

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY**

DIAGNOSTIKA PORUCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ POMOCÍ VIBRACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE

ROMAN ČECH

BRNO 2016



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 PORUCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ
POMOCÍ VIBRACÍ**

FAULT DIAGNOSIS OF ELECTRICAL MACHINES USING VIBRATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Roman Čech

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2016

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Roman Čech

ID: 146801

Ročník: 2

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Diagnostika poruch elektrických strojů pomocí vibrací

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se zdroji vibrací v asynchronním motoru.
2. Proveďte měření vibrací na asynchronních motorech.
3. Naměřené průběhy vibrací vyhodnoťte pomocí různých metod.

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: 21.9.2015

Termín odevzdání: 24.5.2016

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

Konzultant diplomové práce:

Ing. Ondřej Vitek, 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

V této práci se podíváme na problematiku zdrojů vibrací v asynchronním motoru a jejich vliv a rizika na chod motoru. Poznáme rozdělení zdrojů vibrací, zaměříme se na závady ložisek a na dynamickou i statickou excentricitu. Zaměříme se také na metodiku analýzy vibrací. Provedeme měření na laboratorních asynchronních strojích a provedeme analýzu ložisek a excentricit.

ABSTRACT

The task of this thesis is to introduce the problems of vibration sources in asynchronous motor and their effects and risks to the engine. We will classify the sources of vibration, we will focus for the defects of bearings and for dynamic and static eccentricity. The thesis includes vibration measurement for asynchronous motor, analysis and evaluation of bearings defects and eccentricities.

KLÍČOVÁ SLOVA: vibrace; vibrodiagnostika; vibrační diagnostika; vibrodiagnostický systém; asynchronní motor, excentricita, crest faktor

KEYWORDS: vibration, vibrodiagnostics, vibration diagnostics, vibrodiagnostics system, asynchronous motor, eccentricity, crest factor

Bibliografická citace práce:

ČECH, R. *Diagnostika poruch elektrických strojů pomocí vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 53 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, PhD..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Diagnostika poruch elektrických strojů pomocí vibrací jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce Ing. Marcelovi Jandovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc, čas, ochotu a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	10
SEZNAM TABULEK	11
ÚVOD	12
1 VIBRACE	13
1.1 HARMONICKÝ POHYB [1].....	13
1.1.1 RYCHLOST HARMONICKÉHO POHYBU [1]	13
1.1.2 ZRYCHLENÍ HARMONICKÉHO POHYBU [1]	13
1.2 TLUMENÝ OSCILÁTOR [1]	14
1.3 NUCENÉ KMITY A REZONANCE [1]	14
1.4 PRINCIP SUPERPOZICE [1]	15
1.4.1 DISKRÉTNÍ FOURIEROVA TRANSFORMACE DFT [4], [5].....	16
1.4.2 RYCHLÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE FFT [3].....	16
1.5 INTERFERENCE VLN [1]	17
1.6 STOJATÉ VLNY [1]	17
2 ZDROJE VIBRACÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ.....	18
2.1 ROTOROVÉ BUZENÍ VIBRACÍ [6], [7]	18
2.1.1 EXCENTRICKÝ ROTOR.....	18
2.1.2 OHNUTÝ HŘÍDEL	20
2.1.3 SPOJKY A NESOUOSOST.....	20
2.1.4 NEVYVÁŽENOST ROTORU [7], [8]	21
2.1.5 MECHANICKÉ UVOLNĚNÍ [7], [8]	22
2.2 AERODYNAMICKÉ A HYDRODYNAMICKÉ BUZENÍ [7]	22
2.2.1 PRŮCHOD LOPATEK.....	22
2.2.2 TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ.....	23
2.2.3 KAVITACE	23
2.3 LOŽISKA A JEJICH ZÁVADY [7], [9]	23
2.3.1 KLUZNÁ LOŽISKA	23
2.3.2 VALIVÁ LOŽISKA	24
2.3.3 METODY DIAGNOSTIKY VALIVÝCH LOŽISEK	25
3 MĚŘENÍ VIBRACÍ	27
3.1 MĚŘENÉ VELIČINY [9]	27
3.2 SNÍMAČE VIBRACÍ	27
3.2.1 SNÍMAČE VÝCHYLKY [6], [7]	28
3.2.2 SNÍMAČE RYCHLOSTI	29
3.2.3 SNÍMAČE ZRYCHLENÍ.....	29
3.3 ZPRACOVÁNÍ NAMĚŘENÉHO SIGNÁLU [9], [10].....	29
3.3.1 DIGITALIZACE NAMĚŘENÉHO SIGNÁLU	30
3.4 VÝZNAMNÉ FREKVENCE	31
4 DIAGNOSTIKA ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ.....	32

4.1 MĚŘENÍ.....	32
4.2 VÝSTUPY MĚŘENÍ.....	33
4.2.1 VÝPOČET FREKVENCÍ LOŽISKOVÝCH ZÁVAD LOŽISEK MOTORŮ TM90	34
4.2.2 MOTOR 1	35
4.2.3 MOTOR 2	38
4.2.4 MOTOR 3	41
4.2.5 MOTOR 4	44
4.2.6 ANALÝZA EXCENTRICITY MĚŘENÝCH MOTORŮ	46
5 ZÁVĚR ANALÝZY	48
5.1 ZÁVĚR ANALÝZY LOŽISKOVÝCH ZÁVAD	48
5.2 ZÁVĚR ANALÝZY STATICKÉ A DYNAMICKÉ EXCENTRICITY	48
6 ZÁVĚR.....	51
POUŽITÁ LITERATURA	53

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.2-1 Tlumený oscilátor [1].	14
Obr. 1.4-1 Fourierova transformace [11].	15
Obr. 2.1.1-1 Excentrický rotor – a) bez excentricity, b) statická, c) dynamická [14].	19
Obr. 2.1.3-1 Rovnoběžná nesouosost [7].	20
Obr. 2.1.3-2 Úhlová nesouosost [7].	21
Obr. 2.1.4-1 Nevyváženost rotoru [8].	21
Obr. 2.3.3-1 Vývoj Crest faktoru v závislosti na vývoji poruchy [13].	26
Obr. 3.1-1 Rozsahy snímačů při měření [9].	27
Obr. 3.3-1 Blokové schéma analyzátoru [9].	30
Obr. 3.4-1 Rozdělení významných frekvencí [9].	31
Obr. 4.2.2-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 1 po dobu dvou otáček.	35
Obr. 4.2.2-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 1 po dobu dvou otáček.	35
Obr. 4.2.2-3 Spektrum zrychlení vibrací motoru 1.	36
Obr. 4.2.2-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 1.	36
Obr. 4.2.2-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 1 pro analýzu ložiska.	37
Obr. 4.2.3-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 2 po dobu dvou otáček.	38
Obr. 4.2.3-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 2 po dobu dvou otáček.	38
Obr. 4.2.3-3 Spektrum zrychlení vibrací motoru 2.	39
Obr. 4.2.3-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 2.	39
Obr. 4.2.3-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 2 pro analýzu ložiska.	40
Obr. 4.2.4-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 3 po dobu dvou otáček.	41
Obr. 4.2.4-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 3 po dobu dvou otáček.	41
Obr. 4.2.4-3 Spektrum zrychlení vibrací motoru 3.	42
Obr. 4.2.4-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 3.	42
Obr. 4.2.4-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 3 pro analýzu ložiska.	43
Obr. 4.2.5-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 4 po dobu dvou otáček.	44
Obr. 4.2.5-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 4 po dobu dvou otáček.	44
Obr. 4.2.5-3 Spektrum zrychlení vibrací motoru 4.	45
Obr. 4.2.5-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 4.	45
Obr. 4.2.5-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 4 pro analýzu ložiska.	46

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 4-1 Štítkové hodnoty asynchronních motorů.</i>	32
<i>Tab. 4-2 Podmínky okolí v laboratoři.</i>	32
<i>Tab. 4.2.1-2 Frekvence ložiskových závad ložiska 6204-2Z.</i>	34
<i>Tab. 4.2.6-1 Frekvence statické excentricity.</i>	47
<i>Tab. 4.2.6-2 Frekvence dynamické excentricity.</i>	47
<i>Tab. 4.2.6-3 Deklarované excentricity měřených motorů.</i>	47
<i>Tab. 5.2-1 Amplitudy frekvencí statické excentricity ve spektru zrychlení.</i>	48
<i>Tab. 5.2-2 Amplitudy frekvencí dynamické excentricity ve spektru zrychlení.</i>	49



ÚVOD

Elektrické točivé stroje jsou velmi potřebná zařízení, bez kterých si dnes lze jen těžko představit život. Generátory jsou základem majoritního procenta výroby elektrické energie, motory pak najdeme ve vozidlech, poháněných elektrickou energií, v různých provozech, vzduchotechnikách, budovách, automatizační technice, zdravotnictví apod. Tyto stroje procházely a dodnes prochází různými vývoji, výrobními procesy a inovacemi. Avšak jejich konečnou výrobou v podstatě začíná jejich nejdůležitější fáze, a tou je provoz.

Provoz jako takový s sebou nese různá úskalí. Představuje náklady, stroj je třeba udržovat, opravovat, kontrolovat. Zájmem každého provozovatele je snižovat náklady a zajišťovat co nejdelší životnost stroje. Proto často nejefektivnějším způsobem je prevence. Jedním z preventivních opatření pro zajištění dlouhé životnosti stroje je průběžné sledování stavu stroje. Tím je možné předejít vzniku defektů. K takovému sledování často slouží právě vibrační diagnostika. Ta umožňuje zpravidla bez nutnosti demontáže poměrně snadno a rychle analyzovat stroj, zjistit jeho slabá místa, která jsou potenciálně ohrožená a díky tomu mít možnost naplánovat odstávku pro včasnou údržbu. Dále také umožňuje zjistit již probíhající defekt, lokalizovat jej a zajistit nápravná opatření.



1 VIBRACE

Vibrace jsou nedílnou součástí chodu stroje. Samotná přítomnost vibrací tedy není závadou, pokud se nachází v mezích tolerance. Vibrace nám však mohou podat důležité informace nejen o celkovém stavu stroje, ale i o stavech jeho částí. Pro pochopení principu vibrací je však nutné nahlédnout do samotné podstaty harmonického pohybu a jeho parametrů. První kapitola je tedy věnována této problematice.

1.1 Harmonický pohyb

Časová závislost výchylky při harmonických kmittech je určena funkcí:

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.1)$$

kde X_m je amplituda kmitu, ω je úhlová frekvence, φ je počáteční fáze. U kmitání je důležitá frekvence a perioda kmitu. Pro úhlovou frekvenci platí:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f \quad (1.2)$$

kde T je perioda kmitání, f je frekvence kmitání [1].

1.1.1 Rychlost harmonického pohybu

Jedná se o derivaci funkce pro časovou závislost výchylky [1]:

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(X_m \cos(\omega t + \varphi)) = -\omega X_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1.3)$$

Pro maximální rychlost platí [1]:

$$V_m = \omega X_m \quad (1.4)$$

1.1.2 Zrychlení harmonického pohybu

Zrychlení je derivace rychlosti:

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(-\omega X_m \sin(\omega t + \varphi)) = -\omega^2 X_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (1.5)$$

Pro maximální zrychlení platí:

$$A_m = \omega^2 X_m \quad (1.6)$$

Střední hodnota kmitavého pohybu je vyjádřena rovnicí:

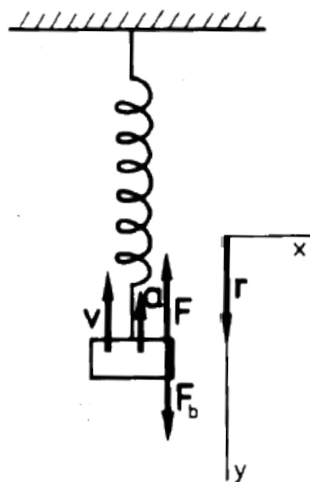
$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x(t)^2 dt} \quad (1.7)$$

Pro určení střední hodnoty harmonického kmitání X_{RMS} vycházíme ze vztahu [1]:

$$X_{RMS} = \frac{1}{\sqrt{2}} X_m \quad (1.8)$$

1.2 Tlumený oscilátor

Při mechanickém kmitání dochází ve všech případech k tlumení, ať už vlivem tření nebo gravitace, které způsobí postupný útlum mechanických kmitů až do úplného zastavení. V této souvislosti hovoříme o tlumených kmitech, nebo také o tlumeném oscilátoru. Na Obr. 1.2-1 je zobrazena situace, kdy je těleso o hmotnosti m zavěšeno na pružině s tuhostí k a nachází se v tekutině (ve vzduchu). Na tomto obrázku je uvažován pohyb vzhůru, kdy na těleso působí pružina silou F , proti které působí brzdná síla F_b a těleso je vychýleno oproti rovnovážné pozici o vzdálenost r .



Obr. 1.2-1 Tlumený oscilátor [1].

Na těleso působí výsledná síla F_v , která je dána vztahem:

$$F_v = F_b - F = -bv - kr \quad (1.9)$$

kde b je součinitel útlumu.

Výsledná funkce tlumených kmitů je:

$$x(t) = X_m e^{-bt} \cos(\omega' t + \varphi) \quad (1.10)$$

kde ω' je úhlová frekvence tlumených kmitů. Tato oscilující funkce se vyznačuje postupně klesající amplitudou $X_m e^{-bt}$ [1].

1.3 Nucené kmity a rezonance

Nucené kmity mají v sobě zahrnutou nejen vlastní úhlovou frekvenci ω , udávanou pro systém volného kmitání, ale i úhlovou frekvenci vnější budící síly ω_b . V případě rezonance nastává rovnost mezi těmito úhlovými frekvencemi, tedy $\omega = \omega_b$. V tomto případě je největší amplituda rychlosti kmitání.

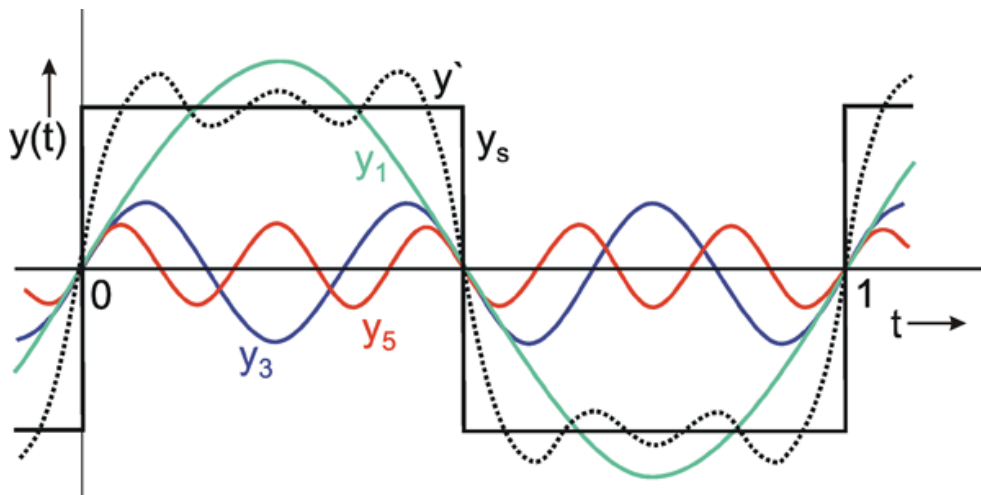
Jakákoliv mechanická soustava obsahuje jednu nebo i více vlastních frekvencí. Pokud se frekvence nucených kmitů z okolí začne blížit k frekvenci vlastních kmitů v dané mechanické soustavě, může dojít k silným vibracím a k narušení pevnosti soustavy. Tento jev je ve většině mechanických soustav nežádoucí.

Pokud soustava sama sebe udržuje v kmitání, hovoříme o parametrické rezonanci. Tato rezonance je závislá na vhodné změně jejího vnitřního parametru. Na rozdíl od rezonance nucených kmitů, kdy $\omega = \omega_b$, dochází k parametrické rezonanci tehdy, pokud $\omega_p = 2\omega$, kde ω_p je parametrická rezonanční úhlová frekvence mechanismu.

1.4 Princip superpozice

V reálném světě většina kmitání nemá čistě harmonický průběh. Tento jev je způsoben tím, že se v dané oblasti nachází více jednotlivých vln, které se navzájem sčítají, ale neovlivňují se. Sčítání vln v kmitavém systému se nazývá princip superpozice. Tento princip se nejen ve vibrační diagnostice nejlépe uplatňuje použitím Fourierovy analýzy. Anglický fyzik Sir James Jeans definoval tento princip takto:

„Fourierův teorém říká, že libovolnou křivku, ať už jsou její vlastnosti jakékoliv nebo ať už byla získána jakýmkoliv způsobem, lze přesně reprodukovat tím, že složíme dostatečný počet jednoduchých harmonických (tj. sinusových) křivek.“ [1]



Obr. 1.4-1 Fourierova transformace [11].

Na Obr. 1.4-1 vidíme obdélníkový průběh, který je rozložen na několik harmonických průběhů. Plná čára, vyjadřující ideální případ obdélníkového průběhu, je aproximována čerchovanou křivkou, která vznikla sečtením harmonických složek. Kdybychom chtěli docílit přesnějšího zobrazení, museli bychom průběh rozložit na více harmonických [1].



Pro Fourierovu transformaci platí:

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1.11)$$

A pro zpětnou transformaci platí:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) e^{j\omega t} dt \quad (1.12)$$

Tyto vztahy platí pro periodické signály. Obecně může být Fourierova transformace použita i pro neperiodické nespojité signály.

1.4.1 Diskrétní Fourierova transformace DFT

Tento způsob FT je určen pro diskrétní signály, jehož podstatou je transformace signálu z časové do frekvenční oblasti. Vstupní jednotkou pro FT je diskrétní signál v komplexním tvaru, který je dále navzorkován. Na výstupu je poté diskrétní spektrum daného signálu v komplexním tvaru. Matematická definice DFT je vyjádřena jako:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (1.13)$$

kde $x(n)$ jsou jednotlivé vzorky a N je počet vzorků.

Tento způsob v podstatě převádí Fourierův integrál na sumu vzorků. Jeho nevýhodou je zdlouhavý výpočet, protože je pro něj nutné uvažovat N^2 vzorků. Jeho výhodou ale je, že pro reálný vstupní signál, jehož počet prvků je sudý, je spektrum symetrické a komplexně sdružené kolem svého středu. Reálná složka je tedy kolem středu sudá a imaginární složka je potom lichá. Poté se vypočítává jen první polovina spektra, druhá polovina bude identická, jen s opačným znaménkem u imaginární složky. DFT je základním kamenem pro Rychlou Fourierovu transformaci FFT, která se používá v široké škále aplikací [4], [5].

