

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2016

Bc. Jakub Lexa



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

# DIAGNOSTIKA VIBRACÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

VIBRATION DIAGNOSTICS OF ELECTRICAL MACHINES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

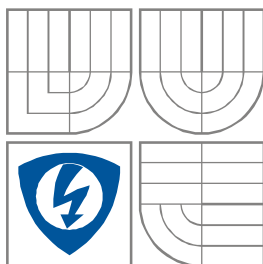
**Bc. JAKUB LEXA**

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

**Ing. MARCEL JANDA, Ph.D.**

BRNO 2016



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. Jakub Lexa

**Ročník:** 2

**ID:** 134541

**Akademický rok:** 2015/2016

**NÁZEV TÉMATU:**

## Diagnostika vibrací elektrických strojů

**POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

1. Seznamte se se zdroji vibrací v elektrických strojích.
2. Proveďte měření vibrací na několika konkrétních strojích.
3. Měření vyhodnoťte a určete možné poruchy strojů na základě analýzy vibračního spektra.

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] JACEK F. GIERAS, Jacek F. CHong Wang. Noise od Polzphase 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:** 21.9.2015

**Termín odevzdání:** 24.5.2016

**Vedoucí projektu:** Ing. Marcel Janda, Ph.D.

**Ing. Ondřej Víték, Ph.D.**

*Předseda oborové rady*

**UPOZORNĚNÍ:**

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá diagnostikou vibrací elektrických strojů. V práci je popsán vznik vibrací a způsob jejich měření. V další části práci jsou popsány jednotlivé druhy vibrací elektrických strojů. Vibrace strojů jsou rozděleny na elektrické příčiny a na mechanické příčiny. Praktická část se zabývá měřením vibrací na konkrétních strojích a jejich následnou analýzou. Výsledkem praktické části je určení poruch měřených asynchronních motorů.

## **Abstract**

This thesis deals with vibration diagnostics of electrical machines. The thesis describes vibrations and their measurement. The next section concerns the different modes of electrical machines. Vibration of machines are divided into electrical causes and mechanical causes. Practical part deals with the measurement of vibration on the machines and their subsequent analysis. The result of the practical part is determining the fault of the measured induction motors.

## **Klíčová slova**

Vibrace; asynchronní stroj; frekvence; výchylka; rychlost; zrychlení; excentricita; nevyváženost, FFT.

## **Keywords**

Vibrations; asynchronous machines; frequency; deflection; speed; acceleration; eccentricity; imbalance, FFT.

## **Bibliografická citace**

LEXA, J. *Diagnostika vibrací elektrických strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 50 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Diagnostika vibrací elektrických strojů 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 .....

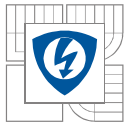
Podpis autora .....

## **Poděkování**

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

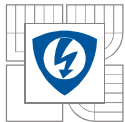
V Brně dne .....

Podpis autora .....



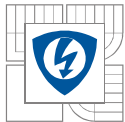
## Obsah

<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>8</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2 VIBRACE A SIGNÁLY .....</b>	<b>12</b>
<b>3 MĚŘENÍ VIBRACÍ .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1 MĚŘENÍ VÝCHYLKY .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 MĚŘENÍ RYCHLOSTI .....</b>	<b>17</b>
<b>3.3 MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ .....</b>	<b>18</b>
<b>3.4 UMÍSTĚNÍ MĚŘICÍCH SOND.....</b>	<b>18</b>
<b>4 VIBRACE ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....</b>	<b>20</b>
<b>4.1 VIBRACE ELEKTROMAGNETICKÉHO PŮVODU .....</b>	<b>20</b>
4.1.1 STATICKÁ EXCENTRICITA, ZKRATOVANÉ PLECHY A VOLNÉ ŽELEZO .....	20
4.1.2 DYNAMICKÁ EXCENTRICITA.....	21
4.1.3 PORUCHY TYČÍ, ZKRATOVANÉ PLECHY .....	22
<b>4.2 VIBRACE MECHANICKÉHO PŮVODU .....</b>	<b>23</b>
4.2.1 NEVYVÁŽENOST ROTORU .....	23
4.2.2 NESOUOSOST .....	26
4.2.3 OHNUTÝ HŘÍDEL .....	27
4.2.4 MECHANICKÉ UVOLNĚNÍ.....	27
<b>5 VIBRODIAGNOSTIKA ELEKTRICKÝCH STROJŮ .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1 ANALÝZA VIBRACÍ V ČASOVÉ OBLASTI .....</b>	<b>30</b>
<b>5.2 ANALÝZA VIBRACÍ VE FREKVENČNÍM SPEKTROU.....</b>	<b>32</b>
<b>6 PRAKTICKÁ ČÁST.....</b>	<b>35</b>
<b>6.1 ANALÝZA V ČASOVÉ OBLASTI .....</b>	<b>38</b>
<b>6.2 ANALÝZA VE FREKVENČNÍ OBLASTI.....</b>	<b>40</b>
<b>7 ZÁVĚR.....</b>	<b>48</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>49</b>



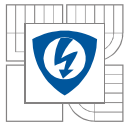
## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Akcelerometry[7]</i> .....	18
<i>Tabulka 2: Souhrn elektrických příčin vibrací</i> .....	23
<i>Tabulka 3: Souhrn mechanických příčin vibrací</i> .....	28
<i>Tabulka 4: Tabulka mezních hodnot vibrací dle ČSN EN 60034-14</i> .....	30
<i>Tabulka 5: Kritéria vibrací dle ČSN ISO 10816-3</i> .....	31
<i>Tabulka 6: Rozdělení frekvencí</i> .....	34
<i>Tabulka 7: Štítkové hodnoty motoru TM90-4S</i> .....	35
<i>Tabulka 8: Výrobní čísla motorů</i> .....	36
<i>Tabulka 9: Otáčky měřených elektromotorů</i> .....	37
<i>Tabulka 10: Teoretické frekvence elektrických poruch(<math>Q_R=28</math>; <math>n=1495 \text{ min}^{-1}</math>)</i> .....	37
<i>Tabulka 11: Teoretické frekvence mechanických poruch(<math>n=1495 \text{ min}^{-1}</math>)</i> .....	38
<i>Tabulka 12: Vypočtené hodnoty RMS v porovnání s normou ČSN EN 60034-14</i> .....	39
<i>Tabulka 13: Tabulku činitele výkmitu</i> .....	40
<i>Tabulka 14: Souhrn poruch jednotlivých motorů</i> .....	47



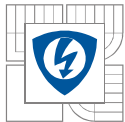
## SEZNAM OBRÁZKŮ

2-1 Mechanické kmitání .....	12
2-2 Fázové posuny výchylky, rychlosti a zrychlení kmitání .....	14
2-3 Příklad složeného kmitání .....	14
3-1 Princip absolutního snímače vibrací [12] .....	16
3-2 Princip měření výchylky pomocí Foucaultových proudů [12] .....	17
3-3 Frekvenční rozsah způsobů připevnění měřicích sond [14] .....	19
3-4 Umístění měřicích sond [17] .....	19
4-1 Statická nevyváženost (OR -osa rotace, COS-centrální osa setrvačnosti) [9] .....	24
4-2 Momentová nevyváženost (OR-osa rotace, COS-centrální osa setrvačnosti) [9] .....	25
4-3 Dynamická nevyváženost (OR-osa rotace, COS-centrální osa setrvačnosti)[9] .....	25
4-4 Úhlová nesouosost [9] .....	26
4-5 Rovnoběžná nesouosost [9] .....	27
4-6 Ohnutý hřídel [9] .....	27
5-1 Princip Crest Factoru[14] .....	32
5-2 Princip frekvenční analýzy[5] .....	33
6-1 Motor TM90-4S [16] .....	35
6-2 Fotografie měřicího místa .....	36
6-3 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 1 - radiální směr .....	41
6-4 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 1 - axiální směr .....	42
6-5 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 2 - radiální směr .....	43
6-6 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 2 - axiální směr .....	43
6-7 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 3 - radiální směr .....	44
6-8 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 3 - axiální směr .....	45
6-9 Frekvenční spektrum rychlostí vibrací motoru 4 - radiální směr .....	45
6-10 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 4 - axiální směr .....	46



## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	amplituda zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]
B	magnetická indukce [T]
N	počet tyčí rotoru [-]
Q	počet drážek [-]
T	perioda [s]
V	amplituda rychlosti [m/s]
X	amplituda výchylky [m]
a	okamžité zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]
f	frekvence [Hz]
i	celé číslo [-]
k	celé číslo [-]
l	délka [m]
m	počet fází [-]
n	otáčky [1/min]
p	počet pólových dvojic [-]
s	skluz [-]
t	čas [s]
u	napětí [V]
v	okamžitá rychlost [m/s]
x	okamžitá výchylka [m]
$\varphi$	počáteční fáze [rad]
$\omega$	úhlová frekvence [rad/s]



# 1 ÚVOD

Elektrické stroje jsou dnes nejrozšířenějšími pohonnými jednotkami. Již od prvních strojů se konstruktéři potýkají s nežádoucími jevy při provozu elektrických strojů. Jedním z kritérií při navrhování elektrických strojů jsou i vibrace. Důvody snižování vibrační elektrických strojů jsou technicko-finanční a ekologické.

Technická a finanční stránka provozu se týká především velkých elektrických strojů. Vibrace poškozují stroje samotné, jako jsou například namáhání materiálu, praskliny mechanických částí nebo ovlivňují přímo její funkčnost. Tyto vady mohou mít za následek snížení životnosti drahého stroje, drahé odstavení stroje z provozu kvůli technicky složité a finančně nákladné opravě, či k nevratnému zničení samotného stroje.

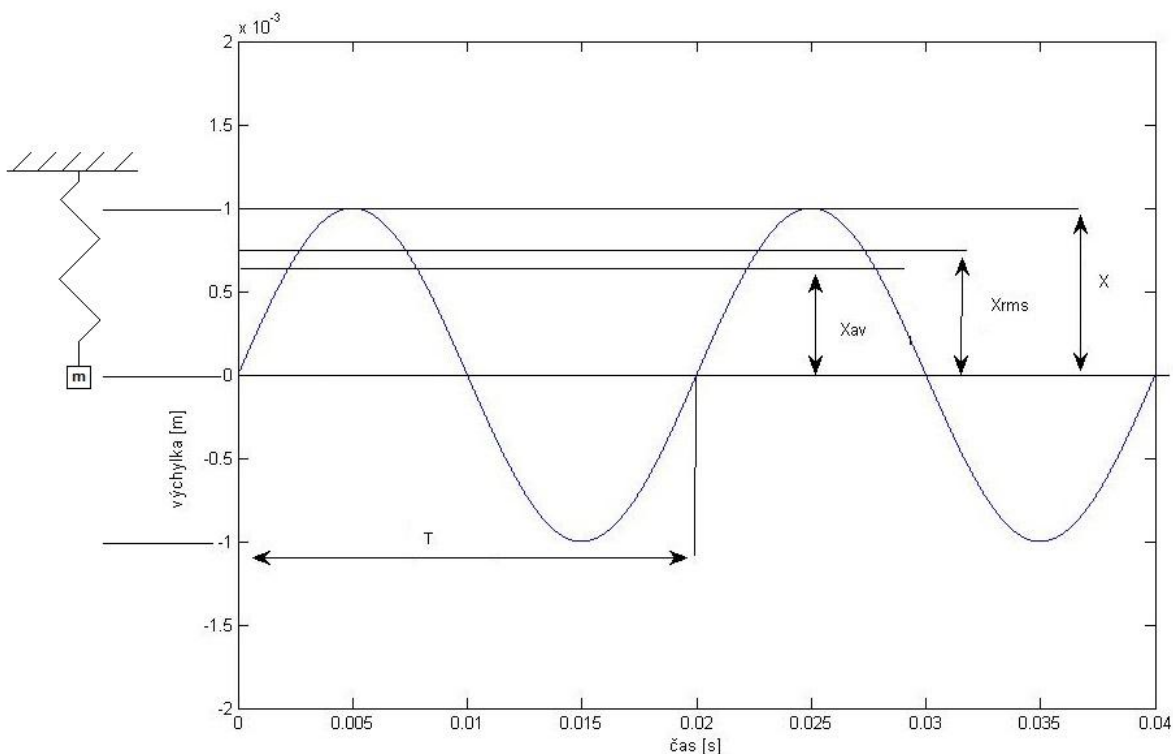
Mezi ekologické důvody patří splnění norem pro vliv na životní prostředí kolem nás, v neposlední řadě i na nás samotné a naše zdraví. Průvodním jevem vibrační je hluk, který je jedním z největších nebezpečí pro životní prostředí.

Vibrodiagnostika elektrických strojů se používá především k zjištění a predikci závad strojů nebo hlídání bezzávadného chodu velkých a drahých strojů přímo při jejich provozu. Díky vibrodiagnostice je možné stroje kontrolovat, aniž by se musely vyřadit z provozu nebo rozebrat. V dnešní době jsme schopni měřit i nejmenší vibrace a diagnostikovat, tak téměř každou závadu stroje elektrického či mechanického původu.

Cílem diplomové práce je popsat fyzikální princip vibrací, způsoby měření vibrací a především příčiny a projevy vzniků vibrací v elektrických strojích. A na teoretickou část navázat praktickým měření vibrací na konkrétních strojích a odhalit jejich poruchu.

## 2 VIBRACE A SIGNÁLY

Vibrace můžeme popsat jako mechanické kmitání v pevných látkách. Vibrace tedy kmitání je děj, při němž se hmotný bod pohybuje kolem své rovnovážné osy - můžeme říct, že kmitá. Pokud se kmitání identicky opakuje v čase hovoříme o kmitání periodickém. Periodické kmitání je charakterizováno periodou  $T$  a frekvencí  $f$ . Nejjednodušším periodickým kmitáním je harmonické kmitání, jehož časový průběh zobrazuje následující obrázek.



### 2-1 Mechanické kmitání

Periodou  $T$  nazýváme čas jednoho kmitu, je to doba kdy hmotný bod vykoná pohyb z kladné amplitudy výchylky zpět do kladné amplitudy výchylky. Perioda, frekvence a úhlová frekvence jsou spolu svázány následujícími vztahy:

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

kde je:  $f$  frekvence [Hz]

$T$  perioda [s]

$\omega$  úhlová frekvence [rad/s]

Harmonické kmitání hmotného bodu můžeme popsat následujícími rovnicemi. Hlavní rovnicí pro popis kmitání je rovnice výchylky:

$$x = X \sin(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

kde je:  $x$  okamžitá hodnota výchylky [m]

$X$  amplituda výchylky [m]

$\omega$  úhlová frekvence [rad/s]

$t$  čas [s]

$\varphi$  počáteční fáze [rad]

Fází nazýváme výraz  $(\omega t + \varphi)$  harmonicky proměnné veličiny. Mají-li dvoje kmitání o stejné frekvenci rozdílné fázové úhly  $\varphi$ , hovoříme o fázovém posunu. Fázový posun definujeme jako rozdíl jejich fázových úhlů  $\varphi_1$  a  $\varphi_2$ .

