická indukcia [T]
μ	permeabilita [$\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$]
f	frekvencia [Hz]
T	perióda [s]
ω	uhlový kmitočet [$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$]
φ	fázový uhol [rad]
λ	vlnová dĺžka [m]
c	rýchlosť šírenia vlnenia [m/s]
s	amplitúda výchylky [m]
t	čas [s]
v	rýchlosť [m/s]
j	imaginárne číslo
a	zrýchlenie [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
x (t)	spojitý signál
RMS	efektívna hodnota
Peak	špičková hodnota
Average	stredná hodnota
FFT	Fourierova transformácia
DFT	Diskrétna Fourierova transformácia
H	horizontálny smer
V	vertikálny smer
f_s	frekvencia siete [Hz]
f_r	frekvencia rotora [Hz]
n	počet
BD	priemer guličky [mm]
PD	roztečný priemer [mm]
$\cos \beta$	uhol dotyku [$^\circ$]
BPFO	frekvencia odpovedajúca chybe vonkajšieho krúžku [Hz]
BPFI	frekvencia odpovedajúca chybe vnútorného krúžku [Hz]
BSF	frekvencia odpovedajúca chybe guličky [Hz]
FTF	frekvencia odpovedajúca chybe kletky [Hz]



ÚVOD

Cieľom diplomovej práce bolo oboznámenie sa s problematikou vibrácií elektrických strojov, ako po teoretickej stránke, tak prakticky urobiť meranie a vyhodnotiť ho. V teoretickej časti popisujem základné pojmy, týkajúce sa vibrácií, metódy merania vibrácií, časovú a frekvenčnú analýzu vibrodiagnostického signálu, základný rozbor závad rotačných strojov. V praktickej časti som vykonal vibrodiagnostické meranie na asynchrónnych motoroch, s následným vyhodnotením výsledkov.

Ná základe výsledkov, ktoré získame pri meraní, môžeme predísť alebo aspoň oddialiť poruchu na diagnostikovanom stroji. Toto je veľmi dôležité, hlavne ak sa jedná o významné zariadenie vo výrobe, ktorého porucha by mohla spôsobiť veľké straty a problémy pre danú výrobu.

1 ZÁKLADNÉ ROZDELENIE ELEKTRICKÝCH STROJOV

Elektrický stroj je zariadenie, ktoré premieňa elektrickú energiu na elektrickú (energiu iného prúdu alebo napätia), elektrickú energiu na mechanickú alebo naopak mechanickú na elektrickú. K premieňaniu energie využíva elektromagnetickú indukciu. Elektrické stroje sa delia podľa rôznych kritérií:

Podľa počtu fáz:

- Jednofázové
- Trojfázové
- Viacfázové

Podľa prúdovej sústavy:

- Jednosmerné
- Striedavé
- Univerzálne

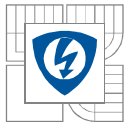
Z hľadiska točenia:

- Točivé
- Netočivé

Podľa smeru toku a druhu energie:

- Motory (premieňajú elektrickú energiu na mechanickú)
- Generátory (premieňajú mechanickú energiu na elektrickú)
- Transformátory (majú na vstupe a výstupe elektrickú energiu rozdielnych vlastností) [1]

Súčasťou každého elektrického stroja je elektrický a magnetický obvod. Základnou časťou elektrického obvodu je vinutie. Vinutie je tvorené jednou alebo viacerými cievkami, ktoré majú určitý počet závitov. Môžu byť vyrobené buď izolovanými alebo neizolovanými vodičmi (spravidla medené alebo hliníkové). V prípade neizolovaných vodičov sa vodiče medzi sebou



izolujú izolačnými vložkami. Tieto vložky sú tvorené z materiálov, ktoré majú určené maximálne prevádzkové teploty. Vinutie transformátora alebo statora pripájame svorkami priamo na svorkovnicu. Vinutie rotora pripájame cez krúžky alebo komutátor. Magnetické pole elektrického stroja má určitý tvar. Magnetické pole transformátora tvorí uzatvorený celok. U točivých elektrických strojov sa skladá z rotora, statora a vzduchovej medzery medzi nimi. [2]

Najpoužívanejšie elektrické stroje: jednosmerné, asynchrónne, synchrónne.

1.1 Asynchrónny stroj

Asynchrónne stroje sa používajú najčastejšie ako motory. Sú najrozšírenejšími elektromotormi vôbec a používajú sa k najrôznejším pohonom preto, že sú najjednoduchšie a najlacnejšie. Sú prevádzkovo najspoľahlivejšie a nevyžadujú žiadnu veľkú údržbu. Využívajú sa k pohonom zariadení, ako sú čerpadlá, ventilátory, kompresory, žeriavy, dopravníky, obrábacie stroje atď.

Asynchrónne stroje môžu tiež pracovať ako asynchrónne generátory (premena mechanickej energie na energiu elektrickú) v prípade, že poháňaním asynchrónneho motoru dosiahneme jeho mechanických otáčok vyšších než sú jeho synchrónne otáčky, čím indukované napätie a prúdy sú opačného smeru a stroj teda dodáva činný elektrický výkon do siete.

Ak poháňame stroj mechanickým momentom pôsobiacim proti zmyslu otáčania točivého magnetického poľa, pracuje ako synchrónna brzda, tj. moment asynchrónneho stroja pôsobí proti hnaciemu mechanickému momentu. [3]

1.1.1 Princíp funkcie asynchrónneho motora

Princíp činnosti asynchrónneho motora je založený na vzájomnom elektromagnetickom pôsobení točivého magnetického poľa statora a prúdov vytvorených vo vinutí rotora týmto magnetickým poľom. Vzájomným pôsobením magnetických polí vzniká sila, pôsobiaca na vodiče rotora v smere pohybu magnetického poľa statora. Motor je teda založený na indukcii napätia a prúde v rotore a preto sa tiež nazýva indukčný motor.

Napätia a prúdy v rotore sa podľa indukčného zákona môžu indukovať točivým magnetickým poľom iba pri otáčkach rotora odlišných od synchrónnych otáčok točivého poľa statora, teda pri asynchrónnych otáčkach. Pri synchrónnych otáčkach rotora by sa do neho neindukovalo napätie, nepretekali by ním prúdy a stroj by mal nulový moment. Rozdiel otáčok statora a rotora vzťahnutý na jednu otáčku magnetického poľa statora je tzv. sklz.

Otáčky magnetického poľa statora závisia na počte pólov a kmitočte napájacieho napätia. Sklz, a teda aj otáčky motora sa menia s mechanickým zaťažením stroja a je pri menovitom zaťažení malých motorov asi 10%, u veľkých okolo 1%.

Pri rozbehu sa v stojacom rotore indukujú napätia, ktoré v uzatvorenom obvode rotora vyvolajú prúd, čím dôjde k silovému pôsobeniu poľa statora na rotorový obvod. Smer a orientácia tejto sily sa určí podľa Flemingovho pravidla ľavej ruky. Účinkom týchto síl vzniká točivý moment, ktorý roztočí rotor v zmysle točenia magnetického poľa statora. Elektrická energia sa mení na mechanickú a stroj pracuje ako motor. [3]

1.1.2 Konštrukcia asynchrónneho motora

Asynchrónny stroj je točivý elektrický stroj, ktorého magnetický obvod je malou medzerou rozdelený na dve časti (stator a rotor). Obe časti sú opatrené vinutím. Jedno vinutie (obvykle statorové) je pripojené na zdroj striedavého prúdu a druhé rotorové vinutie môže byť vinuté (v prevádzke spojené nakrátko) alebo klieťka (trvalo spojené nakrátko).

Stator sa skladá z liatinovej konštrukcie a dvoch ložiskových štítov. V kostre statora sú nalisované plechy, ktoré sú navzájom izolované a tvoria časť magnetického obvodu stroja. Rotorové plechy sú nalisované na hriadeli, ktorá sa otáča v ložiskách, upevnených v ložiskových štítoch, ktoré vymedzujú polohu rotora vo vnútri statora. Medzi statorom a rotorom je vzduchová medzera, ktorá umožní pohyb rotora. V drážkach statorových a rotorových plechov je uložené vinutie stroja. Na statore býva obvykle trojfázové vinutie, ale tiež jedno a dvojfázové, ktorého začiatky a konce sú vyvedené na svorkovnicu.

V rotorových drážkach je uložené vinutie, ktorému sa hovorí kotva. U motora s kotvou nakrátko sú v drážkach rotora neizolované medené alebo mosadzné, najčastejšie však hliníkové spojovacie kruhy nakrátko. U motorov menších výkonov sa vinutie odlieva spolu s vetracími lopatkami z hliníku metódou tlakového liatia. Takémuto vinutiu sa hovorí klieťka. U motora s vinutým rotorom a krúžkami je v drážkach rotora uložené trojfázové vinutie z izolovaných vodičov, začiatky fáz sú spojené do uzla a konce pripojené k trom zberacím krúžkom, ku ktorým priliehajú kartáče. Takéto vinutie rotora umožňuje pripojiť zariadenie, slúžiace k regulácii otáčok motora. [3]

1.1.3 Magnetický obvod

Magneticky uzatvorený obvod je usporiadanie magneticky vodivých častí – jadra, kotvy (pohyblivá časť), budiacich cievok (vinutie) a prípadne aj vzduchovej medzery, kedy sa podstatne väčšia časť magnetického toku uzatvára magneticky vodivým materiálom po tzv. strednej indukčnej čiare. Časť magnetického toku, uzatvárajúci sa mimo magnetický vodivý materiál, je rozptylový magnetický tok.

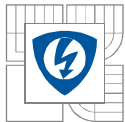
Magnetický obvod zaisťuje vytvorenie magnetického poľa pomocou budiacej cievky (zdroj magnetického napätia).

Magnetické obvody sa skladajú z týchto častí:

1. Stator (pevná časť) a rotor (pohyblivá časť).
2. Statorové vinutie
3. Pracovné vzduchové medzery (typická magnetická indukcie v rozmedzí $B = 1,2 - 1,5T$ pre vzduchovú medzeru 0,2 až 0,3mm, alebo magnetická indukcia $B = 0,8 - 0,5T$ pre medzeru 1 až 2mm).

Magnetické materiály pre striedavé obvody majú úzku hysteréznú slučku $B=f(H)$, ale magnetický tok je premenlivý. Kvôli zmenšeniu strát vírivými prúdmi sa magnetický obvod vyrába z elektrotechnickej oceli vo forme plechov, transformátorových plechov (hrúbky 0,35 až 0,5mm, s maximálnou indukciou $B_{\max} = 1T$) alebo dynamových plechov valcovaných za tepla z kremíkovej ocele.

Striedavým magnetovaním vznikajú straty, spôsobené natáčaním magnetických dipólov vnútri materiálov, ktoré sa menia v magnetickom obvode na teplo. Ich vlastnosť sa



udáva stratovým číslom. Periodická zmena toku vedie k vzniku hysterézných strát (závisí lineárne na frekvencii) a strát vírivými prúdmi (závisí na kvadráte frekvencie).

Závislosť permeability na magnetickej indukcii ($\mu = f(B)$) je príčinou nelinearity obvodu. Magnetické obvody rôzneho tvaru a usporiadania majú obvykle zadanú určitú hodnotu indukcie B a dajú sa počítať analogicky ako obvody elektrické. [3]

2 ZÁKLADY MERANIA VIBRÁCIÍ

Meraním vibrácií sa zaoberá vibračná diagnostika, slúžiaca ako nástroj moderných prediktívnych a proaktívnych metód údržby. Vibrácie úzko súvisia s technickým stavom stroja, so stavom jeho častí a ich dynamickým namáhaním. Dávajú nám najavo objektívne informácie potrebné k určeniu technického stavu strojov. [4]

Vibrácie sa dajú predstaviť ako kmitanie (oscilácia) mechanickej sústavy, ktoré predstavuje pohyb pružného telesa alebo prostredia, ktorého jednotlivé body kmitajú okolo svojej rovnovážnej polohy. Ich monitorovanie a vyhodnotenie patrí k základným a rozhodujúcim predpokladom pre strategické plánovanie nápravných opatrení. Vibrácie je možné popísať amplitúdou a fázou v danom časovom okamžiku. [5]

Vibrácie majú väčšinou náhodný charakter a sú zložené z mnohých kmitočtových zložiek, čo popisuje spektrálna výkonová hustota, ktorá je vždy vzťahovaná na určitú šírku pásma. Účinky vibrácií sa dajú posudzovať z ich amplitúdy, časového priebehu, frekvencie či spektra.

V rozsahu akustických kmitočtov (počuteľných) označujeme vlnenie v plynnom či kvapalnom prostredí ako zvuk, mechanické vlnenie (kmitanie) v tuhých látkach ako vibrácie. [6]

Pri mechanickej kmitaní sa v čase neustále menia hodnoty určujúcich veličín kmitania (výchylky, rýchlosti, zrýchlenia) a dochádza pri tom k premene energie. Hovoríme preto, že mechanickej kmitanie je dynamický dej.

Ak nás zaujíma časový priebeh kmitania určitého telesa, musíme vyšetriť jeho kinematické pomery. Ak nás zaujímajú príčiny kmitania, musíme vyšetriť rovnicu rovnováhy síl a momentov pôsobiacich na sústavu. Polohu tuhého telesa alebo hmotného bodu v priestore určuje jeho polohový vektor. Ak určíme v ktoromkoľvek okamžiku amplitúdu (veľkosť) a fázu tohto vektora, sme schopní popísať aj ich mechanickej kmitanie. K mechanickej kmitaniu počítame aj rázy. Pri nich ide o stretnutie dvoch navzájom sa pohybujúcich telies, pričom toto stretnutie vyvolá prechodový jav, otras. [7]

3 ZÁKLADNÉ POJMY VIBRODIAGNOSTIKY

Kmitočet

Kmitočet (frekvencia) f [Hz] určuje počet celých kmitov za sekundu, ktoré vykoná kmitajúci hmotný bod. Doba kmitu (perióda) T [s] je určená časom medzi dvomi susediacimi kladnými maximálnymi výchylkami. Perióda určuje uhlový kmitočet ω [s^{-1}] a tým aj samotný kmitočet harmonického deja. Pokiaľ v náhodne zvolenom časovom okamžiku počiatku sledovaného deja nie je uvažovaná častica prostredia v kľudovej polohe, hovoríme, že periodický dej má počiatočný fázový uhol φ [rad].

Fáza

Fáza (fázový posun) je daná posunom dvoch periodických veličín, pričom posun o 360° (2π) je považovaný za nulový posun. U rotačných súčastí sa merá fáza voči vzťažnému bodu, napr. na hriadelí a slúži k lokalizácii poškodenia. Ak prebiehajú dva deje s rovnakým kmitočtom f , ale majú rôzne fázové uhly φ_1 a φ_2 , označujeme rozdiel ako fázový posun medzi oboma dejmi, určujúci súčasne aj fázový rozdiel, o ktorý sú oba deje posunuté. Fáza je meraná

ako uhlový alebo časový rozdiel jedného sínusového vibračného signálu voči inému signálu, alebo ako rozdiel vibračného signálu. [4,7]

Vlnoplocha

Vlnoplochou sa označuje množina (plocha) bodov priestoru, ktoré pri vlnení kmitajú s rovnakou fázou a v rovnakom okamžiku.

Pre dve susedné vlnoplochy pri vyžarovaní jednoduchého signálu s kmitočtom f [Hz] od seba vzdialených o vlnovú dĺžku λ [m] vyžarovaného rozruchu a pri rýchlosti šírenia vlnenia c [m/s] platí

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

Mechanické kmitanie (vibrácia)

Mechanické kmitanie, alebo vibrácia je dynamický jav, pri ktorom hmotné body alebo tuhé telesá vykonávajú vratný pohyb okolo kľudovej rovnovážnej polohy. Hodnoty veličín mechanických vibrácií sú dané budiacou silou, jej smerom a kmitočtom. Vibrácie sa dajú popísať amplitúdou a fázou v danom časovom okamžiku. Mechanické kmitanie sa meria na obale ložisiek alebo na štíte ložisiek, a to v troch navzájom kolmých smeroch.

Hlavnou príčinou vibrácií sú dynamické sily, ktoré doprevádzajú výrobné nepresnosti, vôle pohybových častí, styk dielov s trením a odvalovaním, nevyváženosť súčastí s rotačným kmitavým pohybom. Mechanické chvenie vyvoláva rezonanciu ostatných častí a tak sa stáva zdrojom ďalšieho mechanického kmitania. Kmitajúci systém je obvykle popisovaný pomocou diferenciálnej rovnice alebo sústavy diferenciálnych rovníc. [4]

Zložené vibrácie

Zložené vibrácie vznikajú súčtom rôznych časových priebehov zložených harmonických vibrácií a podľa vzťahu (2) sú vibrácie dané superpozíciou rôznych nesínusových časových priebehov.