1.4.2 Rychlá Fourierova transformace FFT

Jedná se o formu algoritmu pro výpočet Fourierovz transformace, díky které se sníží počet prvků N pro výpočet, což snižuje náročnost výpočtu transformace. Naměřený signál se rozdělí na určitý počet stejných signálů. Výstupem FFT je počet harmonických, který odpovídá polovině vzorků. Takto získané spektrum obsahuje nultou harmonickou, což je stejnosměrná složka signálu. Dále obsahuje první harmonickou (základní) a každá další harmonická složka je celistvým násobkem základní harmonické. Počet harmonických složek (včetně nulté harmonické) je určen poměrem počtu vzorků a dvojnásobné periody měřeného signálu $N/2T$ [3].

Rovnici pro FFT lze zapsat takto:

$$X(k) = x_0 + \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (1.14)$$



1.5 Interference vln

Na tvar superponovaných vln má závislost i to, jak jsou vlny vzájemně vůči sobě fázově posunuty. Pokud existují v jedné soustavě dvě vlny se stejnou amplitudou kmitající kolem nuly a jsou vzájemně ve fázi, amplituda výsledné vlny je dvakrát větší než amplituda obou vln. V tomto případě je to největší možná amplituda, která z těchto vln může vzniknout a dochází k interferenci úplně konstruktivní.

V opačném případě, pokud existují v jedné soustavě dvě vlny se stejnou amplitudou kmitající kolem nuly, ale jsou vzájemně posunuty o 180° , bude mít výsledná křivka v každém okamžiku hodnotu nulovou. V takovém případě hovoříme o interferenci úplně destruktivní. Pokud interference není ani úplně destruktivní, ani úplně konstruktivní, jedná se o interferenci částečnou [1].

1.6 Stojaté vlny

Pokud existují v jednom systému dvě vlny, které mají stejnou amplitudu i vlnovou délku, přitom jejich směr je opačný, dochází ke vzniku takzvané stojaté vlny. Výsledná vlna se nepohybuje ani jedním směrem, ale kmitá na stejném místě. Vznikají zde místa, která jsou v každém okamžiku v klidu. Taková místa se nazývají uzly. Uprostřed mezi těmito uzly se nachází kmitny, což jsou místa, která kmitají podle principu superpozice s maximální amplitudou [1].



2 ZDROJE VIBRACÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ

V každém elektrickém stroji se nachází určitá míra vibrací. Tyto vibrace jsou z technologického hlediska nevyhnutelné. Pro správný chod stroje je potřeba kontrolovat hladinu vibrací, která je ještě v pořádku a která už v pořádku není. Zdrojů vibrací je mnoho, zde si uvádíme ty nejobvyklejší [6], [7].

a) Vibrace, které vznikají ve stroji:

- Mechanické - valivá ložiska, mechanické uvolnění, tření
- Elektromagnetické - fázová nesymetrie, vyšší harmonické, magnetické sycení
- Hydrodynamické a aerodynamické - kavitace, turbulence

b) Vibrace, které jsou do stroje přenášeny z okolí:

- Spojení stroje se zátěží - ozubené soukolí, nesouosost, ohnutý hřídel apod.
- Spojení stroje se základnou - dopravní provoz v okolí, probíhající stavby, přírodní zdroj vibrací apod.

2.1 Rotorové buzení vibrací

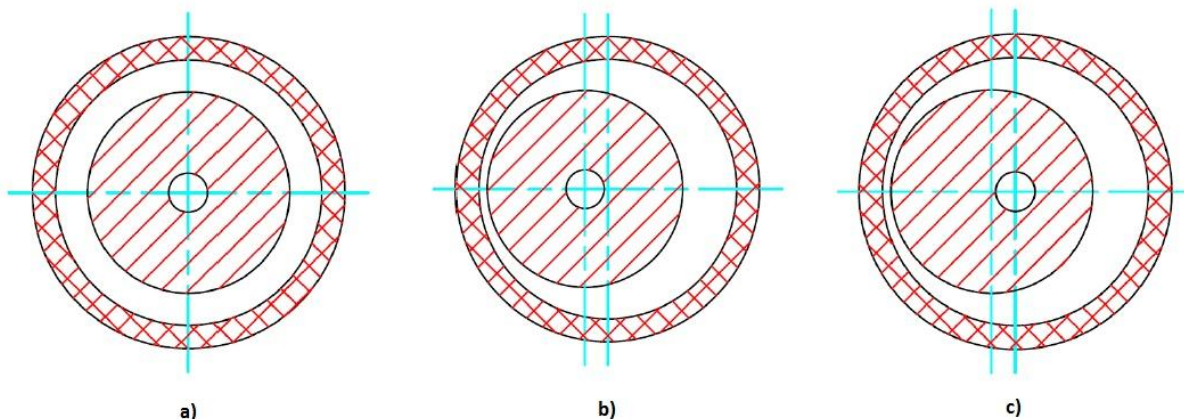
Část vibrací v elektrických točivých strojích bývá zapříčiněna rotorem. Při měření vibrací je důležité zjistit, v jaké orientaci působí vůči zemi (horizontální a vertikální) a ve kterém směru působí vůči stroji samotnému (radiální a axiální). Některé zdroje poruch vyvolávají typické vibrace v daném směru, ale některé se projevují v kombinacích směrů působení [6], [7].

Pro rotor definujeme tyto typy zdrojů vibrací:

- Excentrický rotor
- Ohnutý hřídel
- Nesouosost
- Nevyváženost rotoru
- Mechanické uvolnění

2.1.1 Excentrický rotor

Tento případ nastává tehdy, když je rozdílná osa rotace a geometrická osa rotoru, ozubeného kola, řemenice apod., jak je patrné na Obr. 2.1.1-1. Dochází tedy k proměnné vzduchové mezeře mezi rotorem a statorem. Fáze jsou v radiálním směru v horizontální a vertikální orientaci buď shodné nebo posunuté o 180° . Při vyvažování rotoru může sice zaniknout problém vibrací v radiálním směru, ale toto vyvážení se obvykle začne projevovat v axiálním směru [6], [7].



Obr. 2.1.1-1 Excentrický rotor – a) bez excentricity, b) statická, c) dynamická [14].

Excentricita je dvojího typu – statická a dynamická. Při statické excentricitě je změna vzduchové mezery v daném místě, její místo se vzhledem ke statoru nemění. To může nastat například při nesprávném umístění rotoru vůči statoru, při oválném jádru apod. Dynamická excentricita se projevuje v závislosti na poloze a nesymetrii vzduchové mezery se polohově mění spolu s rotorem. Nastává to tehdy, kdy je osa rotoru mimo osu rotace, k čemuž může dojít například při špatném uchycení rotoru v ložiscích, ohnuté hřídeli, nesouososti ložisek apod. [14].

Statická excentricita je tedy závislá jen na poloze. Vibrace se projeví na synchronní rychlosti a jejích násobcích, protože právě touto rychlostí se otáčí i magnetická indukce ve vzduchové mezeře. Častým případem je, že se statická excentricita projeví na frekvenci jednonásobku a dvojnásobku otáčkové frekvence (dále budeme používat označení 1x, 2x apod.). Pro statickou excentricitu dále platí:

$$f_{stat} = f_1 \left(\frac{vQ_2(1-s)}{p} \mp k \right) \quad (2.1)$$

kde f_1 je základní statorová (síťová) frekvence, p je počet pólových dvojic, v je celé číslo harmonické, s je skluz, $k=0, 2, 4, 6, \dots$ a Q_2 je počet drážek rotoru.

Dynamická excentricita je závislá jak na poloze, tak i na čase (respektive na otáčkách stroje). Změna magnetické indukce v daném místě vzduchové mezery je závislá na otáčkách rotoru. Dále je třeba uvažovat i počet drážek rotoru, statorovou harmonickou složku a skluz. Pro dynamickou excentricitu platí:

$$f_{dyn} = f_1 \left((vQ_2 \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm k \right) \quad (2.2)$$

kde n_d je definován podle typu excentricity (pro dynamickou excentricitu je $n_d=1$) [14].



2.1.2 Ohnutý hřídel

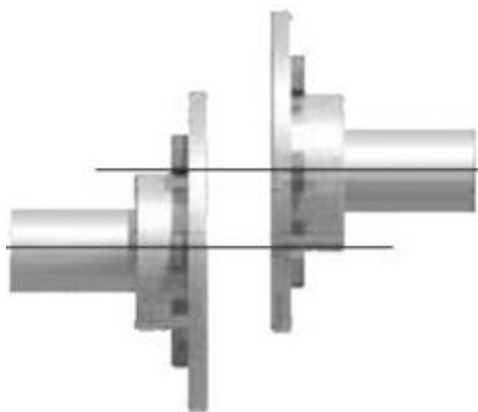
Ohnutý hřídel má svou geometrickou osu mimo osu rotace, těžiště hřídele neleží v této ose a osa rotace nabývá tvaru křivky místo obvyklé přímky. V takovém případě tento jev vykazuje vysoké vibrace na otáčkách 1x (při ohybu uprostřed) i 2x (při ohybu v blízkosti spojky). Tyto vibrace jsou vůči sobě v protifázi v radiálním i axiálním směru, pokud je hřídel převislý. Pokud je ohnutý hřídel na dvou podporách, pak jsou vibrace v axiálním směru v protifázi a v radiálním směru ve fázi [6], [7].

2.1.3 Spojky a nesouosost

Při spojování hřídelů strojů se zátěží se využívá spojek (pevných nebo pružných), které jsou dimenzovány tak, aby tlumily vibrace a kompenzovaly mírnou nesouosost. Přesto je však nutné dbát na to, aby byla osa hřídele zátěže připojena přes spojku co nejpřesněji v ose hřídele stroje. V případě špatného naspojování může dojít k některému z typu nesouososti. To má za následek vyvolání vibrací, které mohou zatěžovat a opotřebovávat hřídele, ložiska a samotné spojky. Vyhnout se nesouososti je žádoucí z pohledu prodloužení životnosti strojů i zařízení. Při odstranění nesouososti docílíme mimo jiné redukci axiálních i radiálních sil na ložiska, stability rotoru při dynamickém zatížení, dále minimalizujeme možnost ohybu hřídele a redukuje opotřebení hřídele cyklickou únavou. Také snižujeme opotřebení spojky, spotřebu energie a vibrace, které by se mohly šířit do okolí. Může ale docházet k závadě na spojce i při jinak bezproblémovém naspojování. Patří sem velká vůle ve spojce, nevyváženost spojky apod. Rozlišujeme dvě hlavní nesouososti, a to rovnoběžnou a úhlovou nesouosost [6], [7].

a) Rovnoběžná nesouosost

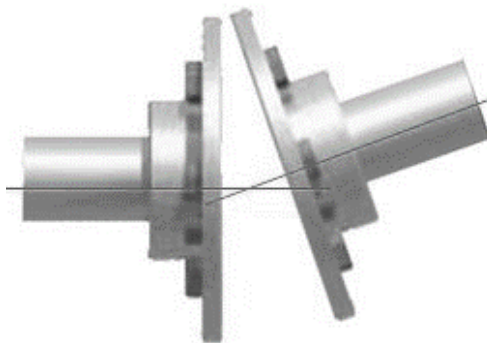
V případě rovnoběžné nesouososti jsou osy naspojovaných hřídelů úhlově vůči sobě nenakloněné, ale posunuté. Tento případ je zobrazen na Obr. 2.1.3-1. Dochází k velkým radiálním vibracím při převládající složce 2x otáček. Její velikost závisí na typu a konstrukci spojky. V radiálním směru je fázový posun 180°.



Obr. 2.1.3-1 Rovnoběžná nesouosost [7].

b) Úhlová nesouosost

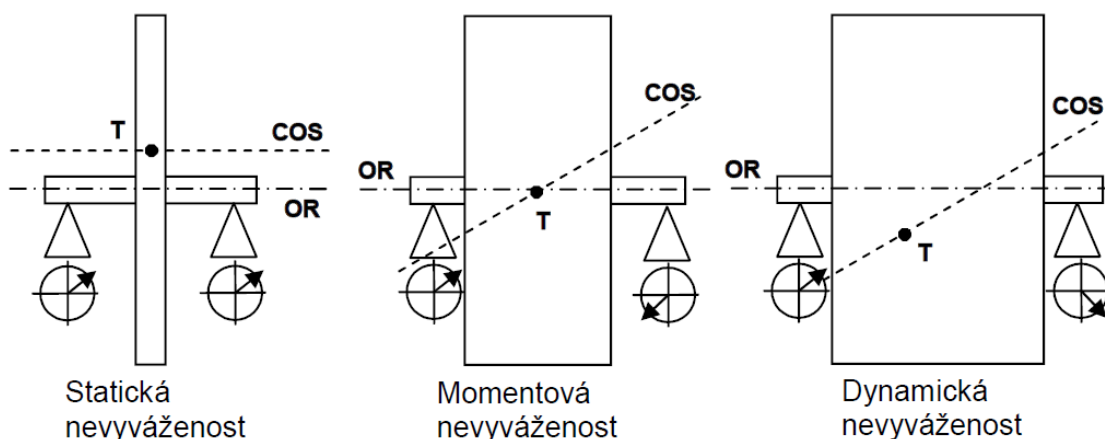
V tomto případě jsou osy naspojovaných hřídelí vůči sobě nakloněny, takže mezi nimi vzniká úhel. To způsobuje velké axiální vibrace při převládající složce $1x$ a $2x$. Pokud složka $2x$ překročí složku $1x$ o 50%, projevuje se i složka $3x$. V axiálním směru je fázový posun 180° . Tento stav je zobrazen na Obr. 2.1.3-2.



Obr. 2.1.3-2 Úhlová nesouosost [7].

2.1.4 Nevyváženost rotoru

Jedná se o jednu z nejčastějších příčin vibrací v točivých elektrických strojích. Její definice spočívá v nesouladu dvou os – osy rotace OR, kolem které dochází k nucené rotaci rotoru a je vázána na body rotoru s nulovou obvodovou rychlostí, a centrální osy setrvačnosti COS, kolem které mají rotující části tendenci rotovat. Příčin nevyváženosti je několik. Patří k nim nehomogenní materiál, usazeniny, nesymetrie tvaru, nepřesná výroba apod. Při nevyváženosti se amplituda zrychlení kvadraticky zvětšuje s otáčkami, amplituda s fází vibrací na složce $1x$ je stabilní. Existují tři základní typy nevyváženosti, a to statická, momentová a dynamická.



Obr. 2.1.4-1 Nevyváženost rotoru [8].



Statická nevyváženost rotorů se vyznačuje rovnoběžností OR s COS a vyskytuje se jen u rotorů, které mají několikanásobně větší průměr, než je jejich tloušťka. Typickým příkladem takového rotoru je řezný kotouč, setrvačnický, brusný kotouč apod. Nejvýraznější jsou vibrace v radiálním směru na frekvenci 1x, fázový posun je nulový.

Dynamická nevyváženost rotorů se vyznačuje mimoběžností OR vůči COS a je nejčastějším typem nevyváženosti. Osy se protínají mimo těžiště rotoru. Vibrace jsou výrazné na složce 1x v radiálním směru.

Momentová nevyváženost rotorů se vyznačuje různoběžností OR vůči COS a jejich průsečík se nachází v těžišti. Ve statickém stavu je rotor vyvážen, jeho nevyváženost se projeví až při vzniku momentu. Tento jev se může objevovat například u klikových hřídelí se dvěma zalomeními. Převládají zde vibrace v radiálním směru na složce 1x s fázovým posunem 180° [7], [8].

2.1.5 Mechanické uvolnění

V případě mechanického uvolnění se může jednat o uvolnění základny od podložky, uvolnění spojů, defekt ložiska apod. Tato vůle může vzniknout mechanickým přenosem sil do pevných vazeb, které svou únavou a opotřebením postupně ztratí schopnost této pevnosti. Signál vibrací je periodický a blízký obdélníkovému tvaru. Tento zdroj vibrací má nežádoucí efekt na identifikaci jiných zdrojů vibrací. Jeho spektrum má zastoupení mnoha složek (2x, 3x, 4x, ...), obsahuje subharmonické i interharmonické složky, takže je snadno identifikovatelný, ale zakrývá možnost rozeznat jiné zdroje vibrací. Pro diagnostiku je tedy žádoucí nejprve odstranit právě vliv mechanického uvolnění a teprve poté se může spolehlivě pokračovat v další diagnostice [7], [8].

2.2 Aerodynamické a hydrodynamické buzení

2.2.1 Průchod lopatek

Frekvence vyvolaná průchodem lopatek je vyjádřena jako součin otáček a počtu lopatek. Označuje se jako BPF (blade pass frequency):

$$BPF = z_L * n \quad (2.3)$$

kde z_L je počet lopatek a n jsou otáčky.

Frekvence od průchodu lopatek se vždy vyskytuje u ventilátorů, kompresorů a čerpadel. Při normálním provozu není tato frekvence problematická. Její negativní projev může nastat tehdy, kdy se vygeneruje velká amplituda na její frekvenci a na frekvenci jejích násobků. Taková situace je často projevem nerovnoměrnosti rozložení mezery mezi lopatkami a statorovým difusorem. Také mohou nastat velké vibrace, pokud tato frekvence souhlasí s vlastní frekvencí systému. BPF může být generována i v případě zvýšeného tření ložisek (zadrhnutí), při uvolnění svarů lopatek, také pokud se v potrubí vyskytují prudké ohyby nebo jiné překážky v proudění [7].



2.2.2 Turbulentní proudění

Turbulentní proudění se ve spektru vibrací projevuje jako širokopásmové vibrace (při nadměrné turbulenci a při takzvaném utrženém turbulentním proudění i vysokofrekvenční vibrace), navíc jsou tyto vibrace náhodné a nesoustavné. Častý výskyt turbulencí je u dmýchadel. Tento jev je důsledkem odchylek tlaku či rychlosti vzduchu, který prochází ventilátorem a jeho připojenými kanály [7].

2.2.3 Kavitace

Kavitace se ve spektru vibrací projevuje náhodnými, širokopásmovými a mnohdy vysokofrekvenčními vibracemi. Je způsobena většinou nedostatečným tlakem v sání v případě vzduchového média nebo při lokálním podtlaku v kapalinách. V obou případech vznikají místa s vakuem, která implodují a mohou mít destruktivní účinky na okolní materiál. Kavítace může představovat hrozbu pro lopatky a vnitřní součásti čerpadel [7].