Derivujeme-li rovnici výchylky (1) získáme rovnici popisující rychlost kmitání:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega X \cos(\omega t + \varphi) = V \cos(\omega t + \varphi) = V \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3)$$

kde je:  $v$  okamžitá hodnota rychlosti [m/s]

$V$  amplituda rychlosti [m/s]

Derivujeme-li i rovnici rychlosti kmitání (3) resp. provedeme-li druhou derivaci výchylky získáme rovnici pro zrychlení kmitání:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega V \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 X \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

kde je:  $a$  okamžitá hodnota zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]

$A$  amplituda zrychlení [ $\text{m/s}^2$ ]

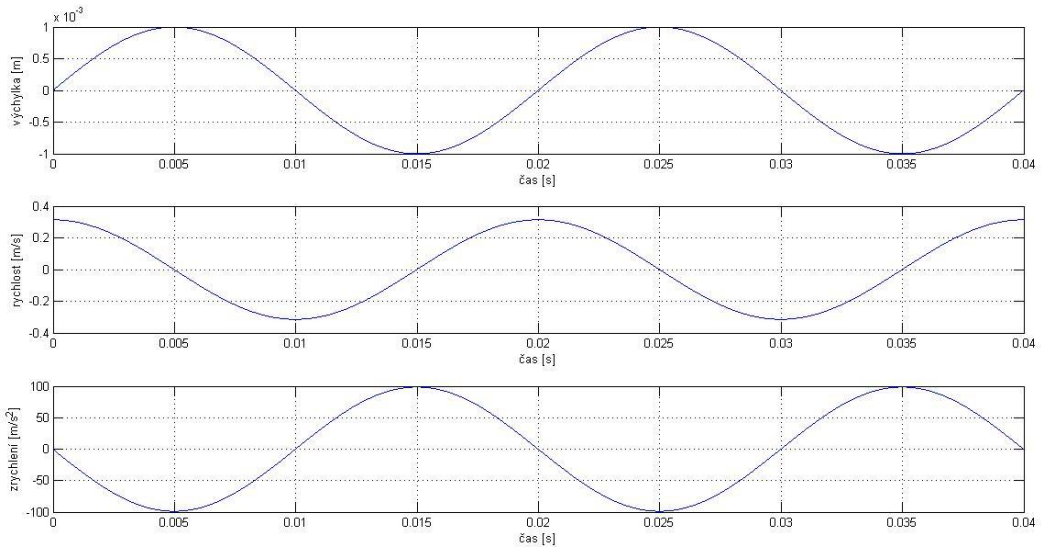
Obrázek 2-2 ukazuje vzájemné fázové posuvy výchylky, rychlosti a zrychlení kmitání. Z výše uvedených rovnic vyplývá, že fáze rychlosti kmitání je oproti fázi výchylky posunuta o  $\pi/2$  tedy o  $90^\circ$ . Fáze zrychlení je proti fázi rychlosti posunuta o  $90^\circ$  a proti výchylce o  $180^\circ$  tedy je s výchylkou v protifázi. Na obrázku je kmitání o amplitudě  $X=1$  mm a frekvenci  $f=50$  Hz.

Místo amplitudy se pro popis kmitavého děje používají i jiné veličiny jak je patrné z obrázku 2-1. Jedná se o střední hodnotu, pro kterou platí následující vztah:

$$X_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T |x(t)| dt = \frac{2}{\pi} X = 0,637 \cdot X \quad (5)$$

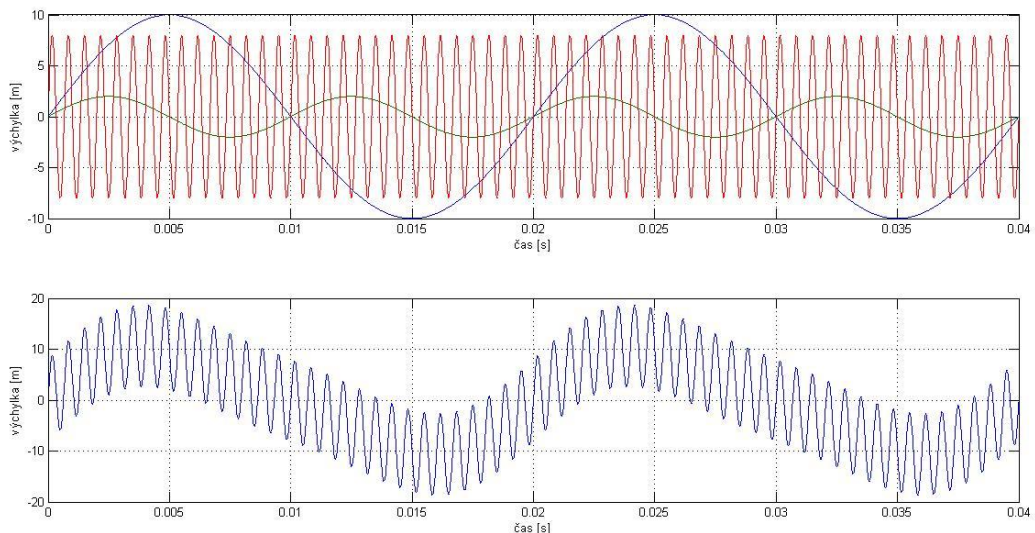
A efektivní hodnotu, pro kterou platí:

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} X = 0,707 \cdot X \quad (6)$$



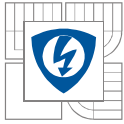
### 2-2 Fázové posuny výchylky, rychlosti a zrychlení kmitání

Tyto veličiny používáme pro popis kmitavého signálu v časové oblasti. Efektivní hodnota vyjadřuje průměrný výkon měřené veličiny. Je třeba si uvědomit fakt, že doba měření nemusí být rovna periodě a při opakovaných měřeních nezískáme vždy přesně stejnou hodnotu.



### 2-3 Příklad složeného kmitání

V praxi se častěji setkáváme se složenými signály kmitů (obrázek 2-3), než s čistým harmonickým signálem sinusového průběhu, který jsme si již popsali. Tyto složené kmitání se



---

skládají ze dvou a více diskrétních kmitání o různých kmitočtech a amplitudách. Matematicky můžeme výsledný průběh kmitání vyjádřit rovnicí:

$$x = \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

a pro sinusové průběhy diskrétních kmitů:

$$x = \sum_{i=1}^n X_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (8)$$

### 3 MĚŘENÍ VIBRACÍ

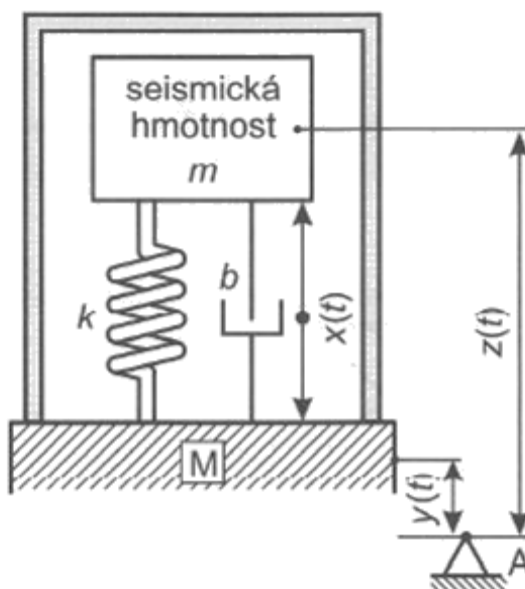
Pro měření vibrací elektrických strojů potřebujeme speciální technické vybavení. Do vybavení spadají měřicí sondy a analyzátory poskytující komfort ve výsledném zpracování naměřeného signálu a jeho analýze.

Měřicí sondy v principu převádí mechanickou veličinou na elektrický signál. Sondy se v dnešní době konstruují nejčastěji na piezoelektrickém principu, dříve se používali elektrodynamické principy. Měřené signály lze rozdělit na nízkofrekvenční (0-2 kHz), vysokofrekvenční (2-50 kHz).

Jedním z hlavních rozdělení vibračních sond je na absolutní a relativní.

#### Absolutní sondy vibrací

Absolutní vibrace jsou vztahovány k poli země nebo k pevnému bodu. Tyto snímače měří veličinu mechanických vibrací vzhledem k vlastní seismické soustavě. Používají se v případech, kdy není možné použít vhodný pevný bod pro sondu.



3-1 Princip absolutního snímače vibrací [12]

#### Relativní sondy vibrací

Relativní sondy měří relativní pohyb dvou bodů kmitající soustavy. Kmitání je vztahováno a vyhodnocováno vůči zvolenému reálnému bodu. Relativní sondy jsou vhodné pouze pro měření výchylek. Relativní výchylka se měří při použití dvou sond, uspořádaných pro měření v radiálním směru.

Dále rozdělujeme sondy na:

- aktivní - kdy jsou sondy zdrojem signálu, přímo přeměňují mechanickou energii na elektrickou
- pasivní - zdroje potřebují ke své funkci zdroj napájení, elektrický signál ze zdroje modulují v závislosti na mechanickém signálu

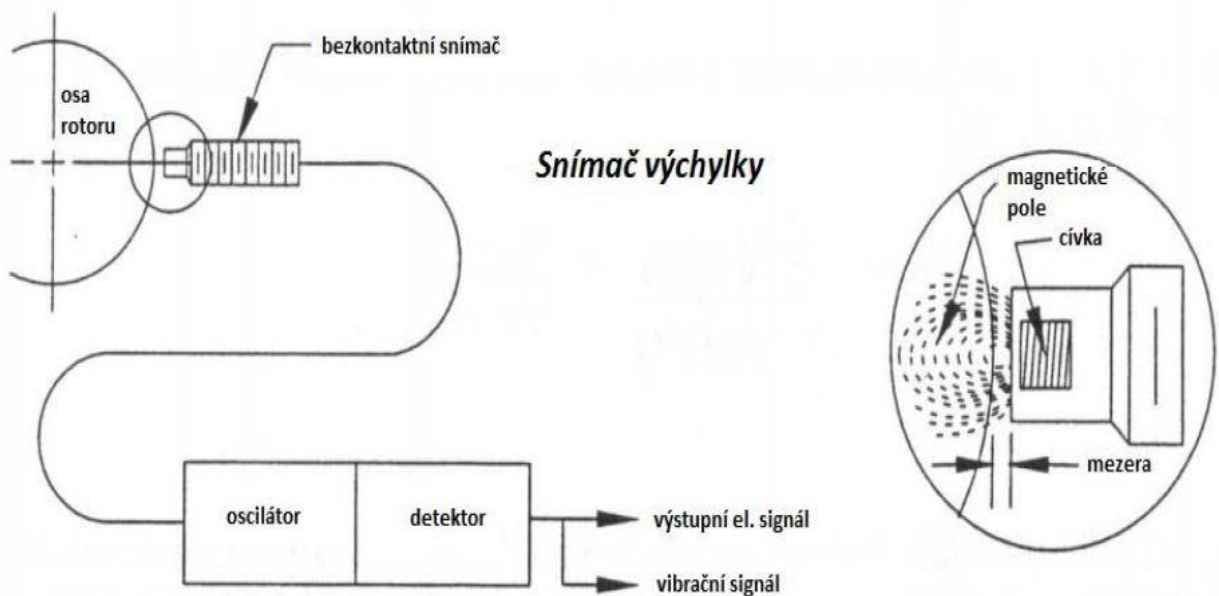
A také na:

- bezkontaktní - jsou upevněny mimo měřený objekt, např.: měření rotujících částí
- kontaktní - jsou upevněny přímo na měřeném objektu

### 3.1 Měření výchylky

Pro měření výchylky se nejčastěji používají bezkontaktní sondy fungující na principu vířivých proudů. Tento princip využívá změny Foucaltových proudů závislých na odporu prostředí, který se mění se změnou vzdálenosti. V praxi se také používají indukční, kapacitní a laserové sondy.

Měření výchylky se nejčastěji používá pro měření vibrací hřídelů. Při tomto způsobu se měří relativní vibrace hřídele - vibrace hřídele vůči statoru. Obvykle se k měření používají dvě sondy pootočené o 90°.



3-2 Princip měření výchylky pomocí Foucaltových proudů [12]

### 3.2 Měření rychlosti

Sondy pro měření rychlosti vibrací jsou seismické zařízení generující napěťový signál. Napěťový signál je přímo úměrný rychlosti kmitání. Touto rychlostí se pohybuje cívka v magnetickém poli permanentního magnetu uvnitř sondy a indukuje se v ní napětí. Matematicky lze princip dokázat rovnicí:

$$u = l \cdot B \cdot v \quad (9)$$

Sondy rychlosti vibrací pracují v rozsahu 10 až 1000 Hz. Z naměřeného průběhu rychlosti kmitání lze integrací získat průběh výchylky kmitání.

### 3.3 Měření zrychlení

Pro měření zrychlení vibrací se používají akcelerometry. Tyto sondy se používají jako základní snímače při měření vibrací, protože skýtají proti předchozím některé výhody. Mezi výhody patří frekvenční rozsah použitelnosti (0,1 Hz až 30 kHz), citlivost a také možnost získat ze zrychlení integrací rychlost případně výchylku vibrací.

Princip akcelerometrů spočívá v použití piezoelektrického keramického materiálu, na němž vzniká elektrický náboj. Náboj je přímo úměrný deformaci piezoelektrického materiálu, kterou způsobuje referenční hmota uvnitř sondy. Při kmitání měřeného objektu kmitá i těleso sondy s piezoelektrickým materiálem a referenční hmota zůstává v klidu a tím vzniká síla působící na piezoelektrický materiál. Akcelerometr měří tedy absolutní vibrace.

Akcelerometry jsou trvanlivé a spolehlivé a nevyžadují častou kalibraci jako sondy pro měření rychlosti kmitání. Vyrábí se ve třech variantách: smykové, tlakové a ohybové. Jejich provedení nastiňuje následující tabulka.