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

Zložený signál môže byť buď periodický, ak sa opakuje priebeh zhodne po dobu periódy T , alebo neperiodický, neopakuje sa nikdy totožne. Neperiodickými signálmi sú napr. šumy, jednorázové deje (buchnutie, akustický tresk apod.), lopatka turbíny pri turbulencii, ale aj reč alebo hudba. [6]

Celkové vibrácie

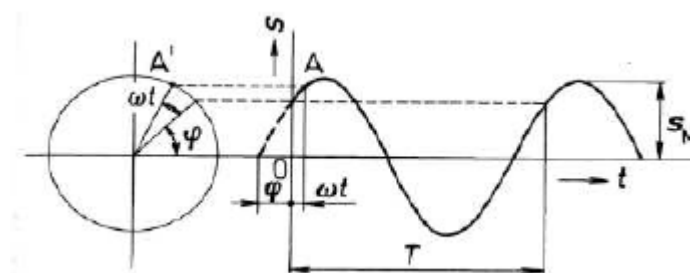
Celkové vibrácie stroja sú merítkom energie, ktorá súvisí so všetkými frekvenciami vibrácií v danom bode. Hodnota celkových vibrácií sa porovnáva s meraniami vykonanými pri bezporuchovom technickom stave, porovnáva sa s nastavenými kritickými úrovňami a vyhodnocujú sa časové trendy veličín. Meria sa efektívna hodnota rýchlosti v horizontálnom, axiálnom a vertikálnom smere.

4 MERANÉ VELIČINY CHARAKTERIZUJÚCE VIBRÁCIE

Sledovaním hmotného bodu elementu prostredia môžeme určiť v časovom okamžiku jeho výchylku z rovnovážnej polohy, rýchlosť kmitania alebo zrýchlenie tohto pohybu. Určujúcimi veličinami vibrácií sú teda výchylka, rýchlosť a zrýchlenie.

4.1 Výchylka

Výchylka určuje zmenu vzdialenosti alebo polohy objektu vzhľadom k referenčnej polohe. Pravidelným, periodickým vychýlením častice z kludovej polohy je vyvolané harmonické kmitanie, kde okamžité hodnoty výchylky odpovedajú v časovom rozložení priebehu sínusovej funkcie obr. 1. Harmonické vibrácie sú periodické, pravidelné vibrácie obsahujúce len jednu frekvenciu.



Obr. 1. Časové rozvinutie harmonického kmitania

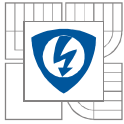
Kde

S_M ... amplitúda výchylky [m],

ω_t ... uhlový kmitočet [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

φ ... fázový posun [rad].

Výchylka s [m] z nulovej polohy (kludovej) dosiahne svojej maximálnej hodnoty s_{\max} a vracia sa cez kludovú polohu do svojej zápornej maximálnej výchylky a takto osciluje okolo svojej rovnovážnej polohy. Výchylka je daná nielen veľkosťou, ale je určená aj smerom. [6]



Ak značíme bežiaci čas $t[s]$, kmitočet $f[Hz]$, dobu kmitu (perióda) $T[s]$ a uhlový kmitočet $\omega[s^{-1}]$ sú tieto veličiny vzájomne viazané vzťahom

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

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

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

Výraz $(\omega t + \varphi)$ sa nazýva fáza harmonicky premennej veličiny.

4.2 Rýchlosť

Merá sa pohybovou rýchlosťou $v[m/s]$ a je definovaná ako rýchlosť zmeny výchylky vibračného signálu. Je to najbežnejší spôsob merania vibrácií. Najčastejšie sa používajú pomerne lacné akcelerometre, z ktorých sa hodnoty rýchlostí získajú integrovaním hodnôt zrýchlenia. Pre okamžitú rýchlosť platia vzťahy

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

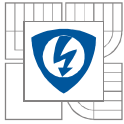
z ktorých vyplýva, že fáza rýchlosti kmitania je proti fáze výchylky posunutá o $\pi/2[\text{rad}] = 90^\circ$.

Pre jednoduchý harmonický signál ďalej platí [6]

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

4.3 Zrýchlenie

Zrýchlenie sa meria pomocou akcelerometra, ktorý obvykle obsahuje jeden alebo viacej piezoelektrických kryštálov a hmotné teleso. Ak je piezoelektrický kryštál deformovaný, vzniká elektrický signál úmerný zrýchleniu. Rýchlosť aj zrýchlenie je udané veľkosťou a smerom.



Podľa Newtonovho zákona je zrýchlenie meradlom sily ($F = m \cdot a$), ktorá na časticu pôsobí. Okamžité zrýchlenie je dané časovou zmenou rýchlosti, a odvodené druhou deriváciou okamžitej výchylky podľa času, teda [6]

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

Fáza zrýchlenia je teda proti fáze rýchlosti posunutá o ďalších 90° a proti výchylke o 180° , tzn. že je s ňou v protifázi. Pre jednoduchý harmonický signál potom ide stanoviť zrýchlenie

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

Kde

a ... zrýchlenie [$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$],

j ... imaginárna jednotka,

ω ... uhlový kmitočet [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$],

v ... rýchlosť [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$],

s ... výchylka [m].

5 ANALÝZA VIBRODIAGNOSTICKÉHO SIGNÁLU

5.1 Analýza vibrodiagnostického signálu v časovej oblasti

Analýza vibrodiagnostického signálu v časovej oblasti je založená na vyhodnotení parametrov časových priebehov signálov určujúcich veličín (výchylka, rýchlosť, zrýchlenie). V časovej oblasti ide ľahko vyhodnotiť okamžité, stredné a efektívne hodnoty signálu alebo obálky signálu. V prípade prevládajúcej náhodnej zložky signálu (tzv. náhodnej vibrácie) sa dajú pre analýzu aplikovať vybrané štatistické výpočty ako je smerodajná odchýlka, koeficient špicatosti, koeficient šikmosti, činiteľ výkmitu a rada ďalších. Analýza vibrodiagnostického signálu v časovej oblasti je ďalej vhodná pre prechodové javy ako sú napr. rozbehy a dobehy motorov, rázové odozvy, nestacionárne signály s premennou frekvenciou pri nelineárnych parametroch systému. Pokročilé metódy časovej analýzy využívajúce číslicovú filtráciu, integrálnu alebo vlnkovú transformáciu, umožňujú lokalizovať miesto závady alebo animovať módy kmitov. [4]

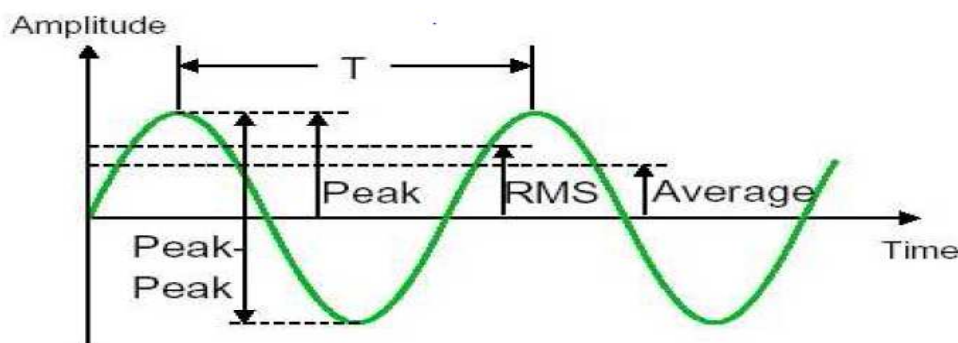
Analýza v čase je vhodná vtedy, ak existuje jediný alebo aspoň dominantný zdroj vibrácií, alebo inak dochádza k strate diagnostickej informácie v šume signálu spôsobenom prenosom vibrácií z rôznych oblastí strojného komplexu a možnosť lokalizácie príčiny vibrácií stroja je potom veľmi obmedzená.

5.1.1 Veličiny popisujúce časový signál

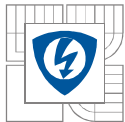
Maximálna hodnota teda špička (Peak, tiež špičková hodnota, výkmit, vrcholová hodnota) popisuje amplitúdy krátkodobých javov, mechanických rázov a určuje vzdialenosť medzi vrcholom vlny a nulovou úrovňou. Indikuje len prítomnosť špičky, ale neukazuje na časový priebeh ani kmitočtové zloženie hodnoteného kmitania.

Hodnota špička – špička (Peak – Peak, teda rozkmit) udáva najväčší rozkmit hodnoteného sínusového signálu kmitu a jej použitie je vhodné tam, kde pre hodnotenie chvenia je záväzná výchylka chvenia.

Efektívna hodnota RMS (Root Mean Square) ukazuje jeho časový priebeh, a teda je merítkom nebezpečnosti a škodlivosti mechanického kmitania. Z hľadiska kvantitatívneho hodnotenia amplitúd mechanického kmitania je najdôležitejšou hodnotou, ktorá má priamy vzťah k energii vibrácií. RMS popisuje schopnosť hodnoty veličiny konať užitočnú (efektívnu) prácu. [4]



Obr. 2. Znáozornenie hodnôt popisujúcich signál



Kde:

- PEAK-PEAK – hodnota špička – špička
- PEAK - maximálna (špičková) hodnota
- RMS – efektívna hodnota
- Average – stredná hodnota
- T – perióda

5.1.2 Celkové vibrácie stroja

Celkové vibrácie stroja sú meradlom energie, ktorá súvisí so všetkými frekvenciami vibrácií v danom bode. Výhodou diagnostikovania stroja na základe celkových vibrácií je rýchlosť vyhodnotenia a nízke zriaďovacie náklady. Nevýhodami merania celkových vibrácií je možnosť straty diagnostickej informácie v šume signálu spôsobenom prenosom vibrácií z iných oblastí strojného komplexu a veľmi obmedzená možnosť lokalizácie príčiny vibrácií stroja. Hodnota celkových vibrácií sa porovnáva s meraniami vykonanými pri bezporuchovom technickom stave, porovnáva sa s nastavenými poplachovými úrovňami, vyhodnocujú sa časové trendy veličín. [4]

V_{ef} (mm/s)	< 15kW	(15 - 25)kW	> 75kW pevné nepoddajné	> 75kW pevné poddajné
0,28	A	A	A	A
0,45				
0,71				
1,12	B	B	B	B
1,8				
2,8	C	C	C	C
4,5				
7,1	D	D	D	D
11,2				
18				
28				
45				

Tab. 1 Orientačné hodnoty rýchlostí vibrácií pre rôzne stroje

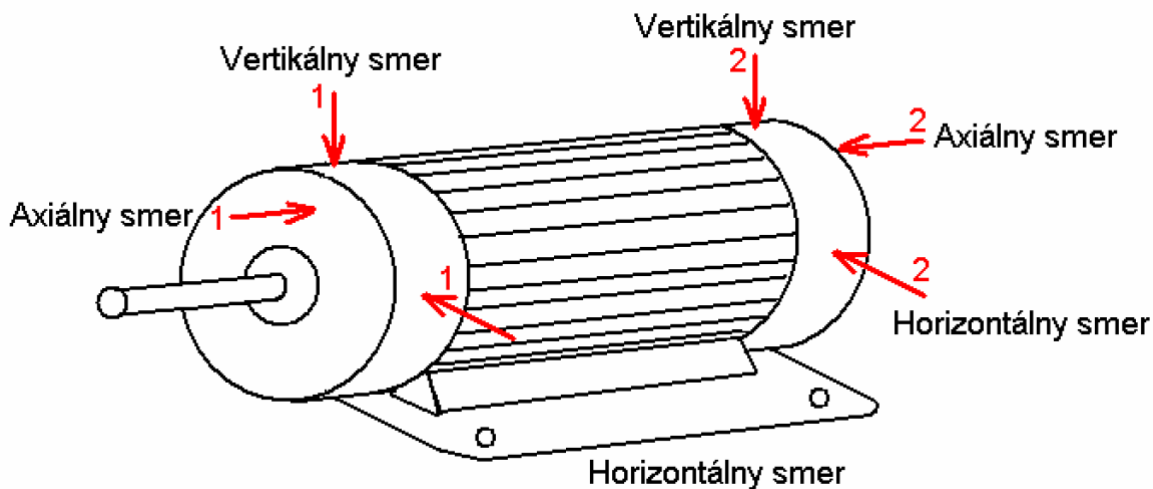
A ... plne funkčný stroj bez chýb

B ... prípustné vibrácie v neobmedzenej funkčnosti

C ... prípustné vibrácie na hranici s obmedzenou funkčnosťou

D ... neprípustné vibrácie a poškodený stroj

Mohutnosť vibrácií, tj. efektívna hodnota rýchlosti, sa meria v troch smeroch a v definovanom frekvenčnom pásme. [4]



Obr. 3 Smery merania pri meraní vibrácií stroja

Vertikálny + horizontálny smer = radiálny smer. Radiálny smer je kolmý smer na hriadeľ. Axiálny smer je rovnobežný smer s hriadeľom.

5.1.3 Metódy vyhodnocovania vibrácií

Pre udržanie bezporuchového chodu stroja sa používajú rôzne diagnostické metódy, pomocou ktorých je možné detekovať, ale aj lokalizovať veľkosť a rozsah poškodenia. Pre správne meranie vibrácií je nutné zvoliť vhodný spôsob merania a typ snímača.

Detekovaný signál sa najprv spracuje analogicky a potom sa prevedie digitalizácia pomocou analógovo-číslcových prevodníkov. Ďalším krokom sú analýzy pre popis vlastností signálu z hľadiska amplitúdy a popis signálu v časovej oblasti. Následne sa vykonáva spektrálna analýza prevažne pomocou rýchlej Fourierovej transformácie (FFT). Súhrnom analýz a spracovaním signálu je možné určiť poškodenie a navrhnúť správne opatrenie vzniknutého stavu.

Konkrétne metódy boli vyvinuté buď výrobcami alebo meracími technikmi. Medzi najznámejšie metódy vibrodiagnostiky platí: Obálková analýza, Metóda rázových pulzov, Crest factor... .

5.2 Frekvenčná analýza vibrodiagnostického signálu

Frekvenčná analýza odstraňuje nevýhody analýzy v časovej oblasti, tj. lokalizuje vznikajúce poruchy jednotlivých častí objektu (nevyváženosť, ložiská a iné). Úplná frekvenčná analýza je daná amplitudovým spektrom (tj. amplitúdovou spektrálnou hustotou) a fázovým spektrom. U náhodných signálov sa vyhodnocuje výkonová spektrálna hustota. Fázové spektrum umožňuje analyzovať fázové pomery medzi jednotlivými komponentami amplitúdového spektra a je používané pre detekciu nevyváženosti rotačných častí stroja, nesúososti hriadelí a pre vyvažovanie.

Cieľom spektrálnej analýzy je popísať rozloženie zložiek signálu vo frekvenčnej oblasti a teda vyjadriť analyzovaný signál pomocou ortogonálnych (navzájom kolmých) básových vektorov.



Zmes kmitov daného objektu sa rozkladá na svoje jednotlivé zložky podľa frekvencie. V prípade Fourierovej transformácie je bázovou funkciou komplexná exponenciála v tvare $e^{j2\pi ft}$. Popri Fourierovej transformácii existuje aj vlnová, kosínusová a Walsh-Hadamardova transformácia. [4]

5.2.1 Spektrálna analýza pomocou Fourierovej transformácie

Cieľom spektrálnej analýzy je popísať rozloženie zložiek signálu vo frekvenčnej oblasti, teda vyjadriť analyzovaný signál pomocou ortogonálnych (navzájom kolmých) bázových funkcií.

U Fourierovej transformácie je bázovou funkciou komplexná exponenciála v tvare $e^{j2\pi ft}$.

Pomocou Fourierovej transformácie analyzujeme predovšetkým periodické a neperiodické signály. Pre náhodné signály je Fourierova transformácia nepoužiteľná. Reálne signály pri kmitočtovej analýze vibračných a akustických sústav sú však väčšinou neperiodické.

Pre výpočet kmitočtových zložiek sa používa Fourierova transformácia, ktorá je daná spojitým analytickým integrálom definovaným ako priama Fourierova transformácia. [4]

$$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (10)$$

Pre Fourierovu transformáciu inverznú (spätnú) potom platí:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(f)e^{j2\pi ft} df \quad (11)$$

$x(t)$... spojitý signál

f ... odpovedá frekvencii

j ... imaginárna jednotka

Fourierova transformácia je vhodná pre neperiodické spojité signály a poskytuje spojité neperiodické spektrum $F(f)$, ktoré býva obvykle komplexné (má reálnu a imaginárnu zložku). Obsahuje informácie o amplitúdach $|F(f)|$ (amplitúdové spektrum, alebo amplitúdová spektrálna hustota) a fázach $\varphi(f)$ (fázové spektrum) všetkých harmonických frekvencií, ktoré sú obsiahnuté v $x(t)$ a dá sa vyjadriť ako [4]

(12)

$$F(f) = Re(f) + j.Im(f) = |F(f)|.e^{j\varphi(f)}$$

Spojité periodické signály sa dajú vytvoriť sčítaním konečného počtu harmonických funkcií s rôznymi frekvenciami. Spektrum týchto signálov ma teda čiarový (diskrétne) charakter a odpovedá vyjadreniu signálu pomocou Fourierovej rady. Pre vzájomný vzťah vo frekvenčnej a časovej oblasti sa dá usúdiť, že pokiaľ je vyjadrenie signálu v jednej oblasti periodické (časová alebo kmitočtová oblasť), je v druhej oblasti diskrétne (kmitočtová alebo časová oblasť).