2.3 Ložiska a jejich závady

Jedním z nejčastějších zdrojů vibrací v elektrických točivých strojích jsou ložiska a závady na nich. Dělí se na dva základní typy – kluzná a valivá. Správná detekce ložiskových závad vede ke včasnému varování a upozornění na potřebu výměny. Ložiska mají svou životnost, která se může výrazně snižovat různými vlivy. Mohou jimi být nesprávná montáž, nevhodná teplota (souvisí s viskozitou mazacího oleje), špatné rozložení sil, odlehčení jednoho ložiska na úkor přetěžování druhého, nedostatečné mazání, špatně zvolené mazivo, znečištění, vniknutí cizích částí nebo vlhkosti, apod. [7], [9].

2.3.1 Kluzná ložiska

Jejich konstrukční uspořádání je takové, že rotující část (zpravidla hřídel) je většinou upevněna ve vnitřním kroužku, který dosedá s definovanou vůlí na kroužek vnější. Oproti valivým ložiskům neobsahuje žádné další rotující části. Hladké otáčení je způsobeno danou vůlí a mazivem (zpravidla olej). Proto je nutné zajistit přívod a odvod mazacího oleje a vyvarovat se jeho úniku. To je zajištěno většinou přívodní a odvodní drážkou a těsněním.

Závady kluzných ložisek

Mezi závady těchto typů ložisek patří například opotřebení a nadměrná vůle. Také sem patří problémy spojené s olejem, jako je víření oleje a tlučení oleje (oil whip).

Při opotřebení vzniká v ložisku nadměrná vůle, která se projevuje ve spektru rychlosti vibrací přítomností násobků frekvence otáčení. Detekce nadměrné vůle pomocí vibrací je stále v dnešní době nespolehlivá a je těžké ji přesně určit. Nejlepší detekcí je v tomto případě preventivní vizuální prohlídka ložisek diagnostikem.

Víření oleje je nestabilita, která vzniká v případě, kdy olejový klín v ložisku tlačí náboj (hřídel) dokola ve směru otáčení, ale s nižší frekvencí, než je frekvence otáčení hřídele. Projevuje se zpravidla velmi významně v oblasti subsynchronních frekvencí cca 0,4 až 0,48x.

Tluchení oleje (oil whip) může být přítomno v případě, kdy je motor provozován nad dvojnásobkem kritických otáček. Frekvence víření oleje může při těchto otáčkách budit rezonanci a nadměrné vibrace [7], [9].



2.3.2 Valivá ložiska

Převažující množství točivých strojů obsahují valivá ložiska. Jejich životnost je závislá nejen na preciznosti výroby, ale především na okolních vlivech. Ložiska jsou nejcitlivější na nadměrné vibrace a dynamické zatížení. Je tedy třeba dbát na eliminaci škodlivých vlivů, jako jsou nesouosost, nevyváženost, nedostatečné mazání, chybná montáž nebo problémy převodů. Životnost ložisek se může změnit se třetí mocninou zatížení. Proto je důležité tyto vlivy detekovat a co nejefektivněji odstraňovat.

Při detekci vibrací ložisek je nejvhodnější použít měření zrychlení nebo rychlosti. Měření výchylky je nevhodné z důvodu vysokých frekvencí vibrací. Detekce pomocí zrychlení má výhodu oproti detekci rychlosti v tom, že zvýrazňuje ložiskové frekvence, což může upozornit na vznikající závadu dříve, než by tomu bylo při měření rychlosti. Avšak měření zrychlení může detekovat falešnou poruchu, proto je vhodné při podezření na poruchu změřit i rychlost a podle toho vyhodnotit, zda porucha skutečně vzniká.

Závady valivých ložisek

Vadná ložiska se projevují vibracemi ve třech oblastech frekvencí: náhodné ultrazvukové, vlastní ložiskové a frekvence ložiskových závad. Vlastní frekvence ložiska se pohybuje mezi 500 Hz a 2 000 Hz. Při přítomnosti závady se vlastní frekvence projevuje více, než v případě bezporuchového stavu. Pokud se okolo vlastní frekvence objevují postranní pásma s odstupem $1x$, pak se jedná o zhoršování poruchy.

Frekvence ložiskových závad napomáhá přesněji identifikovat místo poruchy v ložisku. Rozlišují se čtyři typy závad, pro které jsou odpovídající frekvence: na vnitřním kroužku (BPFI), na vnějším kroužku (BPFO), na valivém tělísku (BSF) a na kleci (FTF). Všechny tyto frekvence lze vypočítat pomocí známých parametrů ložiska a otáčkové frekvence.

Pro případ stojícího vnějšího kroužku platí:

$$BPFI = \frac{N}{2} \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi \right) \cdot n \quad (2.4)$$

$$BPFO = \frac{N}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi \right) \cdot n = N \cdot FTF \quad (2.5)$$

$$BSF = \frac{P_d}{2B_d} \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi \right)^2 \right) \cdot n \quad (2.6)$$

$$FTF = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\varphi \right) \cdot n \quad (2.7)$$

kde N je počet valivých elementů ložiska, n je otáčková frekvence rotoru [Hz], B_d je průměr valivého element [mm], P_d je roztečný průměr [mm] a φ je kontaktní úhel.

Všechny tyto parametry (kromě otáček rotoru) lze najít v katalogu výrobce daného ložiska. V některých katalozích se uvádí i hodnoty frekvencí závad, které je nutno vynásobit frekvencí otáčení a pak není třeba tyto frekvence dopočítávat pomocí daných parametrů ložiska.



Ložiskové frekvence závad se projevují až tehdy, pokud došlo k závadě. Pokud tyto frekvence známe a jsou přítomny, pak se jedná o informaci, že závada skutečně existuje a lze s touto informací dále počítat. Také je dobré mít na paměti, že ložiskové frekvence závad jsou necelými násobky otáčkové frekvence [7], [9].

2.3.3 Metody diagnostiky valivých ložisek

Kurtosis

Tato metoda spočívá v měření efektivní hodnoty rychlosti vibrací v pěti frekvenčních pásmech v rozsahu 2,5 až 80 kHz. Posuzuje se statické rozdělení amplitud vibrací v závislosti odchylky od normálního rozdělení. Předpokládá se, že ložisko bez závady vykazuje náhodný šum s normálním (Gaussovým) rozdělením. Při poruše to ale neplatí.

Poškození se hodnotí podle faktoru K:

$$K = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - x_{stř})^4 \cdot p(x) dx}{\sigma^4} \quad (2.8)$$

kde x je amplituda signálu, $x_{stř}$ je střední hodnota, $p(x)$ je pravděpodobnost x a σ je standardní odchylka vůči nulovému signálu.

Obálková metoda

Jedná se o analýzu pomocí obálky zrychlení. Naměřený signál obsahuje nízkofrekvenční oblast, která reprezentuje závady typu nevyváženost apod. Obsahuje také vysokofrekvenční oblast, která nás z pohledu detekce závad v ložisku zajímá nejvíce. Pomocí pásmového filtru lze odstranit nízkofrekvenční část. Filtr se volí v závislosti na otáčkách stroje, obvykle se volí dolní hranice jako desetinásobek otáčkové frekvence.

Dále se zbývající signál usměrňuje, čímž dojde k zesílení hodnot. Výsledný průběh se nahradí obálkou. Takto získaný signál se zpracovává, stanovuje se celková hodnota (zvaná gE) a získává se spektrum obálky pomocí FFT.

Crest faktor

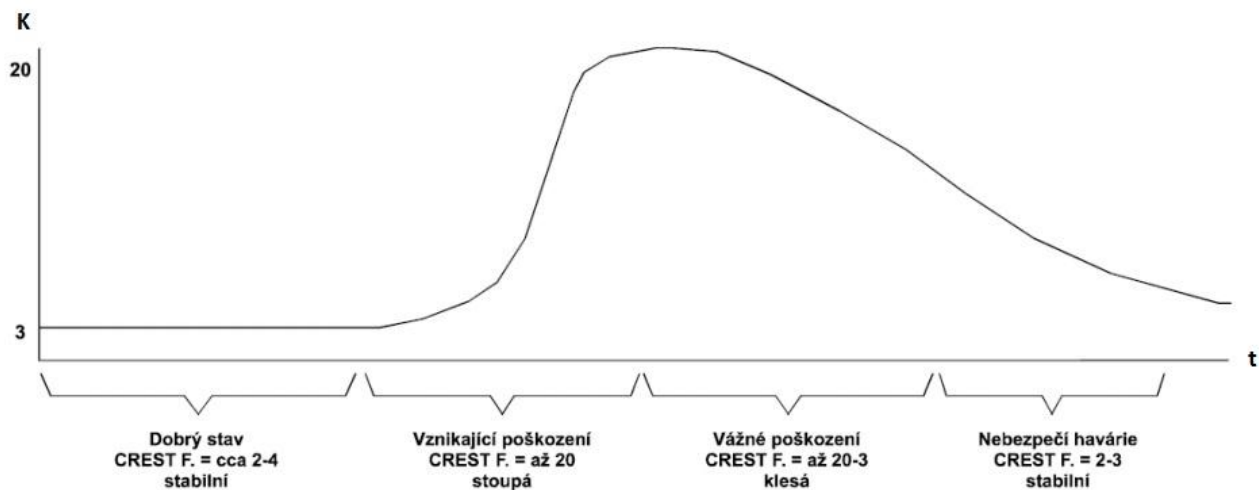
Princip této metody je založen na zjištění efektivní a špičkové hodnoty vibrací, poté se provádí jejich poměr:

$$K_v = \frac{\max(|v|)}{RMS(v)} \quad (2.9)$$

Nejlepší využití Crest faktoru je při častém měření a sledování změny faktoru v čase. Při vznikající poruše stoupá hodnota Crest faktoru. Tato metoda je zejména v počátcích poruchy velmi citlivá a dokáže odhalit vznikající poruchu dříve, než většina ostatních metod. Nevýhodou je, že při delším rozvoji poruchy ložiska Crest faktor klesá až k hodnotám, které jsou typické pro vznikající poškození, což znemožňuje pozdější identifikaci poruchy. Vzhledem k těmto nevýhodám je metoda využívána pouze jako doplňková [7], [9].



Hodnota Crest faktoru by se měla pohybovat v rozmezí od 2 do 4. Vyšší hodnoty znamenají vznikající poškození, jak je patrné z obr. 2.3.3-1.

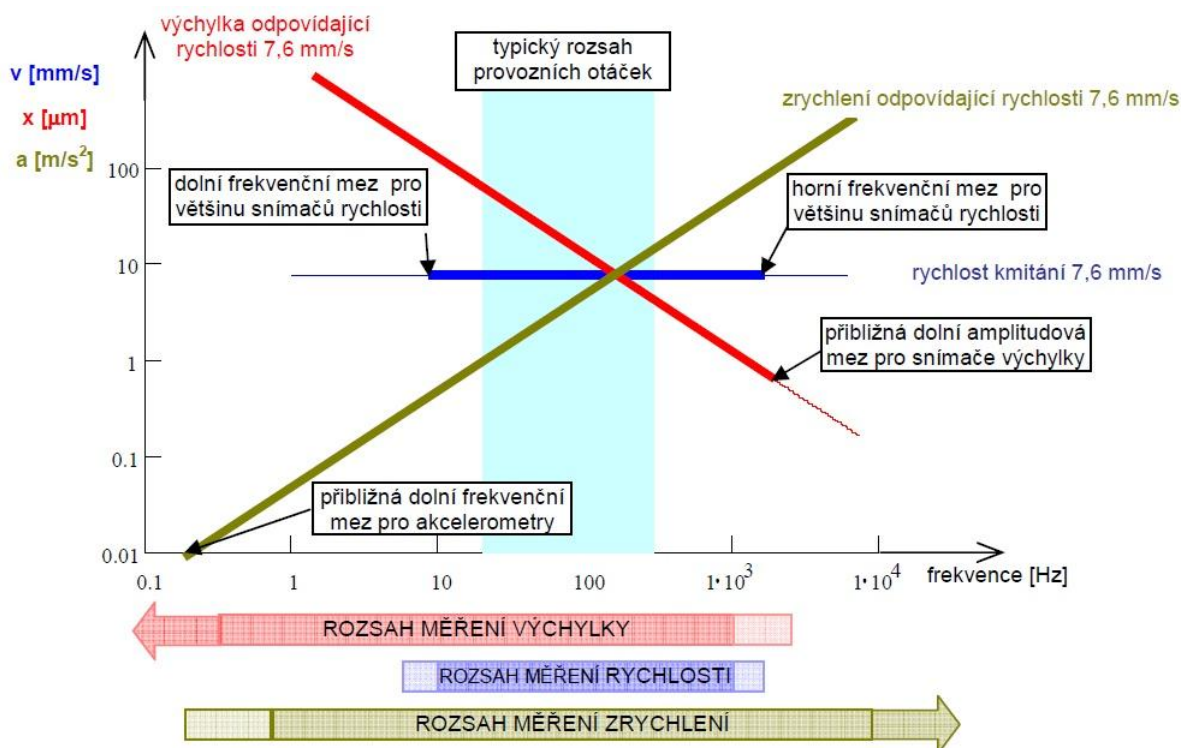


Obr. 2.3.3-1 Vývoj Crest faktoru v závislosti na vývoji poruchy [13].

3 MĚŘENÍ VIBRACÍ

3.1 Měřené veličiny

Při měření vibrací (stejně jako při analýze obecného pohybu) se vyjadřují tři parametry: výchylka, rychlost a zrychlení. Popis těchto veličin je uveden výše v kapitole 1. Mezi těmito veličinami existuje matematická spojitost. Teoreticky by tedy stačilo znát jednu veličinu a na základě ní by bylo možné vyjádřit obě ostatní. V praxi je však nutné rozlišovat, v jakém frekvenčním pásmu měření provádíme. Existuje totiž omezení snímačů výchylky, rychlosti i zrychlení. Podle tohoto omezení můžeme zjistit, v jakém rozsahu lze použít ten který snímač a kterou veličinu je spolehlivější měřit. Omezení snímačů a jejich rozsahů je vyjádřeno na obr. 3.1-1. Z obrázku je patrné, že pro typický rozsah provozních otáček lze použít všechny druhy měření, ale pro nízké frekvence (1 Hz a méně) je vhodnější využít měření výchylky, od cca 1 kHz je naopak vhodnější měřit zrychlení. Měření rychlosti je vhodné od 10 Hz do 1 kHz [9].



Obr. 3.1-1 Rozsahy snímačů při měření [9].

3.2 Snímače vibrací

Funkce snímačů vibrací je přeměna vibračního pohybu na elektrický signál. U snímačů vibrací rozlišujeme dva základní druhy, a to snímače absolutní a relativní. Absolutní snímače hodnotí vibrace vztažené vůči pevné soustavě, kterým je obecně Země. Měřenými vibracemi jsou ty, které se vyskytují vůči vlastní setrvační hmotě. Oproti tomu relativní snímače vibrací jsou takové, které měří vibrace vztažené vůči zvolenému bodu, například vibrace hřídele vůči statoru nebo ložisku. Snímače rozdělujeme na pasivní (indukční a kapacitní) a aktivní (elektrodynamické a piezoelektrické) [7].



Na snímače je kladeno několik požadavků, vztahujících se na měřený stroj, okolí a dobu měření:

- dynamický rozsah
- frekvenční rozsah
- časová stálost
- vysoká citlivost
- linearita
- malá hmotnost a rozměry
- odolnost vůči okolnímu prostředí

3.2.1 Snímače výchylky

Odporové snímače výchylky

Jedná se o přímé kontaktní snímače, které přeměňují mechanický pohyb (výchylku) na elektrický signál pomocí změny odporu. Jsou to v podstatě potenciometry, které jsou spojeny se strojem a jejich běžec mění polohu na odporové dráze podle výchylky. Tyto snímače mají velkou životnost a velkou rozlišovací schopnost.

Indukční snímače výchylky

Fungují na principu závislosti indukčnosti jejich cívek na proudové hustotě vířivých proudů. Vířivé proudy jsou vyvolány magnetickým polem cívek, které proniká do okolního feromagnetického materiálu (měřený stroj nebo jeho část). Sekundární magnetické pole, vyvolané vířivými proudy, zeslabuje intenzitu původního magnetického pole, vyvolané cívkami snímače. Tyto změny se pak vyhodnocují jako změna výchylky. Snímače jsou náchylné na parazitní vlivy, vyvolané délkou kabelu, vnější elektromagnetické pole apod. Z toho důvodu se minimalizuje délka kabelu tak, že se těsně k cívce do stínícího obalu umístí část vyhodnocovací elektroniky. Ta převádí signál z cívek na takový signál, který už těmito vlivům odolává a posílá jej dál do vyhodnocovací nebo zapisovací elektroniky.

Kapacitní snímače výchylky

Využívá se zde efektu změny kapacity při změně vzdálenosti dvou elektrod. Snímač je bezkontaktně umístěn k měřenému stroji (nebo jeho části), která je využita jako elektroda a dielektrikem je prostředí mezi elektrodou a snímaným povrchem. Zaznamenává se změna kapacity mezi elektrodou snímače a strojem, představující druhou elektrodu. Elektrody jsou uspořádány diferenciatně, takže se u jedné z nich kapacita zmenšuje a u druhé zvětšuje. Vyhodnocuje se pak jejich rozdíl. Tyto snímače se mohou používat i ve velmi náročných podmínkách, například při vysoké teplotě a tlaku [6], [7].



3.2.2 Snímače rychlosti

Elektrodynamické snímače

U těchto snímačů se využívá elektrodynamického jevu pohyblivé cívky v magnetickém poli permanentních magnetů. Cívka při vibracích mění polohu v magnetickém poli a indukuje se v ní napětí podle vztahu:

$$U = B \cdot l \cdot v \quad (3.1)$$

kde B je indukce magnetického pole vyvolané magnety, l je délka vodiče pohyblivé cívky a v je rychlost kmitů.

Tyto senzory se používají pro amplitudu výchylky do 200 mm a pro rozsah frekvence kmitání 5 až 10 Hz. Mají dobrou rozlišovací schopnost, ale jsou náchylné na parazitní magnetické pole [7].