Tabulka 1: Akcelerometry[7]

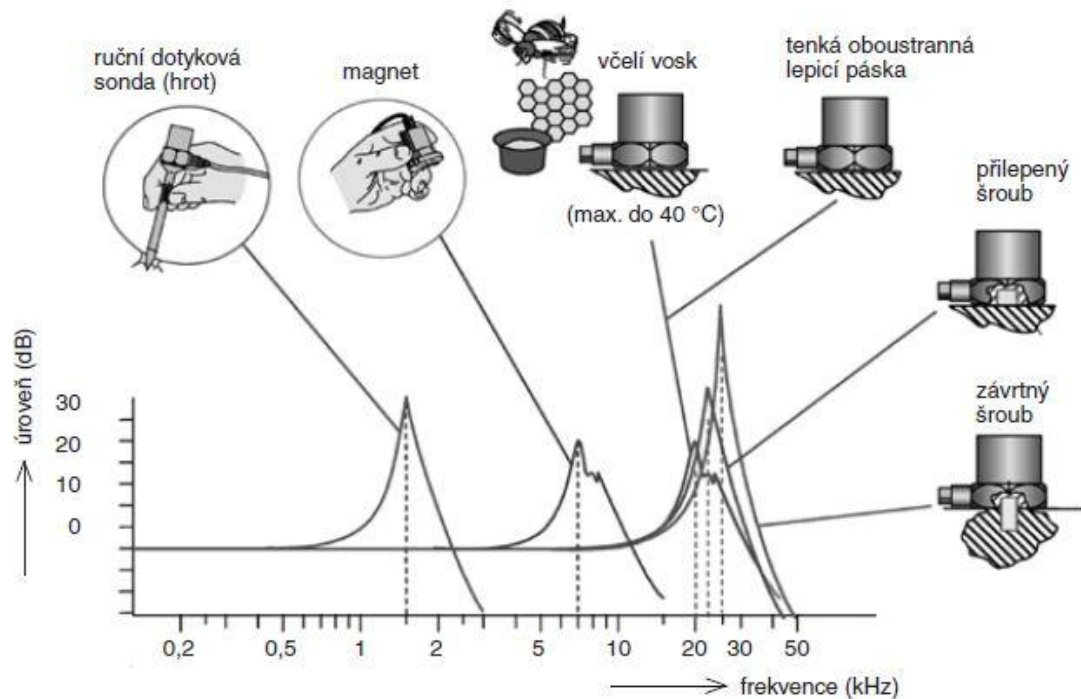
Typ	Výhoda	Nevýhoda
<p><b>smykový</b></p> 	<p>široký frekvenční rozsah</p> <p>odolný</p> <p>nízký teplotní vliv</p>	<p>malá citlivost</p>
<p><b>tlakový</b></p> 	<p>široký frekvenční rozsah</p> <p>odolný na rázy</p>	<p>teplotní vliv</p> <p>náchylný na deformaci základny</p>

### 3.4 Umístění měřicích sond

Přípevnění sondy na měřený objekt je důležitým aspektem pro kvalitu měření. Co se děje s měřeným objektem se děje i s měřicí sondou a kvalita přípevnění ovlivňuje přenos děje na měřicí sondu. Existuje několik způsobů, které podrobně uvádí norma ČSN ISO 5348. Možné varianty upevnění jsou:

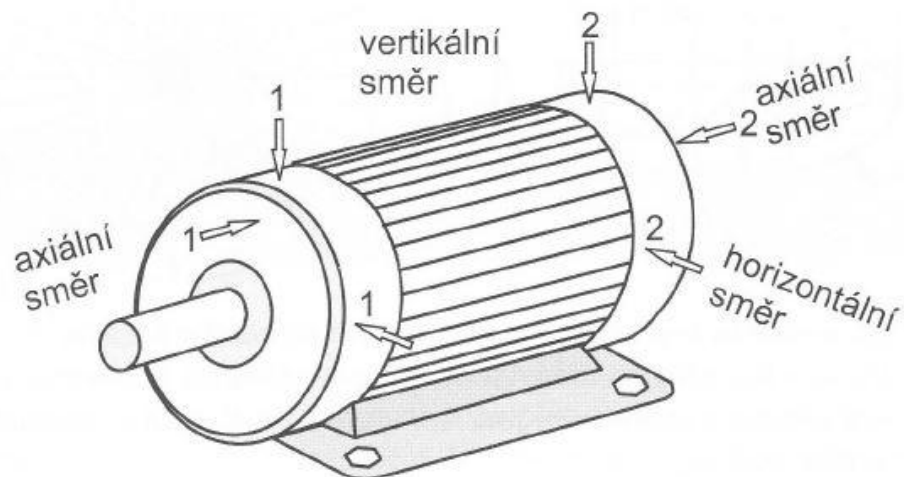
- **šroubem** - Nejspolehlivější uchycení, které minimálně zmenšuje frekvenční rozsah. Plocha pod sondou musí být čistá a rovná. Zhotovení kolmosti a kvality závitové díry je velmi náročné a požadavky na něj jsou vysoké.
- **lepidlem** - Zachování frekvenčního rozsahu záleží na kvalitě použitého lepidla a na kvalitě plochy pod sondou. Obvykle se na měřený objekt nelepí přímo sonda, ale kovová podložka se závitem pro šroub. Nevýhodou je měknutí lepidla při vyšších teplotách.

- **oboustranná lepicí páska** - Rychlý a levný způsob s velkou nespolehlivostí.
- **magnet** - Častý a rychlý způsob uchycení sondy. Používá se pro provozní měření ve frekvenčním rozsahu do 2 kHz.
- **včelím vosk** - Rychlý způsob pro laboratorní účely. Frekvenční rozsah omezuje jen mírně. Použitelný pouze do 40 °C.
- **doteková jehla** - Slouží pro orientační měření do 1 kHz.



3-3 Frekvenční rozsah způsobů připevnění měřicích sond [14]

Sondy umísťujeme v horizontálním, vertikálním a axiálním směru. Měříme přímo na tělese měřeného objektu, nikoliv na přechodech či plechových krytech. Umístění sond nastiňuje obrázek 3-4.



3-4 Umístění měřicích sond [17]

## 4 VIBRACE ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Princip elektrických točivých strojů spočívá v přeměně elektrické energie na mechanickou v případě motorů nebo mechanické energie na elektrickou v případě generátorů. Provoz elektrických točivých strojů je doprovázen nežádoucími jevy a poruchy. V elektrických motorech a generátorech mohou vznikat závady a poruchy v elektrických obvodech (tj. ve vinutích), v magnetických obvodech (jha statoru a rotoru) a v mechanických částech (ložiska, hřídele atd.). Vzhledem k těmto možným poruchám můžeme vznik vibrací rozdělit na:

- vibrace elektromagnetického původu
- vibrace mechanického původu
- vibrace ventilačního původu

Celkové vibrace elektrických strojů s kterými se potýkáme v praxi jsou tvořeny celkovým účinkem výše uvedených původů. K těmto celkovým se přidávají i vibrace externího původu, které nevznikají v elektrickém stroji. Externí vibrace vznikají v převodech, v poháněných strojích (nebo v pohánějících strojích případě generátorů) nebo jsou do soustavy vnášeny z vnějšku. Nejčastěji se však setkáváme s vibracemi rotačního charakteru a mechanického původu.

### 4.1 Vibrace elektromagnetického původu

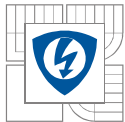
Část vibrací elektrických strojů je elektromagnetického původu. Jejich příčinou je kmitání kostry stroje a jeho částí způsobené elektromagnetickými silami. Tyto síly vznikají v důsledku vyšších harmonických napájecího proudu, magnetického sycení, fázové nesymetrie, magnetostrickce nebo poruchy v magnetickém obvodu či elektrické části stroje. Frekvenční spektrum těchto vibrací je diskrétního charakteru. Vibrace způsobené elektrickými příčinami se vyskytují především radiálním směru. V axiálním směru by se vyskytovaly vibrace pouze v případě podélně proměnné vzduchové mezery, například vlivem nesouměrným uložením rotoru.

Uvedené vztahy v další části kapitoly platí pro asynchronní stroje.

#### 4.1.1 Statická excentricita, zkratované plechy a volné železo

Statická excentricita je případ poruchy, kdy vnitřní tvar jha statoru není přesně kruhový a vzniká tak staticky nerovnoměrná vzduchová mezera. U asynchronních strojů, které vyžadují pro svou funkci přesnou a malou vzduchovou mezera, vzniká deformovaná magnetická vodivost vzduchové mezery. Deformovaná magnetická vodivost způsobuje interferenci s magnetomotorickým napětím silné vibrace. Podobný příklad statické excentricity vzniká při špatném uložení rotoru, kdy je osa rotoru umístěna mimo osu statoru. V tomto případě rotor rotuje kolem své osy vzdálené od osy statoru o excentricitu  $\epsilon$  a mezi statorem a rotorem vzniká staticky nerovnoměrná vzduchová mezera.

Zkratované plechy způsobují nerovnoměrný ohřev jha statoru a může vzniknout deformace statoru. Takto vznikají teplotně indukované vibrace v čase významně narůstající, které způsobují deformaci statoru. Tímto způsobem může vzniknout i problém se statickou vzduchovou mezerou. Důvodem vzniku zkratovaných plechů je odření plechů při montáži rotoru nebo škrtnutí rotoru o stator při provozu.



Problémy statoru generují velké vibrace v radiálním směru se základní frekvencí:

$$f_s = 2 \cdot f \quad (10)$$

kde je:  $f$  frekvence napájecí sítě [Hz]

V případě statické excentricity jsou patrné komponenty kolem  $f_s$  ve frekvenčním spektru na:

$$\Delta f_{STAT} = f \left( \frac{i Q_R (1-s)}{p} \pm k_1 \right) \quad (11)$$

kde je:  $f$  frekvence sítě [Hz]

$i$  celé číslo harmonické

$Q_R$  počet rotorových drážek

$s$  skluz

$p$  počet pólových dvojic

$k_1$  konstanta, která může nabývat hodnot: 0, 2, 4, 6 ...

Je-li uvolněný statorový plech, vyskytují se ve frekvenčním spektru komponenty s odstupem  $f_s$  okolo frekvence 1 kHz.

#### 4.1.2 Dynamická excentricita

Příčinou dynamické excentricity je rotace rotoru kolem osy, která není jeho osou souměrnosti. Ve stroji vzniká rotující vzduchová mezera - dynamicky proměnná vzduchová mezera. Proměnná vzduchová mezera vyvolává ve stroji kroužící silové účinky. Vzniklé vibrace pulzují obvykle mezi frekvencí  $f_s$  (8) a nejbližším harmonickým násobkem otáčkové frekvence  $f_R$ . Excentrické rotory generují vibrace na frekvenci  $f_s$  s postranními pásmy o frekvenci průchodů pólů  $f_P$ , které vzniká i kolem otáčkové frekvence.

Otáčkovou frekvenci rotoru definuje vztah:

$$f_R = \frac{n}{60} \quad (12)$$

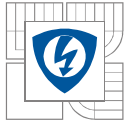
kde je:  $n$  otáčky rotoru [1/min]

Frekvence průchodu pólů je definována vztahem:

$$f_P = f_{SK} \cdot p \quad (13)$$

kde je:  $f_{SK}$  skluzová frekvence [Hz]

$p$  počet pólů



Skluzovou frekvenci lze vypočítat podle následujícího vztahu:

$$f_{SK} = f \cdot s = f \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (14)$$

kde je:  $f$  frekvence napájecí sítě [Hz]

$s$  skluz

$n_1$  synchronní otáčky [1/min]

Dynamická excentricita generuje vibrace kolem  $f_R$  s postraním pásmem  $2 \cdot f_{SK}$  a komponenty na frekvencích:

$$\Delta f_{dyn} = f \left[ \frac{(iQ_R \pm k_e)(1-s)}{p} \pm k_1 \right] \quad (15)$$

kde je:  $f$  frekvence napájecí sítě [Hz]

$s$  skluz

$Q_1$  počet rotorových drážek

$i$  celé číslo harmonické

$k_e$  stupeň excentricity (celé číslo)

$k_1$  konstanta, která může nabývat hodnot: 0, 2, 4, 6...

$p$  počet pólů

### 4.1.3 Poruchy tyčí, zkratované plechy

V rotorové kleci může docházet k poruchám jako jsou: zlomené rotorové tyče nebo čelní prstence, špatné spoje mezi tyčemi a prstenci. Dále zkratované rotorové plechy nebo uvolněné rotorové tyče. Všechny tyto poruchy způsobují velké vibrace se základní frekvencí rovnou otáčkovou frekvencí  $f_R$  s postraními pásmy  $f_p$ . Často vznikají postraní pásma kolem harmonických násobků  $f_R$ .

Lom tyče, trhlina v tyči či uvolněná tyč rotorového vinutí způsobují vibrace na frekvencích  $f_{tyč}$  s postraními pásmy  $f_s$ . Poruchy tyče způsobují i vibrace na frekvenci  $f_s$  s postraními pásmy  $f_{SK}$ .

$$f_{tyč} = N_R \cdot f_R \quad (15)$$

kde je:  $N_R$  počet rotorových tyčí resp. počet drážek rotoru  $Q_R$

Tabulka 2: Souhrn elektrických příčin vibrací

Elektrické příčiny				
Příčina vibrací	Rovina	Základní frekvence vibrací	Postraní pásma	Komponenty
Statická excentricita	radiální	$f_s=2 \cdot f$	-	$\Delta f_{\text{STAT}}=[f \cdot i \cdot Q_R \cdot (1-s)/p] \pm k_1$
Zkratované plechy statoru, rozdílné odpory fází	radiální	$f_s=2 \cdot f$	-	-
Volné železo	radiální	$f_s=2 \cdot f$	-	s odstupem $f_s$ kolem 1 kHz
Dynamická excentricita	radiální	$f_r=n/60$	$2f_{sk}=f \cdot s, f_p=f \cdot s \cdot p$	$\Delta f_{\text{DYN}}=f[[(i \cdot Q_R \pm k_c)(1-s)/p] \pm k_1]$
	radiální	$f_s=2 \cdot f$	$f_p=f \cdot s \cdot p$	-
Porucha tyčí rotoru	radiální	$f_{tyč}=Q_R \cdot n/60$	-	-
	radiální	$f_s=2 \cdot f$	$f_{sk}=f \cdot s$	-
Zkratované plechy rotoru	radiální	$f_r=n/60$	$f_p=f \cdot s \cdot p$	-

## 4.2 Vibrace mechanického původu

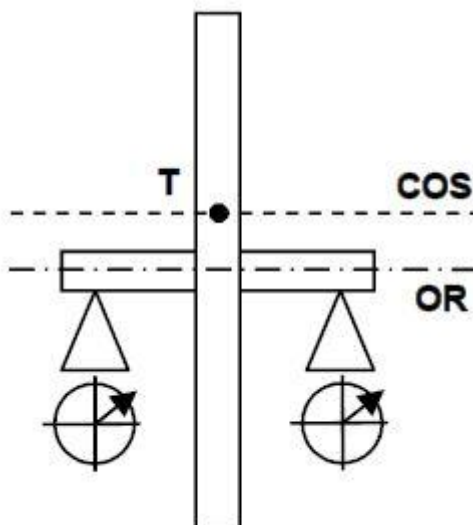
Mechanické vibrace způsobují především ložiska, nevyvážení rotoru, opracování rotujících částí a uložení rotoru. Dále do elektrických strojů vstupují mechanické vibrace z připojených periferií. Mezi tyto vnější vibrace patří vibrující nesouosost spojky, ozubené převody, klínové převody či vibrace způsobené prací připojených zátěží. Níže jsou popsány vibrace způsobeny poruchami rotoru a spojky.

### 4.2.1 Nevyváženost rotoru

Nevyváženost znamená netotožnost osy těžiště a osy rotace rotoru. Jedná se o vibrace sinusového průběhu s jedinou frekvencí a s stejnou amplitudou ve všech radiálních směrech. Amplituda roste v otáčkách blízkých kritickým otáčkám stroje.

#### Statická nevyváženost

Statická nevyváženost vyvolává rovnoběžné posunutí osy setrvačnosti vůči ose rotace rotoru. Vzdálenost posunutí os je rovna posunutí těžiště rotoru. U statické nevyváženosti působí jen jedna síla, kterou je možné pozorovat pootočením rotoru při položení na plochu s minimálním třením.



#### 4-1 Statická nevyváženost (OR -osa rotace, COS-centrální osa setrvačnosti) [9]

Amplitudy statické nevyváženosti jsou na obou ložiscích ve fázi ( $0 \pm 20^\circ$ ). Amplituda se zvětšuje s kvadrátem otáček. První harmonická je přítomna vždy a dominuje ve frekvenčním spektru. Fázový posuv mezi horizontální a vertikálním směrem je  $90^\circ \pm 20^\circ$ . Velikost nevyváženosti je možné zjistit měřením na ložiskových domcích.