Periodickosť spektra diskrétneho neperiodického signálu sa dá získať pomocou Fourierovej transformácie diskrétnych signálov označených FTD (Fourier of Discrete Signal) alebo lepšie DTFT (Discrete Time Fourier Transform) a definované vzťahom [4]

$$F(f) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j2\pi fn} \quad (13)$$

Inverzná transformácia

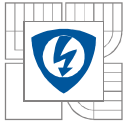
$$x(n) = \int_{-f_{vz}/2}^{f_{vz}/2} F(f)e^{-j2\pi fn} df \quad (14)$$

Posledným typom transformácie diskrétneho signálu, ktorá poskytuje diskrétne spektrum je diskrétna Fourierova transformácia (DFT, Discrete Fourier Transform), ktorá pracuje s konečnými postupnosťami v časovej a frekvenčnej oblasti.

DFT je vhodná pre analýzu stacionárnych signálov (parametre sa nemenia v čase). DFT je najvhodnejšia pre praktickú realizáciu, pretože pre diskrétne vyjadrený signál (vzorky signálu) poskytuje diskrétne vyjadrený výsledok (vzorky spektra), ktorý je možný ďalej číslicovo spracovávať. DFT je definovaná nasledujúcimi vzťahmi: [4]

Pre priamu transformáciu

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (15)$$



kde

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

N ... počet vzorkov

Pre spätnú transformáciu

$$x(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} F(k) e^{\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (16)$$

kde

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

Rozlíšiteľnosť frekvenčnej analýzy udáva interval, tj. rozostup medzi spektrálnymi čiarami a je daný vzťahom:

$$\Delta f = \frac{f_{vz}}{N} = \frac{1}{NT} \quad (17)$$

T ... časový interval medzi vzorkami

NT ... celková dĺžka signálu v čase

Δf ... rozostup frekvencií výsledného diskrétného spektra (frekvenčné rozlíšenie)

Platí základný vzťah medzi dĺžkou vzorku T , počtom diskrétnych hodnôt N , vzorkovacou (digitalizačnou) frekvenciou f_s a rozsahom frekvenčného spektra (f_{max} , Δf)

$$f_{max} = \frac{f_{vz}}{2} = \frac{1}{2} \cdot \frac{N}{T} \quad (18)$$

f_{vz} ... vzorkovacia frekvencia

f_{max} ... Nyquistova frekvencia

Pre výpočet DFT je k dispozícii niekoľko rýchlych algoritmov nazývaných FFT (Fast Fourier Transform). Doposiaľ najrýchlejšou metódou výpočtu DFT je algoritmus nazývaný FFTW (Fastest Fourier Transform in the West).

Najpoužívanejším algoritmom výpočtu spektrálnej analýzy je rýchla Fourierova transformácia (FFT). Všetky FFT výpočty predpokladajú lineárny systém. Dĺžka výpočtu klasickej FFT je závislá na dĺžke vstupného signálu, ktorý je najkratší pre dĺžky mocnín 2. Ideou

algoritmu je vhodné rozložiť problém výpočtu FFT pre signál ľubovoľnej dĺžky na niekoľko problémov, pre ktorých riešenie existujú rýchle metódy. [4]

FFT vypočíta jednotlivé kmitočtové zložky zmeraného časového komplexného signálu, podľa predom stanovených požiadavok na frekvenčný rozsah a rozlíšenie. Počet hodnôt kmitočtového spektra je polovičný vzhľadom k počtu hodnôt časového signálu, pričom f_{\max} je rovná polovičke vzorkovacej frekvencie $f_{vz} = 1/\Delta t$. To súvisí so Shannonovým vzorkovacím teorémom, podľa ktorého musí byť vzorkovacia frekvencia aspoň dvakrát väčšia (Nyquistova frekvencia), než je frekvencia najvyššej harmonickej zložky, obsiahnutej v meranom signále. [8]

5.2.2 Obáľková analýza

Obáľkovou metódou je nielen možné identifikovať porušenie ložiska, ale je tiež možné analýzou pomocou rýchlej Fourierovej transformácie (FFT) určiť, ktorá časť ložiska je poškodená. Týmto je myslené, že sa dá zistiť, či je porucha na valivom elemente, vnútornom alebo vonkajšom krúžku alebo klietke. Vychádza sa z toho, že každá z vymenovaných častí má inú relatívnu rýchlosť vzhľadom k hriadeľu a tým frekvenciu, na ktorej sa tieto poruchy prejavujú. Princípom je teda meranie impulzov, ktoré vznikajú pri porušení dráhy, na ktorej sa valivé elementy odvalujú. Signál v časovej oblasti sa filtruje pásmovou priepusťou, prekrývajúce kmitočtové pásmo, v ktorom bolo zistené zväčšenie amplitúd zložiek monitorovaného spektra. Signál na výstupe pásmovej priepuste obsahuje len zložky s vysokými kmitočtami, ku ktorým zaručene patrí aj chvenie, vybudené impulzmi v dôsledku porúch. Ostatné „maskujúce“ zložky sú účinne potlačené. Výstupný signál pásmovej priepuste sa ďalej spracováva pomocou usmerňovača s dolnou priepusťou o medznom kmitočte, ktorý odpovedá približne polovičke šírky priepustného pásma pásmovej priepuste. Takto spracovaný signál sa v časovej oblasti do istej miery podobá východnému signálu so sledom impulzov. Najdôležitejšia je však skutočnosť, že v spracovanom signále je bezpečne obnovený opakovací kmitočet východných impulzov. Tento kmitočet je potom možné presne stanoviť pomocou analyzátoru založeného na rýchlej Fourierovej transformácii. [9]

5.2.3 Metóda činiteľa výkmitu (Crest Factor)

Meranie hodnoty Crest faktora patrí medzi rozšírené metódy diagnostiky valivých ložísk a býva využívaný ako doplnkový parameter o stave ložiska v pásme 10 Hz až 10 kHz. Crest faktor je pomerová záležitosť umožňujúca veľmi skoré odhalenie poškodenia ložiska. Je tiež vhodným pomocným indikátorom porúch mazania. Je veľmi citlivý parameter a je vždy väčší než 1. Crest faktor je typicky v rozmedzí 3 až 3,5.

Princíp metódy spočíva v meraní efektívnej a špičkovej hodnoty vibrácií a vo výpočte ich pomeru. Pretože sa vyhodnocuje pomer dvoch hodnôt, je táto metóda úplne nezávislá na type ložiska a na otáčkach hriadeľa.

Pomer výkmitu k efektívnej hodnote zrýchlenia:

$$CREST \text{ FAKTOR} = \frac{Peak}{RMS} \quad (19)$$

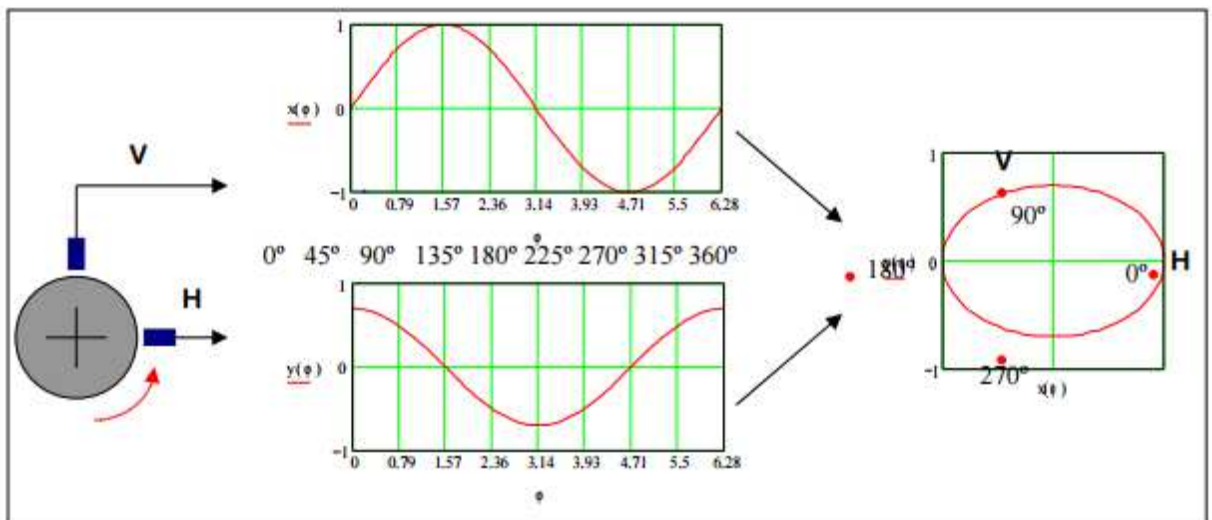
Kde:

- Peak – maximálna (špičková) hodnota
- RMS – efektívna hodnota

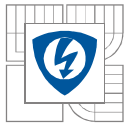
Crest faktor definuje schopnosť prenosu neskresleného signálu, ktorý udáva koľkokrát je maximálna hodnota signálu väčšia ako jeho efektívna hodnota. Táto hodnota je rozhodujúca pre správny a dôveryhodný prenos meracím reťazcom (tj. bez limitácie alebo skreslenia). U jednoduchého signálu je činiteľ výkmitu = 1,41, u zložených signálov dosahujú až desiatkových hodnôt. Merací reťazec pripúšťajúci činiteľ výkmitu až 5 výnimočne 8. [6.10]

5.2.4 Orbíta

V nameranom signáli udáva jednosmerná zložka polohu stredu hriadele a zo striedavej zložky sa konštruuje tzv. orbíta, čo je dráha stredu čapu v priebehu jednej otáčky. K získaniu orbity je treba snímať signál z dvoch na seba kolmo umiestnených snímačov výchylky. Orbíta sa získa na základe rovnakého princípu ako Lissajousove obrazce známe z fyziky. V ideálnom prípade – pri bezchybnom chode stroja – má orbíta tvar kruhu, ktorá sa vykresluje v rovnakom zmysle, ako sú otáčky hriadele (tzv. súbežná orbíta). Z tvaru orbity sa dajú diagnostikovať rôzne závady chodu stroja, napr. nestabilita olejového filmu (vírenie oleja) alebo pridieranie rotora o stator. [13]



Obr. 4 Princíp vytvorenia orbity [13]



6 ROZBOR ZÁVAD ROTAČNÝCH SYSTÉMOV PODĽA KMITOČTOVÉHO SPEKTRA

6.1 Oblasť nízkych kmitočtov

Odpovedá frekvenčnému pásmu otáčok hriadeľa. Frekvenčné spektrum je od 40% do niekoľkonásobku základnej harmonickej odpovedajúcej otáčkam častí stroja.

6.1.1 Nevyváženosť hriadeľa

- nerovnomerné rozloženie hmoty točivej časti stroja okolo osi otáčania
- môže byť statická, momentová a dynamická

Dynamická nevyváženosť spôsobuje vibrácie stroja na rovnakej frekvencii ako je otáčková frekvencia a obvykle aj na dvojnásobku tejto frekvencie v radiálnom a axiálnom smere.

Radiálny smer je kolmý na os hriadeľa a axiálny je rovnobežný s osou hriadeľa.

Amplitúda zložiek vibrácií rastie s kvadrátom otáčok. Fázový rozdiel v radiálnom a axiálnom smere medzi vnútorným a vonkajším ložiskom je v rozmedzí $0^\circ - 180^\circ$, fázový rozdiel medzi radiálnym a axiálnym smerom je do $\pm 40^\circ$. [4]

6.1.2 Nesúososť hriadeľa

- paralelná a uhlová
- typická zložka na frekvencii zhodnej s otáčkovou frekvenciou, ale nie sú výnimočné ďalšie harmonické zložky

Uhlová nesúososť – charakteristické vibrácie v axiálnom smere fázovo navzájom posunuté cez spojku o 180° , typická je zložka na frekvencii zhodnej s otáčkovou frekvenciou.

Paralelná nesúososť – charakteristické vibrácie v radiálnom smere fázovo navzájom posunuté cez spojku o 180° , typická je zložka na dvojnásobku otáčkovej frekvencie, pričom jej amplitúda býva väčšia ako u základnej zložky. [4]

6.1.3 Statická a dynamická excentricita vzduchovej medzery

Vzniká, ak vzduchová medzera nie je rovnomerná, potom sily na rotore nie sú vyvážené, čo vedie k vysokým magneticky indukovaným vibráciám. Aj malá excentricita spôsobuje relatívne veľké vibrácie.

6.1.3.1 Statická excentricita

Pri statickej excentricite je šírka vzduchovej medzery závislá len na polohe, nie na čase. Na tomto základe vyvodzujeme, že magnetické pole vo vzduchovej medzere sa otáča synchronnou rýchlosťou, ktorá je daná frekvenciou siete a počte pólových dvojíc asynchrónneho motora. Na p period magnetického poľa pripadá 1 perióda modulačnej funkcie, ktorá je predstavovaná premenlivou vzduchovou medzerou, tj. fuknciou jej vodivosti.

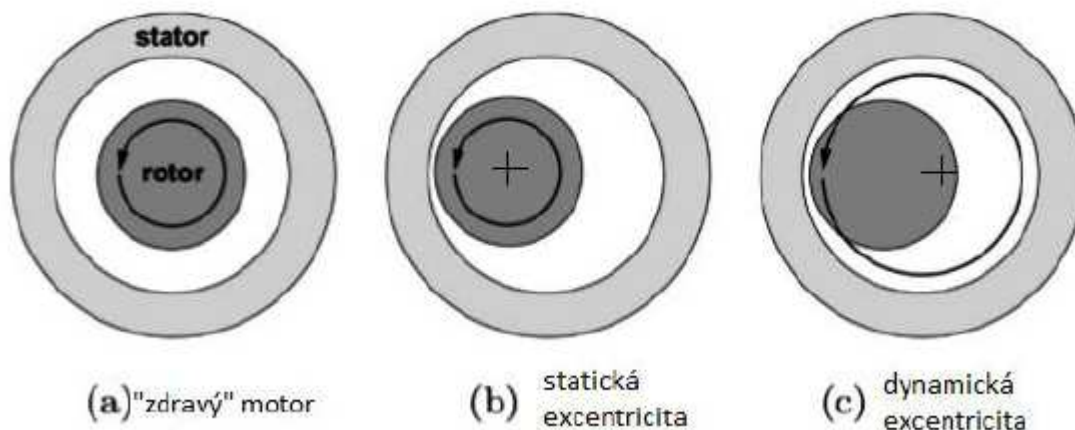
Statická excentricita je definovaná ako vyosenie osi rotora oproti osi statora. Rôzne veľkosti vzduchovej medzery má za následok, že v mieste, kde je medzera menšia, dochádza k silnejšej interakcii statorového a rotorového magneticého poľa. Vplyv statickej excentricity sa prejaví ako vznik postranných pásiem, ktoré sú posunuté od sieťovej frekvencie f_s o synchronnú otáčkovú frekvenciu.

- typická amplitúda na dvojnásobnej frekvencii napájacej siete (pri napájaní $f_s = 50\text{Hz}$ je táto frekvencia 100Hz) v radiálnom smere.
- vzhľadom k tomu, že sa jedná o 2. Harmonickú sieťovej frekvencie, je diagnostika statickej excentricity na tejto frekvencii problematická [11]

6.1.3.2 Dynamická excentricita

Dynamická excentricita vzniká pri poruche rotora alebo jeho častí. Pomery sú zložitejšie o to, že šírka vzduchovej medzery nie je len funkciou polohy, ale je zároveň funkciou času, pretože premenná vzduchová medzera sa otáča rýchlosťou danou otáčkami rotora. Prejavuje sa vznikom postranných pásiem, ktoré sú posunuté od sieťovej frekvencie f_s o otáčkovú frekvenciu (frekvenciu rotora). [11]

- typické frekvencie f_r , $2f_r$, $2f_s \pm f_r$, $2(f_s \pm f_r)$
 f_s ... frekvencia napájacej siete
 f_r ... frekvencia otáčania hriadeľa



Obr. 5 Excentricita motora

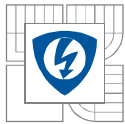
- **Prehnutý hriadeľ**

Spôsobuje vibrácie na základnej a na dvojnásobnej frekvencii otáčok

- **Mechanická vôľa**

Generuje násobky (až do dvadsať násobku) harmonických a násobky subharmonických zložiek (tj. 0,3 až 0,5 základnej harmonickej) otáčkovej frekvencie. [4]

- **Trhlina v hriadelí**



Dá sa rozpoznať pri rozbehu alebo dobehu na základe amplitúdy a fáze spektrálnych zložiek pri základnej a dvojnásobnej otáčkovej frekvencii.