3.2.3 Snímače zrychlení

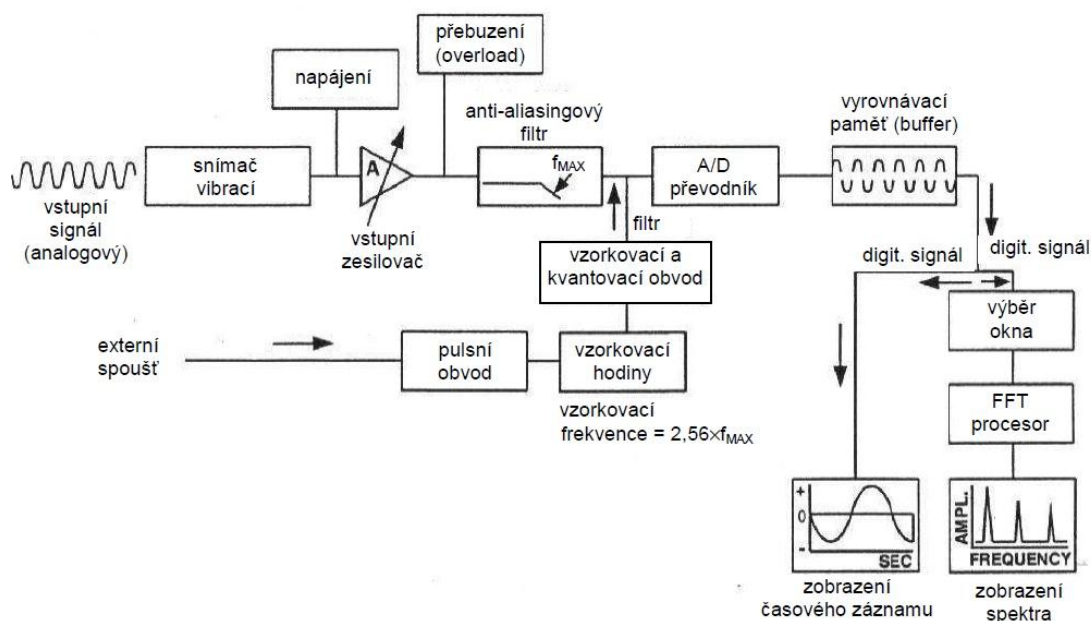
Piezoelektrické snímače

Tyto snímače využívají piezoelektrického jevu při deformaci krystalů. Na měřeném povrchu stroje (nebo jeho části) je umístěna seizmická hmota snímače, která při vibracích stroje působí na krystal. Na něm se při mechanickém namáhání vytváří náboj a ten je elektronikou vyhodnocován.

Tento snímač nelze použít při vyhodnocování konstantního zrychlení, protože musí docházet ke změně minimálně 0,1 Hz. Pro zvětšení citlivosti je vhodné použít dvojici piezoelektrických snímačů [7].

3.3 Zpracování naměřeného signálu

K měření vibrací se používá k tomu určený analyzátor, jehož základní blokové schéma je vyobrazeno na Obr. 3.3-1. Vstupní analogový signál je sbírán snímačem vibrací (výchylky, rychlosti nebo zrychlení), signál je zesílen zesilovačem a prochází antialiasingovým filtrem. Po přefiltrování je digitalizován v A/D převodníku a shromažďován v zásobníku dat (buffer). Takto uložený signál je možné zobrazit nebo zpracovat pomocí Fourierovy transformace [9], [10].



Obr. 3.3-1 Blokové schéma analyzátoru [9].

3.3.1 Digitalizace naměřeného signálu

Digitalizace signálu je důležitá pro další zpracování pomocí výpočetní techniky a elektroniky. Provádí se pomocí A/D převodníku, který je řazen za filtraci, zde se odfiltrují nežádoucí složky. Kvalitní navzorkování je provedeno tehdy, když je daná funkce ryze periodická s periodou T , což v praxi není mnohdy možné realizovat přesně. Analogový signál je tedy diskretizován posloupností N vzorků v intervalu T . Důležitá je také správně zvolená vzorkovací frekvence f_{vz} .

Tato vzorkovací frekvence musí splňovat kritérium (Nyquistovo kritérium). K tomu, aby bylo možné diskretizovaný signál opět rekonstruovat, je zapotřebí takové vzorkovací frekvence, která bude nejméně dvojnásobná, než je maximální frekvence vzorkovaného signálu f_{max} .

Aliasing efekt

Aliasing je nežádoucí efekt překládání pásma. Je způsoben přítomností vyšších frekvencí, než je Nyquistova frekvence. Tyto složky se zobrazují ve spektru od 0 Hz do f_N (Nyquistova frekvence). Vysokofrekvenční složky se mísí s nízkofrekvenčními složkami a spolu tvoří nerozlišitelný signál. Tento jev lze potlačit užitím antialiasingového filtru, což je dolnofrekvenční filtr s pásmem propustnosti do frekvence f_N .

Chyba únikem

Pro Fourierovu transformaci je potřebné získat ryze periodický signál, který obsahuje celistvý počet period. Při měření signálu vibrací může nastat (a často nastává) situace, kdy je snímání signálu ukončeno dříve, než se stihne poslední kmit vrátit do výchozího stavu. Dochází tedy k neperiodickému signálu, který způsobí nespojitost na konci měřeného signálu. Tato nespojitost je nahrazována harmonickými složkami, které se vmísí do celého spektra. Pro potlačení tohoto jevu se využívá takzvané okénkování. To potlačí chybu na konci měření [9], [10].

Rozlišení a počet spektrálních čar

Rozlišení je vhodné nastavovat podle zmíněných chyb a kritérií. Pro rozlišení platí:

$$\Delta f = \frac{1}{T_{vz}} = \frac{f_{vz}}{N} \quad (3.2)$$

Pro Nyquistovo kritérium platí:

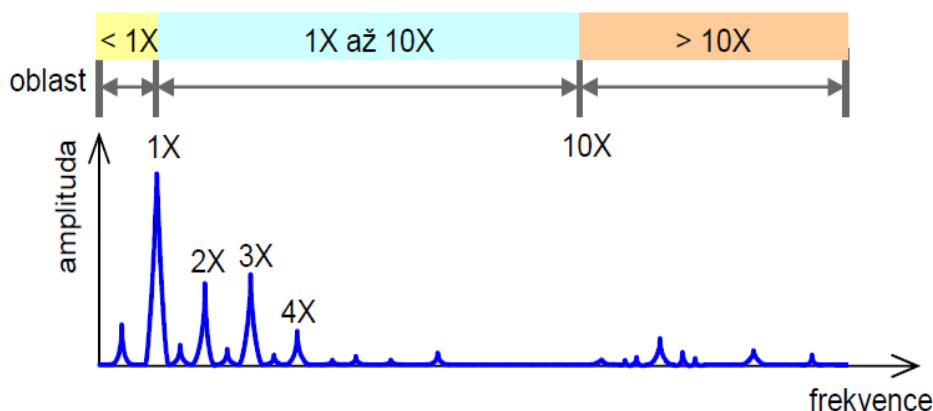
$$f_N = \frac{f_{vz}}{2} \quad (3.3)$$

Při volbě vzorkovací frekvence však v praxi nestačí dodržet Nyquistovo kritérium, kdy vzorkovací frekvence má být dvakrát vyšší, než maximální frekvence vzorkovaného signálu. Kvůli šířce pásma antialiasingového filtru, jehož charakteristika je sice strmá, ale není ideálně kolmá, uvažujeme minimální násobek maximální frekvence 2,56 (a více). Pro vzorkovací frekvenci tedy platí:

$$f_{vz} \geq 2 * f_{max} \quad (3.4)$$

3.4 Významné frekvence

Pro správné určení závad ve stroji při spektrální analýze je třeba znát významné frekvence, o kterých víme, že se mohou ve stroji objevit. Tato znalost pomáhá rozlišit, který výskyt harmonických je v pořádku a který není. Základní rozdělení frekvenčního spektra zobrazuje Obr. 3.4-1. Pro subsynchronní oblast <1x jsou typické závady typu víření oleje v ložisku. Pro nízkofrekvenční oblast od 1x do 10x jsou typické závady typu nesouosost, nevyváženost, uvolnění a další závady mechanického původu. Pro vysokofrekvenční oblast >10x jsou zase typické závady na ložisku nebo ozubených soukolí, také zde může být pozorován projev excentricity. Je však potřeba mít na paměti, že se jedná pouze o orientační srovnání a není zcela vypovídající skutečností. Pro přesné určení frekvencí je třeba znát individuální parametry stroje a jeho částí [9].



Obr. 3.4-1 Rozdělení významných frekvencí [9].



4 DIAGNOSTIKA ASYNCHRONNÍCH MOTORŮ

V laboratořích SA2.08 v budově FEKT jsme provedli základní měření čtyř trojfázových, asynchronních motorů s rotorem nakrátko. Parametry všech motorů jsou uvedeny v tabulce Tab. 4-1. Jedná se o motory řady TM 90, jejichž výrobcem je firma EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Tyto motory mají kostru, zadní ložiskový štít a přední ložiskový štít vyroben z hliníkové slitiny, ventilátor a jeho kryt je vyroben z polypropylenu. Materiál statorového a rotorového svazku je plech. Izolace vinutí je ve třídě F. Instalovaná ložiska jsou typ 2Z C3. Měřené motory typu TM90 4S mají výkon 1,1 kW a účinnost 79% [17]. V následující tabulce jsou uvedeny štítkové hodnoty všech motorů. V dalším textu bude používáno označení motor 1 až 4.

Tab. 4-1 Štítkové hodnoty asynchronních motorů.

	2p	Zapojení	f [Hz]	cosφ [-]	U [V]	I [A]	P [W]	n [min ⁻¹]
Motor TM90-4S	4	Y/Δ	50	0,78	400/230	2,70/4,68	1100	1400

Podmínky okolí v laboratoři a napětí sítě jsou uvedeny v Tab. 4-2. Měření provádíme při zapojení do hvězdy a se síťovou frekvencí 50 Hz.

Tab. 4-2 Podmínky okolí v laboratoři.

Relativní vlhkost vzduchu	19,80%
Teplota	21,8°C

Měření jsme praktikovali pomocí přístroje VIBXpert II, jehož součástí jsou i dva piezoelektrické ICP akcelerometry (sonda A a sonda B) s parametry 2 mA/24 V. Analyzátor VIBXpert II je rychlý, doba měření je velmi krátká, takže je vhodný pro servisní měření. Je v něm obsažen sběrač dat a FFT analyzátor, umožňuje měřit rychlost, zrychlení i výchylku, amplitudové spektrum, obálkové spektrum, fáze, teplotu apod. [12].

4.1 Měření

Měření jsme provedli při zapojení do hvězdy a se síťovou frekvencí 50 Hz. Motory jsme měřili při chodu naprázdno. Měřením byly ověřeny otáčky strojů 1490 min⁻¹. Sondy jsme umístili na přední ložiskový štít. Sonda A byla umístěna vertikálně a sonda B horizontálně. Vertikální sonda byla upevněna pomocí šroubu díky tomu, že se v horní části ložiskového štítu nacházel závit, vytvořený od výroby. Horizontální sonda byla upevněna pomocí vestavěného magnetu ke šroubu na ložiskovém štítu. Na dalších stránkách bude patrné, především v grafech spektra, že toto nedokonalé umístění způsobuje významné zesilování některých frekvencí a naopak zeslabování jiných. Proto považujeme za referenční sondu A, především při analýze možných vibrací, způsobených ložisky.



4.2 Výstupy měření

Změřili jsme pro každý motor zrychlení, rychlost a výchylku kmitů v horizontální i vertikální orientaci, vše v radiálním směru. Všechna měření byla prováděna po dobu 1 sekundy. Výstupy z analyzátoru VIBXPERT II jsou uvedeny na následujících stranách. Pro analýzu vibrací asynchronních motorů nás nejvíce zajímají výsledky rychlosti a zrychlení, které jsou při měření nejlépe vypovídající z důvodu rozsahu, viz kapitola 3.1.

Pro hodnoty rychlosti a zrychlení jsme provedli zobrazení průběhů v čase. Dále jsme tyto průběhy využili pro rychlou Fourierovu transformaci. Ta je pro nás důležitá z důvodu zobrazení spektra. Výstup Fourierovy transformace jsou zobrazeny v grafech. Červená křivka vyznačuje výstup ze sondy A pro vertikální orientaci, modrá křivka vyznačuje výstup ze sondy B pro horizontální orientaci.

Pro každý z motorů jsme provedli výpočet Crest faktoru rychlosti. Díky Crest faktoru můžeme identifikovat poruchu ložiska nebo naopak poruchu ložiska vyloučit. Pro každý z motorů byla zjištěna maximální a efektivní hodnota amplitudy v programu MATLAB. Jak již bylo zmíněno, poměr těchto veličin nám udává výslednou hodnotu Crest faktoru.

Jako další metodu analýzy jsme využili známé parametry ložiska. Na jejich základě jsme vypočítali frekvence ložiskových závad. Tyto frekvence budeme vyhledávat ve spektrech a sledovat jejich projev.

Před samotnou analýzou je pro měřené motory potřeba určit základní otáčkovou frekvenci. Vycházíme ze známosti otáček naprázdno 1498 min^{-1} :

$$f_n = \frac{n}{60} = \frac{1498}{60} = 24,96 \doteq 25 \text{ Hz} \quad (4.1)$$

Tedy základní otáčková frekvence je 25 Hz. Tento údaj je pro nás důležitý, neboť k otáčkové frekvenci jsou relativní i frekvence vibrací. Pro tuto frekvenci platí, že doba jedné otáčky je 40 ms.



4.2.1 Výpočet frekvencí ložiskových závad ložisek motorů TM90

Pro určování stavu ložisek nám mimo jiné poslouží i sledování určitých frekvencí ložiskových závad, které jsou popsány v kapitole 2.3.2. Zde uvedeme tabulku pro jednotlivé frekvence závad, abychom s těmito údaji mohli dále pracovat při vyhodnocení spekter signálu.

Víme, že v motorech řady TM90 se nachází ložiska typu 6204-2Z, kde roztečný průměr ložisek je 33,5 mm, 8 kuliček o průměru 8 mm. Na základě těchto údajů byly vypočítány následující frekvence ložiskových závad:

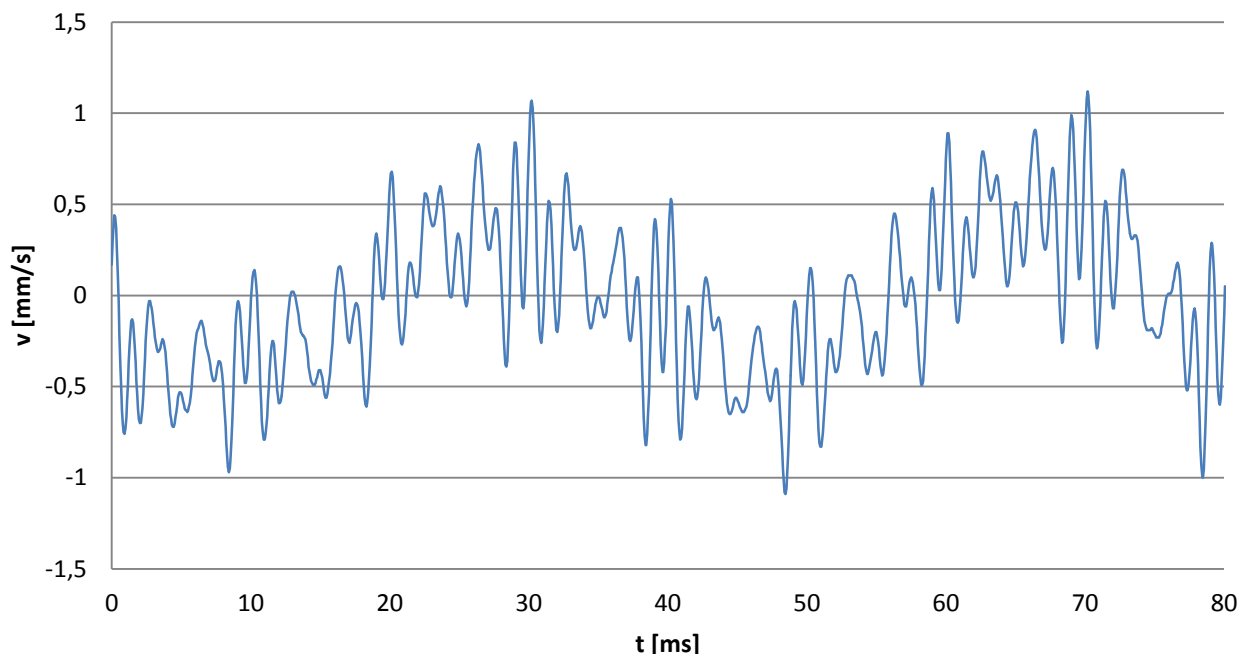
Tab. 4.2.1-2 Frekvence ložiskových závad ložiska 6204-2Z.

Závada na:	Označení:	
vnitřním kroužku	BPFI [Hz]	123,7
vnějším kroužku	BPFO [Hz]	76,2
valivém tělísku	BSF [Hz]	49,5
kleci	FTF [Hz]	9,5

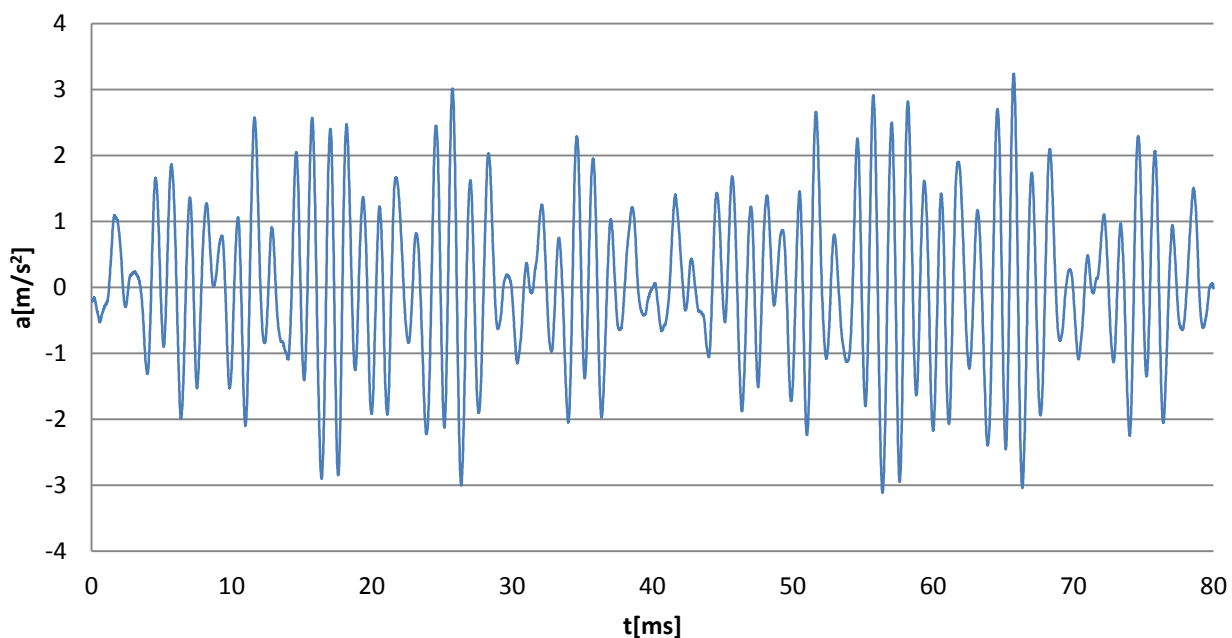
Pomocí těchto frekvencí budeme posuzovat stav ložiska ve spektru rychlosti na následujících stránkách. Pro každý motor zobrazíme spektrum od 0 do 150 Hz. Pokud se na frekvencích závad budou objevovat amplitudy, pak se může jednat o závadu ložiska. Toto tvrzení však není zcela stoprocentní. Dané frekvence mohou být vyšší i z důvodů jiných, než je závada ložiska. Amplitudy na těchto frekvencích bývají obvykle velmi malé v porovnání s ostatními amplitudami v celém spektru i v případě poškozeného ložiska. Proto budeme tuto metodu kombinovat s metodou Crest faktoru.