Ve frekvenčním spektru se vyskytuje základní frekvence pro kterou platí:

$$f_R = \frac{n}{60} \quad (16)$$

A pro harmonické frekvence:

$$f_k = k \cdot f_R \quad (17)$$

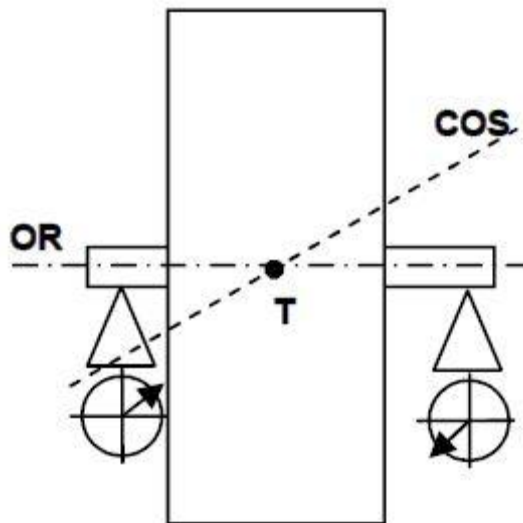
kde je: n otáčky rotoru [1/min]

k celé číslo (řád harmonické)

### Momentová nevyváženost

V tomto případě svírá hlavní osa setrvačnosti s osou rotace určitý úhel. Osy se protínají v těžišti rotoru. Oproti statické nevyváženosti se rotor v klidu jeví jako vyvážený, protože na něj působí dvě totožné síly vzájemně posunuté o  $180^\circ$ . Tyto síly při rotaci posouvají konce hřídele v opačném směru. Následkem těchto sil rotor vibruje a fáze na opačných koncích jsou posunuty o  $180^\circ$ .

Jak už bylo zmíněno momentová nevyváženost má tendenci k posunu fáze o  $180^\circ$  na stejné hřídeli. I v tomto případě ve frekvenčním spektru dominuje první harmonická a její amplituda roste s kvadrátem otáček. Může způsobit velké radiální a axiální vibrace.



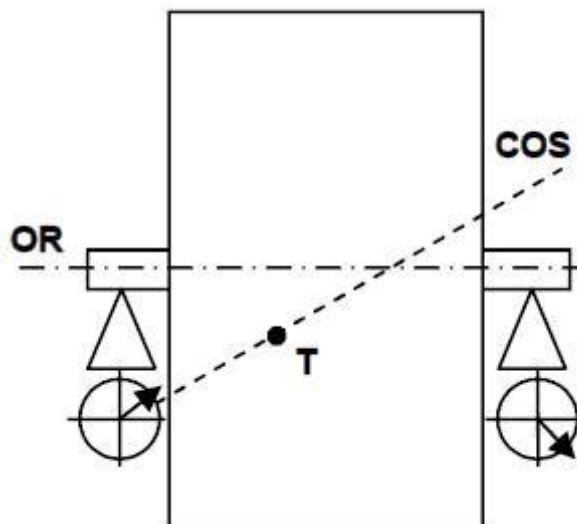
4-2 Momentová nevyváženost (*OR*-osa rotace, *COS*-centrální osa setrvačnosti) [9]

Ve frekvenčním spektru radiálního směru se vyskytují frekvence, pro které platí vztahy (16) a (17).

### Dynamická nevyváženost

Rotory všeobecně vykazují statickou i momentovou nevyváženost. V tomto případě osa setrvačnosti neprotíná osu rotace v těžišti rotoru, ale mimo něj.

Osa setrvačnosti s osou rotoru jsou mimoběžné. Ve fázovém spektru radiálního směru převládá amplituda otáčkové frekvence. Fázový rozdíl je na obou ložiscích stabilní s kolísáním  $\pm 20^\circ$ . Velká nevyváženost způsobuje výskyt amplitudy s frekvencí dvojnásobnou otáčkové.



4-3 Dynamická nevyváženost (*OR*-osa rotace, *COS*-centrální osa setrvačnosti)[9]

Ve frekvenčním spektru radiálního směru se vyskytují frekvence, pro které platí vztahy (16) a (17).

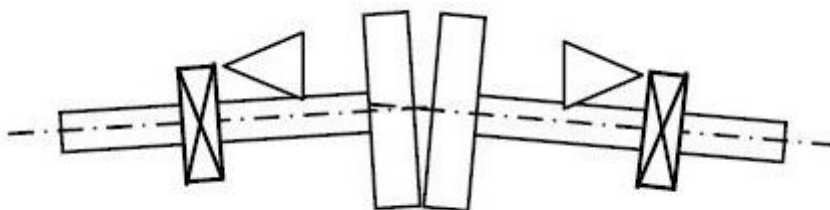
### 4.2.2 Nesouosost

V praxi elektrické stroje spojujeme s poháněnými zařízeními v případě motorických režimů, nebo s pohánějícími stroji v případě generátorů. Mechanickým spojení hřídelů a s tím spojený přenos kroutícího momentu je uskutečněn spojky. V případě nedokonalého spojení vznikají v soustrojí vibrace. Vynucené kmity vlivem nesprávně provedeného nastavení spojek vyvolávají nechtěné zatížení hřídelů, spojek, ložisek. Překročí-li vibrace vlivem nesouososti přípustné tolerance může dojít k nevratnému poškození ložisek, spojek, deformacím hřídelů a celých rotorů.

Chyby spojek vedou k deformacím rotorů a vyvolávají odstředivé síly s frekvencí otáček, jejichž důsledkem je kmitání s otáčkovou frekvencí. Amplitudy kmitání jsou totožné s amplitudami kmitání způsobené nevyvážeností. Rozdíl poznáme až při zkoumání fázového úhlu 1. řádu. V případě, že nesouosost není překryta vibracemi nevyváženosti budou radiální kmity na úložných místech rotoru nesoucího polovinu spojky ve fázi a to v horizontálním i vertikálním směru. V důsledku prohnutého hřídele přibudou v axiálním směru protiběžné kmity.

#### Úhlová nesouosost

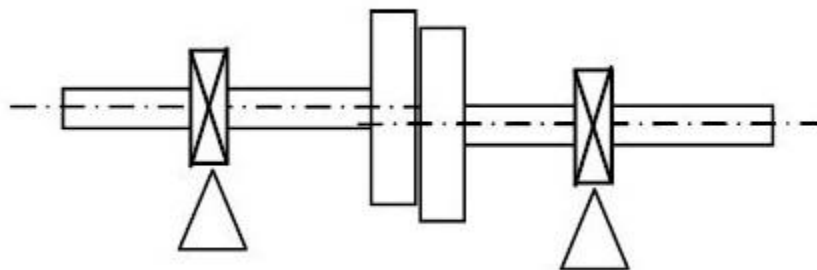
Úhlovou nesouosost charakterizují velké axiální i radiální vibrace. Vibrace na spojce jsou posunuty vzájemně o  $180^\circ$ . V typickém případě jsou velké axiální i radiální vibrace s frekvencí 1. a 2. řádu otáčkové frekvence. Ve frekvenčním spektru jsou i velké amplitudy 3. a 4. harmonické otáčkové frekvence. Rotor elektrického stroje se chová jako nevyvážený.



4-4 Úhlová nesouosost [9]

#### Rovnoběžná nesouosost

Rovnoběžná neboli paralelní nesouosost spojky způsobuje velké vibrace v radiálním směru. Na spojce jsou vibrace v radiálním směru fázově posunuty o  $180^\circ$ . Ovšem vibrace na ložiscích rotoru elektrického stroje jsou ve fázi a rotor se jeví jako nevyvážený. Amplituda dvojnásobné harmonické otáčkové frekvence je obvykle výrazně velká, velikost druhé harmonické je dána typem a konstrukcí spojky. Při velké nesouososti se generují amplitudy s čtyřikrát až osmkrát vyšší harmonické složky otáčkové frekvence.



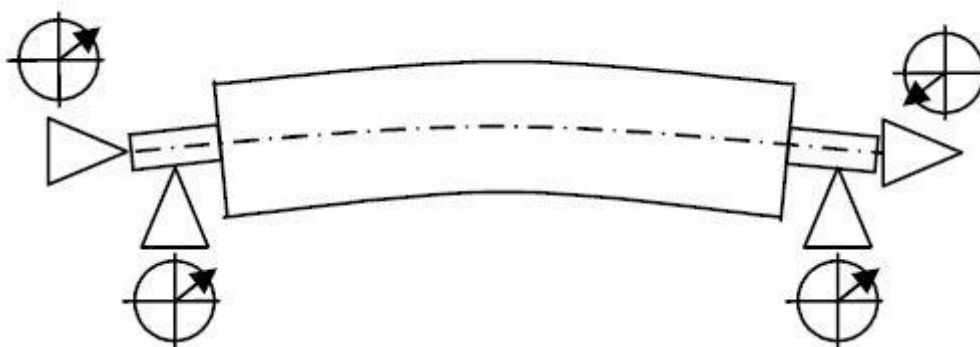
4-5 Rovnoběžná nesouosost [9]

### 4.2.3 Ohnutý hřídel

K ohnutí hřídele může dojít za studena nebo za tepla. Za studena způsobuje ohnutí velký poměr délky a průměru hřídele, manipulace při transportu nebo montáži a také vysokým kroučícím momentem. Za tepla se může hřídel prohnut i vlastní vahou.

Ohnutý hřídel způsobuje nadměrné dynamické namáhání ložisek. U elektrických strojů způsobuje dynamickou změnu vzduchové mezery a tím negativně ovlivňuje funkci elektrického stroje. Při velkém prohnutí může dojít i mechanickému kontaktu rotorového paketu se statorovým a dojít k poškození magnetického obvodu stroje. Tato situace může nastat především u strojů s malou vzduchovou mezerou jako jsou stroje asynchronní.

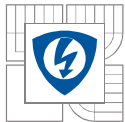
Ohnutý hřídel se při analýze jeví jako nesouosost a je potřeba provést i měření fáze. Ve spektru frekvencí se mohou objevit vyšší hodnoty amplitud pro otáčkovou frekvenci a její dvojnásobek. Hodnota amplitudy pro  $2X$  může být 30% - 200 % amplitudy otáčkové frekvence. Hodnoty fáze v radiálním směru jsou ve fázi, fáze v axiálním směru jsou posunuté o  $180^\circ$ .



4-6 Ohnutý hřídel [9]

### 4.2.4 Mechanické uvolnění

Mechanické uvolnění vzniká přenosem sil přes úložné body nebo pohyblivé body do dalších částí stroje. V těchto místech strojů vznikají vůle vlivem opotřebení, uvolnění spoje, chybné montáže nebo nekvalitní konstrukce. Dynamickým zatížením se tato vůle vymezuje a vzniká výrazně nesinusový pohyb. Mechanické uvolnění je doprovázeno rázovým pohybem, který je průvodním jevem problémů:



- vysoká úroveň vibrací při rezonanci
- nevhodné pružné uložení
- pohyb základů stroje po nerovném povrchu

Ve frekvenčním spektru se mechanické uvolnění projeví dlouhodobým sledem vysokých amplitud vyšších harmonických složek jako jsou  $2x$ ,  $3x$ ,  $4x$  otáčkové frekvence, také na subharmonických složkách  $2/3x$ ,  $1/2x$  a na intreharmonických složkách  $1.5x$ ,  $2.5x$ . Velikost těchto amplitud je vyšší než 20% jejich základní otáčkové frekvence. Nevýhodou při vibrodiagnostice stroje s mechanickým uvolněním je maskování příznaků jiných zdrojů vibrací ve frekvenčním spektru.

Tabulka 3: Souhrn mechanických příčin vibrací

Mechanické příčiny				
Příčina vibrací	Rovina	Základní frekvence vibrací	Harmonické frekvence	Fázový posuv na ložiscích
Statická nevyváženost	radiální	$f_r=n/60$	-	$0^\circ$
Momentová nevyváženost	radiální	$f_r=n/60$	-	$180^\circ$
Dynamická nevyváženost	radiální	$f_r=n/60$	$2X,$	obecný
Úhlová nesouosost	radiální	$f_r=n/60$	$2X, 3X,$	$180^\circ$
	axiální	$f_r=n/60$	$2X, 3X,$	$0^\circ$ , na spojce $180^\circ$
Rovnoběžná nesouosost	radiální	$f_r=n/60$	$2X, 3X,$	$0^\circ$ , na spojce $180^\circ$
Ohnutý hřídel	radiální	$f_r=n/60$	$2X, 3X,$	$0^\circ$
	axiální	$f_r=n/60$	$2X, 3X,$	$180^\circ$
Mechanické uvolnění	radiální	$f_r=n/60$	$1X, 2X, 3X,..$ $0.5X, 1.5X,..$	-

## 5 VIBRODIAGNOSTIKA ELEKTRICKÝCH STROJŮ

Vibrodiagnostikou zjišťujeme technický stav mechanické i elektrické části elektrických strojů. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, každá porucha budí vibrace o určitém kmitočtu. Abychom mohli odhalit vzniklou poruchu stroje musíme změřit a analyzovat frekvenční spektrum vibrací. Samotné analýze frekvenčního spektra předchází měření průběhu vibrací. Před měřením elektrického stroje si musíme uvědomit jaký stroj budeme měřit a jaké vibrace resp. jaké frekvence vibrací můžeme očekávat.

Před analýzou je důležité zjištění následujících technických parametrů:

- napájecí napětí
- frekvence napájení
- otáčky stroje
- počet pólů stroje
- počet drážek statoru a rotoru
- skluz
- schéma měřicích bodů

Při měření vibrací elektrických strojů musíme rozlišit zda se jedná o mechanickou či elektrickou příčinu vibrací. Jednoduchým způsobem, jak zjistit o jakou příčinu se jedná, je odpojení stroje od elektrické sítě. Zmizí-li vibrace po odpojení od elektrické energie, jedná se o vibrace elektrického původu. Pokud vibrace zůstanou, případně se mění s doběhem stroje, jedná se o vibrace mechanického původu. K tomuto způsobu rozlišení vibrací je nutno podotknout nutnost odpojení i napájení budících vinutí u generátorů případně motorů s budícím vinutím. Pro další rychlé rozlišení původu vibrací z frekvenčního spektra můžeme použít následující body:

- vyskytuje-li se dvojnásobek napájecí frekvence jedná se o statickou excentricitu nebo závadu statorového vinutí
- otáčková frekvence s postranými pásy jedná se o dynamickou excentricitu nebo poruchu vinutí rotoru
- otáčková frekvence, případně její harmonické násobky jedná se o mechanickou závadu

### **Teoretické průběhy pro jednotlivé poruchy**

Vypočtené teoretické frekvence nebudou vždy stejné se skutečnými změřenými a patrnými ve frekvenčním spektru. Důvody odchylek jsou tři:

1. Skluz - otáčky stroje se mohou lišit od jmenovitých i v průběhu měření vibrací a tím i skluz
2. Frekvence - napájecí frekvence stroje nemusí být vždy přesně např. 50 Hz
3. Fast Fourier Transform - chyba dána počtem spektrálních čar při Rychlé Fourierově transformaci (FFT)

## 5.1 Analýza vibrací v časové oblasti

Princip analýzy v časové oblasti naměřeného signálu spočívá ve vyhodnocení parametrů popisující časový průběh signálu. Základní parametry pro popis signálu v časové oblasti jsou popsány a definovány na začátku této práce. Mezi tyto parametry patří především efektivní hodnota signálu (RMS), amplituda signálu, perioda, střední hodnota a rozkmit špička-špička. Nejpoužívanější parametr je RMS hodnota, která je spjata s energií vibrací a je nazývána mohutností vibrací. RMS hodnota popisuje schopnost vykonávat efektivní práci vibrací. Mohutností vibrací jsou i normami stanovené dovolené meze vibrací jednotlivých skupin strojů, jak bude uvedeno dále.