6.2 Oblasť stredných kmitočtov

Odpovedá kmitočtovému pásmu zubových frekvencií ozubených kôl prevodoviek a závad na elektrických motoroch. [4]

Spektrálnou analýzou sa dajú detekovať tieto závady:

- opotrebená styková plocha zubu
- nerovnomerná šírka zubov
- ozubené koleso s vyštípnutým alebo vylomeným zubom
- ohnutý hriadeľ s ozubeným kolesom
- nesúososť hriadeľa s ozubenými kolesami
- excentricita uloženia kolesa prevodovky
- uvoľnenie ozubeného kolesa na hriadeli
- nadmerná vôľa spôsobujúca osciláciu kolesa
- elektrické alebo magnetické poruchy u indukčného motora (nesymetria statoru alebo rotoru, poškodené rotorové tyče, premenná vzduchová medzera aj.)
- kavitačné javy

Zubové frekvencie vznikajú pri zábere dvoch alebo viacerých ozubených kolies a závisí na počte zubov a rýchlosti otáčania jednotlivých kolies.

$$f_z = f_1 n_1 = f_2 n_2 \quad (20)$$

f_1 ... otáčková frekvencia kolesa 1 s počtom zubov n_1

f_2 ... otáčková frekvencia kolesa 2 s počtom zubov n_2

6.3 Oblasť vysokých a veľmi vysokých kmitočtov

6.3.1 Ložiská

Ložisko je mechanické zariadenie – súčiastka, ktorá umožňuje pohyb dvoch nezávislých mechanických častí. Ložiská pri pohybe týchto dvoch častí znižujú ich trenie a tým aj teplotu, dovoľujú väčšiu rýchlosť pohybu a majú jednoznačne priaznivý vplyv na životnosť a spoľahlivosť pohybujúcich sa mechanických častí.

Ložiská primárne rozdeľujeme podľa princípu, na ktorom pracujú, podľa pohybu, ktorý vykonávajú ale aj podľa sily, ktorá na ložisko pôsobí. Podľa princípu rozlišujeme ložiská:

- Valivé
- Klzné
- Magnetické

Môžeme sa stretnúť aj s inými menej bežnými typmi ložísiiek. Podľa pohybu ložiska rozlišujeme na rotačné a lineárne. Podľa sily pôsobiacej na ložisko, rozdeľujeme na:

- Axiálne (také ložiská, kde zaťaženie pôsobí v smere osi ložiska)
- Radiálne (zaťaženie pôsobí kolmo na os ložiska)

Valivé ložiská a ich poškodenia

Valivé ložiská sú také, v ktorých konštrukcii sú použité valivé elementy. Tieto elementy sú umiestnené medzi dve pohybujúce sa časti a ich vzájomný rotačný alebo posuvný pohyb je prenášaný na rotačný pohyb vložených elementov. Tým sa eliminuje trenie, ktoré by vzniklo bez týchto rotujúcich elementov. Konštrukčne rozoznávame podľa typu vloženého elementu valivé ložiská:

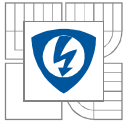
- Guličkové
- Valčekové
- Súdočkové
- Ihlové
- A iné



Obr. 6 Valčekové ložisko

Všetky valivé ložiská vo svojej konštrukcii používajú dva krúžky (vonkajší a vnútorný), vyššie spomenuté valivé súčati umiestnené medzi krúžky a kľetku, ktorá pomáha dodržať vzdialenosť a obmedzuje vzájomný pohyb guľičiek (alebo prvkov daného ložiska). Konštrukčné typy ložísiiek majú rozdielne vlastnosti a preto aj rôzne miesta použitia. Líšia sa predovšetkým v možnostiach axiálneho a radiálneho zaťaženia a svojou únosnosťou. To je ďalší, dôležitý parameter ložiska. Únosnosť delíme na statickú a dynamickú. Statická únosnosť vyjadruje zaťažovaciu vlastnosť ložiska, kedy sa neotáča (alebo otáča pomaly), dynamická únosnosť popisuje chovanie ložiska pri prevádzke (keď rotuje). Všetky tieto kľúčové vlastnosti ložísk sú spravidla uvádzané výrobcami, pretože pre voľbu správneho ložiska pre danú aplikáciu sú potrebné.

Vznik vibrácií valivých ložísk je primárne spôsobený poškodením v dôsledku prevádzkového zaťaženia, nevhodnými prevádzkovými podmienkami (vlhkosť, nesprávne mazanie, vyššie než dovolené otáčky, pôsobenie axiálnych a radiálnych záťaží nevhodných pre dané ložisko, vysoká prevádzková teplota), menej často taktiež nesprávnou či nepresnou inštaláciou ložiska. Obvyklé poškodenie ložiska je reprezentované nepatrným odpadávaním kovu



(v prípade kovových ložísk) zo styčných plôch vonkajšieho a vnútorného krúžku a zo styčných plôch valivých častí.

Ďalším, pre funkciu závažnejším, poškodením sú praskliny, či už na krúžkových alebo valivých častiach. Menej častým pškodením ložiska bývajú defekty klietky. Defekty klietky väčšinou nasledujú až ako dôsledok poškodenia krúžkov alebo valivých častí.

Všetky tieto poškodenia majú za následok pri prevádzke vznik vibrácií. Pokiaľ je v dráhe valivého elementu nerovnosť alebo je sám valivý element poškodený, pri rotácií je následkom narážanie do týchto nerovností vznik rázovej vlny v materiáli a periodickým opakovaním týchto rázov vznikajú samotné vibrácie.

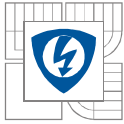
6.3.2 Vysoké a veľmi vysoké kmitočty

Odpovedá frekvenčnému pásmu závad na valivých ložiskách. U ložísk dochádza povrchovou únavou materiálu k vydrobovaniu materiálu povrchovej vrstvy, k oteru s nárastom vôle, ku korózií, k ryhovaniu a k prehĺbeninám. Závady sa dajú lokalizovať na základe charakteristických ložiskových frekvencií určených z rozmerov ložiska.

Existujú 4 fázy opotrebenia ložiska:

- počiatočná fáza - opotrebenie ložiska s povrchovými defektmi o rozmeroch rádovo mikrometrov sa nárazy pri kontakte kov – kov telesom ložiska šíri akustická emisia vo frekvenciách až niekoľko MHz.
- druhá fáza poškodenia – dochádza k poškodeniu jednotlivých elementov, ale vibračné spektrálne zložky odpovedajúce nízkym kinematických frekvenciám sú maskované nf spektrálnymi zložkami. Z uvedeného dôvodu sa diagnostika ložísk v tejto fáze poškodenia vykonáva vo frekvenčnom ultrazvukovom pásme v rozsahu 20 kHz – 60kHz. Pre meranie sa používajú špeciálne akcelerometre, s vysokou hodnotou vlastnej rezonančnej frekvencie.
- tretia fáza poškodenia – dajú sa používať už klasické akcelerometre. Poškodený prvok vyvoláva pri pohybe stykom s ďalším prvkom mechanické rázy, pri ktorých dochádza k prenosu kinetickej energie na telesá ložiska. Toto teleso sa po ráze rozkmitá na vlastnom kmitošte v rozmedzí 5kHz – 20kHz, pričom kmity sú tlmené a rýchlo doznievajúce.
- posledná fáza – obvykle už kritické poškodenie ložísk. Dá sa už registrovať vibračné spektrálne zložky priamo v oblasti nízkych kmitočtov. Dochádza ale aj k nárastu otáčkových spektrálnych zložiek.

Pre kinematické (tj opakované) frekvencie impulzov za predpokladu čisto valivého pohybu platia nasledujúce vzťahy: [4]



Frekvencia odpovedajúca chybe vonkajšieho krúžku

(BPFO – Ball Pass Frequency – Outer Race)

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 - \frac{BD}{PD} \cos\beta\right) \quad (21)$$

Frekvencia odpovedajúca chybe vnútorného krúžku

(BPFI – Ball Pass Frequency – Inner Race)

$$f = \frac{n}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta\right) \quad (22)$$

Frekvencia odpovedajúca chybe guličky alebo valčeka

(BSF- Ball Spin Frequency)

$$f = \frac{PD}{2BD} f_r \left(1 - \left(\frac{BD}{PD} \cos\beta\right)^2\right) \quad (23)$$

Frekvencia odpovedajúca chybe klietky

(FTF – Fundamental Train Frequency)

$$f = \frac{1}{2} f_r \left(1 + \frac{BD}{PD} \cos\beta\right) \quad (24)$$

n ... počet guličiek alebo valčekov

f_r ... frekvencia daná relatívnymi otáčkami vnútorného a vonkajšieho krúžku

BD ... priemer guličky alebo valčeka

PD ... roztečný priemer

β ... uhol dotyku

6.4 Prehľad frekvencií chýb na rotačných strojoch

Chyba	Frekvencia
Dynamická nevyváženosť rotora	$f_r, 2xf_r$
Uhlová nesúososť rotora	f_r
Paralelná nesúososť	$f_r, 2xf_r$
Statická excentricita vzduchovej medzery	$2xf_s$
Dynamická excentricita vzduchovej medzery	$f_r, 2xf_r, 2xf_s \pm f_r, 2x(f_s \pm f_r)$
Prehnutý hriadeľ	$f_r, 2xf_r$
Trhlina v rotore	$f_r, 2xf_r$
Závada prevodovky	Nxf
Chyba na vonkajšom krúžku ložiska	$\frac{n}{2}f_r(1 - \frac{BD}{PD}\cos\beta)$
Chyba na vnútornom krúžku ložiska	$\frac{n}{2}f_r(1 + \frac{BD}{PD}\cos\beta)$
Chyba na guľičke alebo valčeku ložiska	$\frac{PD}{2BD}f_r(1 - (\frac{BD}{PD}\cos\beta)^2)$
Chyba na kletke ložiska	$\frac{1}{2}f_r(1 + \frac{BD}{PD}\cos\beta)$

Tab. 2 Tabuľka prehľadu frekvencií chýb na rotačných strojoch

f_r ... frekvencia otáčok rotora

f_s ... frekvencia napájacej siete

N ... počet zubov kolesa prevodovky

f ... frekvencia otáčok kolesa prevodovky

n ... počet guľičiek v ložisku

BD ... priemer guľičky alebo valčeku

PD ... roztečný priemer

β ... uhol dotyku

7 MERANIE

7.1 Popis merania

Na 4 motoroch s preddefinovanými chybami statickej a dynamickej excentricity som postupne meral hodnoty vibrácií v dvoch rôznych polohách – radiálnom a axiálnom smere. Merané hodnoty boli zaznamenávané do pamäte meracieho prístroja. Získané priebehy vibrácií v časovej oblasti, ktoré boli namerané, som pomocou programu Matlab pretransformoval do frekvenčnej oblasti. Na transformáciu boli využité rovnice, ktoré sú uvádzané v teoretickej časti práce. S pomocou týchto vzorcov budeme analyzovať konkrétne vypočítané frekvencie spektra jednotlivito pre každú možnú chybu.

Na vyhodnotenie nameraných hodnôt som využil viacero druhov analýz. Od informatívneho vyhodnotenia získaných údajov až po podrobné spracovanie nameraného signálu pomocou jednotlivých metód a to Fourierovej transformácie a Obálkovej metódy.

Štítkové údaje motora od firmy EMP SLAVKOV

TYP	VÝKON	Y/D	COS	OTÁČKY	FREKV.
TM90 – 4S	1100W	400/230 V	0,78	1400 min ⁻¹	50 Hz

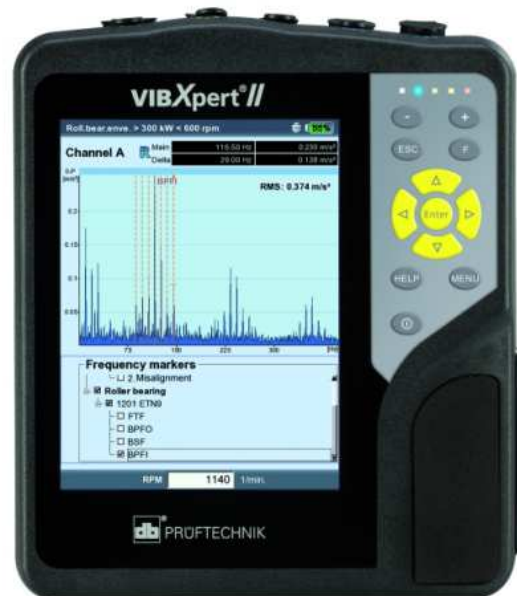
7.2 Merací prístroj VIBXPRT

VIBXPRT II sa vyznačuje vysokou úrovňou ergonomie a rýchlosťou. Farebný VGA displej s viac než 200 000 farbami poskytuje ešte lepšie grafické rozhranie, ktoré sprevádza užívateľa procesom merania. Ergonomický tvar prístroja zaisťuje vysoký komfort pri jeho používaní. Pri zbere dát VIBXPRT vyniká podstatne kratšou dobou merania, čo je umožnené najmodernejším procesorom a optimalizáciou spracovávania merania. Rada funkcií pre interpretáciu nameraných dát a praktické meracie šablóny zjednodušujú analýzu komplikovaných problémov strojného parku, ako aj rutinné meranie v prevádzke. Kapacita pamäte 2 GB a Li-iontová batéria s dlhou výdržou umožňuje nepretržité nahrávanie dát po dobu až 8 hodín. Prístroj komunikuje s užívateľom v českom jazyku a je konštruovaný pre prácu v nepriaznivom, prašnom a vlhkom prostredí, kde to nie sú schopné notebooky alebo iné prístroje na báze PC. Robustná konštrukcia a krytie IP 65 je samozrejmosťou.

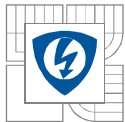
Prístrojom sa dá merať:

- celková úroveň vibrácií (rýchlosť, zrýchlenie, výchylka)
- prúd, napätie (AC/DC)
- stav ložísk (metóda rázových pulzov)
- teplota
- otáčky
- amplitúdové spektrum rýchlosti, zrýchlenia, výchylky, prúdu, napätia
- obálkové spektrum rýchlosti, rázových pulzov, prúdu, napätia
- časový záznam rýchlosti, zrýchlenia, výchylky, prúdu
- fázu/ vzájomnú fázu
- rozbeh/dobeh

- orbity (filtrované/nefiltrované)
- Cepstrum
- rázový test pre zistenie rezonancie
- prevádzkové tvary kmitov
- meranie v obchôdzke alebo mimo obchôdzku
- vyvažovanie v 1 a 2 rovinách
- súbežné meranie 2 kanálov



Obr. 7 VIBXPert



7.3 Výpočet jednotlivých chýb motorov

Testované motory sú osadené ložiskami od firmy SKF 6205-Z, roztečný priemer ložisiek je 38,5mm, 9 guľičiek o priemere 8mm.