4.2.2 Motor 1

Průběhy rychlosti a zrychlení vibrací



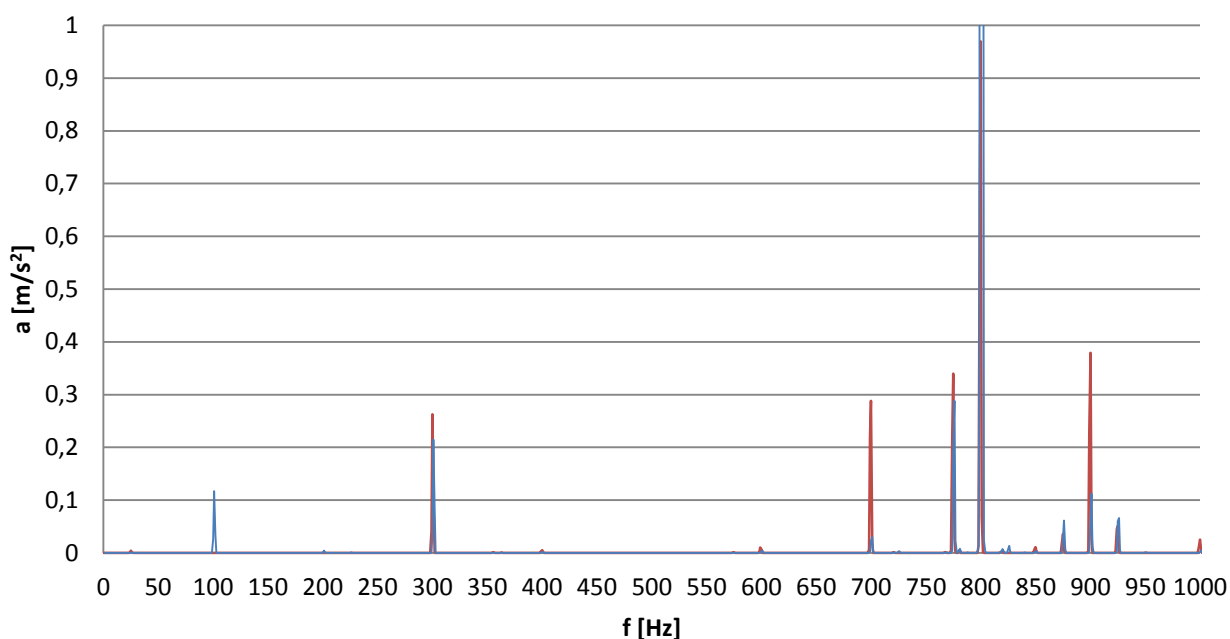
Obr. 4.2.2-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 1 po dobu dvou otáček.



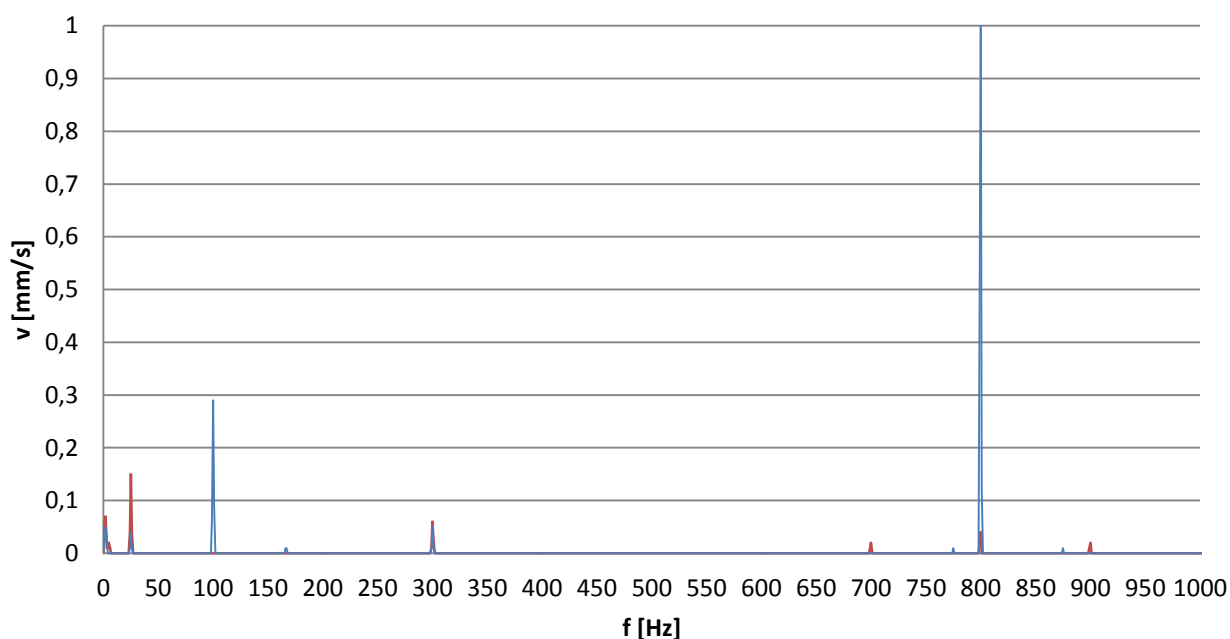
Obr. 4.2.2-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 1 po dobu dvou otáček.

Na obrázku 4.2.2-1 vidíme průběh zrychlení vibrací, na obrázku 4.2.2-2 můžeme pozorovat průběh rychlosti vibrací. Oba průběhy byly naměřeny sondou A ve vertikální poloze s pevným šroubovým spojem. Pro oba tyto grafy můžeme říct, že zrychlení i rychlost probíhá na vysokých kmitočtech. Po dobu jedné otáčky rotoru dochází k mnoha změnám hodnot. Rychlost vibrací v tomto motoru mírně přesahuje hodnotu 1 mm/s a zrychlení dosahuje hodnot cca 3,3 m/s^2 .

Spektrum rychlosti a zrychlení vibrací



Obr. 4.2.2-1 Spektrum zrychlení vibrací motoru 1.



Obr. 4.2.2-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 1.

Z obrázku 4.2.2-3 a obrázku 4.2.2-4 můžeme pozorovat, že při zrychlení i rychlosti dominuje frekvence 800 Hz, a to obzvlášť v případě sondy B v horizontální poloze (modrá křivka). Pravděpodobně se jedná o zesílení vibrací vlivem nedokonalého uchycení sondy magnetem ke šroubu, jak již bylo zmíněno výše. V obou grafech jsme museli přizpůsobit rozlišení tak, aby z nich byly patrné i další významné frekvence, proto není vidět konečná hodnota sondy B v oblasti 800 Hz, která dosahuje několikanásobných hodnot oproti sondě A.

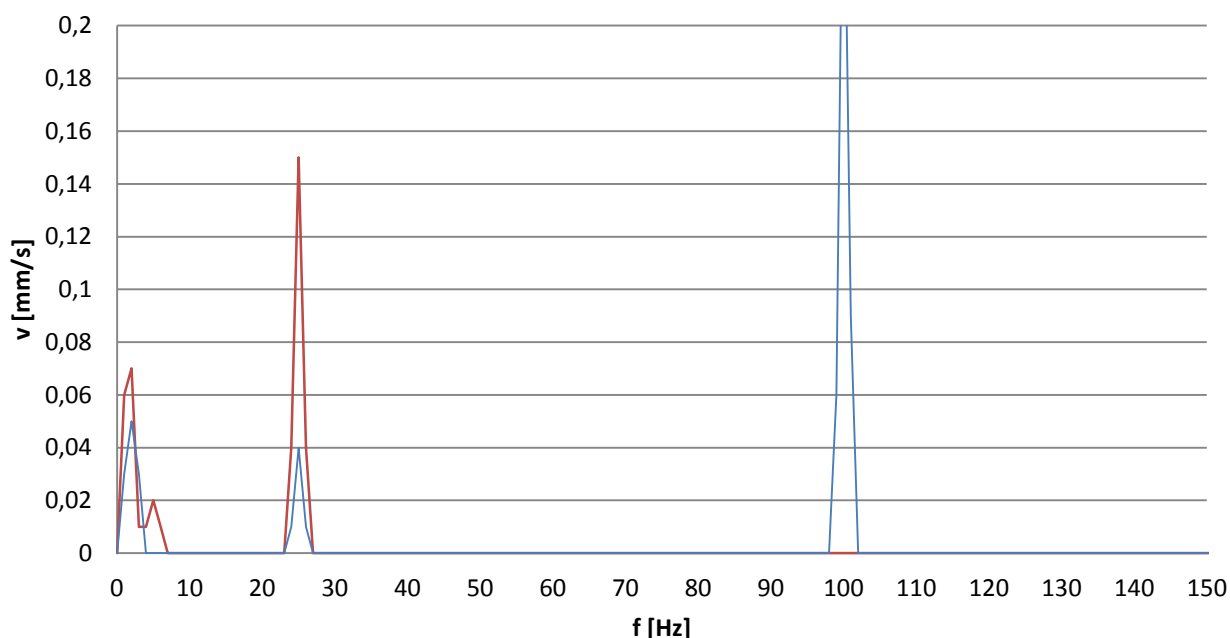
Z grafu spektra zrychlení je patrná nejen dominantní frekvence 800 Hz, ale jsou to i frekvence 775 Hz, 700 Hz a 900 Hz, dále 300 Hz a 100 Hz. V okolí 900 Hz jsou patrné dvě špičky, které mají od této hodnoty odstup 25 Hz, tedy otáčkové frekvence. Z grafu spektra rychlosti, pokud zanedbáme sondu B, je vidět především dominanta otáčkové frekvence 25 Hz a potom mírné špičky v subsynchronní oblasti.

Analýza závady ložisek:

Pro motor 1 vypočítáme Crest faktor rychlosti:

$$K_v = \frac{\max(|v|)}{RMS(v)} = \frac{1,72}{0,4480} = 3,839$$

Hodnota Crest faktoru se blíží hodnotám, které odpovídají vznikajícímu poškození, viz. kapitola 2.3.3. Je zde ale ještě dostatečná rezerva.

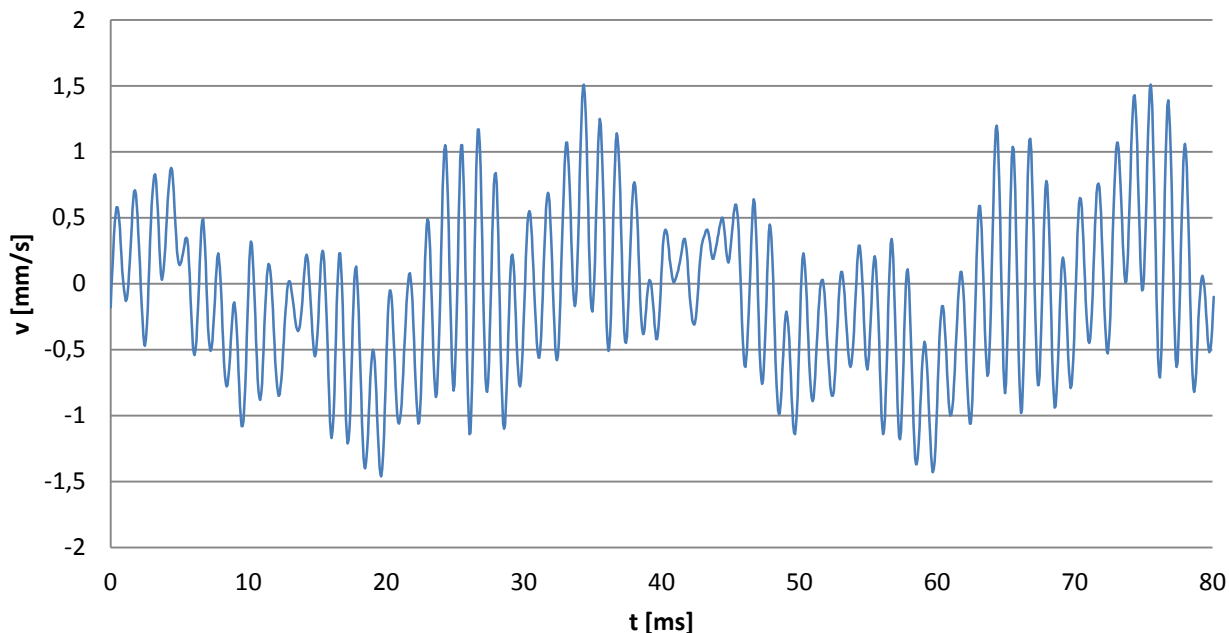


Obr. 4.2.2-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 1 pro analýzu ložiska.

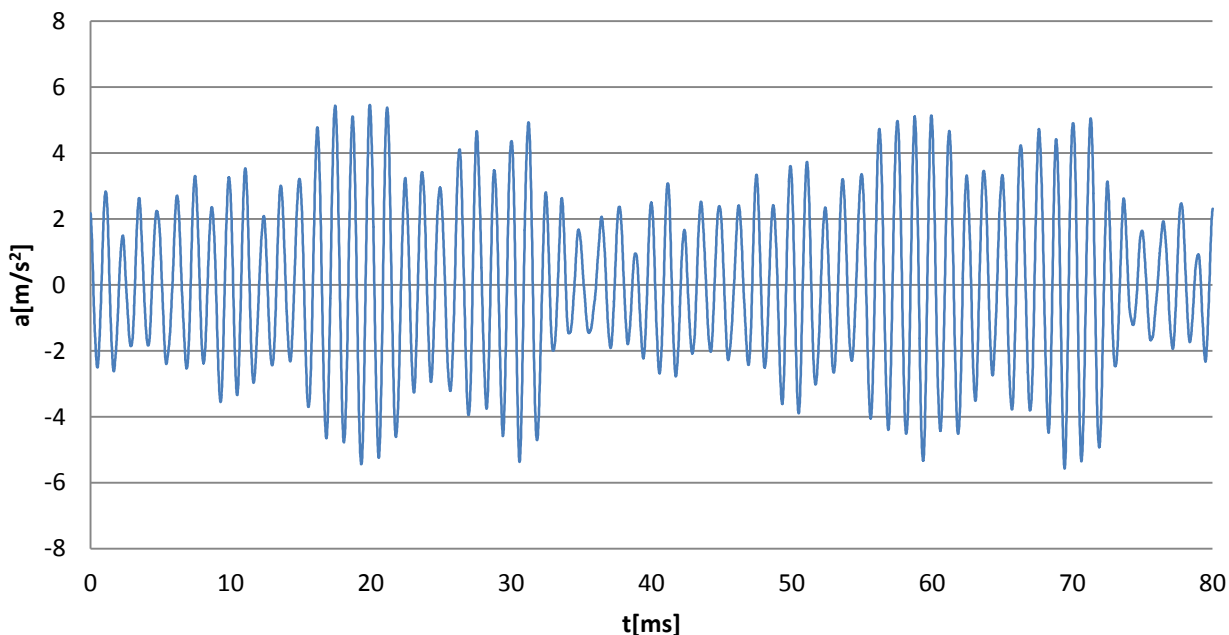
Z obrázku 4.2.2-5 je patrné, že na frekvencích závad se žádné špičky nenachází. Vzhledem k hodnotě Crest faktoru můžeme říci, že ložiska v motoru 1 jsou pravděpodobně v pořádku.

4.2.3 Motor 2

Průběhy rychlosti a zrychlení vibrací



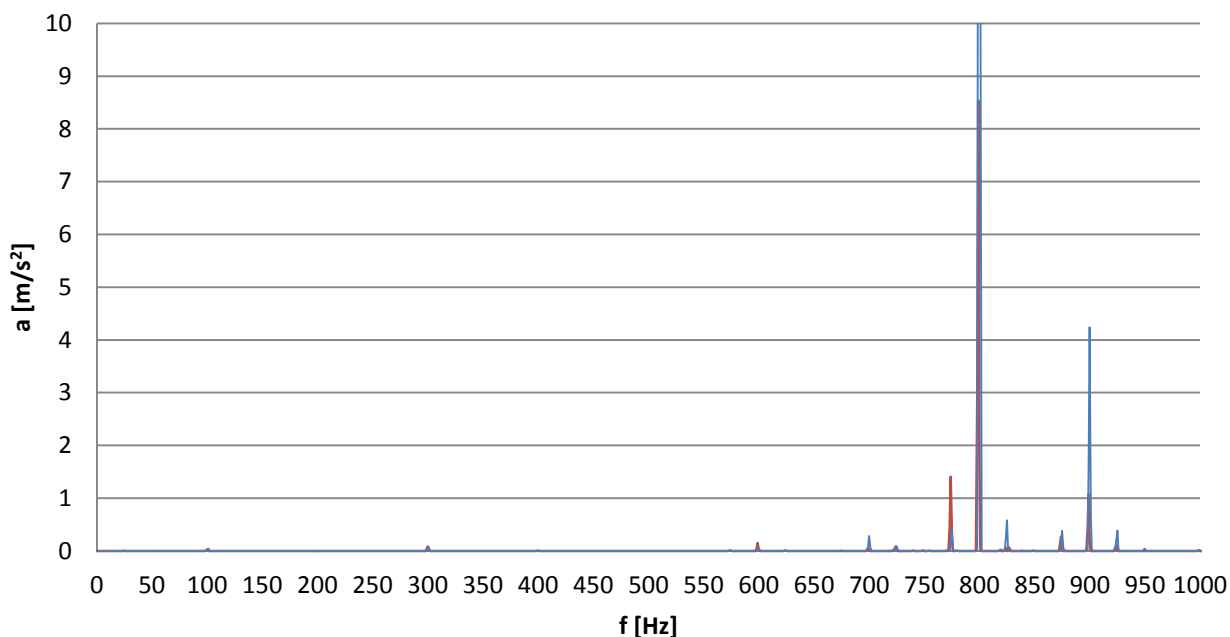
Obr. 4.2.3-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 2 po dobu dvou otáček.