Analýza vibrací v časové oblasti je vhodná pro přechodné jevy, jako jsou rozběhy a doběhy motoru. Dále je možné analýzu v časové oblasti využít pro zjištění trendu vibrací. Jinými slovy jestli se vibrace nacházejí na stejné úrovni jako v předcházejícím měření či se zhoršují.

### Přípustné hodnoty vibrací

Norma ČSN EN 60034-14 ed. 2 stanovuje postupy pro měření vibrací při výrobní přejímání zkoušce a mezní hodnoty vibrací pro určité elektrické stroje za stanovených podmínek, jsou-li tyto stroje odpojeny od jakékoliv zátěže nebo hnacího stroje. Platí pro stejnosměrné a trojfázové střídavé stroje s výškou osy od 56 mm a se jmenovitým výkonem do 50 MW, s provozními otáčkami od 120 min<sup>-1</sup> do 15 000 min<sup>-1</sup>.

Tabulka 4: Tabulka mezních hodnot vibrací dle ČSN EN 60034-14

ČSN EN 60034-14										
Výška osy	mm	56≤h≤132			132≤h≤280			280<h		
Stupeň vibrací	Uložení	s	v	a	s	v	a	s	v	a
		μm	mm/s	mm/s <sup>2</sup>	μm	mm/s	mm/s <sup>2</sup>	μm	mm/s	mm/s <sup>2</sup>
A	Pružné	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8	4,4
	Pevné	21	1,3	2	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Pružné	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Pevné	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Pozn.: A - stroje bez zvláštních požadavků na vibrace

B - stroje se zvláštními požadavky na vibrace

Norma ČSN ISO 10816-3 stanovuje kritéria pro posouzení úrovní vibrací, když jsou měření prováděna in situ. Specifikovaná kritéria platí pro soustrojí s výkonem nad 15 kW a provozními otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min.

Tabulka 5: Kritéria vibrací dle ČSN ISO 10816-3

ČSN ISO 10816-3			Skupina 1		Skupina 2	
Typ stroje			Velké stroje 300 kW < P < 50 MW		Stroje střední velikosti 15 kW < P < 300 kW	
			Elektromotory h > 315 mm		Elektromotory 160 mm < h < 315 mm	
Uložení			Pružné	Tuhé	Pružné	Tuhé
Rychlost $v_{ef}$	mm/s	11,0	<b>D</b>			
			<b>C</b>			
		7,1				
		4,5				
			<b>B</b>			
		3,5				
		2,8				
		2,3				
		1,4	<b>A</b>			

Pozn.: A - Nově přejímané stroje

B - Neomezený dlouhodobý provoz

C - Omezený provoz

D - Riziko poškození

Kritéria uvedená v této části ISO 10816 platí pro měření širokopásmových vibrací in situ na ložiskách, ložiskových stojanech nebo tělesech strojů zapojených do soustrojí za ustálených provozních podmínek v rozsahu jmenovitých provozních otáček. Vztahují se jak na přijímací zkoušky, tak na provozní monitorování. Kritéria platí jen pro vibrace vytvářené samotným soustrojím a ne pro vibrace přenášené na soustrojí z vnějších zdrojů.

### Činitel výkmitu

Činitel výkmitu (Crest factor) je poměr amplitudy a efektivní hodnoty signálu.

$$CF = \frac{A}{A_{RMS}} \quad (18)$$

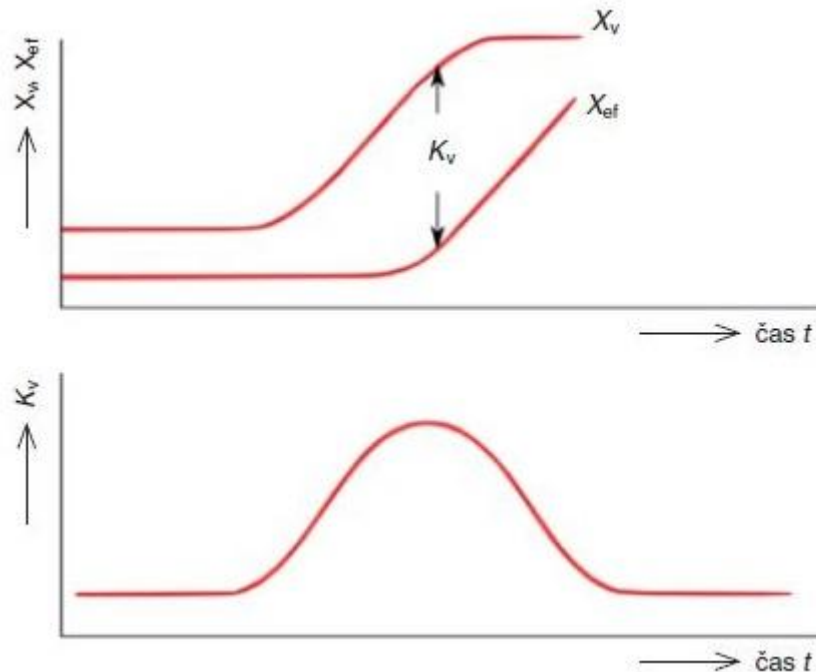
kde je: A            amplituda signálu

$A_{RMS}$             efektivní hodnota signálu

Metoda činitele výkmitu je rychlá a levná, ale na druhou stranu nepřesná při stanovení stupně poškození. Zvýšená hodnota crest factoru upozorňuje na začínající problém v monitorovaném

stroji. Princip naznačuje obrázek 5-1, kdy extrém poměru mezi ustalující se amplitudou veličiny a k ní se přibližující efektivní hodnotou informuje o počátku poškození.

Činitel výkmitu je metoda využívaná především při obchůzkovém měření stavu ložisek strojů.



5-1 Princip Crest Factoru[14]

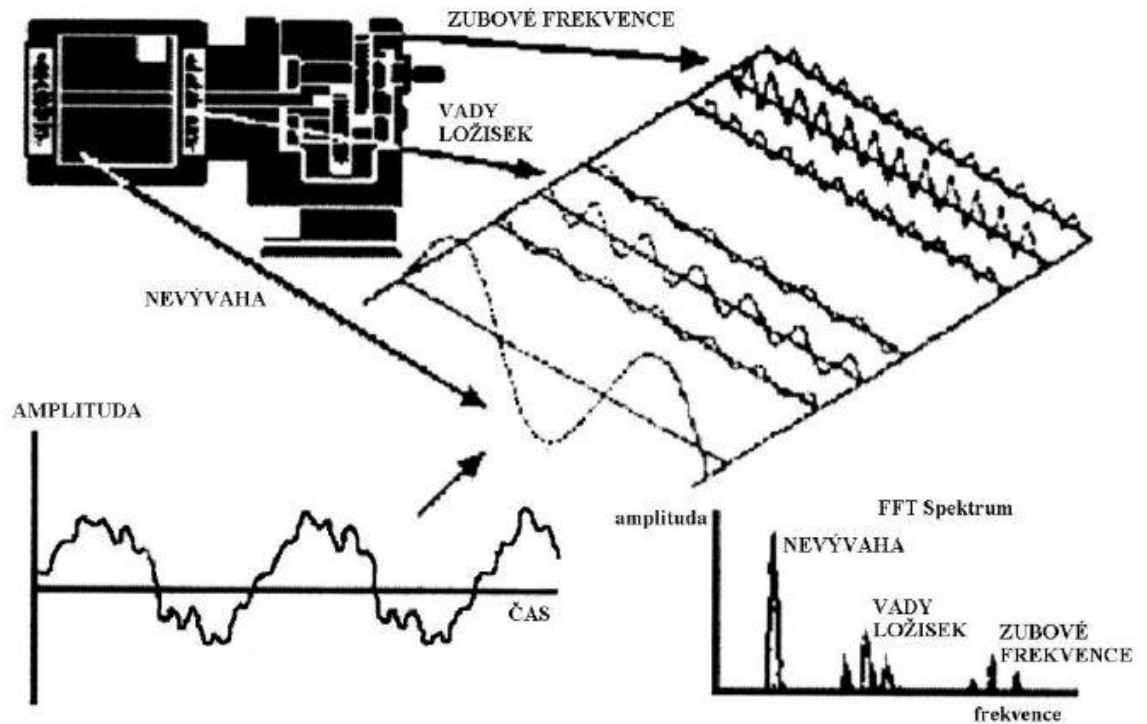
## 5.2 Analýza vibrací ve frekvenčním spektru

Frekvenční analýza je základním nástrojem vibrodiagnostiky. Umožňuje pomocí FFT (Fast Fourier Transform - Rychlá Fourierova transformace) rozložit naměřený signál na jednotlivé složky, které zobrazí v grafu - frekvenčním spektru daného signálu. Frekvenční spektrum je graf o souřadnicích frekvence (osa x) - amplituda (osa y).

Porovnání očekávaných frekvencí jednotlivých poruch s frekvenčním spektrem skutečných vibrací nabízí diagnostikovi možnosti zjištění poruch analyzovaného stroje. Takovou to analýzu můžeme rozdělit do tří oblastí. Oblast nízkých frekvencí kde se objevují frekvence spjaté s otáčkami hřídele a tedy s mechanickými poruchami typu nevyváženosti, nesouososti apod. Tato oblast se nachází v okolí frekvence otáčení rotoru až do několikanásobku této frekvence. Na tuto oblast navazují střední kmitočty, ve kterých se objevují frekvence spjaté s elektrickými poruchami. Jedná se o spektrum do 1 kHz. Třetí oblastí jsou vysoké frekvence. Na těchto frekvencích se vyskytují poruchy ložisek a převodů.

Pro každou výše pojmenovanou oblast je důležité analyzovat správnou veličinu vibrací. Pro nízké a střední kmitočty se nejlépe hodí analyzovat rychlost vibrací. Řádově se jedná o vibrace od 10 Hz do 1 000 Hz. V této oblasti jsou i normou stanovené dovolené hodnoty vibrací, jak je popsáno v kapitole 5.1. Pro oblast vyšších kmitočtů a analýzu ložisek a převodů je potřeba použít zrychlení vibrací.

Princip analýzy vibrací pomocí frekvenčního spektra představuje obrázek 5-2.



5-2 Princip frekvenční analýzy[5]

V souvislosti s frekvenční analýzou je potřebné uvést následující termíny, které jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 6: Rozdělení frekvencí

Veličina	Popis
<b>Základní budící frekvence</b>	-zásadní pro identifikaci poruchy -odpovídá budícím frekvencím vypočteným pro jednotlivé poruchy
<b>Harmonické frekvence k základní frekvenci</b>	-celčíselným násobkem základní frekvence -důsledkem odchylek časového průběhu od tvaru funkce $\sin(t)$ -velikost amplitud ve vztahu k základní frekvenci je příznakem poškození
<b>Subharmonické frekvence</b>	-celočíslným podílem základní frekvence -velikost amplitud ve vztahu k základní frekvenci je příznakem poškození
<b>Interharmonické frekvence</b>	-necelčíselným podílem základní frekvence -modou být způsobený signálem z neznámého zdroje -vyskytují se v pokročilém stádiu poškození
<b>Frekvence na postranních pásmech</b>	-rozprostírají se kolem základní nebo harmonické složky -vzdáleny od složky o konstantní vzdálenost na obě strany -jejich amplituda se vzdáleností od nosné složky klesá -jsou příznakem stádia poškození
<b>Spojité pásmo</b>	-pásmo obsahuje všechny složky s přibližně stejnou energií -dáno především přítomností tření, kavitace, proudění tekutin a plynů

## 6 PRAKTICKÁ ČÁST

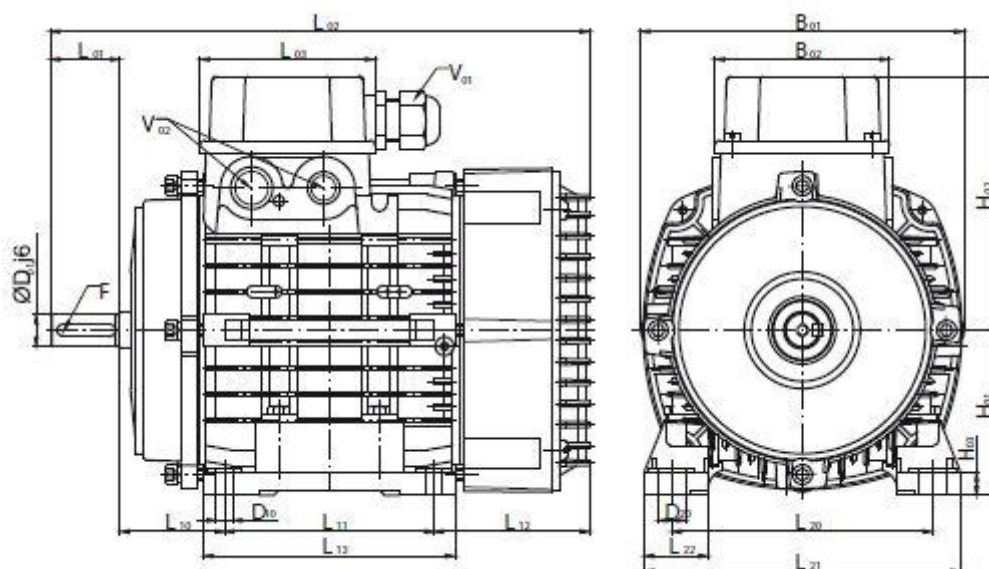
Praktická část se skládá z měření vibrací na konkrétních elektromotorech s danou poruchou a z následné analýzy a vyhodnocení naměřených dat a definování poruch zmíněných elektromotorů.

### Diagnostikované elektromotory

Měření bylo provedeno v prostorách fakulty na čtyřech shodných trojfázových elektromotorech. Jednalo se o čtyřpólové asynchronní stroje o výkonu 1,1 kW od výrobce EMP Slavkov u Brna typu TM90-4S B3 jejichž štítkové údaje uvádí následující tabulka.

Tabulka 7: Štítkové hodnoty motoru TM90-4S

Typ	TM90-4S B3	
Jmenovitý výkon	kW	1,1
Jmenovité otáčky	1/min	1380
Jmenovitá účinnost	%	79
Jmenovitý účinník	-	0,79
Jmenovitý proud	A	2,64
Jmenovitý moment	Nm	7,6
Jmenovité napětí	V	400
Třída krytí	-	IP54



6-1 Motor TM90-4S [16]

Tento typ motoru je vyráběn v osové výšce  $H_{01}=90$  mm. Pro případnou identifikaci motorů uvádí následující tabulka výrobní čísla konkrétních motorů.

Tabulka 8: Výrobní čísla motorů

Motor	No.	SAP
Motor 1	00252114	001000199344-0000
Motor 2	00252113	001000199343-0000
Motor 3	00252112	001000199342-0000
Motor 4	00000111	001000199345-0000

## Měření

Měření bylo prováděno na motorech, které byly uloženy pružně na laboratorním stole. měřené motory byly připojeny k síti 230/400 V 50 Hz a byly spuštěny naprázdno.