Statická excentricita

$$2 \cdot f_s = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Hz}$$

Dynamická excentricita

$$f_r = \frac{n_r}{60} = \frac{1500}{60} = 25 \text{ Hz}$$

$$2 \cdot f_r = 2 \cdot 25 = 50 \text{ Hz}$$

$$2 \cdot f_s + f_r = 2 \cdot 50 + 25 = 125 \text{ Hz}$$

$$2 \cdot f_s - f_r = 2 \cdot 50 - 25 = 75 \text{ Hz}$$

$$2 \cdot (f_s + f_r) = 2 \cdot (50 + 25) = 150 \text{ Hz}$$

$$2 \cdot (f_s - f_r) = 2 \cdot (50 - 25) = 50 \text{ Hz}$$

Chyba na vonkajšom krúžku ložiska

$$\frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 - \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta\right) = \frac{9}{2} \cdot 25 \cdot \left(1 - \frac{8}{38,5} \cdot \cos(0)\right) = 89,1 \text{ Hz}$$

Chyba na vnútornom krúžku ložiska

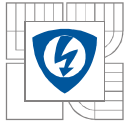
$$\frac{n}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos \beta\right) = \frac{9}{2} \cdot 25 \cdot \left(1 + \frac{8}{38,5} \cdot \cos(0)\right) = 135,88 \text{ Hz}$$

Chyba na guľičke ložiska

$$\frac{PD}{2BD} f_r (1 - (\frac{BD}{PD} \cos \beta)^2) = \frac{38,5}{2 \cdot 8} 25 \cdot (1 - (\frac{8}{38,5} \cos(0))^2) = 2,06 \text{ Hz}$$

Chyba na kletke ložiska

$$\frac{1}{2} \cdot f_r \cdot \left(1 + \frac{BD}{PD} \cdot \cos(\beta)\right) = \frac{1}{2} \cdot 25 \cdot \left(1 + \frac{8}{38,5} \cdot \cos(0)\right) = 15,09 \text{ Hz}$$



7.4 Fourierova transformácia FFT

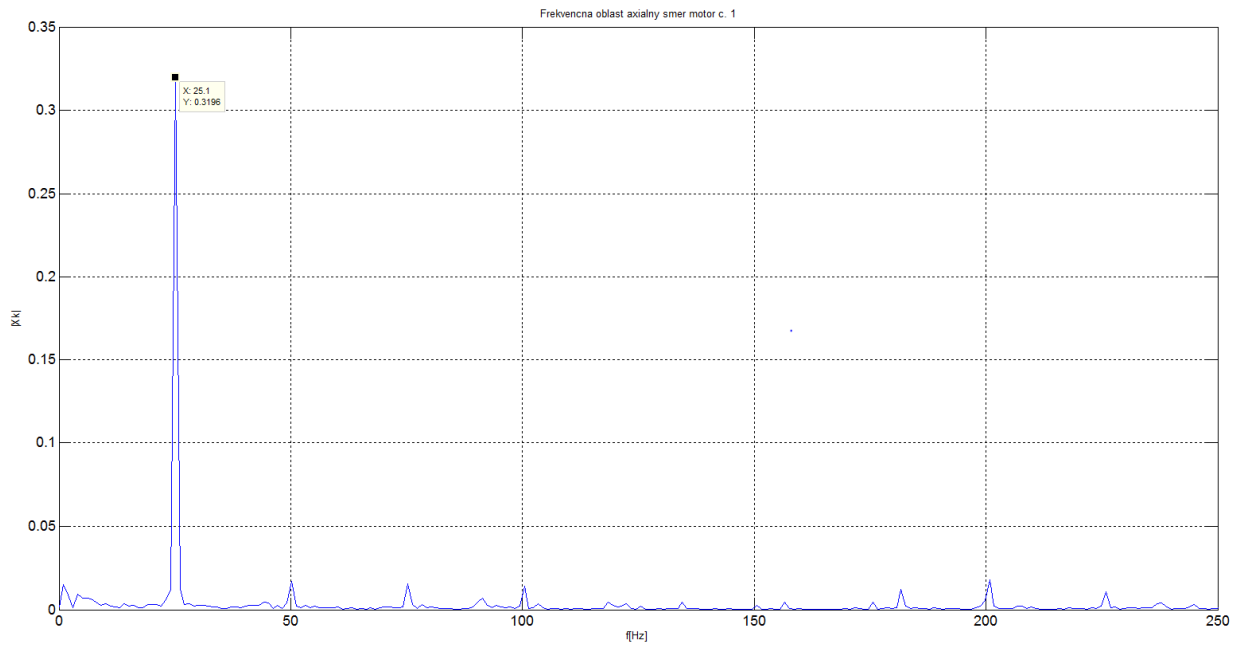
Fourierova transformácia je najpoužívanejšou analytickou metódou, ktorá vo vibračnom signále dokáže vyhľadať periodické deje, ktoré potom zobrazí vo frekvenčnom spektre a priradí im prislúchajúcu frekvenciu. Fourierova transformácia je využitá pri diagnostike strojov s periodickým rotačným pracovným cyklom, kde je vibračný signál spôsobený týmito periodickými dejmi. Frekvenčný rozklad (frekvenčné spektrum), je rozklad časového signálu na množstvo sínusových signálov s príslušnou amplitúdou a počiatočnou fázou. Tento frekvenčný rozklad potom dáva diagnostikovi významný nástroj pre identifikáciu technického stavu rotačného zariadenia.

V pôvodnom časovom signále, ktorý je zložený z rady vibračných dejov, je veľmi náročné identifikovať jednotlivé zložky, z ktorých je zložený. Preto je omnoho jednoduchšie využiť frekvenčné spektrum. Veľmi často býva najdominantnejším signálom harmonický signál spôsobený nevyváženosťou, ktorá sa prejavuje na otáčkovej frekvencii. Ďalší signál spôsobený vadou ložiska. Posledným signálom, z ktorého je časový signál zložený, je signál spôsobený zubovým prevodom, resp. zubovou frekvenciou. V našom prípade sa so zubovou frekvenciou neuvažuje, pretože nemáme prevodoku.

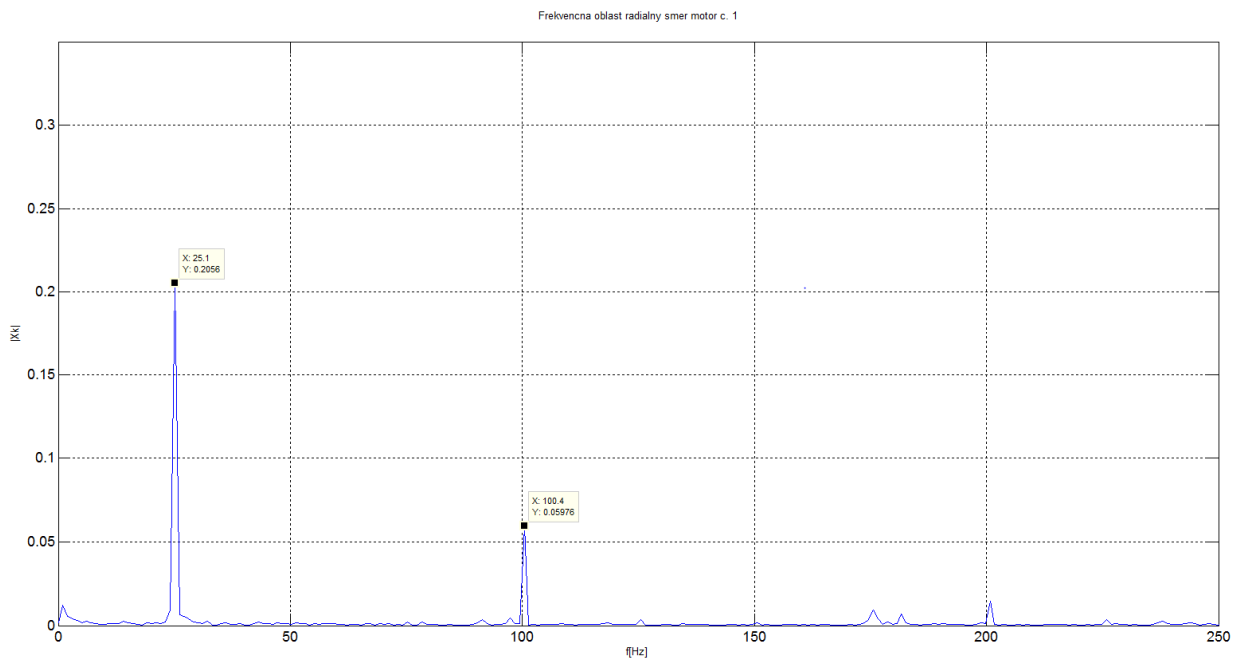
Výpis z programu Matlab

```
Fs = 1/7.6e-6;  
L = length(t);  
  
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y  
Y = fft(y,NFFT)/L;  
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);  
  
% Plot single-sided amplitude spectrum.  
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))  
grid on  
title('Frekvencna oblast')  
xlabel('f[Hz]')  
ylabel('|Xk|')
```

Priebehy po Fourierovej transformácii



Obr. 8 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 1

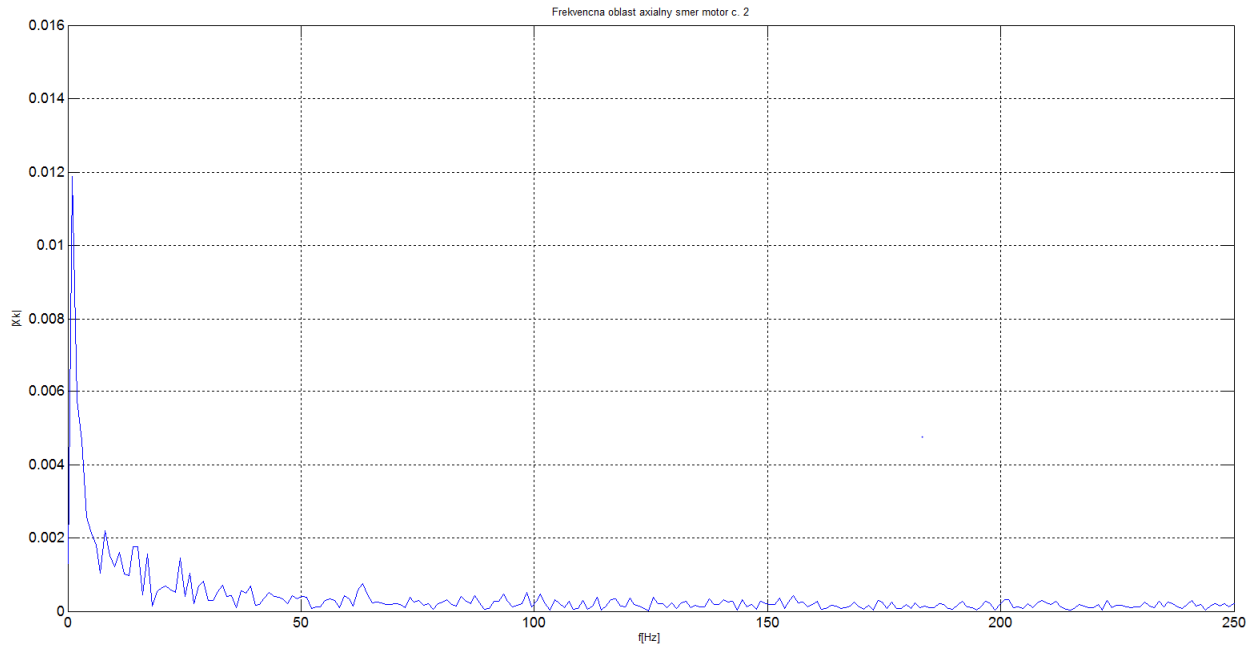


Obr. 9 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 1

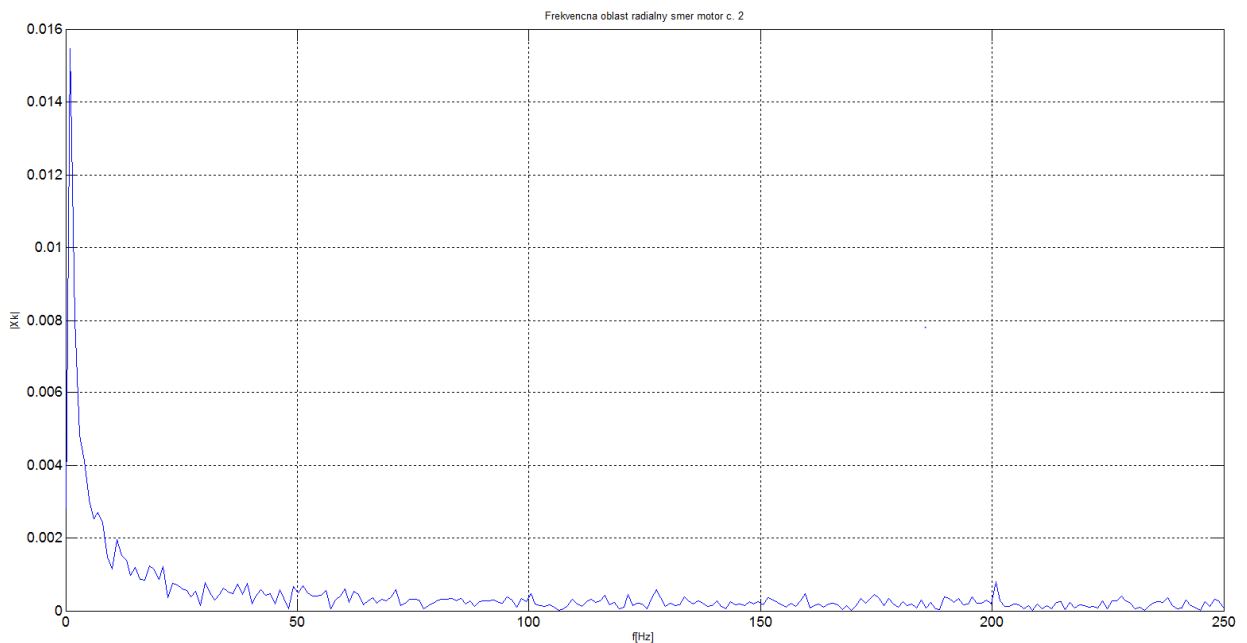
Odčítané hodnoty z grafov:

Axiálne pole	25,1 Hz
Radiálne pole	25,1 Hz; 100,4 Hz

Z odčítaných hodnút vyplýva, že v motore sa vyskytuje chyba o frekvencii 25,1Hz, okrem tejto frekvencie sa tu nevyskytujú žiadne iné frekvencie a preto som vyhodnotil, že sa v danom motore vyskytuje dynamická excentricita.



Obr. 10 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 2

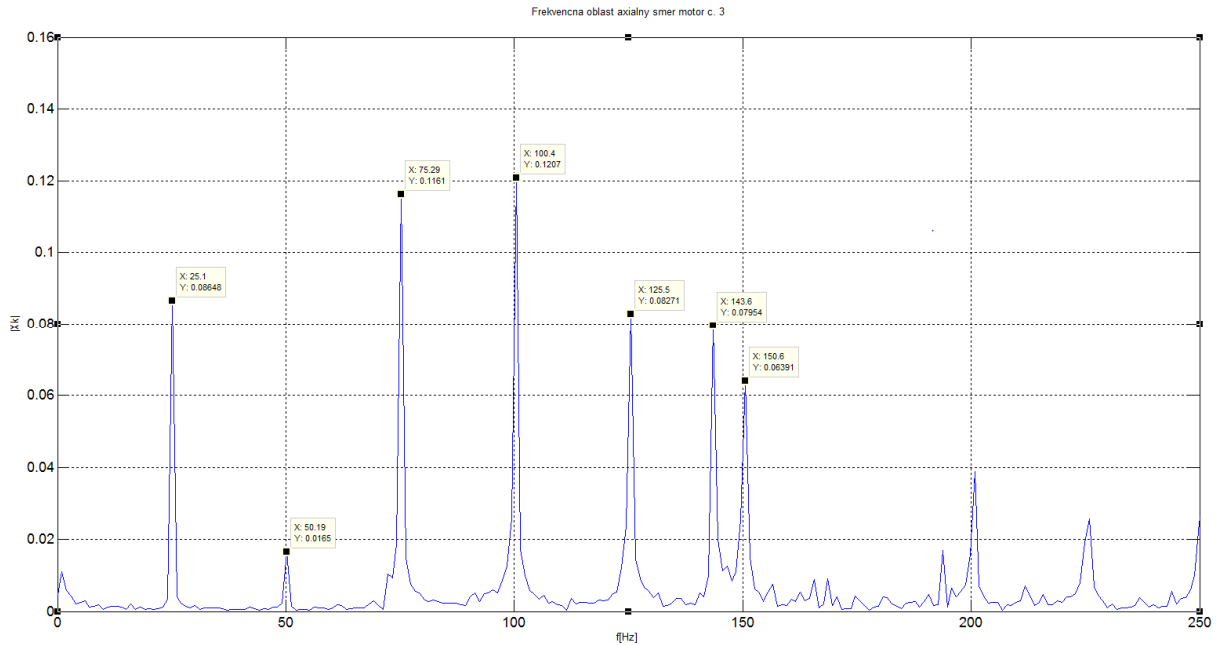


Obr. 11 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 2

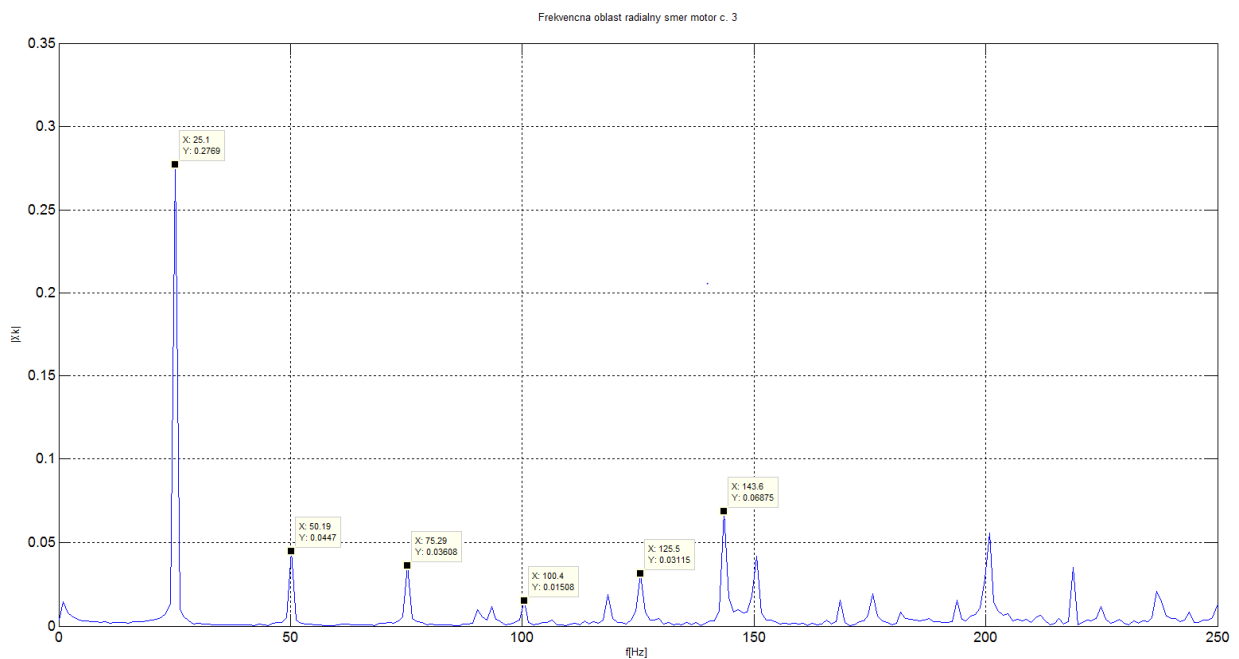
Odčítané hodnoty z grafov:

Axiálne pole	---
Radiálne pole	---

Z grafů č.10 a 11 je možné vidieť, že v motore sa nevyskytujú žiadne frekvencie, ktoré by reprezentovali chybu, vyskytujú sa len drobné záchvevy, ktoré sú zapríčinené rozbehom motora a otáčková frekvencia 25Hz. Z tohto vyplýva že motor č. 2 je bezporuchový.