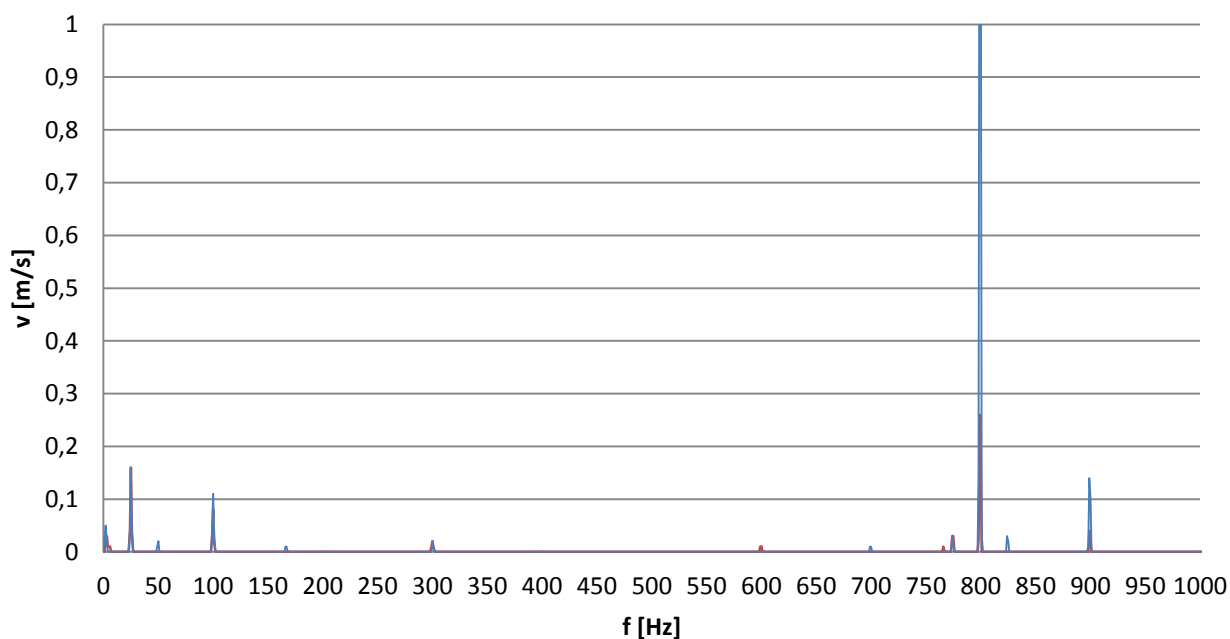
Obr. 4.2.3-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 2 po dobu dvou otáček.

Na obrázku 4.2.3-1 vidíme průběh zrychlení vibrací, na obrázku 4.2.3-2 pozorujeme průběh rychlosti vibrací. Oba průběhy byly opět naměřeny sondou A ve vertikální poloze s pevným šroubovým spojem. I zde je vidět, že zrychlení i rychlost probíhá na vysokých kmitočtech. Rychlost vibrací v tomto motoru dosahuje až k hodnotám 1,5 mm/s a zrychlení dosahuje hodnot cca 5,5 m/s^2 .

Spektrum rychlosti a zrychlení vibrací



Obr. 4.2.3-2 Spektrum zrychlení vibrací motoru 2.



Obr. 4.2.3-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 2.

Z obrázku 4.2.3-3 a 4.2.3-4 můžeme pozorovat, že při zrychlení i rychlosti opět dominuje frekvence 800 Hz. Také zde je výrazný rozdíl mezi vertikální a horizontální sondou.

Z grafu spektra zrychlení je patrná dominantní frekvence 800 Hz, která dosahuje až $8,5 \text{ m/s}^2$, a také frekvence 900 Hz. V okolí 900 Hz jsou patrná dvě postranní pásma s odstupem 25 Hz. Z grafu spektra rychlosti je vidět také dominanta 800 Hz, pak otáčkové frekvence 25 Hz a potom

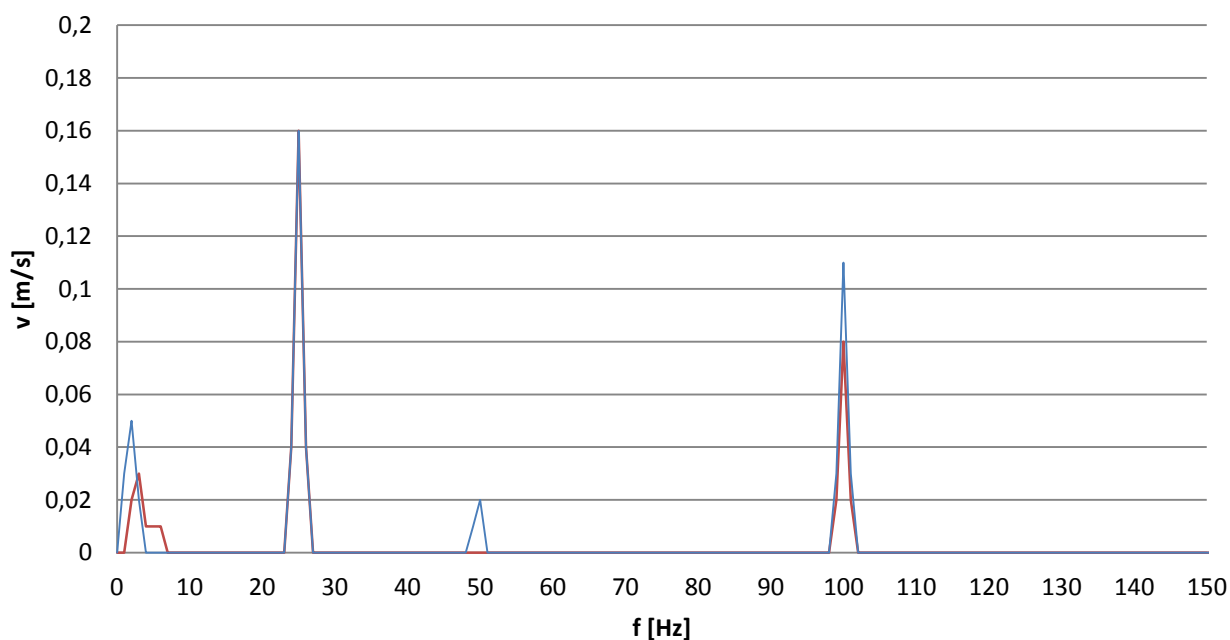
mírné špičky v subsynchronní oblasti. Další frekvencí je 100 Hz, méně výrazné jsou 300 Hz a 900 Hz.

Analýza závady ložisek:

Pro motor 2 vypočítáme Crest faktor rychlosti:

$$K_v = \frac{\max(|v|)}{RMS(v)} = \frac{1,87}{0,6167} = 3,032$$

Hodnota Crest faktoru nedosahuje hodnot pro vznikající poškození ložisek.

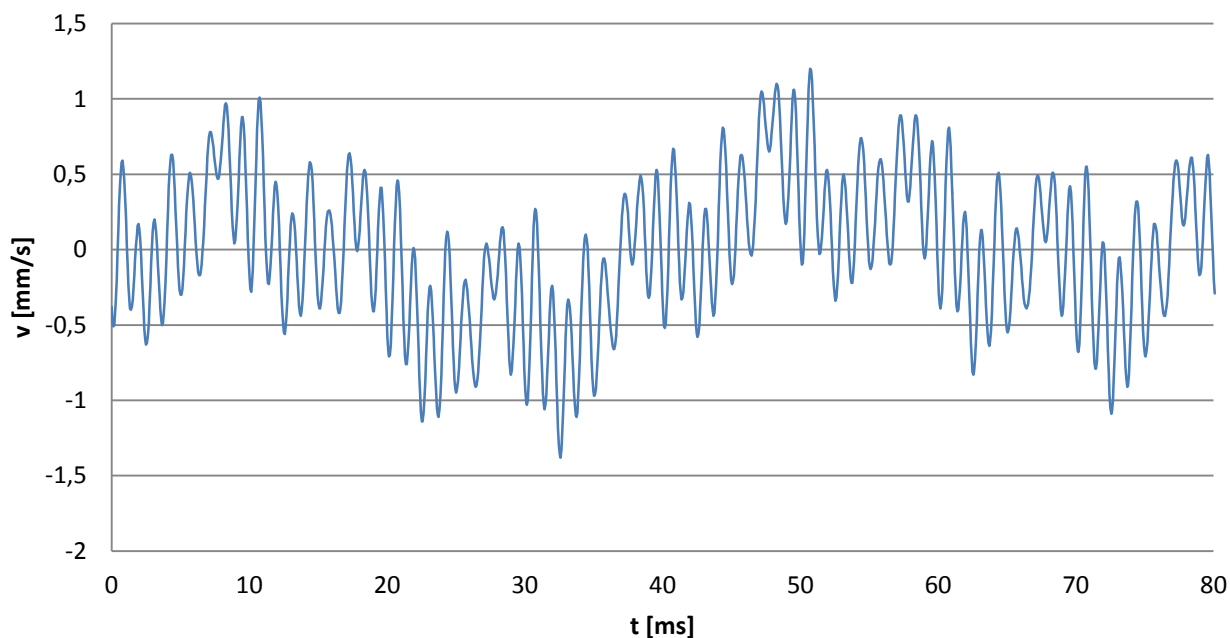


Obr. 4.2.3-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 2 pro analýzu ložiska.

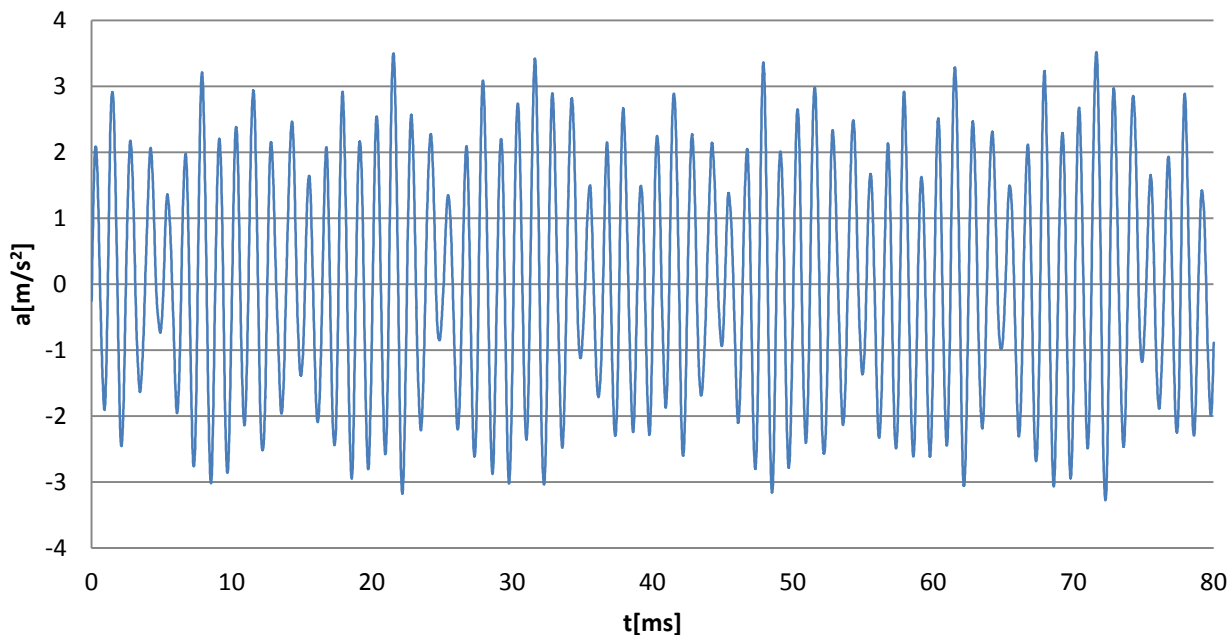
Při pozorování obrázku 4.2.3-5 zjistíme, že zde je pozorovatelná špička na frekvenci závady na valivém tělísku. Hodnota Crest faktoru je v rámci mezí pro bezporuchové ložisko. Může se jednat o vznikající vadu valivého tělíska, které ale ještě nemá vliv na provoz.

4.2.4 Motor 3

Průběhy rychlosti a zrychlení vibrací



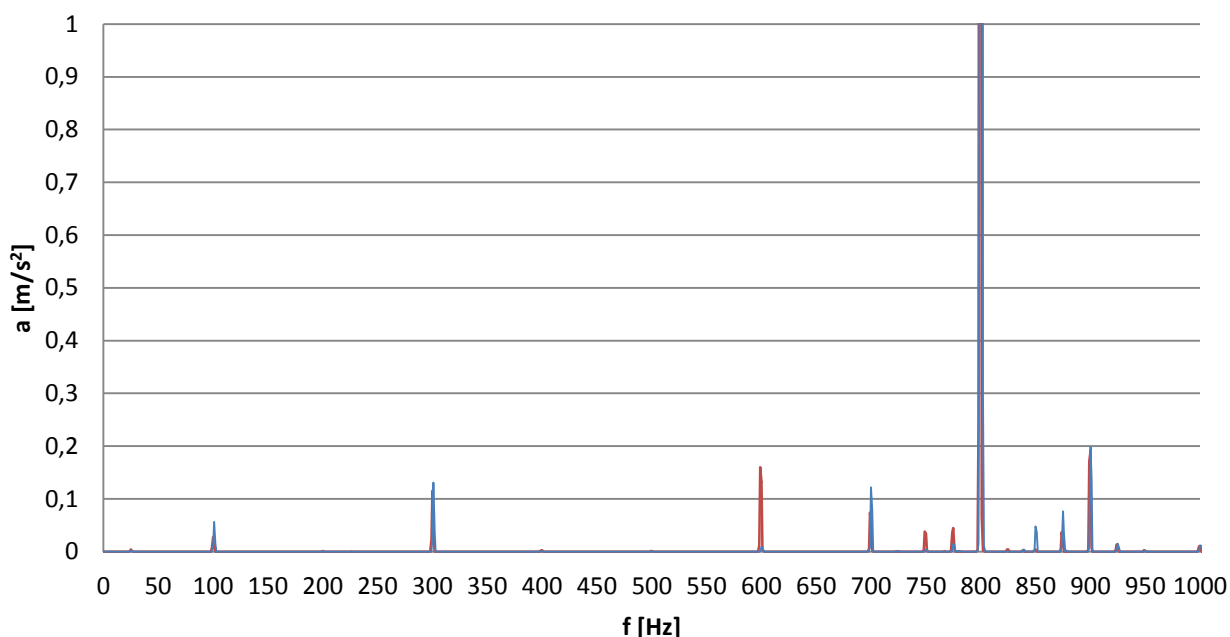
Obr. 4.2.4-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 3 po dobu dvou otáček.



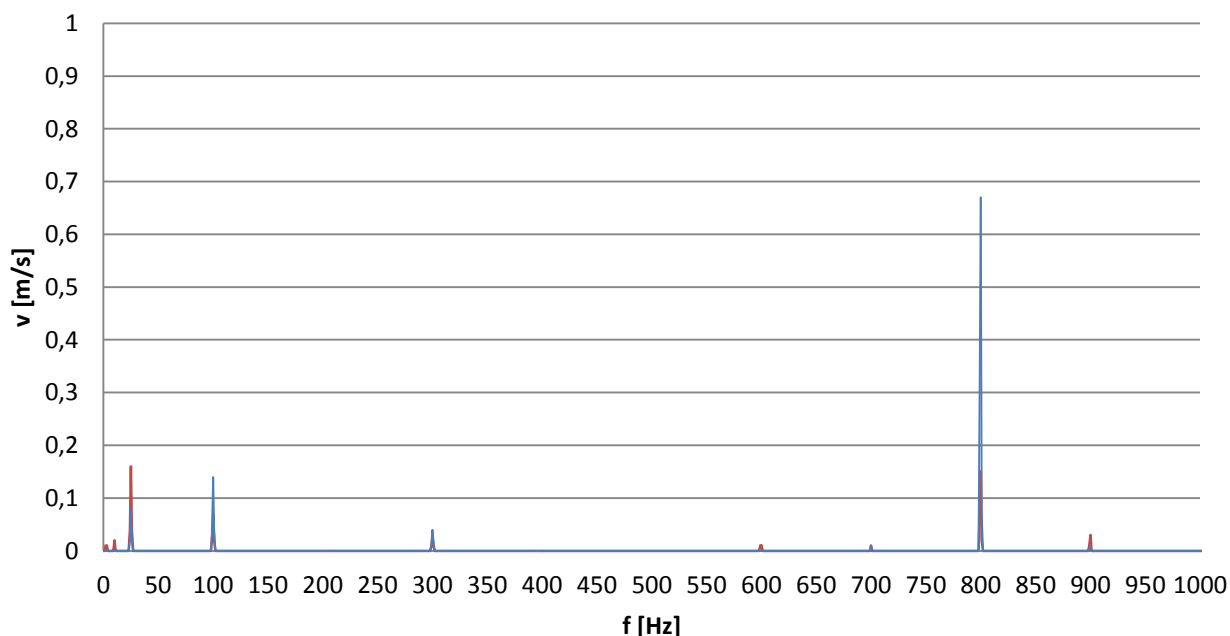
Obr. 4.2.4-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 3 po dobu dvou otáček.

Z obrázku 4.2.4-1 a 4.2.4-2 můžeme pozorovat, že rychlost vibrací v motoru 3 mírně přesahuje hodnotu 1 mm/s a zrychlení dosahuje hodnot cca 3,5 m/s².