Vibrace byly snímány ve dvou bodech orientovaných ve dvou směrech - radiálním a axiálním. Ke snímání vibrací byly použity dva shodné akcelerometry. Jeden označen písmenem A (označení vychází ze značení kanálů měřicího přístroje) v radiálním směru, který byl upevněn pomocí šroubu ke kostře statoru. K přišroubování sondy A byla využita díra se závitem v krytu svorkovnice motoru. Druhý akcelerometr byl označen jako B a snímal vibrace v axiální rovině. K motoru byl připevněn pomocí magnetického nástavce. Pomocí magnetického nástavce byl přichycen ke šroubu, kterým je uchycen štít motoru ke kostře statoru na volné straně motoru.

Naměřené signály vyhodnocoval a ukládal v časové oblasti přístroj VIBXPERT II. Jedná se přístroj firmy Prüftechnik. VIBXPERT II je vysoce moderní měřicí přístroj, který skýtá spoustu možností a využití ve vibrodiagnostice.

V následující tabulce jsou uvedeny otáčky jednotlivých motorů, při kterých byly změřeny výchylky, rychlosti a zrychlení vibrací pomocí přístroje VIBXPERT II. Otáčky byly změřeny přístrojem tachometrem DT-2236. Otáčky byly změřeny kontaktním způsobem.



6-2 Fotografie měřicího místa

Tabulka 9: Otáčky měřených elektromotorů

Motor	n
	min <sup>-1</sup>
<b>Motor 1</b>	1495
<b>Motor 2</b>	1490
<b>Motor 3</b>	1494
<b>Motor 4</b>	1495

### Očekávané vibrace

Před samotnou analýzou naměřených hodnot, bylo nutné vypočítat očekávané budicí frekvence možných poruch. Všechny vzorce podle kterých jsou očekávané frekvence vypočítány jsou uvedeny v kapitole 4. Výpočet byl proveden pomocí programu MATLAB. Jako vstupní hodnoty pro výpočty byly použity parametry diagnostikovaných strojů, tyto parametry jsou uvedeny na začátku 5. kapitoly. Šítkové údaje měřených motorů je třeba doplnit o počty drážek rotoru a statoru a o hodnotu otáček rotoru. Počet drážek rotoru je 28 a počet drážek statoru je 32. Protože motory byly měřeny ve stavu naprázdno blížily se jejich otáčky otáčkám synchronním. Očekávané hodnoty frekvencí poruch jsou vypočítány pro otáčky 1495 1/min. Frekvence mechanických poruch jsou vypočteny pouze pro nevyváženosti rotoru, protože jiné mechanické poruchy se u motoru nepřipojeného k zátěži nemohou projevit.

 Tabulka 10: Teoretické frekvence elektrických poruch ( $Q_R=28$ ;  $n=1495 \text{ min}^{-1}$ )

	Frekvence	Postranní pásma na frekvenci		Komponenty na frekvenci					
	Hz	Hz	Hz	Hz					
<b>Statická excentricita</b>	100	-	-	597	697	797	897	997	-
<b>Zkratované plechy statoru, rozdílné odpory fází</b>	100	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Volné železo</b>	100	-	-	700	800	900	1100	1200	1300
<b>Dynamická excentricita</b>	24.9	0.33	-	672	722	772	822	872	922
	100	0.33	-	-	-	-	-	-	-
<b>Porucha tyčí rotoru</b>	697.6	-	-	-	-	-	-	-	-
	100	0.16	-	-	-	-	-	-	-
<b>Zkratované plechy rotoru</b>	24.9	0.33	-	-	-	-	-	-	-

Tabulka 11: Teoretické frekvence mechanických poruch ( $n=1495 \text{ min}^{-1}$ )

	Frekvence	Vyšší harmonické					Rovina
	Hz	Hz					
<b>Statická nevyváženost</b>	25	-	-	-	-	-	radiální
<b>Momentová nevyváženost</b>	25	-	-	-	-	-	radiální
<b>Dynamická nevyváženost</b>	25	50	-	-	-	-	radiální

## 6.1 Analýza v časové oblasti

V rámci diplomové práce je analýza v časové oblasti zaměřena pouze na stanovení efektivních hodnot výchylky, rychlosti a zrychlení vibrací a následnému vyhodnocení vůči normám. Výsledné hodnoty jsou porovnány pouze z normou 60034-14, protože se jednalo o měření motoru v režimu naprázdno.

Efektivní hodnoty byly vypočítány podle následujícího vzorce.

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i^2} \quad (19)$$

kde je: a                      okamžitá hodnota veličiny

$a_{RMS}$                       efektivní hodnota veličiny

V programu MATLAB byl výpočet proveden pomocí následujícího scriptu:

```
%RMS
vefvA=sqrt(mean(v_A.^2))
vefvB=sqrt(mean(v_B.^2))
vefxA=sqrt(mean(x_A.^2))
vefxB=sqrt(mean(x_B.^2))
vefaA=sqrt(mean(a_A.^2))
vefaB=sqrt(mean(a_B.^2))
```

Vypočtené výsledky uvádí následující tabulka. V tabulce 12 jsou pro porovnání uvedeny i limitní hodnoty veličin dle normy ČSN EN 60034-14.

Z tabulky 12 vyplývá, že v případě efektivních hodnot výchylky a zrychlení vibrací motory vyhovují limitním hodnotám normy ČSN EN 60034-14. V případě efektivní hodnoty rychlosti vibrací, nebo-li mohutnosti vibrací nevyhovuje normě ČSN EN 60034-14 ani jeden motor. Motory 1, 3 a 4 nevyhovují normě v žádném směru. Motor 2 nevyhovuje pouze ve směru radiálním. Nejvyšší mohutnosti vibrací dosahuje v radiálním směru motor 1 a ve směru axiálním motor 4. Oba motory v těchto rovinách dosahují stejných hodnot efektivní rychlosti 2,12 mm/s. Nejnižší mohutnosti vibrací v radiálním směru dosahuje motor 3 a ve směru axiálním motor 2. V případě motoru 3 je hodnota mohutnosti vibrací 1,67 mm/s a blíží se tak k normou stanovené mezní hodnotě.

Tabulka 12: Vypočtené hodnoty RMS v porovnání s normou ČSN EN 60034-14

Motor	Rovina	s	v	a
		μm	mm/s	mm/s <sup>2</sup>
Motor 1	Radiální	13.13	2.12	1.54
	Axiální	14.62	2.08	0.36
Motor 2	Radiální	10.17	1.88	2.02
	Axiální	9.41	1.37	0.51
Motor 3	Radiální	9.96	1.67	1.46
	Axiální	13.04	1.82	0.43
Motor 4	Radiální	10.13	1.87	1.83
	Axiální	15.72	2.12	1.17
Norma*		25	1.6	2.5

Pozn.: \* Hodnoty platí pro pružné uložení, stupeň vibrací A a osovou výšku  $56 \leq h \leq 132$

### Činitel výkmitu

I když analýza vibrací ložisek a jejich případných poruch není předmětem diplomové práce je zde nastíněn princip *crest factoru* (CF) (viz. kapitola 5.1). V této části je ukázka numerického zpracování a vyhodnocení stavu ložisek analyzovaných motorů v rámci diplomové práce.

Z naměřených časových průběhů zrychlení vibrací byly vypočítány pomocí programu MATLAB hodnoty crest factoru pro jednotlivé roviny každého motoru. Výpočet byl proveden podle vztahu 16. Nejprve se musela vypočítat RMS hodnota zrychlení naměřených vibrací a vyhledat amplituda daného signálu zrychlení. RMS hodnota zrychlení je vypočítána podle vztahu (17).

V programu MATLAB byl výpočet proveden pomocí následujícího scriptu:

```
%RMS hodnota
aefaA=sqrt(mean(a_A.^2))
aefaB=sqrt(mean(a_B.^2))
%CF
cfaA=max(a_A)/aefaA
cfaB=max(a_B)/aefaB
```

V následující tabulce 13 jsou uvedeny odečtené amplitudy zrychlení a vypočtené RMS hodnoty a výsledný činitel výkmitu.

Při posouzení hodnot crest factoru je zřejmé, že ložiska motorů nejsou postižena počínající poruchou. Tento jednoduchý závěr plyne z nízkých hodnot činitele výkmitu. Bezporuchové ložiska dosahují hodnot CF kolem 3,0 až 3,5. V případě měřených motorů nejvyšší hodnoty dosahuje motor 3 v axiálním směru, kdy jeho hodnota CF je 3,23.

Tabulka 13: Tabulku činitele výkmitu

Motor		$a_{RMS}$	$a_{max}$	CF
		mm/s <sup>2</sup>	mm/s <sup>2</sup>	-
Motor 1	Radiální	1.54	3.68	2.38
	Axiální	0.36	1.04	2.87
Motor 2	Radiální	2.03	4.55	2.24
	Axiální	0.51	1.62	3.16
Motor 3	Radiální	1.46	3.72	2.55
	Axiální	0.43	1.38	3.23
Motor 4	Radiální	1.83	5.17	2.83
	Axiální	1.17	3.38	2.89

## 6.2 Analýza ve frekvenční oblasti

Pro bližší zkoumání příčin vibrací elektrických strojů je potřeba provést analýzu ve frekvenční oblasti. Jelikož vibrace byly měřeny na nezátížených strojích, mohou se u nich vyskytovat pouze elektrické poruchy a z mechanických poruch pouze nevyváženosti rotoru. Z tohoto důvodu byla provedena FFT rychlostí vibrací a zobrazeno frekvenční spektrum v rozsahu 0 - 1 000 HZ. V tomto rozsahu se mohou vyskytovat frekvenční složky reprezentující dané poruchy. Pro takovou analýzu, kdy jsou zkoumány především elektrické příčiny, jsou důležité spektra v radiálním směru.

Frekvenční analýza byla provedena pomocí programu MATLAB do kterého byly importovány hodnoty rychlostí vibrací získané při měření pomocí přístroje VIBXPRT II. V programu MATLAB byl použit následující script pro výpočet frekvenčních spekter:

```

Fs = 16384;
L = length(t_v);
NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
Y = fft(v_A,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);
% Plot single-sided amplitude spectrum.
figure(3)
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
grid on
title('\fontsize{14}Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru
2 - radiální směr')
xlabel('\fontsize{12}f[Hz]')
ylabel('\fontsize{12}|v| [mm/s]')
xlim([0 1100])
ylim([0 3])
    
```

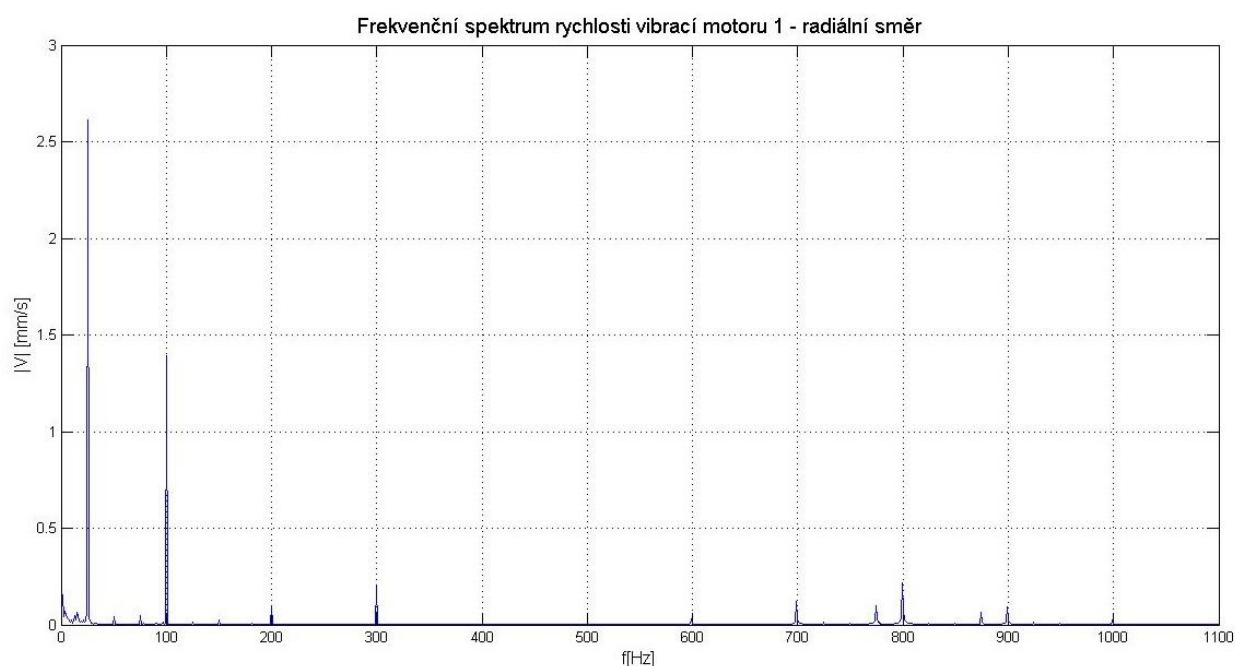
Kde se do proměnné  $NFFT$  ukládá hodnota, která určuje počet frekvenčních čar vypočítaných algoritmem FFT (Fast Furier Transform). Hodnota  $NFFT$  je libovolná mocnina dvou kvůli principu výpočtu algoritmu FFT, který spočívá v dělení transformace v každém kroku na dvě stejné části. Libovolná mocnina dvou zajišťuje dělitelnost dvěma bez zbytku. Hodnota  $L$

je počet analyzovaných dat, v našem případě počet naměřených hodnot rychlosti vibrací. Hodnota  $L$  je v našem případě 16384 a tato hodnota je rovna  $2^{14}$ .

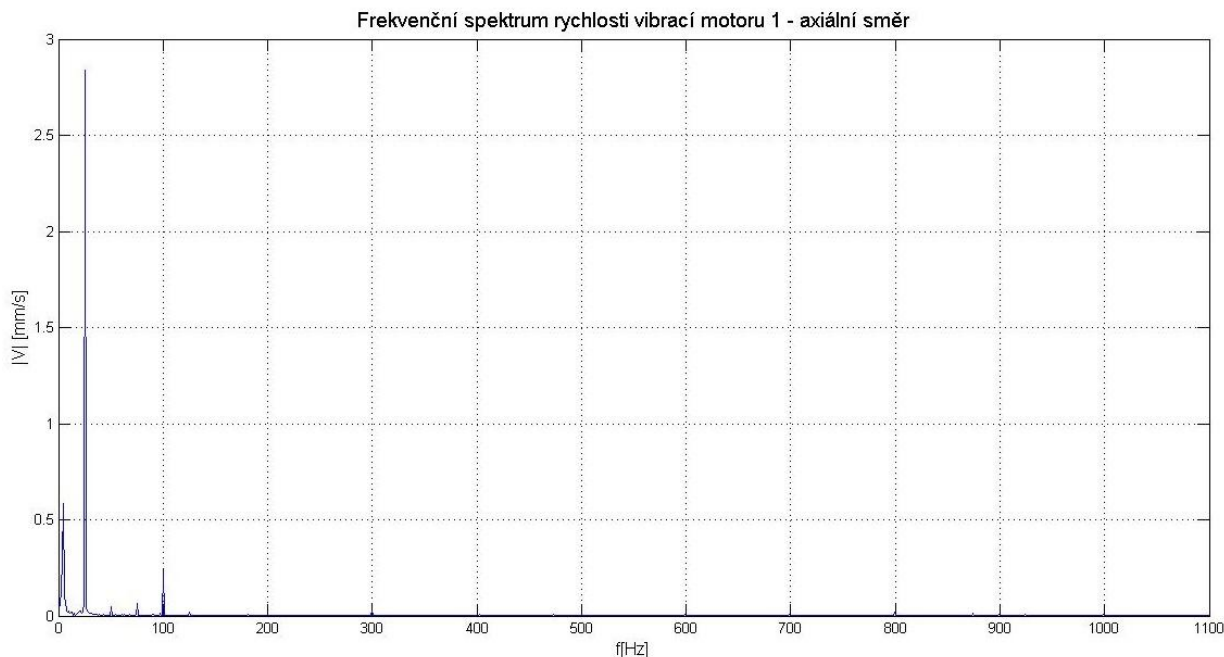
Proměnou  $Y$  je vektor, který je shodně velký s  $NFFT$  a je určen k FFT. Shodnou velikostí je zajištěno doplnění chybějících hodnot nulami programem MATLAB. Výsledkem funkce  $fft$  jsou komplexní hodnoty a zápis  $2 * \text{abs}(Y(1:NFFT/2+1))$  převádí komplexní hodnoty na absolutní. Zároveň tyto hodnoty násobí dvěma, aby bylo dosaženo maximální hodnoty dané harmonické složky. Násobení dvěma je prováděno z důvodu, že hodnoty v druhé polovině frekvencí jsou zrcadlové a mají stejnou velikost jako hodnoty v první polovině frekvencí.