Obr. 12 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 3

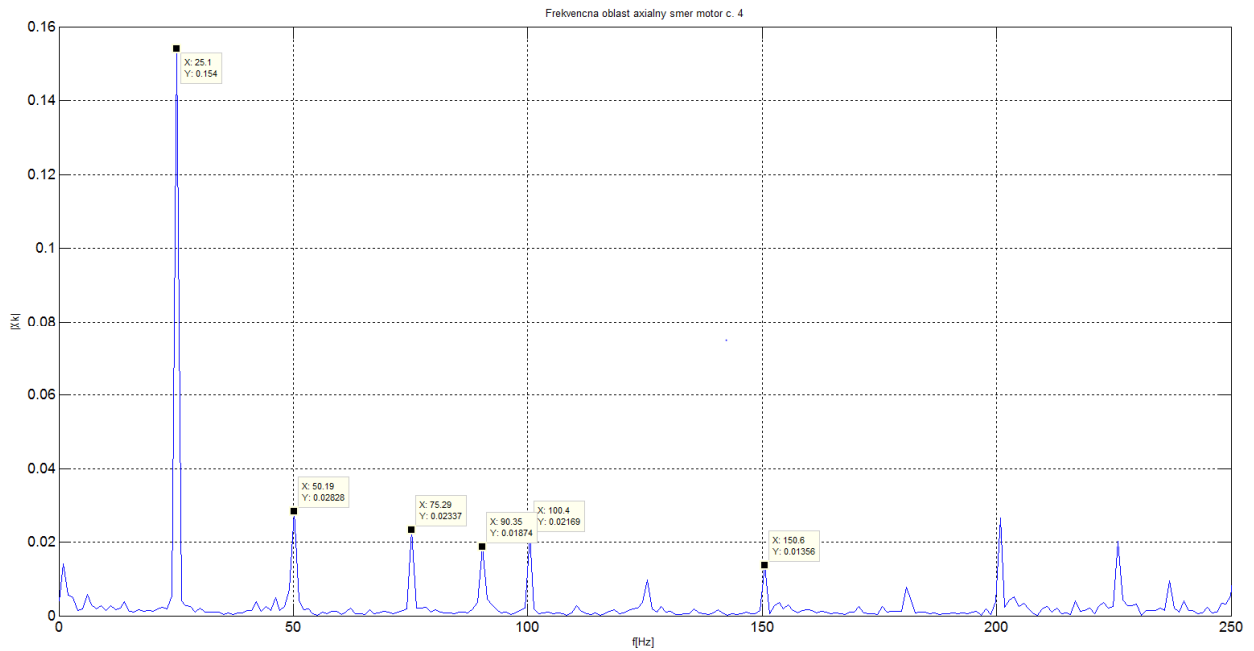


Obr. 13 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 3

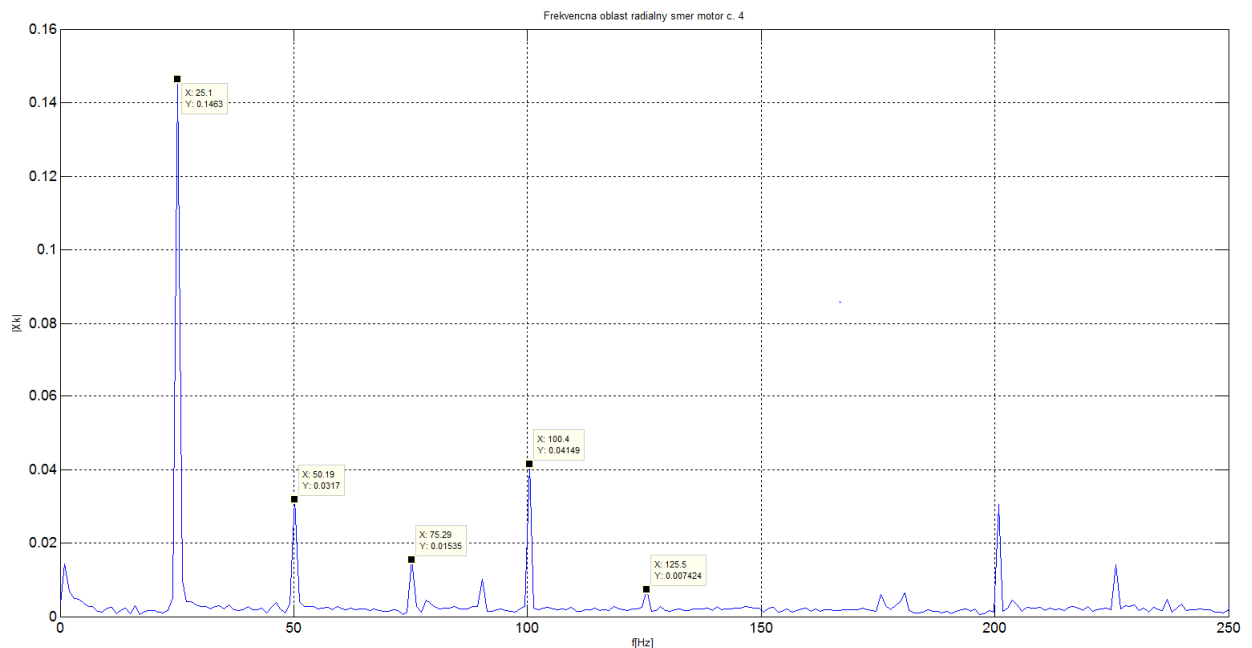
Odčítané hodnoty z grafů:

Axiálne pole	25,1 Hz; 50,19 Hz; 75,29 Hz; 100,4 Hz; 125,5 Hz; 143,6 Hz; 150,6 Hz
Radiálne pole	25,1 Hz; 50,19 Hz; 75,29 Hz; 100,4 Hz; 125,5 Hz; 143,6 Hz

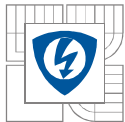
Odčítané hodnoty frekvencií som porovnal s vypočítanými hodnotami možných chýb a zhodnotil som, že v motore č. 3 sa vyskytuje porucha statickej excentricity.



Obr. 14 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 4



Obr. 15 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 4

**Odčítané hodnoty z grafov:**

Axiálne pole	25,1 Hz; 50,19 Hz; 75,29 Hz; 90,35 Hz; 100,4 Hz; 150,6 Hz
Radiálne pole	25,1 Hz; 50,19 Hz; 75,29 Hz; 100,4 Hz; 125,5 Hz

Z odčítaných hodnôt vyplýva, že v danom motore sa vyskytuje chyba kombinovanej (statickej a dynamickej) excentricity. Nie je možné určiť, ktorá chyba má v motore prevládajúci charakter.

7.5 Obáľková metóda

Pre analýzu obáľky signálu sa najčastejšie používa výpočet obáľky z tzv. analytického signálu, ktorý sa dá získať pomocou Hilbertovej transformácie. Z pôvodného signálu pomocou Hilbertovej transformácie dostaneme obraz pôvodného signálu. Energia signálu a Hilbertovho obrazu je zhodná. Súčtom pôvodného signálu a Hilbertovho obrazu dostávame analytický signál. Obáľku daného signálu dostanem urobením absolútnej hodnoty z analytického signálu.

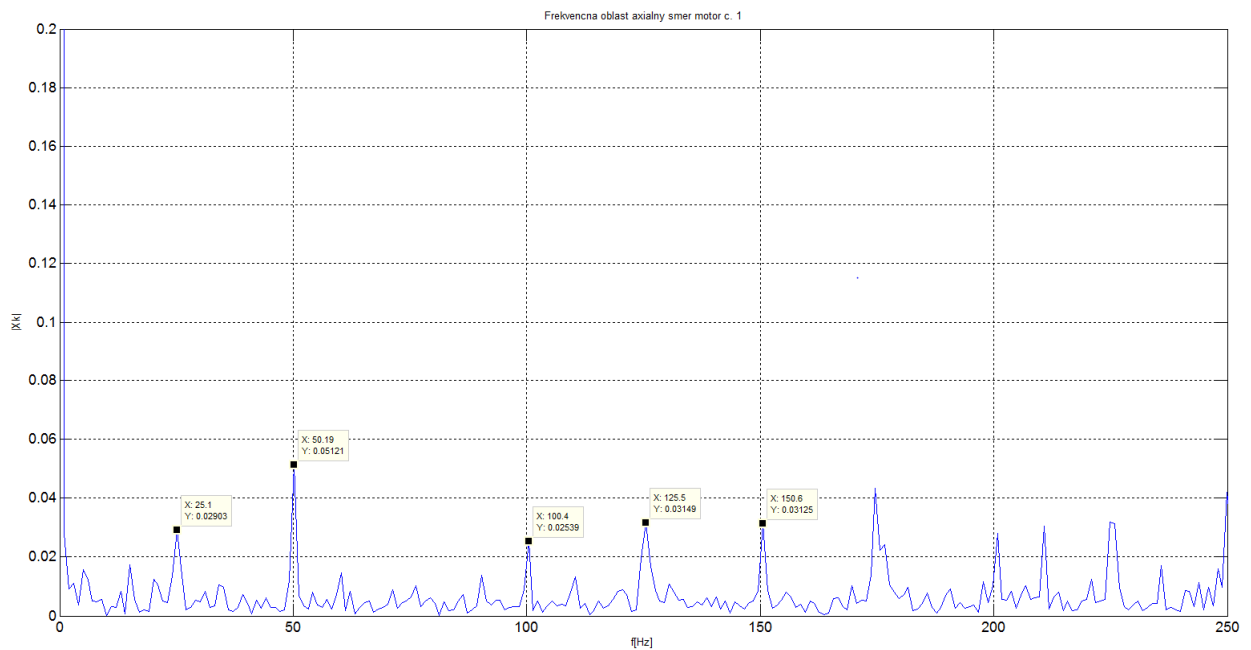
Analýza spočíva v tom, že najprv odfiltrujeme nízkofrekvenčné zložky, ktoré neukazujú na samotné poškodenie a potom je signál vyhladený. Touto metódou sa dá nielen detekovať poškodenie, ale v spojení s rýchlou Fourierovou transformáciou (FFT) aplikovanou na signál sa dá určiť konkrétne miesto poškodenia.

Obáľková analýza predstavuje metódu, ktorá nielen indikuje porušenie ložiska, ale v spojení s FFT analýzou tiež určí, ktorá časť ložiska je poškodená. Pre tieto účely rozlišujeme vonkajší a vnútorný krúžok, valivé elementy a klietku ložiska. Pretože každá z týchto komponentov má rôznu relatívnu rýchlosť vzhľadom k hriadelu, dajú sa určiť frekvencie, na ktorých sa prejavujú tieto poruchy.

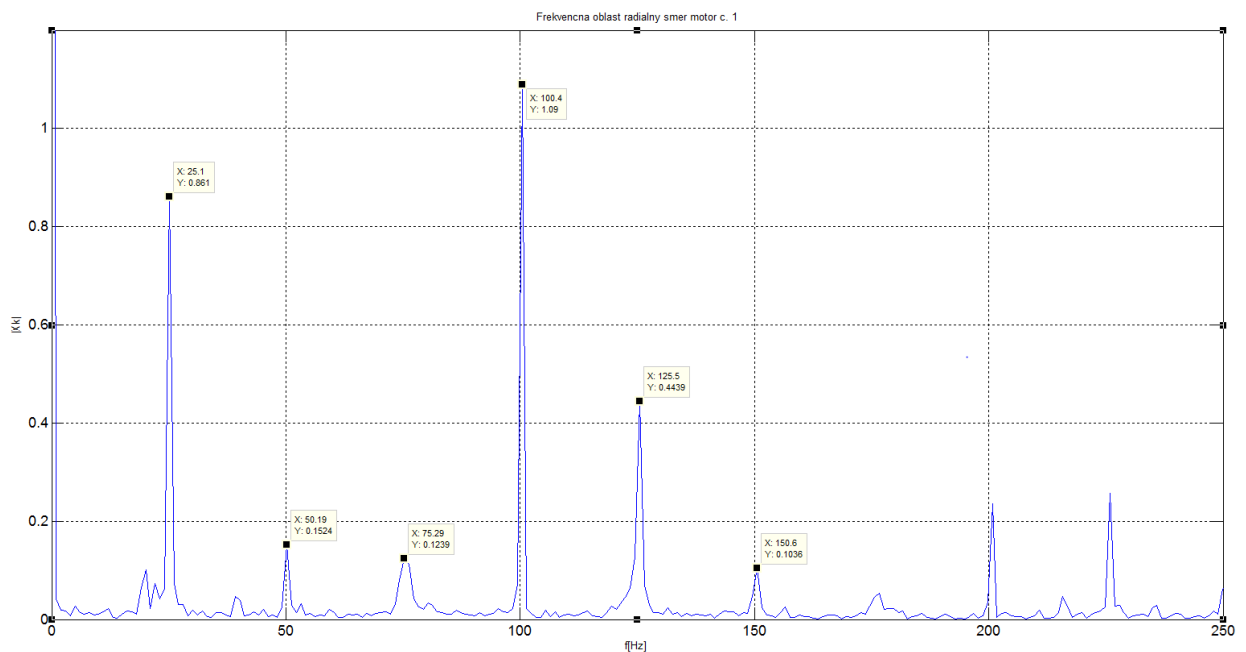
Výpis z programu Matlab

```
clc
close all
y = hilbert(x);
env = abs(y);
%plot(t,x)
hold on
plot(t,env,'r','LineWidth',2)
Fs = 1/7.6e-6;
L = length(t);
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
Y = fft(env,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
% Plot single-sided amplitude spectrum.
figure
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
grid on
title('Frekvencna oblast')
xlabel('f[Hz]')
ylabel('|Xk|')
```

Priebehy po obálkovej analýze



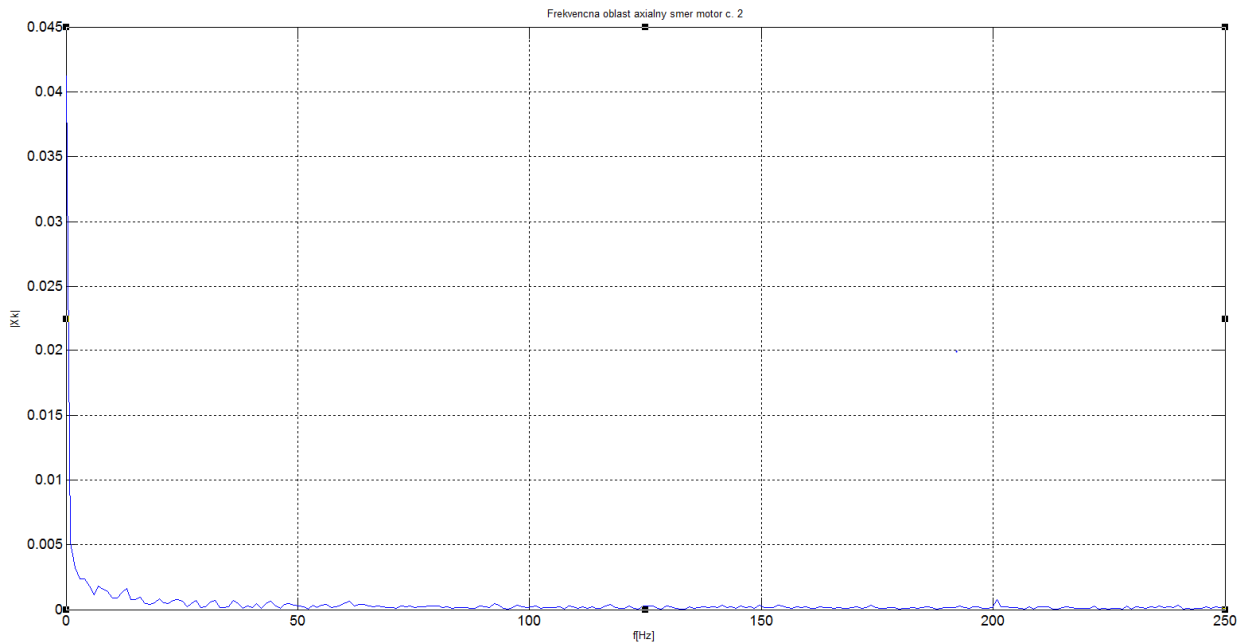
Obr. 16 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 1



