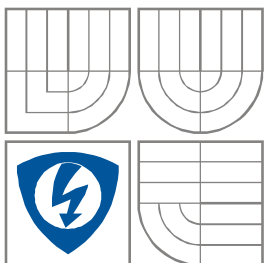


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

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

DIAGNOSTIKA VIBRACÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO PŮVODU V ASYNCHRONNÍM MOTORU

DIAGNOSIS OF ELECTROMAGNETIC ORIGIN VIBRATIONS IN ASYNCHRONOUS MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Pavel Koníček

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda, Ph.D.

BRNO 2014



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. Pavel Koníček

ID: 119485

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Diagnostika vibrací elektromagnetického původu v asynchronním motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se se zdroji vibrací a postupy jejich analytického určení v elektrických strojích
2. Provedte výpočet hlavních frekvencí vibrací u konkrétního elektrického stroje
3. Provedte měření vibrací při různých vstupních proudech na konkrétním elektrickém stroji a vyhodnoťte hlavní složky tohoto signálu
4. Porovnejte výsledky měření a výpočtů a vyhodnoťte rozdíly ve spektru vibračního signálu.

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: 27.9.2013

Termín odevzdání: 28.5.2014

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

Konzultanti diplomové práce:

Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Cílem diplomové práce je seznámení s postupy diagnostiky vibrací v elektrických strojích. Popsání jednotlivých zdrojů vibrací nacházejících se uvnitř a vně elektrického stroje. Popis zdrojů vibrací se pak přednostně věnuje vibracím elektromagnetického původu. Je zde uveden popis konstrukce asynchronního motoru a jeho magnetického obvodu, teorie vibrací a jejich vznik. Popsány jsou zde i snímače umožňující měření vibrací a matematický aparát na jejich vyhodnocení. V této práci je také uvedeno praktické měření vibrací na asynchronním motoru, zpracování naměřených dat, jejich následná analýza a počítačová simulace vibrací elektromagnetického původu. Závěr této práce je pak věnován zhodnocení získaných dat.

Abstract

The aim of this master's thesis is to introduce methods of diagnostics of vibrations in electrical machines. Describe the various vibration sources located inside and outside of the electric machine. Description of the sources of vibration is then preferably dedicated to vibration of electromagnetic origin. There is a description of the construction of an asynchronous motor and the magnetic circuit, the theory of vibrations and their origin. Described are also vibration sensor enables measurement and mathematical tools for their evaluation. In this work also practical vibration measurements on an asynchronous motor, data processing, their subsequent analysis and computer simulation of electromagnetic vibration origin. The conclusion of this work is devoted to the evaluation of the data obtained.

Klíčová slova

Asynchronní motor; magnetický obvod; vibrace; měření vibrací; Fourierova transformace; FFT; okénková Fourierova transformace; Hanning; snímače vibrací; simulace; Ansys

Keywords

Induction motor; the magnetic circuit; vibration; measuring vibration; Fourier transformation; FFT; window Fourier transform; Hanning; vibration sensor; simulation; Ansys

Bibliografická citace

KONÍČEK, P. Diagnostika vibrací elektromagnetického původu v asynchronním motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 79 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Marcel Janda, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma **Diagnostika vibrací elektromagnetického původu v asynchronním motoru** jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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

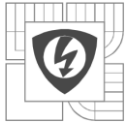
Podpis autora

Poděkování

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

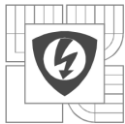
V Brně dne

Podpis autora

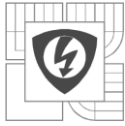


Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ.....	8
SEZNAM TABULEK	10
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
1 ÚVOD.....	12
2 ASYNCHRONNÍ STROJ	13
2.1 PRINCIP FUNKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU	13
2.2 KONSTRUKCE ASYNCHRONNÍHO MOTORU	14
2.3 MAGNETICKÝ OBVOD	14
2.4 VZNIK TOČIVÉHO MAGNETICKÉHO POLE.....	15
3 TEORIE VIBRACÍ.....	17
4 FOURIEROVA TRANSFORMACE.....	20
4.1 RYCHLÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE (FFT).....	21
4.2 OKÉNKOVÁ FOURIEROVA TRANSFORMACE	22
4.3 OKNO HANN (HANNING, HANNING, VON HANN).....	24
5 MĚŘENÍ VIBRACÍ.....	25
5.1 SNÍMAČE VÝCHYLKY	25
5.2 SNÍMAČE RYCHLOSTI.....	26
5.3 SNÍMAČE ZRYCHLENÍ.....	26
6 ZDROJE VIBRACÍ	27
6.1 MECHANICKÉ ZDROJE VIBRACÍ	28
6.2 AERODYNAMICKÉ ZDROJE HLUKU.....	28
6.3 ELEKTROMAGNETICKÉ ZDROJE VIBRACÍ.....	29
7 VÝPOČETNÍ PROGRAM.....	30
7.1 FEM, METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	30
7.2 ANSYS, WORKBENCH	31
8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VIBRACÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU	32
8.1 MĚŘENÍ OKOLNÍCH VIBRACÍ	32
8.2 MĚŘENÍ VIBRACÍ NA NEZATÍŽENÉM MOTORU	37
8.2.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI VIBRACÍ – NEZATÍŽENÝ MOTOR.....	38
8.2.2 MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ VIBRACÍ – NEZATÍŽENÝ MOTOR.....	43
8.3 MĚŘENÍ VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 3,39\text{N}\cdot\text{m}$	47
8.3.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 3,39\text{N}\cdot\text{m}$	47
8.3.2 MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 3,39\text{N}\cdot\text{m}$	51
8.4 MĚŘENÍ VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 7,035\text{N}\cdot\text{m}$	55
8.4.1 MĚŘENÍ RYCHLOSTI VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 7,035\text{N}\cdot\text{m}$	55
8.4.2 MĚŘENÍ ZRYCHLENÍ VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 7,035\text{N}\cdot\text{m}$	58