## Výsledky

### Motor 1



6-3 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 1 - radiální směr



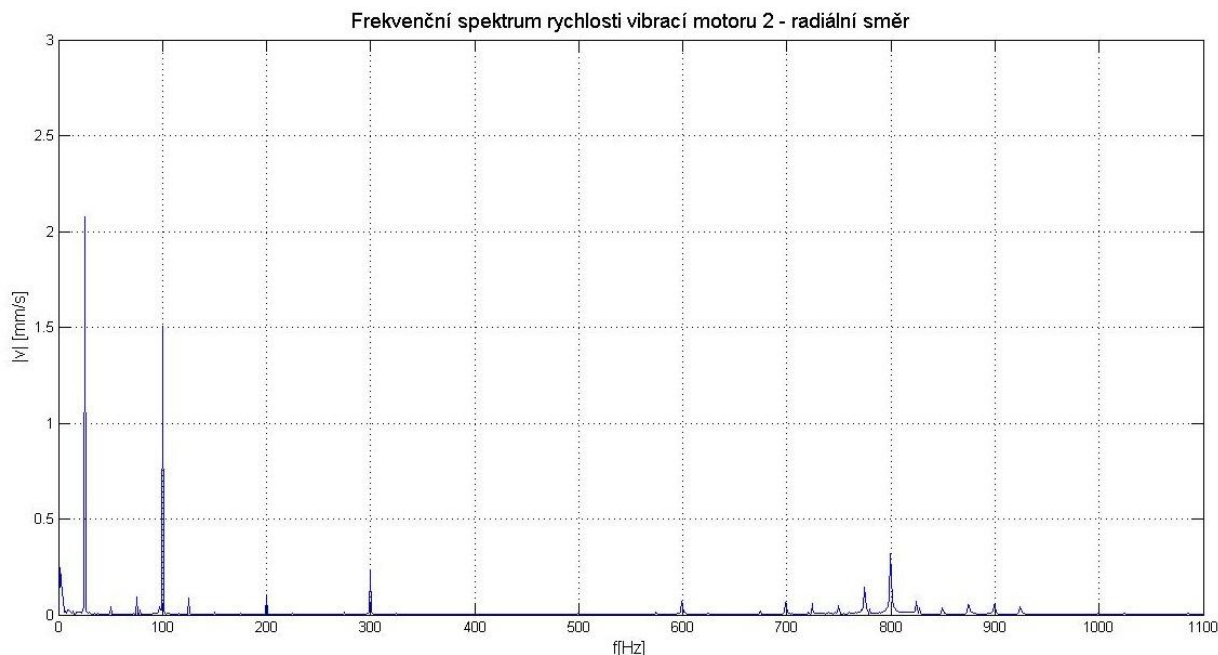
#### 6-4 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 1 - axiální směr

Frekvenční spektrum radiálního směru motoru 1 obsahuje dominantní amplitudu na frekvenci 25 Hz, tuto frekvenci lze považovat za otáčkovou. Vibrace na otáčkové frekvenci obsahují i "zdravé" stroje, které vyhovují limitujícím hodnotám norem, ale amplituda této složky u nich nedosahuje takovéto velikosti. Zvýšená amplituda otáčkové frekvence reprezentuje poruchu mechanického charakteru. V tomto případě lze předpokládat, že by rotor mohl být poškozen některým typem nevyváženosti. Typ ovšem nelze stanovit neboť nebylo provedeno měření fáze vibrací na ložiskách stroje.

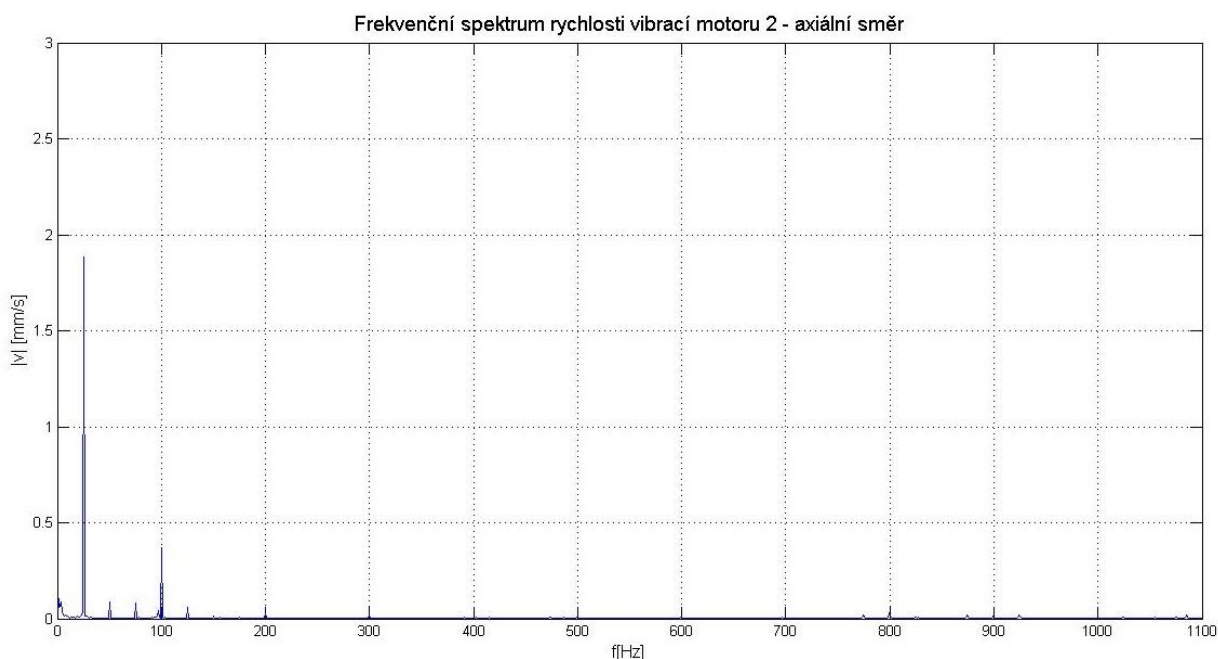
Další zvýšenou amplitudu obsahuje v radiálním směru složka na frekvenci 100 Hz jedná se o dvojnásobek napájecí frekvence motoru (v tomto případě 50 Hz). Tato složka reprezentuje některou z elektrických poruch. Protože tato složka je doplněna komponenty na frekvencích 700 Hz, 800 Hz a 900 Hz lze určit, že se jedná o statickou excentricitu. Frekvenční spektrum obsahuje složky na frekvencích 200 Hz a 300 Hz. Jedná se o násobky frekvence 100 Hz. Tyto složky jsou patrné i u dalších motorů a představují konstrukční poruchu, či spíše nedokonalost daného typu motoru a reprezentují deformované magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře.

Frekvence působící především v radiálním směru se odrážejí i ve směru axiálním, jedná se především o dominantní frekvence 25 Hz a 100 Hz. Tyto vibrace jsou do axiální roviny přenášeny konstrukcí stroje a také způsobem ustavení měřeného stroje, kdy měřené motory byly uloženy pružným způsobem.

**Motor 2**



*6-5 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 2 - radiální směr*



*6-6 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 2 - axiální směr*

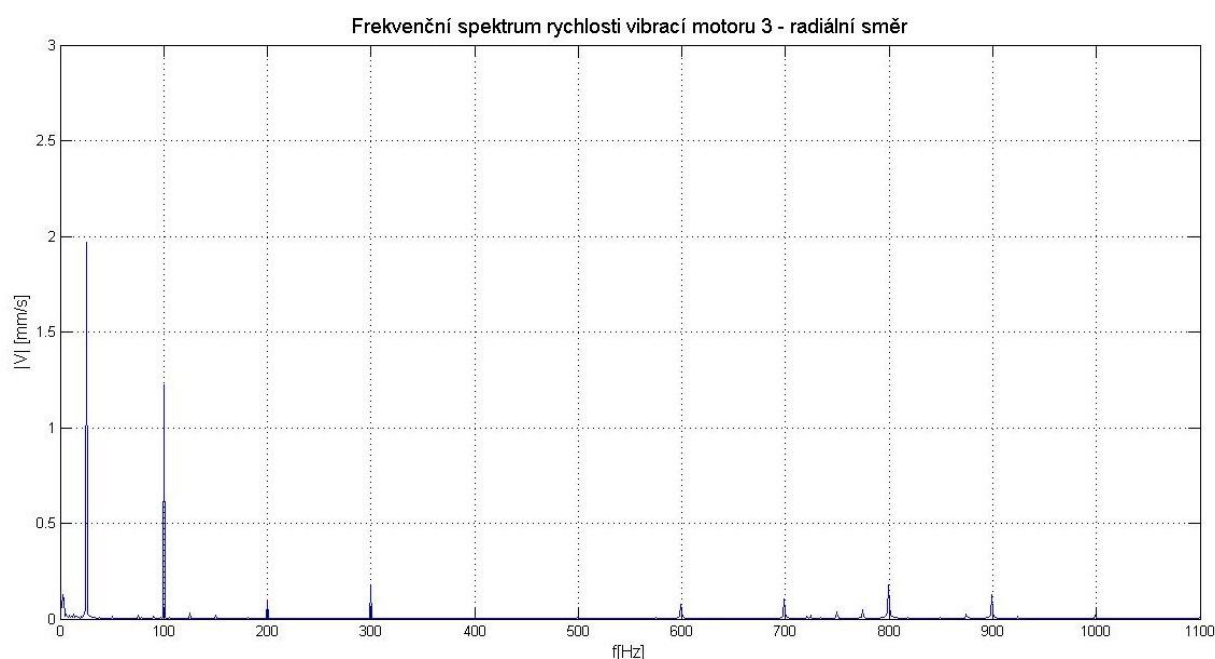
Frekvenční spektrum radiálního směru motoru 2 obsahuje také dominantní amplitudu na otáčkové frekvenci 25 Hz, tato amplituda je však oproti motoru 1 menší. Díky této frekvenci lze soudit, že motor je postižen některým typem nevyváženosti. Typ nejde určit ze stejného důvodu jako v případě motoru 1.

I u tohoto motoru se objevuje složka na frekvenci 100 Hz, která reprezentuje elektrickou poruchu. Frekvence na 100 Hz je obklopena postranními pásmy o otáčkové frekvenci. Pásmo jsou na frekvencích 75 Hz a 125 Hz. Postranní pásma o stejné frekvenci rovné otáčkové se

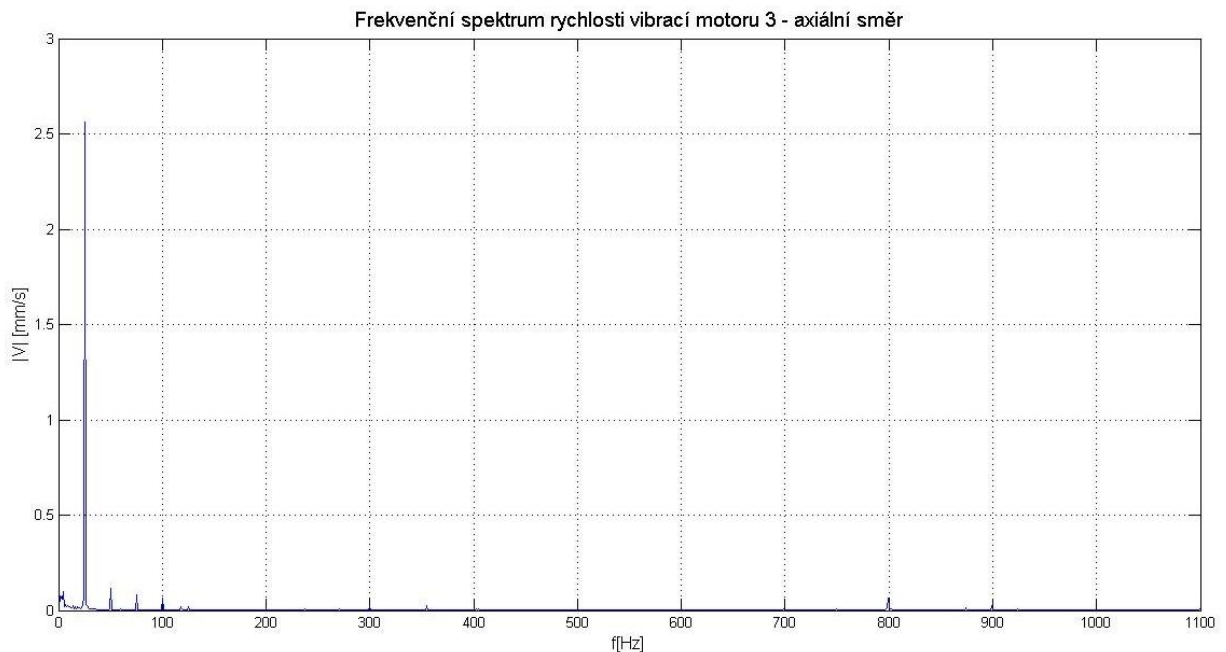
vyskytují i kolem frekvence 800 Hz. Kolem této frekvence je mnohem větší četnost těchto postraních pásem, z každé strany složky na 800 Hz je jich pět. Vzhledem k tomuto projevu frekvenčního spektra v radiální rovině lze určit, že motor 2 je postiženou dynamickou excentricitou. Zároveň jsou patrné i složky na frekvencích 200 Hz a 300 Hz. Tyto složky představují deformované magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře, jak již bylo popsáno u motoru 1.

Frekvence působící především v radiálním směru se odrážejí i u tohoto motoru ve směru axiálním, jedná se především o dominantní frekvence 25 Hz a 100 Hz. Tyto vibrace jsou do axiální roviny přenášeny konstrukcí stroje a také způsobem ustavení měřeného stroje, kdy měřené motory byly uloženy pružným způsobem.