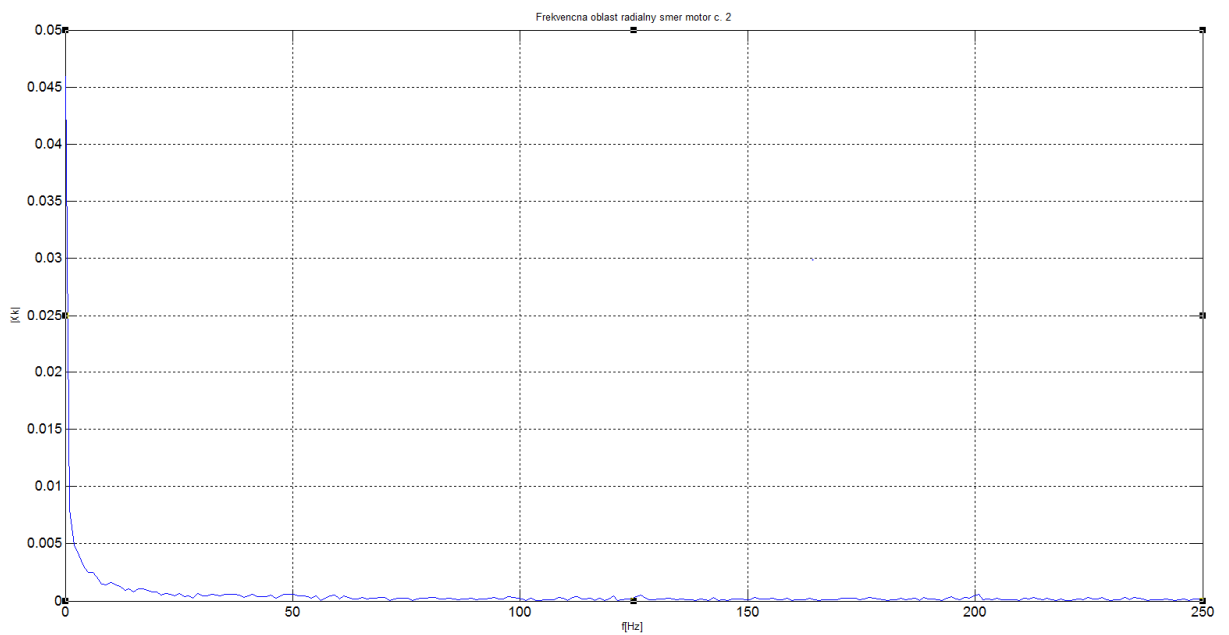
Obr. 17 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 1

Odčítané hodnoty z grafov:

Axiálne pole	25,1Hz; 50,19Hz; 100,4 Hz; 125,5Hz; 150,6Hz
Radiálne pole	25,1Hz; 50,19Hz; 75,29Hz; 100,4Hz; 125,5Hz; 150,6Hz



Obr. 18 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 2

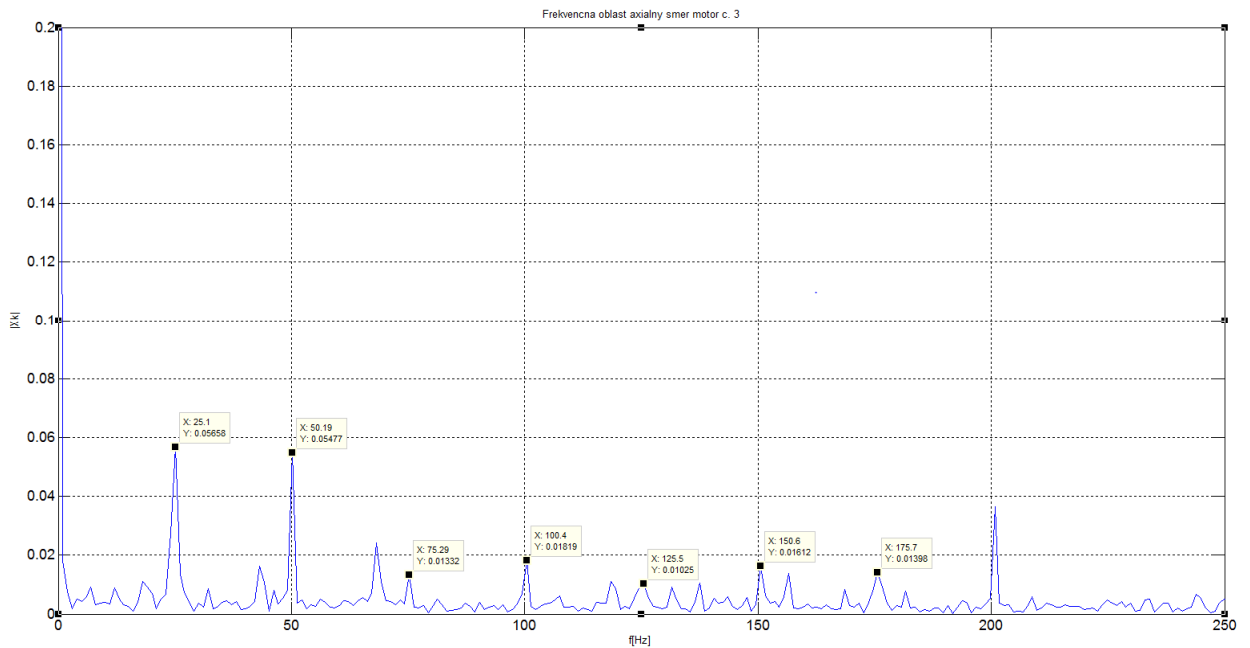


Obr. 19 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 2

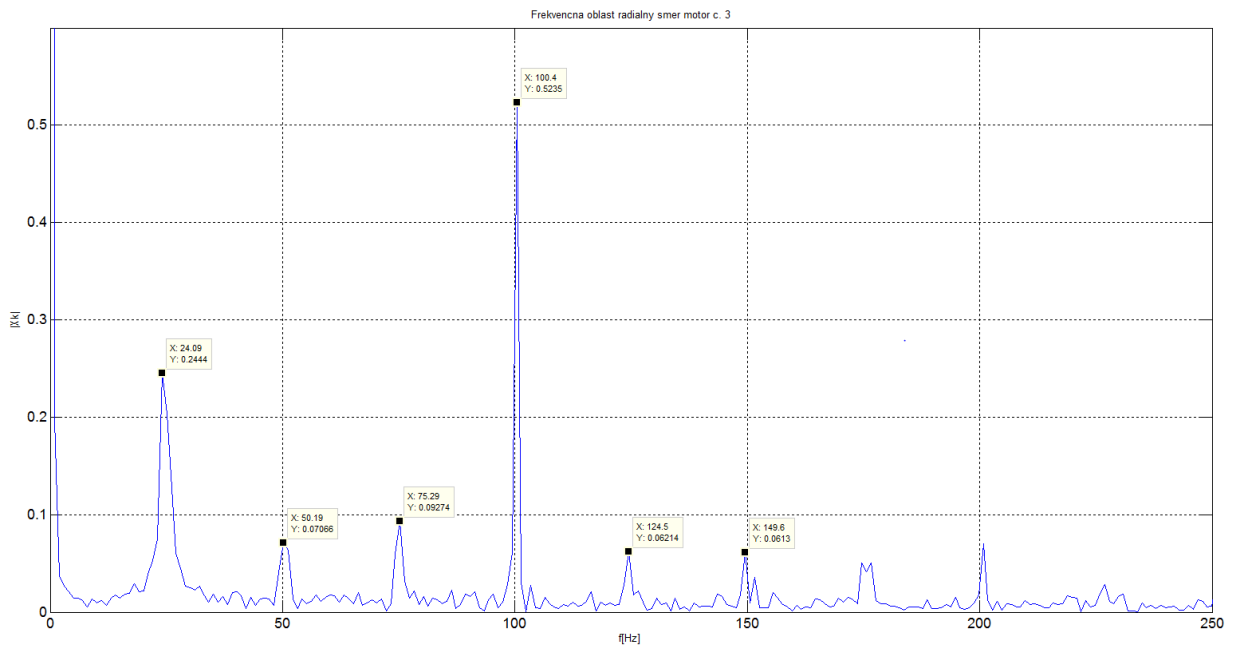
Odčítané hodnoty z grafov:

Axiálne pole	---
Radiálne pole	---

V priebehu sa nevyskytujú žiadne frekvencie, ktoré by reprezentovali chybu vyskytujúcu sa v motore, z toho vyplýva, že sa jedná o bezporuchový stav.



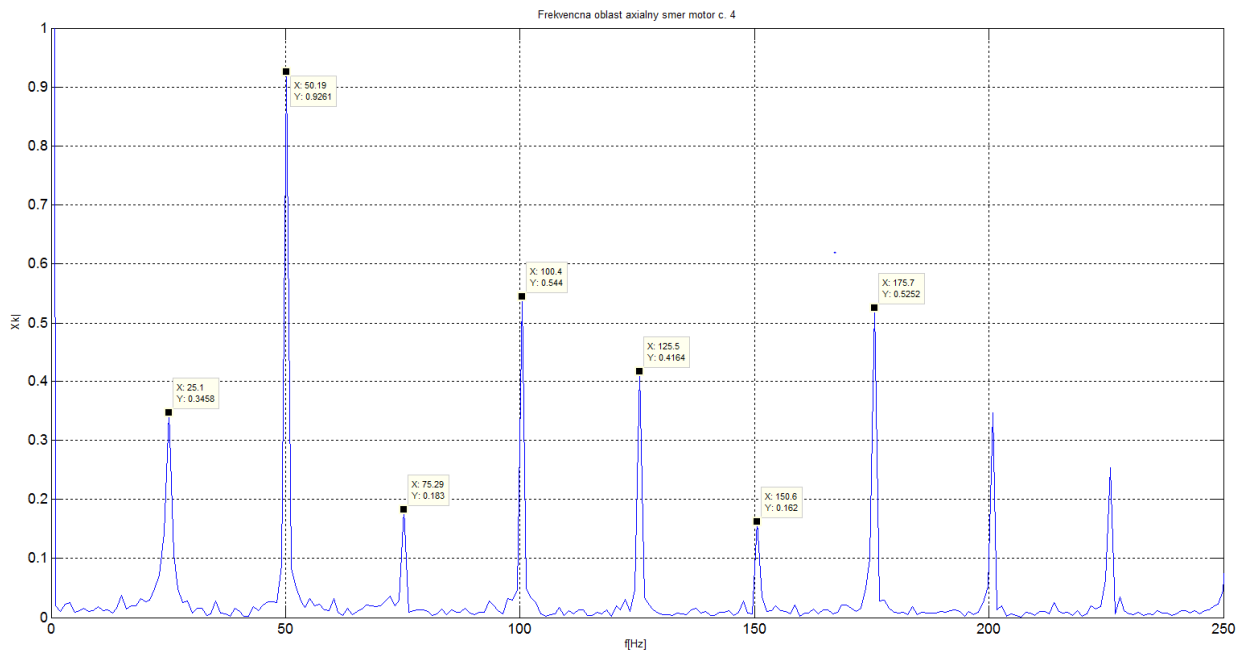
Obr. 20 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 3



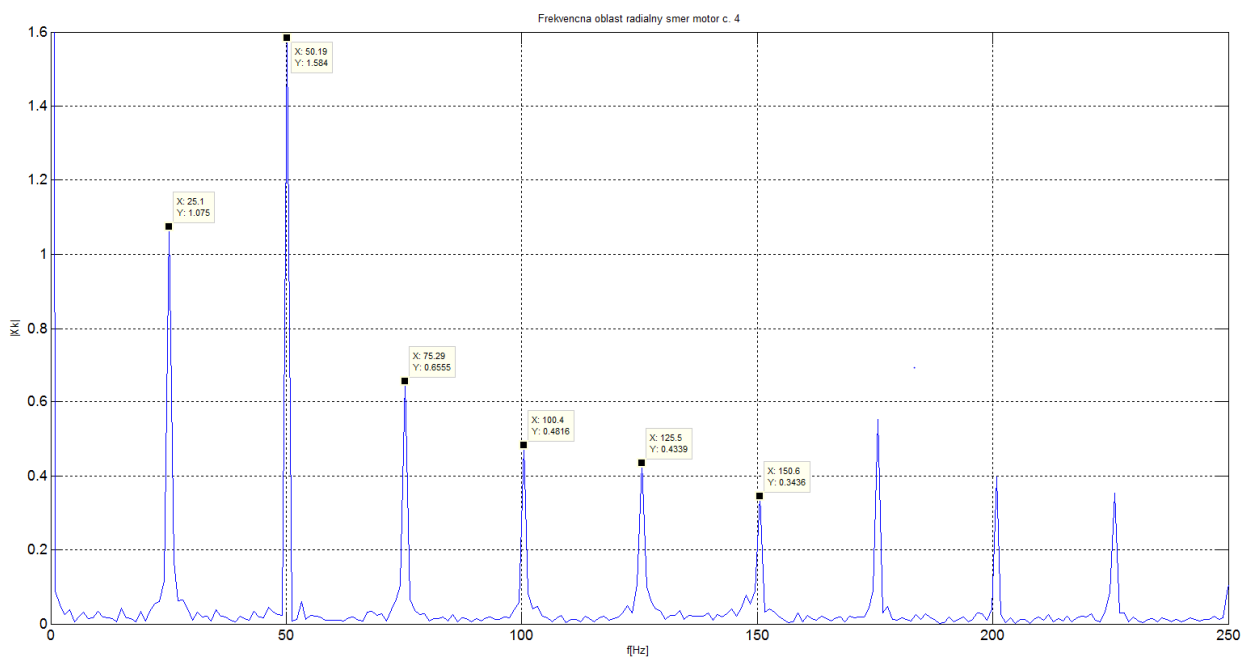
Obr. 21 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 3

Odčítané hodnoty z grafov:

Axiálne pole	25,1Hz; 50,19Hz; 68,26Hz; 100,4Hz
Radiálne pole	24,09Hz; 50,19Hz; 75,29Hz; 100,4Hz; 124,5Hz; 149,6Hz



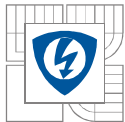
Obr. 22 Frekvenčné spektrum axiálny smer motor č. 4



Obr. 23 Frekvenčné spektrum radiálny smer motor č. 4

Odčítané hodnoty z grafov:

Axiálne pole	25,1Hz; 50,19Hz; 75,29Hz; 100,4Hz; 125,5Hz; 150,6Hz; 175,7Hz
Radiálne pole	25,1Hz; 50,19Hz; 75,29Hz; 100,4Hz; 125,5Hz; 150,5Hz



Obálková metóda slúži na diagnostikovanie porúch ložísk, ktoré sa vyskytujú v radiálnom smere. V našom prípade sa neprejavila žiadna hodnota frekvencie, ktorá by reprezentovala chybu ložiska, môžeme konštatovať, že ložiská v motore su v bezchybnom stave.

7.6 Crest Faktor

Princíp metódy spočíva v meraní efektívnej a špičkovej hodnoty vibrácií a vo výpočte ich pomeru. Pretože sa vyhodnocuje pomer dvoch hodnôt, je táto metóda úplne nezávislá na type ložiska a na otáčkach hriadeľa.

Táto metóda sa doporučuje použiť len ako doplnok inej metódy, pretože pri kritickom poškodení ložiska sú výstupné hodnoty ložiska rovnaké ako u nového ložiska.

Pomer výkmitu k efektívnej hodnote zrýchlenia:

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

Kde:

Peak – špičková hodnota

RMS – efektívna hodnota

Crest faktor sa pohybuje v rozmedzí 2,5 až 3,5.