Spektrum rychlosti a zrychlení vibrací



Obr. 4.2.4-3 Spektrum zrychlení vibrací motoru 3.



Obr. 4.2.4-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 3.

Z obrázku 4.2.4-3 a obrázku 4.2.4-4 můžeme pozorovat, že i v motoru 3 pro zrychlení i rychlost dominuje frekvence 800 Hz. Z grafu spektra zrychlení je patrné, že kromě vysoké hodnoty 800 Hz, která dosahuje téměř 4 m/s², se zde nachází jen relativně nepatrné hodnoty frekvencí 300 Hz, 600 Hz, 700 Hz a 900 Hz. Z grafu spektra rychlosti je vidět především

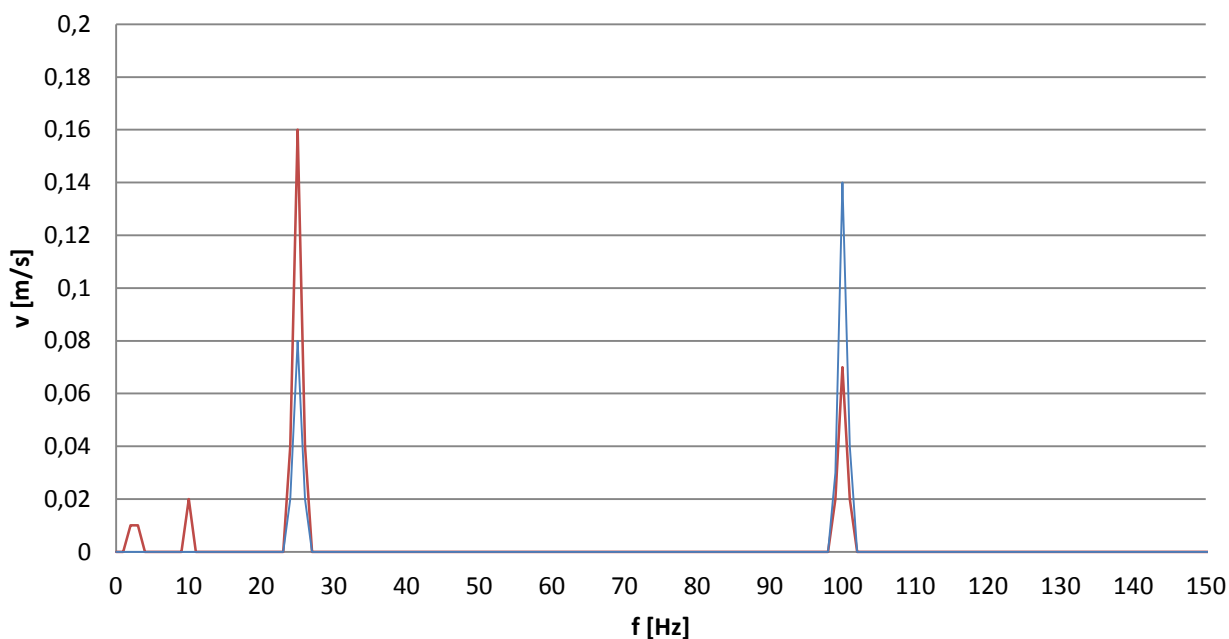
dominanta otáčkové frekvence 25 Hz a malé hodnoty v subsynchronní oblasti. Také je patrná frekvence 100 Hz a 900 Hz.

Analýza závady ložisek

Pro motor 2 vypočítáme Crest faktor rychlosti:

$$K_v = \frac{\max(|v|)}{RMS(v)} = \frac{1,36}{0,5080} = 2,677$$

Hodnota Crest faktoru nedosahuje hodnot pro vznikající poškození ložisek.

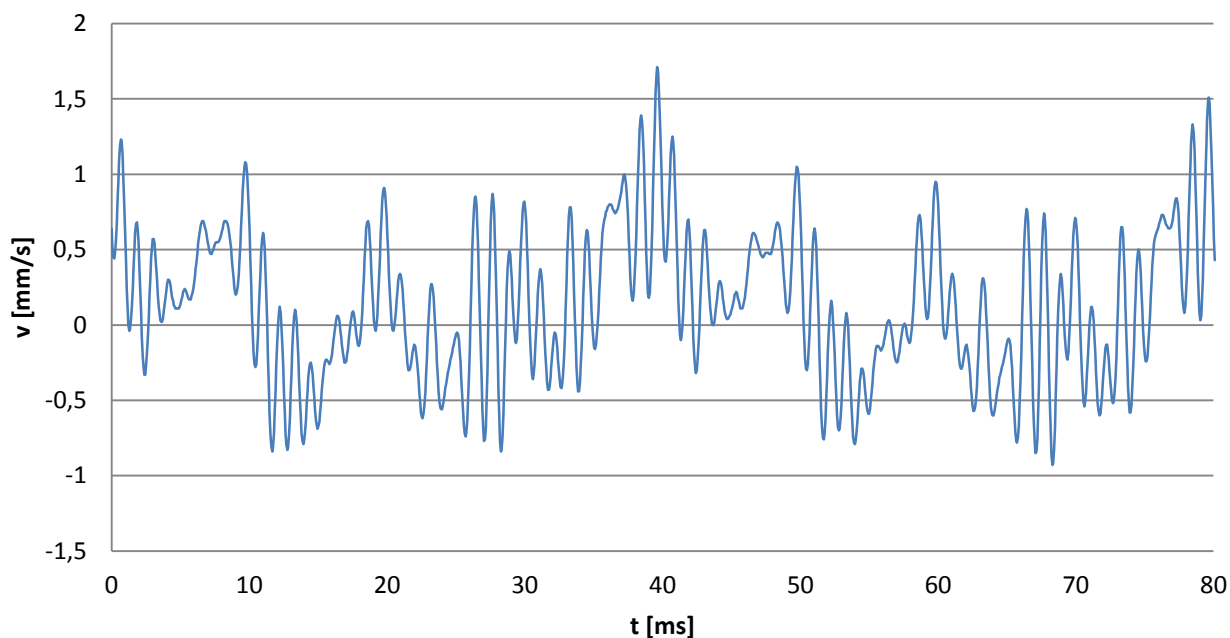


Obr. 4.2.4-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 3 pro analýzu ložiska.

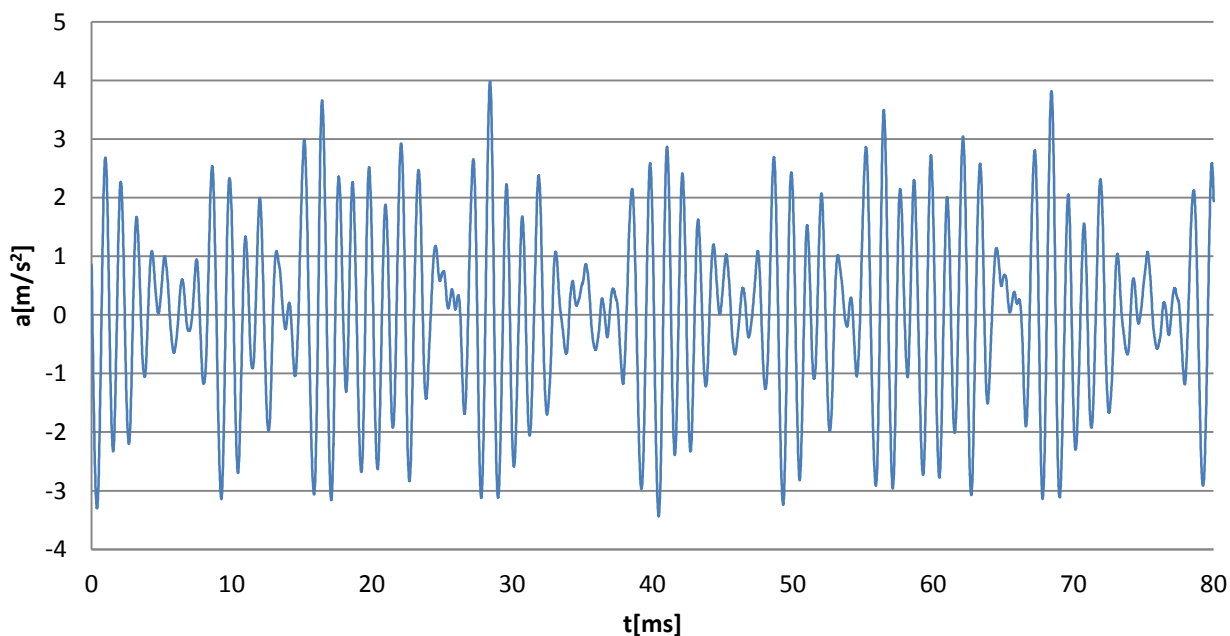
Z obrázku 4.2.4-5 je patrná amplituda na frekvenci kolem 9,7 Hz. Tato frekvence odpovídá frekvenci závady na kleci. Může se tedy jednat o vznikající závadu na kleci ložiska. V porovnání s hodnotou Crest faktoru se spíše jedná o nepatrné problémy klece, které se ještě neprojevují jako závada.

4.2.5 Motor 4

Průběhy rychlosti a zrychlení vibrací



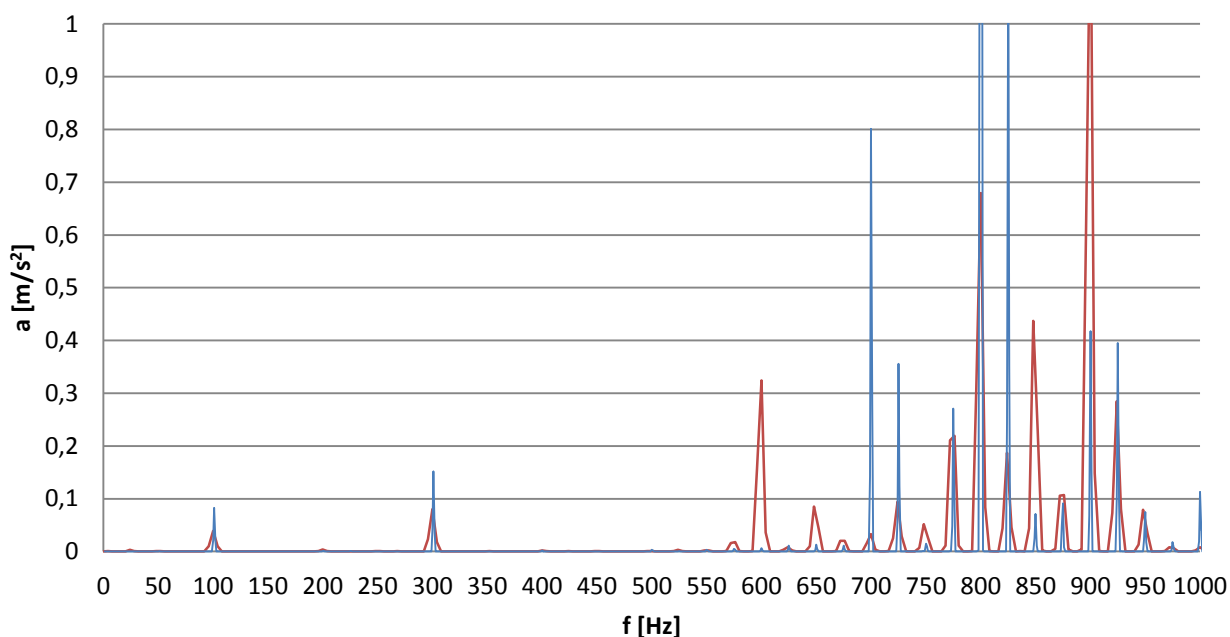
Obr. 4.2.5-1 Průběh rychlosti vibrací motoru 4 po dobu dvou otáček.



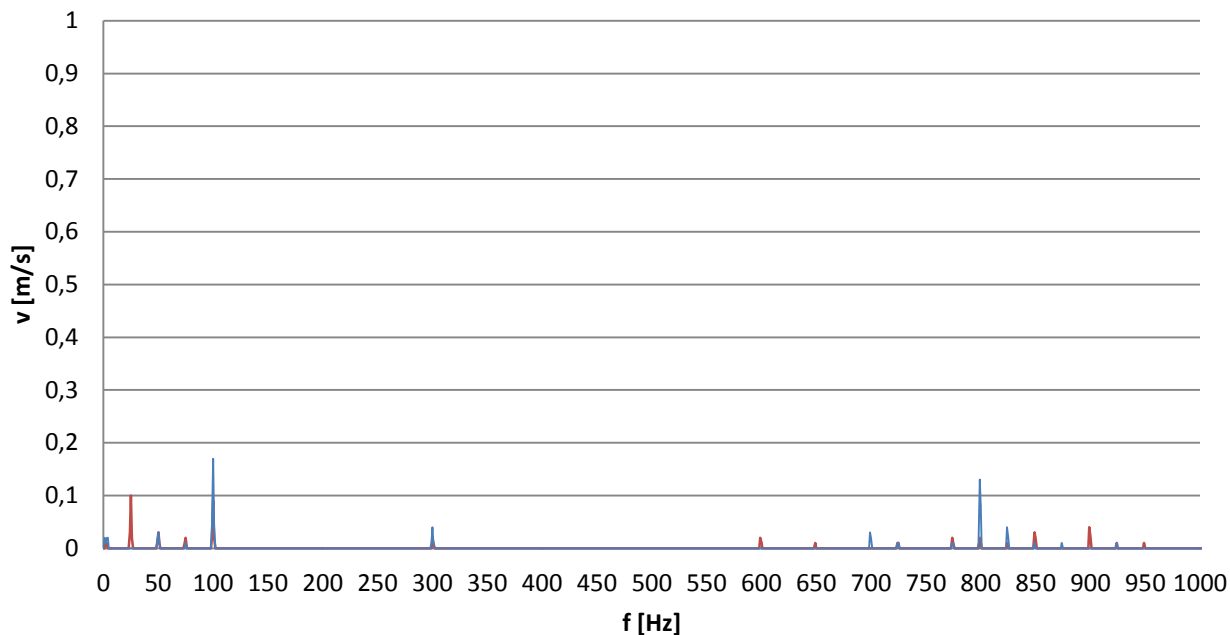
Obr. 4.2.5-2 Průběh zrychlení vibrací motoru 4 po dobu dvou otáček.

Oba průběhy byly opět naměřeny sondou A ve vertikální poloze s pevním šroubovým spojem. Rychlost vibrací v tomto motoru, která je na obrázku 4.2.5-1, dosahuje k hodnotám přes 1,5 mm/s a zrychlení na obrázku 4.2.5-2 dosahuje hodnot cca 4 m/s².

Spektrum rychlosti a zrychlení vibrací



Obr. 4.2.5-4 Spektrum zrychlení vibrací motoru 4.



Obr. 4.2.5-4 Spektrum rychlosti vibrací motoru 4.

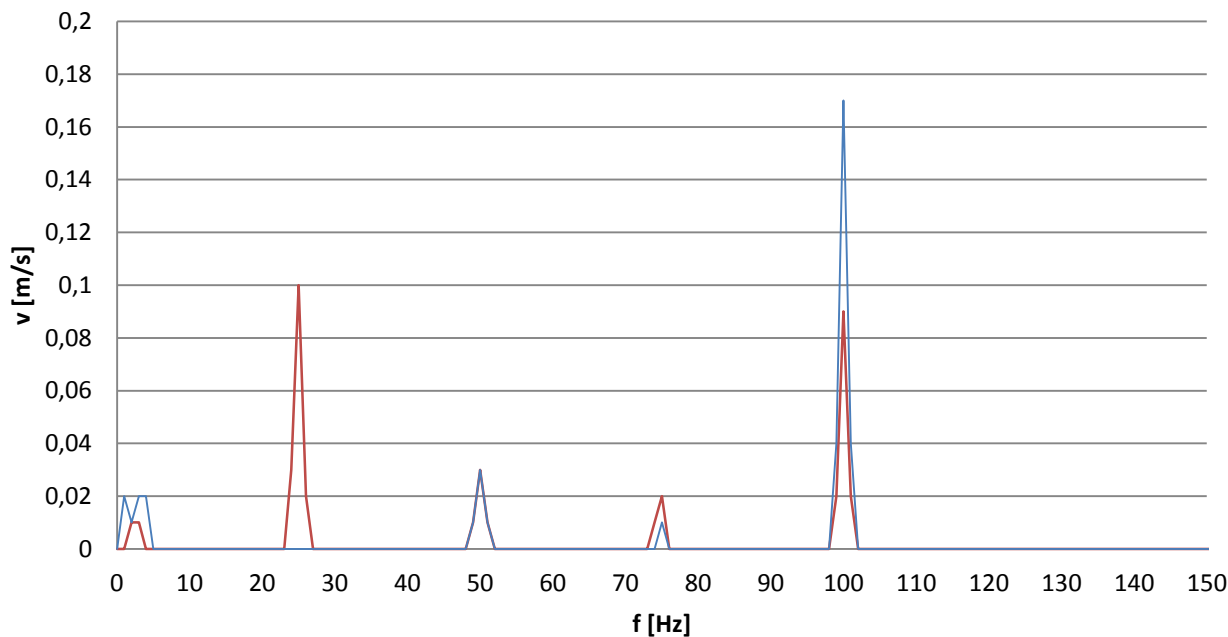
Ve spektru rychlosti vibrací motoru 4 si můžeme všimnout, že nejvyšších hodnot ze sondy A zde dosahuje otáčková frekvence 25 Hz, a to 0,1 m/s. Další patrné frekvence jsou na 50 Hz, 75 Hz a 100 Hz. Dále jsou zde patrné frekvence 600 Hz, 800 Hz a 900 Hz. Ve spektru zrychlení se objevuje již obvyklá frekvence 800 Hz, pak 700 Hz, 825 Hz, 900 Hz a 925 Hz.

Analýza závady ložisek

Pro motor 2 vypočítáme Crest faktor rychlosti:

$$K_v = \frac{\max(|v|)}{RMS(v)} = \frac{1,89}{0,5145} = 3,673$$

Hodnota Crest faktoru se blíží hodnotám, které odpovídají vznikajícímu poškození, ale stále je zde poměrně velká rezerva.



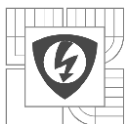
Obr. 4.2.5-5 Spektrum rychlosti vibrací motoru 4 pro analýzu ložiska.