### **Motor 3**



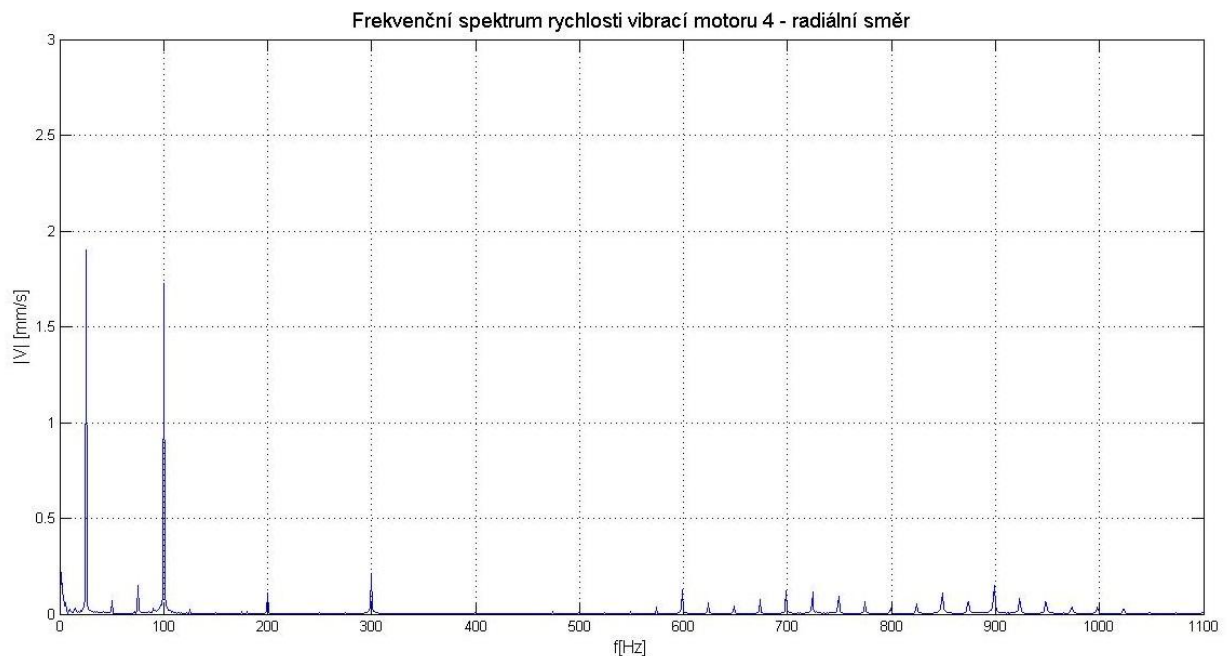
*6-7 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 3 - radiální směr*



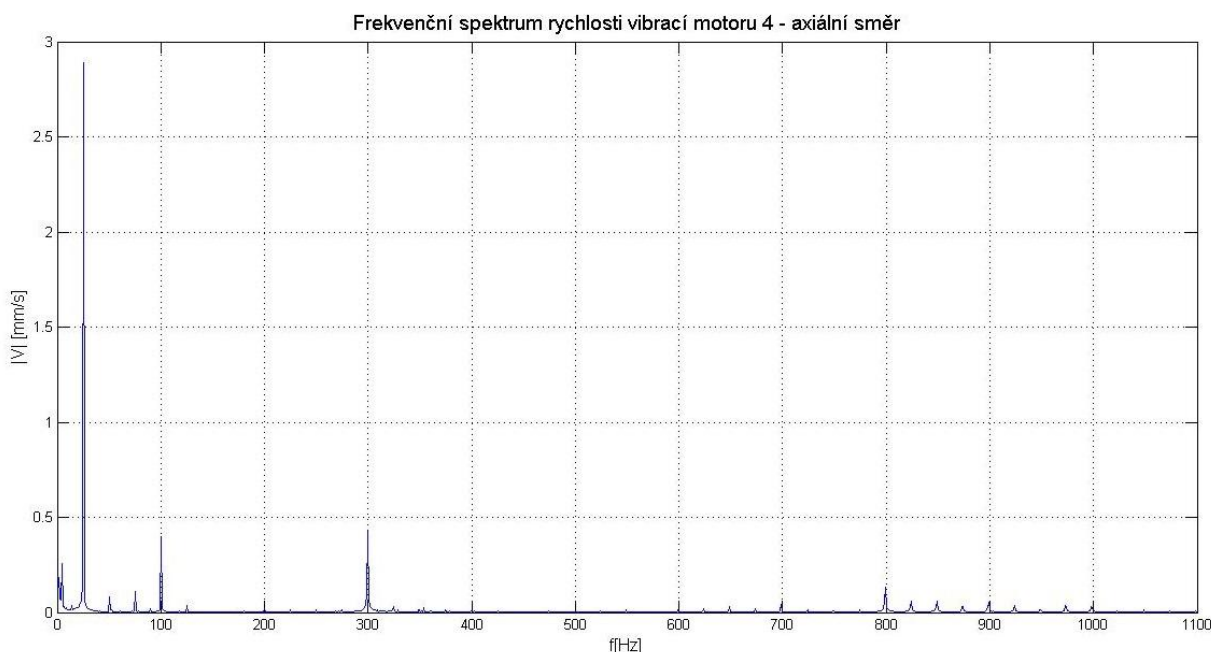
6-8 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 3 - axiální směr

Frekvenční spektrum radiálního směru motoru 3 má podobný projev jako u motoru 1. Z toho důvodu lze soudit, že motor 3 má stejnou poruchu statické excentricity. A zřejmě i některý z typů nevyváženosti rotoru. Oproti motoru 1 se ve spektru motoru 3 vyskytují složky s nižšími amplitudami. Z toho lze soudit, že u motoru 3 jsou poruchy menší než u motoru 1.

#### Motor 4



6-9 Frekvenční spektrum rychlostí vibrací motoru 4 - radiální směr



6-10 Frekvenční spektrum rychlosti vibrací motoru 4 - axiální směr

Frekvenční spektrum radiálního směru motoru 4 obsahuje také dominantní amplitudu na otáčkové frekvenci 25 Hz stejně jako ostatní motory, ale hned za ní s téměř stejnou amplitudou se vyskytuje frekvence 100 Hz reprezentující elektrickou poruchu. Díky frekvenci 25 Hz lze soudit, že motor je zřejmě postižen některým typem nevyváženosti. Typ nejde určit ze stejného důvodu jako v případě ostatních motorů.

Podobně jako u motoru 1 a 3 se ve spektru v radiálním směru motoru 4 vyskytují komponenty na frekvencích 600 Hz, 700 Hz, 800 Hz, 900 Hz a 1000 Hz. tyto komponenty představují statickou excentricitu, ovšem oproti motorům 1 a 3 je komponenta na frekvenci 800 Hz utlumena.

Bližším zkoumáním spektra na frekvencích 600 - 1000 Hz lze zjistit, že kolem frekvence 800 Hz se vyskytují postraní pásma o frekvenci 25 Hz, tedy frekvenci otáčkové. Postranních pásem je 9 na každou stranu od frekvence 800 Hz. Zároveň je patrný útlum frekvenční složky na frekvenci 800 Hz a i nejbližších pásem u této frekvence. Postranní pásma kolem frekvence 800 Hz poukazují na dynamickou excentricitu. Toto tvrzení potvrzuje i výskyt postranních pásem kolem frekvence 100 Hz na frekvencích 75 Hz a 125 Hz. Útlum složky na frekvenci 800 Hz a její nejbližších pásem je dán interakcí dvou poruch, statické a dynamické excentricity.

Zároveň jsou patrné i složky na frekvencích 200 Hz a 300 Hz. Tyto složky představují deformované magnetomotorické napětí ve vzduchové mezeře, jak již bylo popsáno u motoru 1.

Frekvence působící především v radiálním směru se odrážejí i u tohoto motoru ve směru axiálním, jedná se především o dominantní frekvence 25 Hz, 100 Hz a 300 Hz. Tyto vibrace jsou do axiální roviny přenášeny konstrukcí stroje a také způsobem ustavení měřeného stroje, kdy měřené motory byly uloženy pružným způsobem.

### Souhrn frekvenční analýzy

Cílem analýzy ve frekvenční oblasti bylo odhalení poruch konkrétních asynchronních motorů. Především šlo o odhalení elektrických poruch zmíněných strojů. Následující tabulka uvádí poruchy jednotlivých motorů dle podrobných rozborů jejich frekvenčních spekter.

Tabulka 14: Souhrn poruch jednotlivých motorů

Porucha	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
Statická excentricita	ANO		ANO	ANO
Zkratované plechy statoru, rozdílné odpory fází				
Volné železo				
Dynamická excentricita		ANO		ANO
Porucha tyčí rotoru				
Zkratované plechy rotoru				
Statická nevyváženost	ANO*	ANO*	ANO*	ANO*
Momentová nevyváženost	ANO*	ANO*	ANO*	ANO*
Dynamická nevyváženost	ANO*	ANO*	ANO*	ANO*

Pozn.: \* pro přesné stanovení nutno doplňující měření při doběhu a měření fáze na ložiscích

První tři motory obsahují jednu elektrickou poruchu a čtvrtý motor obsahuje dvě elektrické poruchy. Všechny elektrické poruchy byly určeny na základě rozboru frekvenčního spektra rychlosti vibrací radiálního směru. Zároveň všechny motory vykazovaly náznaky nevyváženosti rotoru. U motorů 2 a 4 je nevyváženost přítomna, protože jsou motory postiženy dynamickou excentricitou. U motorů 1 a 3 je porucha statické excentricity, sama o sobě vibrace na otáčkové frekvenci nevykazuje. Ovšem i u těchto motorů se složka na frekvenci 25 Hz objevuje a to s dominantní amplitudou. Pro jasné stanovení zda-li motory obsahují mechanickou poruchu nevyváženosti rotoru je třeba provést doplňující měření vibrací. Jedná se o měření doběhu stroje, kdy se rotor stroje po odpojení od napájecí sítě otáčí. Druh nevyváženosti lze určit pouze na základě podrobnějšího měření, kdy je měřena i fáze vibrací na ložiscích stroje.

## 7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá vibrodiagnostikou elektrických strojů, důležitou částí diagnostiky elektrických strojů. Díky vibrodiagnostice je možné včas a přesně odhalit poruchu konkrétního stroje a zabránit tak velkým následkům poruchy a zároveň ušetřit finance spojené s odstranění poruchy v závažném stádiu či případnou náhradou novým strojem.

Práce je rozdělena na 7 kapitol, kdy druhá až čtvrtá kapitola se zabývá teoretickým popisem kmitání možnostmi a způsoby měření vibrací. V neposlední řadě uvádí možné elektrické i mechanické poruchy asynchronních strojů včetně jejich projevů ve frekvenčním spektru vibrací. V páté kapitole, která tvoří přechod mezi teoretickou a praktickou částí, jsou uvedeny základní metody hodnocení vibrací a normami stanovené mezní hodnoty.

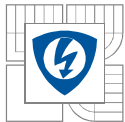
V praktické části je popsáno měření na konkrétních čtyřech asynchronních motorech. Cílem měření a analýzy bylo odhalení poruch motorů a určení zda-li vyhovují normovaným limitům vibrací. Určené poruchy jednotlivých motorů jsou podrobně popsány v předchozí kapitole, kde jsou i přehledně shrnuty v tabulce č. 14. Nejčastěji se u měřených motorů vyskytuje statická excentricita, přesněji u motorů č. 1, 3 a 4. U motorů č. 2 a 4 se vyskytuje dynamická excentricita. Všechny motory jsou zřejmě zatíženy i některou z nevyvážeností rotoru. Tohle tvrzení dokládá výskyt velkých amplitud otáčkové frekvence. Pro přesné stanovení nevyváženosti by bylo potřebné provést doplňkové měření vibrací na ložiscích s následným stanovení fáze vibrací.

V tabulce č. 12 jsou porovnány rychlosti, zrychlení a výchylky vibrací radiálních a axiálních směrů motorů s normou ČSN EN 60034-14 stanovenými dovolenými efektivními hodnotami. Normou stanoveným limitům výchylky a zrychlení vyhovují všechny čtyři motory. V případě mohutnosti vibrací vyhovuje normě pouze motor č. 2 a to jen v axiální rovině.

Posledním kritériem hodnocení v rámci diplomové práce byl crest factor, nebo-li činitel výkmitu. Tato metoda se používá pro hodnocení stavu ložisek. Hodnoty crest factoru jsou uvedeny v tabulce č. 13. Vzhledem k tomu, že hodnota CF nabývá hodnot maximálně 3,23 u motoru č.3 v axiální rovině, lze ložiska považovat za bezporuchová.

## LITERATURA

- [1] HAMATA, Václav. *Hluk elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1987, 171 s.
- [2] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace: měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901936-2-5.
- [3] HAŠA, Jaroslav. *Chvění a hluk asynchronních strojů*. Brno: Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1968, 87 s.
- [4] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. Vyd.3 V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9.
- [5] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost II, Vibrodiagnostika*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004, 173 s. ISBN 80-248-0650-9.
- [6] BLATA, Jan. *Metody technické diagnostiky: učební text předmětu "Technická diagnostika"* ; Metody technické diagnostiky CV . návody do cvičení předmětu "Technická diagnostika". Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2010, 1 DVD-ROM. ISBN 978-80-248-2735-3.
- [7] FAKULTA STROJNÍ, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. *Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: část vibrační diagnostika* [online]. Ostrava [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [8] LEXA, J. *Eliminace hluku šestipólového asynchronního motoru..* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 47 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc..
- [9] KATEDRA VOZIDEL A MOTORŮ, Fakulta strojní, Technická univerzita v Liberci. *Vibrační diagnostika základních závad strojů* [online]. Liberec [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1851>
- [10] ČSN ISO 10816-3. *Vibrace - Hodnocení vibrací elektrických strojů na základě měření na nerotujících částech: Část 3: Průmyslové stroje se jmenovitým výkonem nad 15 kW a jmenovitými otáčkami mezi 120 1/min a 15 000 1/min při měření in situ*. Český normalizační institut. 2009. Druhé vydání
- [11] ČSN EN 60034-14. *Točivé elektrické stroje - Část 14: Mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56 mm - Měření, hodnocení a mezní hodnoty mohutnosti vibrací*. Český normalizační institut. 2004.
- [12] KATEDRA VOZIDEL A MOTORŮ, Fakulta mechatroniky, informatiky a mezioborových studií, Technická univerzita v Liberci. *Technická diagnostik- Měření a diagnostika vibrací* [online]. Liberec [cit. 2015-11-28]. Dostupné z: [http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P8\\_vibrace%20\\_ESF.pdf](http://www.rss.tul.cz/download/tdg/P8_vibrace%20_ESF.pdf)



- 
- [13] JACEK F. GIERAS, Jacek F. CHong Wang. Noise od Polzphase Electric Motors. Hoboken: CRC Press. 2005 ISBN 978-142-0027-730
- [14] ZUTH Daniel, VDOLEČEK František. Měření vibrací ve vibrodiagnostice. *Automa* [online]. 2010, 1 [cit. 13.03.2016].. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/40375.pdf>
- [15] CIGÁNEK, Ladislav. Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714 s.
- [16] EMP Slavkov. Katalog trojfázové a jednofázové motory [online]. [cit. 13.03.2016]. Dostupné z: <http://www.emp-slavkov.cz/katalogy/motory.pdf>
- [17] Kreidl M., Šmid R.: Technická diagnostika, BEN, Praha 2006, ISBN 80-7300-158-6