Zmerané efektívne hodnoty:

	Axiálny smer	Radiálny smer
Motor č. 1	0,532 mm/s ²	2,33 mm/s ²
Motor č. 2	0,017 mm/s ²	0,019 mm/s ²
Motor č. 3	0,296 mm/s ²	1,615 mm/s ²
Motor č. 4	1,669 mm/s ²	2,779 mm/s ²

Zmerané špičkové hodnoty:

	Axiálny smer	Radiálny smer
Motor č. 1	2,056 mm/s ²	6,163 mm/s ²
Motor č. 2	0,174 mm/s ²	0,079 mm/s ²
Motor č. 3	1,02 mm/s ²	5,712 mm/s ²
Motor č. 4	5,542 mm/s ²	8,675 mm/s ²

Hodnoty CREST faktora:

	Radiálny smer
Motor č. 1	2,645
Motor č. 2	4,202
Motor č. 3	3,536
Motor č. 4	3,122

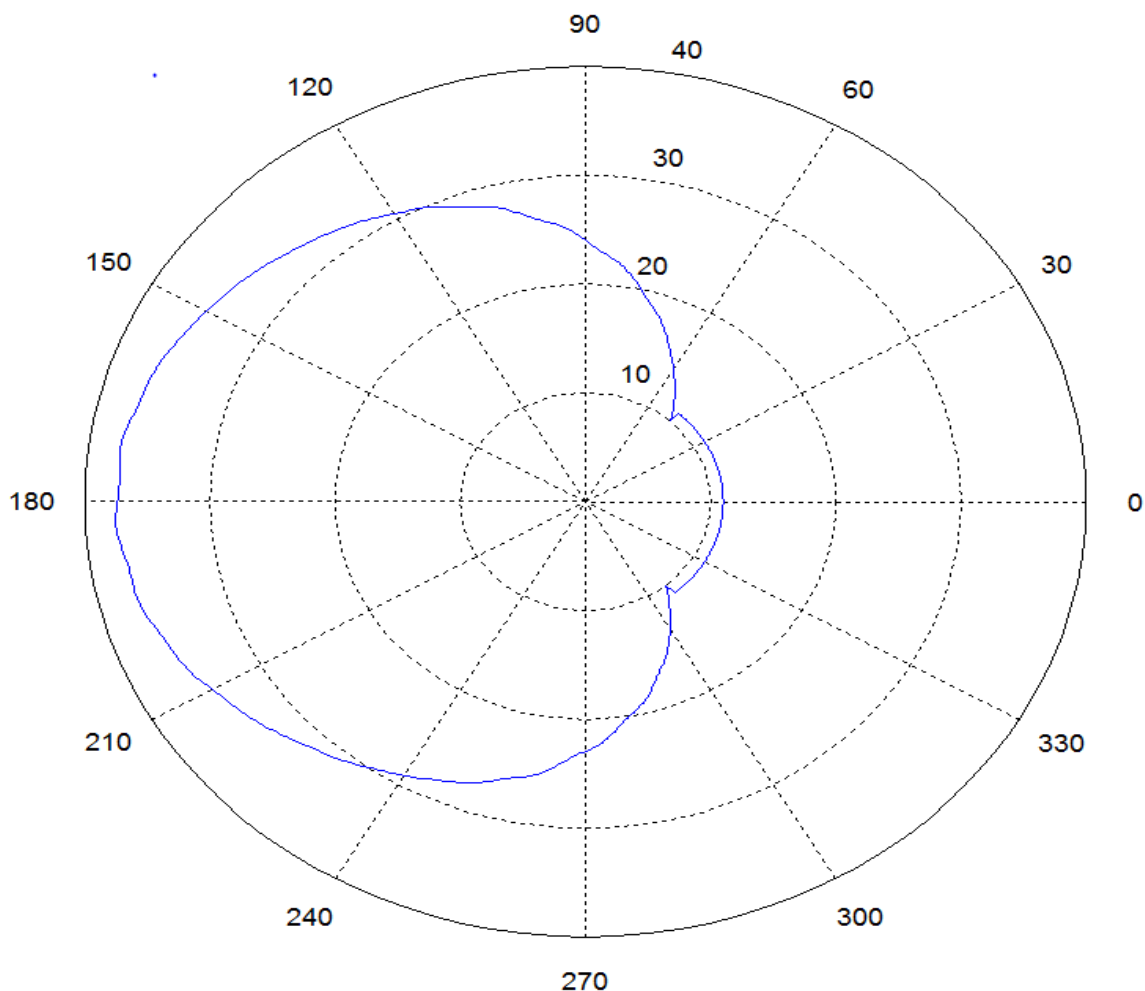
Príklad výpočtu pre prvý riadok:

$$CREST \text{ FAKTOR} = \frac{Peak}{RMS} = \frac{6,163}{2,33} = 2,645$$

Hodnota Crest faktora je len číslo, ktoré nám nič nepovie o danej chybe, len indikuje, že sa v motore vyskytuje chyba a na presnejšiu diagnostiku danej chyby musíme použiť presnejšiu diagnostickú metódu. Hodnota crest faktoru je dobrá na rýchlu identifikáciu poruchy v motore.

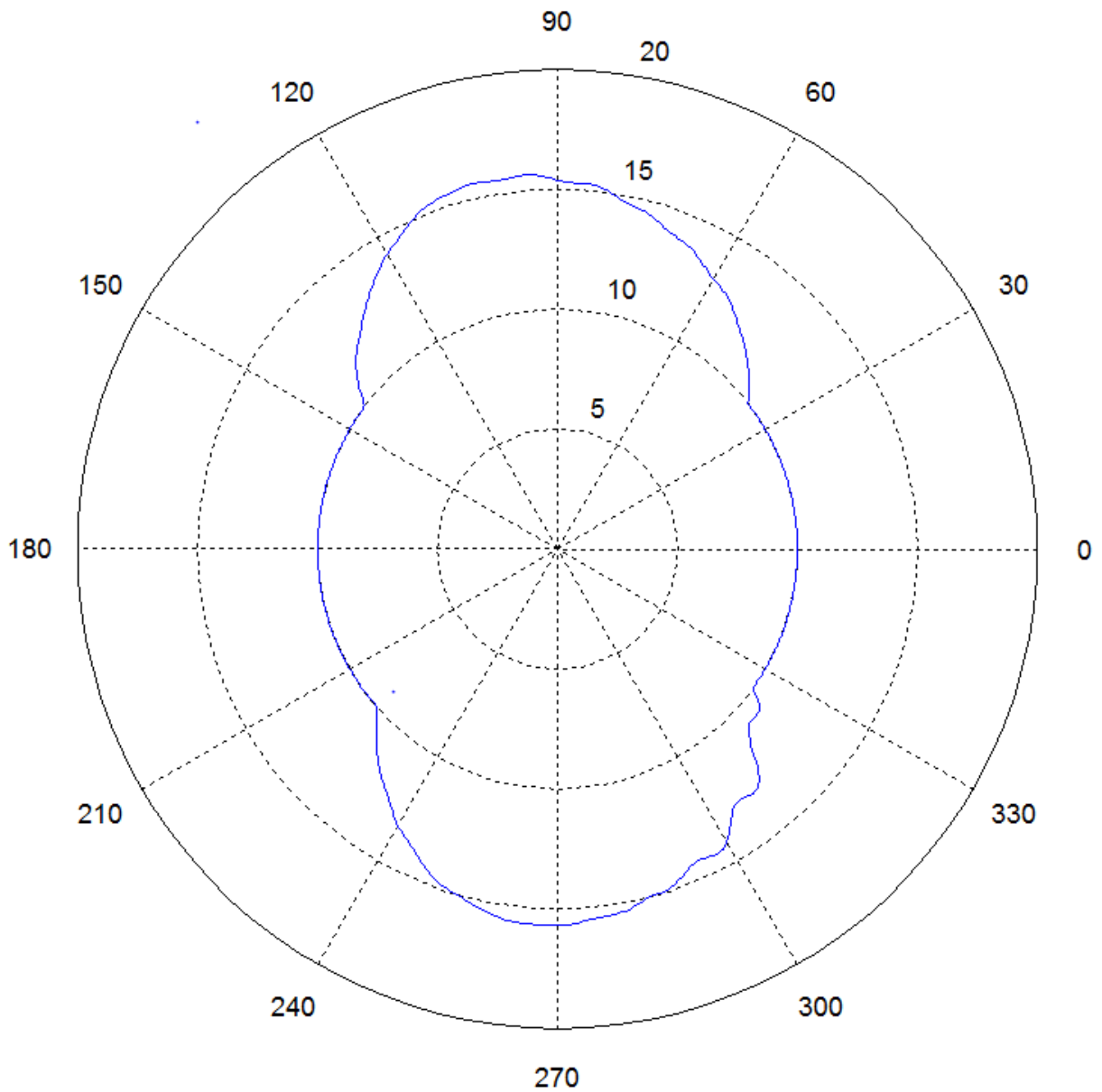
7.7 Orbita

V nameranom signáli udáva jednosmerná zložka polohu stredú hriadele a zo striedavej zložky sa konštruje tzv. orbita, čo je dráha stredú čapu v priebehu jednej otáčky. K získaniu orbity je treba snímať signál z dvoch na seba kolmo umiestnených snímačov výchylky. V ideálnom prípade – pri bezchybnom chode stroja – má orbita tvar kruhu, ktorá sa vykresluje v rovnakom zmysle, ako sú otáčky hriadele .



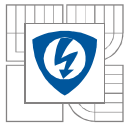
Obr. 24 Orbita pre motor č. 3

Ak si porovnáme priebeh orbity s teoretickými priebehmi znázornenými na obr. 5 potvrdíme, že v motore č. 3 sa nachádza statická excentricita.



Obr. 25 Orbita pre motor č. 4

Na priebehoch orbít je vidieť, že v daných motoroch sa nachádzajú chyby, pretože ani jeden z priebehov naám nevytvoril kruh. Ani moje priebehy nie sú úplné presné, pretože v programe Matlab je dosť zdĺhavé a komplikované odfiltrovanie a vyhladenie priebehov.



8 VYHODNOTENIE MERANIA

Pri vyhodnotení získaných hodnôt som použil viacero vyhodnocovacích metód: Crest faktor, Fourierovu transformáciu, obáľkovú analýzu a vytvorenie orbity.

Ako prvé som si najprv vypočítal frekvencie možných chýb motorov, ktoré mi slúžia na porovnávanie s nameranými frekvenciami a presné diagnostikovanie porúch.

Metóda výpočtu Crest faktora je len informatívne číslo, ktoré nám o danej chybe nepovie nič, slúži len na rýchle diagnostikovanie, či stroj obsahuje alebo neobsahuje poruchu.

Pomocou Fourierovej transformácie som previedol časový priebeh vibrácií na frekvenčnú oblasť, z ktorej môžem určiť, či sa v stroji nachádzajú nasledujúce chyby: statická alebo dynamická excentricita, uhlová nesúososť alebo prehnutý hriadeľ.

Obáľková analýza slúži na odfiltrovanie nežiadúcich zákmitov, nízkofrekvenčných signálov. Následnou Fourierovou transformáciou dostaneme frekvenčnú oblasť, ktorá slúži na diagnostikovanie poruchy ložiska.

Metóda orbity funguje na princípe merania výchylky v dvoch na seba kolmých polohách a následnom vytvorení orbity. Metóda slúži na diagnostikovanie excentricity (statickej alebo dynamickej). V mojom prípade vytvorené orbity nezodpovedajú až tak skutočnosti, nakoľko v programe Matlab je dosť zložitá odfiltrovanie a vyhladenie priebehu. Zostrojenie orbity v programe Matlab som použil na demonštrovanie danej metódy.

Z nameraných hodnôt anásledných grafov, hlavne vo frekvenčnej oblasti som dospel k tomu, že merané motory trpia nasledovnými chybami:

Motor č. 1

Z odčítaných hodnôt frekvencií vyplýva, že v motore sa vyskytuje chyba o frekvencii 25,1Hz, okrem tejto frekvencie sa tu vyskytuje aj frekvencia 100Hz, ktorá predstavuje chybu statickej excentricity, ale jedná sa len o malú výchylku tejto chyby, preto nie je až taká závažná. Vyhodnotil som, že v danom motore sa vyskytuje chyba dynamickej excentricity.

Motor č. 2

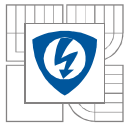
Z grafov č.10 a 11 je možné vidieť, že v motore sa nevyskytujú žiadne frekvencie, ktoré by reprezentovali chybu, vyskytujú sa len drobné záchvevy, ktoré sú zapríčinené rozbehom motora a otáčková frekvencia 25Hz. Z tohto vyplýva, že motor č. 2 je bezporuchový.

Motor č. 3

Z odčítaných hodnôt vyplýva, že v danom motore sa vyskytuje chyba kombinovanej (statickej a dynamickej) excentricity. Nie je možné určiť, ktorá chyba má v motore prevládajúci charakter. Táto porucha je charakteristická tým, že aj relatívne malá excentricita spôsobuje výrazné vibrácie na svojej frekvencii.

Motor č. 4

Z odčítaných hodnôt vyplýva, že v danom motore sa vyskytuje chyba kombinovanej (statickej a dynamickej) excentricity. Nie je možné určiť, ktorá chyba má v motore prevládajúci charakter.



Po vyhodnotení obálkovej metódy som zhodnotil, že na motoroch sa nevyskytujú žiadne frekvencie, ktoré by reprezentovali chybu ložiska.

9 ZÁVER

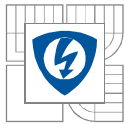
Cieľom tejto diplomovej práce bolo oboznámenie sa s oborom, ktorý sa zaoberá meraním, spracovaním a vyhodnotením vibrácií. Pojmy a princípy naštudované pri písaní diplomovej práce boli uplatnené pri praktickom meraní a vyhodnotení zadanej úlohy. Úlohou bolo zrealizovať meranie na vybraných asynchrónnych motoroch, následné spracovanie získaných hodnôt a celkové vyhodnotenie získaného vibrodiagnostického signálu.

Meranie a vyhodnotenie vibrácií sú nerozdielnou súčasťou sledovania prevádzkového stavu strojov v priemyselnom odbore, predovšetkým elektrických motorov. Meranie vibrácií je dôležitým prvkom na zabezpečenie bezpečnosti prevádzky, ale aj z hľadiska ekonomickej prevádzky.

Vibrodiagnostika prechádza neustálym vývojom. Zdokonaľovanie meracích metód je snahou nielen výrobcov diagnostických meradiel ale aj samotných prevádzkovateľov zariadení. Použitie najmodernejších techník vedie k získaniu včasných a presných informácií, ktoré hovoria o aktuálnom technickom stave meraného objektu. Pomocou vibračnej diagnostiky sa plánujú opravy strojov, podľa ich aktuálneho stavu, čím sa minimalizujú náklady spojené s údržbou zariadení. Vibrácie nemerame len z hľadiska bezporuchového stavu, ale aj škodlivosti vedľajších účinkov na okolie v podobe hluku alebo vibrácií, ktoré nepriaznivo vplyvajú na ľudský organizmus.

Meranie ukázalo, že vibrodiagnostika je účinný nástroj na skúmanie technického stavu zariadení. Avšak na bližšie, presnejšie diagnostikovanie poruchy sa musí previesť viacero meraní a vzájomne ich medzi sebou porovnať a skúmať. Ako vidieť na zmeraných priebehoch, meranie je ovplyvnené vonkajšími vplyvmi – zašumenie, ktoré môže byť spôsobené viacerými faktormi: okolité vibrácie, pripevnenie senzora k motoru a iné vonkajšie vplyvy. Preto sa v praxi používa pre presné technické diagnostikovanie vibrácií napríklad vzduchový vankúš, ktorý minimalizuje rušenie okolitými vibráciami. Ako ďalším možným spôsobom je meranie vibrácií pri rôznych zaťaženiach motorov.

Ďalším problémom pri diagnostikovaní závady je skutočnosť, že niektoré frekvencie, ako otáčková frekvencia a jej násobky, sú charakteristické pre viacero možných porúch a teda je veľmi obtiažne rozlíšiť jednotlivé zdroje vibrácií.



LITERATURA

- [1] MICHALÍK, Ján a Jozef BUDAY. Elektrické stroje. Žilina: EDIS - vydavateľstvo ŽU, 2006, 196 s. ISBN 80-8070-568-2.
- [2] HRUŠKOVIČ, Ladislav. Elektrické stroje. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 1999, 497 s. ISBN 80-227-1249-3.
- [3] KOČMAN, Stanislav. *Asynchronní stroje*. TU Ostrava: Katedra obecní elektrotechniky FEI VŠB, 2002.
- [4] KREIDL, Marcel. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [5] Česká technická norma ČSN ISO 2041. *Vibrace a rázy - slovník*. ÚNMZ, 2010.
- [6] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [7] NAVRÁTIL, Miroslav a Oldřich PLUHAŘ. *Měření a analýza mechanického kmitání: metody a přístroje*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986, 401 s. Redakce báňské a strojírenské literatury.
- [8] LIŠKA, Miroslav. *Spolehlivost a technická diagnostika*. 1. vyd. Brno: VUT Brno, 1989, 146 s. ISBN 80-214-1047-7.
- [9] PROCHÁZKA, F.; KRATOCHVÍL, C. Úvod do matematického modelování pohonových soustav. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2002. 186 s. ISBN 80-7204-256-4.
- [10] Diagnostika valivých ložisek: Crest faktor, Dokumentace Adash [online]. 2000 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: http://www.adash.cz/doc/ApplicationNotes/diag_val_lozisek_man_cz.pdf
- [11] SOKANSKÝ, Karel. Diagnostika vybraných poruch asynchronních motorů pomocí proudových spekter [online]. 1999 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.cmms.cz/elektromotory/179-diagnostika-vybranych-poruch-asynchronnich-motoru-pomoci-proudovych-spekter.html>
- [12] Ložiská [online]. 2015 [cit. 2015-04-04]. Dostupné z: <http://www.skf.com/sk/index.html>
- [13] BILOŠOVÁ, Alena. *Týmová cvičení předmětu Vibrační diagnostika: návody do cvičení předmětu „Vibrační diagnostika“*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2757-5.