V obrázku 4.2.5-5 si můžeme všimnout malých hodnot na frekvenci cca 76 Hz. Může se tedy jednat o vznikající poškození vnějšího kroužku. Amplituda je poměrně nízká. Crest faktor udává hodnotu, která se blíží hodnotě vznikajícího poškození, ale stále je zde rezerva.

4.2.6 Analýza excentricity měřených motorů

Pro všechny čtyři motory provedeme výpočet frekvence statické a dynamické excentricity. Jelikož jsme prováděli měření na experimentálních strojích, máme k dispozici jejich definované excentricity. Naším úkolem bude analyzovat, jakým způsobem se dané excentricity projevují ve spektru. Více ke statické a dynamické excentricitě najdete v kapitole 2.1.1.

Motor 1 by neměl vykazovat žádnou excentricitu, můžeme jej považovat za referenční. Motor 2 má excentricitu dynamickou, motor 3 statickou a motor 4 kombinaci těchto excentricit. V tabulce 4.2.6-3 můžeme vidět deklarované excentricity motorů. Díky vypočítaným frekvencím je můžeme ve spektru najít tyto a pozorovat, jakým způsobem se daná excentricita projevuje.



Nejprve určíme statickou excentricitu:

$$f_{stat} = f_1 \left(\frac{vQ_2(1-s)}{p} \mp k \right) \quad (4.2)$$

Budeme uvažovat následující parametry: $f_1=50$ Hz, $Q_2=28$ drážek, $p=2$, $v=1$, $s=0,13\%$ a $k=0$ a 2 . Potom tedy frekvence statické excentricity budou dle tabulky 4.2.6-1.

Tab. 4.2.6-3 Frekvence statické excentricity.

f_{stat} [Hz]	f_{stat} [Hz]	f_{stat} [Hz]	f_{stat} [Hz]
pro $k=0$		pro $k=2$	
699,9	699,9	599,9	799,9

Dále nesmíme zapomenout na projev statické excentricity na frekvenci dvojnásobku síťové frekvence, tedy 100 Hz.

Pro dané motory spočítáme i frekvence dynamické excentricity:

$$f_{dyn} = f_1 \left((vQ_2 \pm n_d) \frac{(1-s)}{p} \pm k \right) \quad (4.3)$$

Tab. 4.2.6-2 Frekvence dynamické excentricity.

	f_{dyn} [Hz]	f_{dyn} [Hz]	f_{dyn} [Hz]	f_{dyn} [Hz]
	pro $k=0$		pro $k=2$	
$+n_d$	724,9	724,9	624,9	824,9
$-n_d$	674,9	674,9	574,9	774,9

Tab. 4.2.6-3 Deklarované excentricity měřených motorů.

Motor 1		Motor 2	
dynamická	statická	dynamická	statická
0-0,015mm	0-0,015mm	0,040-0,050mm	0-0,015mm
Motor 3		Motor 4	
dynamická	statická	dynamická	statická
0-0,015mm	0,040-0,050mm	0,040-0,050mm	0,040-0,050mm



5 ZÁVĚR ANALÝZY

5.1 Závěr analýzy ložiskových závad

Ve spektru motoru 1 nebyly nalezeny žádné amplitudy na frekvencích závad. Hodnota Crest faktoru je $K_v=3,839$, což se sice blíží hodnotě typické pro začínající poruchy ($K_v=4$ až 20), ale stále je zde určitá rezerva. Můžeme říct, že motor 1 má pravděpodobně ložiska v pořádku.

U motoru 2 je ve spektru pozorovatelná amplituda na frekvenci 49,7 Hz, což by odpovídalo závadě na valivém tělísku. Její amplituda ale dosahuje malých hodnot, $v=0,02$ m/s, a s přihlédnutím k hodnotě Crest faktoru $K_v=3,032$ se o závadu pravděpodobně nejedná. Roste zde ale riziko vzniku závady jako důsledek dynamické excentricity.

Motor 3 má ve spektru přítomnou amplitudu na hodnotě 9,7 Hz, což odpovídá frekvenci závady na kleci. Amplituda i zde dosahuje jen velmi malých hodnot $v=0,02$ m/s. Hodnota Crest faktoru je u tohoto motoru nejnižší, $K_v=2,677$. Ani u motoru 3 se tedy nepotvrdila závada ložiska. Může zde ale růst riziko závady díky statické excentricitě rotoru.

U motoru 4 se ze všech ostatních motorů objevuje nejvíce amplitud na frekvencích závad. Nejvyšší amplituda je na frekvenci 49,5 Hz, což odpovídá frekvenci závady na valivém tělísku a dosahuje hodnoty $v=0,03$ m/s. Dále se zde nachází o něco menší amplituda na frekvenci 76,2 Hz, což je frekvence závady na vnějším kroužku. Amplituda dosahuje hodnoty $v=0,02$ m/s. Crest faktor je v případě motoru 4 $K_v=3,673$. Vzhledem k nízkým amplitudám i k nízké hodnotě Crest faktoru i motor 4 má pravděpodobně ložiska v pořádku. Bylo by ale vhodné pozorovat vývoj frekvencí závad i Crest faktoru, protože je u tohoto motoru nejvyšší riziko poškození z důvodu statické i dynamické excentricity.

5.2 Závěr analýzy statické a dynamické excentricity

Pro sledování dynamické excentricity jsme vypočítali hodnoty frekvencí opět pro první harmonickou a koeficient $k=0$ a 2. Díky tomu jsme zjistili, že je třeba se zaměřovat na frekvence 575 Hz, 625 Hz, 675 Hz, 725 Hz, 775 Hz a 825 Hz. Tyto frekvence jsou přehledně zobrazeny v tabulce 4.2.6-2. Pro tyto frekvence jsme vyhledali ve spektru zrychlení jejich amplitudy. Výsledky analýzy jsou uvedeny v následujících dvou tabulkách.

Tab. 5.2-1 Amplitudy frekvencí statické excentricity ve spektru zrychlení.

číslo motoru	typ excentricity	statická							
	f [Hz]	100		600		700		800	
	sonda	A	B	A	B	A	B	A	B
1	a [mm/s ²]	0	0,1	0	0	0,3	0,04	1	1,5
2	a [mm/s ²]	0	0	0,15	0,5	0,5	0,3	8,5	15
3	a [mm/s ²]	0,8	0,8	0,18	0	0,15	0,15	4	6
4	a [mm/s ²]	0	0,1	0	0	0	0,8	0	5,5



Tab. 5.2-2 Amplitudy frekvencí dynamické excentricity ve spektru zrychlení.

číslo motoru	typ excentricity	dynamická											
	f [Hz]	575		625		675		725		775		825	
	sonda	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
1	a [mm/s ²]	0	0	0	0	0	0	0	0	0,3	0,3	0	0
2	a [mm/s ²]	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	1,5	0,5	0,1	0,6
3	a [mm/s ²]	0	0	0	0	0	0	0	0	0,05	0,5	0	0
4	a [mm/s ²]	0	0	0	0	0	0	0	0,35	0	0,3	0	1,2

Z těchto dvou tabulek jsou patrné amplitudy na daných frekvencích pro statickou a dynamickou excentricitu. Plyne z nich následující zhodnocení motorů. Zvýšená amplituda na frekvenci 800 Hz se nachází u všech čtyř motorů. Nemusí se tedy jednat o projev excentricity, Excentricitou může být tato hodnota zesílená. Pravděpodobně se jedná o běžný projev provozu tohoto typu motoru, zřejmě důsledkem elektromagnetických vlivů nebo vlastních frekvencí ložisek. Vzhledem k široké komplexnosti problematiky vibrodiagnostiky jsme se do hloubky nezabývali ověřením původu této frekvence. Také je třeba brát v úvahu fakt, že sonda A byla pevně spojena s konstrukcí stroje šroubem a sonda B připevněna magnetem, jak již bylo zmíněno v kapitole 4.1. Dochází tedy k zesilování nebo naopak zeslabování hodnot z této sondy a je třeba na to brát zřetel při vyhodnocování.

Motor 1 má pozorovatelné amplitudy na frekvencích 100 Hz, 700 Hz, 800 Hz a 775 Hz. Nejvyšší amplituda je při 800 Hz pro sondu v horizontální orientaci (sonda B). Ze zvýšených hodnot frekvencí statické excentricity bychom mohli usuzovat, že se daná excentricita mírně projevuje. Nelze tedy s jistotou potvrdit předpoklad, že motor 1 je v pořádku. Podle mého názoru se jedná o zanesení vibrací z jiných zdrojů, kterými může být ventilátor a ložiska. Také po přihlédnutí k výše zmíněným faktům o sondách a frekvenci 800 Hz je o to pravděpodobnější, že se o excentricitu skutečně nejedná. Pouze na frekvenci 800 Hz se objevuje amplituda jak v horizontální, tak ve vertikální orientaci. Na frekvencích 100 Hz a 700 Hz detekuje amplitudu jen jedna ze sond. Lze tedy říct, že motor 1 jednoznačně nemá dynamickou excentricitu a s velkou pravděpodobností ani statickou excentricitu.

Motor 2 má viditelné amplitudy na frekvencích 600 Hz, 700 Hz, 800 Hz, dále na 725 Hz, 775 Hz a 825 Hz. Nejvyšší hodnoty dosahuje opět frekvence 800 Hz, potom 775 Hz a 825 Hz. I zde se objevují zvýšené hodnoty frekvencí statické excentricity. Pro dynamickou excentricitu jsou zvýšené frekvence natolik zřejmé, že lze tuto excentricitu potvrdit. Nelze ale zcela s jistotou říct, že motor 2 nemá i statickou excentricitu. Byla by zapotřebí rozsáhlejší diagnostika zmíněných pravděpodobných zdrojů, které zanáší vibrace do těchto frekvencí.



Motor 3 oproti předchozím motorům má hodnoty mnohem čitelnější. V tabulce 5.2-1 jsou zřetelně vidět amplitudy na všech frekvencích, které odpovídají statické excentricitě. Největších hodnot dosahuje opět frekvence 800 Hz. V oblasti frekvencí dynamické excentricity je viditelná amplituda jen na frekvenci 775 Hz, ale dosahuje jen malých hodnot, především z pohledu sondy A. Ostatní hodnoty na dalších frekvencích jsou nulové. O tomto motoru lze tedy říct, že má s velkou pravděpodobností statickou excentricitu, dynamickou excentricitu nemá.

Motor 4 byl nejkomplikovanějším měřeným strojem. V oblasti frekvencí statické excentricity se objevují amplitudy na frekvencích 100 Hz, 600 Hz, 700 Hz a 800 Hz, kde nejvyšší je opět 800 Hz. V oblasti frekvencí dynamické excentricity jsou pozorovatelné amplitudy na frekvencích 725 Hz, 775 Hz a 825 Hz. Nejvyšší z nich je na frekvenci 825 Hz. Z těchto dat lze říct, že motor 4 obsahuje jak statickou, tak dynamickou excentricitu.



6 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámit se se zdroji vibrací v asynchronním motoru, provést měření na laboratorních asynchronních motorech a vyhodnotit stav ložisek a projev předpokládaných excentricit. V kapitole 2 jsou uvedeny podstatné zdroje vibrací v motorech, se kterými se lze běžně setkat. Pro tuto diplomovou práci byla stěžejním zdrojem vibrací excentricita, a to dynamická i statická. Stručné seznámení s oběma typy excentricit a s výpočty jejich typických frekvencí je uvedeno v kapitole 2.1.1. Dalším stěžejním zdrojem vibrací pro tuto diplomovou práci byly ložiska a jejich závady. Touto problematikou se zabývá kapitola 2.3. Také byla využita metoda analýzy typu Crest faktor. Díky známému typu ložiska bylo možné vypočítat frekvence závad, pomocí kterých bylo možné analyzovat stav ložisek měřených motorů.

Praktická část diplomové práce spočívala v měření vibrací čtyř stejných typů asynchronních motorů od firmy EMP s.r.o. Slavkov u Brna. Štítkové hodnoty motorů jsou uvedeny v tabulce 4-1. Jednalo se o laboratorní motory, které byly upraveny pro potřebu měření samotnou firmou. Po úpravě se u každého z motorů nachází daná deklarovaná excentricita. Tyto excentricity jsou uvedeny v tabulce 4.2.6-3. Naším úkolem bylo změřit vibrace motorů a vyhodnotit projev excentricit.

Měření probíhalo v laboratoři SA2.08 v budově FEKT. Podmínky okolí v laboratoři jsou uvedeny v tabulce 4-2. V této laboratoři jsme měřili všechny čtyři motory ve stavu naprázdno. Popis měření je uveden v kapitole 4. Měření jsme prováděli pomocí přístroje VIBXpert II, jehož parametry a popis je více rozveden v odkazu [12]. Pro každý motor jsme změřili pomocí přístroje VIBXpert II rychlost a zrychlení vibrací. Průběhy i spektra těchto veličin jsou uvedeny v kapitolách 4.2.2 až 4.2.5. Pomocí výstupů bylo možné provést analýzu ložiskových závad a excentricit.

Pro všechny čtyři motory jsme provedli analýzu stavu jejich ložisek. Z katalogu výrobce motorů bylo zjištěno, že tyto laboratorní kusy jsou osazeny ložisky firmy SKF typu 6204-2Z. Díky známým parametrům z internetových stránek SKF [15] bylo možné spočítat frekvence ložiskových závad, které jsou uvedeny v tabulce 4.2.1-2. Posuzování stavu ložiska na základě známých frekvencí bylo provedeno ze spektra rychlosti vibrací. Pro každý motor bylo spektrum rychlosti zobrazeno od 0 Hz do 150 Hz. V souvislosti s analýzou ložiskových závad byl vypočítán pro každý motor Crest faktor. Kombinací dvou metod bylo možné určit, v jakém stavu jsou ložiska. Bylo by vhodné upozornit, že k přesnějšímu určení stavu ložiska by bylo zapotřebí více dat, opakovaná měření a sledování změn v čase, především vývoj Crest faktoru. Také by bylo vhodné provést měření při zátěži a změnách zátěže, kde by se frekvence závad mohly lépe projevit. Toto ale nebylo cílem diplomové práce, navíc se ani u jednoho z motorů neprokázalo významnější podezření na poruchu ložisek, proto zmíněná diagnostika nebyla prováděna. Jedná se tedy o vyhodnocení současného stavu, který ale nemusí být definitivní.

Všechny čtyři motory se zdají být z pohledu ložisek v pořádku. Největší riziko poškození ložisek v budoucnu hrozí u motoru 4 v důsledku dynamické i statické excentricity. U motoru 2 a 3 je riziko také. U motoru 1 je riziko nejmenší, ložiska vykazují nejmenší projev na frekvencích závad.



Analýzu statické a dynamické excentricity jsme realizovali ze spekter zrychlení vibrací. Pro statickou excentricitu jsme sledovali dvojnásobek frekvence sítě 100 Hz, dále vypočítané hodnoty frekvencí statické excentricity pro první harmonickou a koeficient $k=0$ a 2. Jsou to tedy frekvence po zaokrouhlení 600 Hz, 700 Hz a 800 Hz. Tyto hodnoty jsou s vyšší přesností uvedeny v tabulce 4.2.6-1.

Z pohledu excentricit se u motoru 1 zcela jistě nezávadnost neprokázala, ale vzhledem k dalším zmíněným vlivům je vysoce pravděpodobná. U motoru 2 se setkáváme s dynamickou excentricitou, u motoru 3 s excentricitou statickou. Motor 4 vykazuje oba typy excentricit, avšak ne tak významně, jak se očekávalo. Pro důkladnější analýzu by bylo zapotřebí provést další měření, především vyhodnotit projev vibrací i v axiálním směru, dále zjistit projev ventilátoru ve spektru vibrací, nevyváženost rotoru, elektromagnetické vlivy apod. Vzhledem k dosaženým výsledkům lze říct, že byly splněny všechny body zadání.



POUŽITÁ LITERATURA

- [1] HALLIDAY, David, Jearl WALKER a Robert RESNICK. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, viii, s.330-576, [33] s. ISBN 80-214-1868-0.
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK, Jearl WALKER a Petr DUB. *Fyzika. 2., přeprac.* vyd. Brno: VUTIUM, 2013, 2 sv. ISBN 9788021441231.
- [3] HORÁK, David. *Diskrétní transformace*. Plzeň, 2012. Učební text. Západočeská univerzita v Plzni.
- [4] TOMEH, Elias. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Základy vibrační diagnostiky*. Liberec, 2010.
- [5] MAŠLÁŇ, Stanislav. *Rychlá Fourierova transformace (FFT) pro AVR* [online]. 2012 [cit. 2015-12-02]. Dostupné z: <http://elektronika.kvalitne.cz/>
- [6] VUT BRNO. *Elektrické stroje: Poruchy asynchronních strojů*. Brno, 2010.
- [7] TOMEH, Elias. *Technická diagnostika: vibrační diagnostika strojů a zařízení*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015, 218 s. ISBN 9788074941740.
- [8] TOMEH, Elias a Pavel NĚMEČEK. *Vibrační diagnostika základních závad strojů*. Liberec, 2010. Učební text. Technická univerzita v Liberci.
- [9] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora*. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012, 1 CD-ROM. ISBN 9788024827551.
- [10] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2006, 406 s. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-730-0158-6.
- [11] CRUSE, Holk. *Neural Networks as Cybernetic Systems*. [online]. 1. Aufl. Berlin: Henschelverlag Kunst und Gesellschaft, 1986 [cit. 2015-12-05]. DOI: 0009-3-2891. ISBN 3-362-00081-9. ISSN 1861-1680. Dostupné z: <http://www.brains-minds-media.org/archive/289>
- [12] Vibxpert II. LAMIKAPPA. [online]. [cit. 2015-01-3]. Dostupné z <http://www.lamikappa.cz>
- [13] Diagnostika valivých ložisek [online]. [2009] [cit. 2009-04-12]. Čeština. Dostupný z www.adash.cz
- [14] VAS, Peter. *Parameter estimation, condition monitoring, and diagnosis of electrical machines*. New York: Oxford University Press, 1993, xviii, 360 p. ISBN 01-985-9375-9.
- [15] SKF Group: *Deep groove ball bearings, single row* [online]. Göteborg: SKF Group, 2012 [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/index.html>
- [16] CIGÁNEK, Ladislav. *Stavba elektrických strojů: Celost. vysokošk. učebnice*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1958, 714, [1] s.
- [17] EmP: *výrobce elektromotorů a čerpadel* [online]. Slavkov u Brna: EmP Slavkov u Brna, s. r. o., 2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: http://www.emp-slavkov.cz/tm_jmc.html