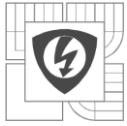


8.5 MĚŘENÍ VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 9,818\text{N}\cdot\text{m}$.....	62
8.6 MĚŘENÍ VIBRACÍ PŘI ZATÍŽENÉM MOTORU – $M = 11,255\text{N}\cdot\text{m}$.....	64
8.7 MĚŘENÍ VIBRACÍ MOTORU PŘI ZMĚNĚ TVARU NAPÁJECÍHO NAPĚTÍ.....	65
9 POČÍTAČOVÁ SIMULACE ELEKTROMAGNETICKÝCH VIBRACÍ MOTORU.....	70
10 ZÁVĚR.....	75
LITERATURA.....	77

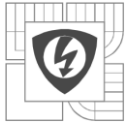


SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 Harmonický průběh obsahující jednu frekvenci, spektrum signálu [6].....</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 2 Periodický průběh s obsahem vyšších harmonických, spektrum signálu [6]</i>	<i>17</i>
<i>Obr. 3 Průběh obsahující náhodné a neperiodické vibrace, spektrum signálu [6]</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 4 Přechodový jev s postupným útlumem, spektrum signálu [6].....</i>	<i>18</i>
<i>Obr. 5 Vybraný úsek s nekoherentním vzorkováním (obdélníkové okno)[14]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 6 Periodický signál analyzovaný Fourierovou transformací [14]</i>	<i>22</i>
<i>Obr. 7 Amplitudová frekvenční charakteristika signálu [14]</i>	<i>23</i>
<i>Obr. 8 Příklad Fourierovy transformace signálu s aplikací okna Hann [17]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 9 Fourierova transformace bez aplikace okna Hann [17]</i>	<i>24</i>
<i>Obr. 10 Snímač výchylky [6].....</i>	<i>25</i>
<i>Obr. 11 Snímač rychlosti [6].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 12 Snímač zrychlení [6].....</i>	<i>26</i>
<i>Obr. 13 Schéma vzniku a přenosu vibrací [20].....</i>	<i>27</i>
<i>Obr. 14 Rozložení magnetické indukce v motoru</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 15 Rozložený 3D model motoru</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 16 Výsledek výpočtu programem Ansys</i>	<i>73</i>
<i>Graf 1 Rychlost okolních vibrací – radiální směr</i>	<i>32</i>
<i>Graf 2 Rychlost okolních vibrací – axiální směr.....</i>	<i>33</i>
<i>Graf 3 FFT rychlosti okolních vibrací – radiální směr.....</i>	<i>33</i>
<i>Graf 4 FFT rychlosti okolních vibrací – axiální směr</i>	<i>34</i>
<i>Graf 5 Zrychlení okolních vibrací – radiální směr</i>	<i>35</i>
<i>Graf 6 Zrychlení okolních vibrací – axiální směr</i>	<i>35</i>
<i>Graf 7 FFT zrychlení okolních vibrací – radiální směr.....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 8 FFT zrychlení okolních vibrací – axiální směr.....</i>	<i>36</i>
<i>Graf 9 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – radiální směr.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf 10 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – axiální směr.....</i>	<i>38</i>
<i>Graf 11 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - radiální směr</i>	<i>39</i>
<i>Graf 12 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - axiální směr</i>	<i>40</i>
<i>Graf 13 FFT rychlosti vibrací (nezatížený motor) – radiální směr</i>	<i>41</i>
<i>Graf 14 FFT rychlosti vibrací (nezatížený motor) – axiální směr</i>	<i>41</i>
<i>Graf 15 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) - radiální směr.....</i>	<i>43</i>

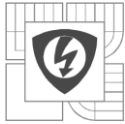


<i>Graf 16 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) - axiální směr.....</i>	<i>43</i>
<i>Graf 17 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - radiální směr.....</i>	<i>44</i>
<i>Graf 18 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - axiální směr</i>	<i>44</i>
<i>Graf 19 FFT zrychlení vibrací (nezatížený motor) – radiální směr.....</i>	<i>45</i>
<i>Graf 20 FFT zrychlení vibrací (nezatížený motor) – axiální směr.....</i>	<i>45</i>
<i>Graf 21 Rychlost vibrací (zátěž = 3,39N·m) – 3 periody - radiální směr</i>	<i>47</i>
<i>Graf 22 Rychlost vibrací (zátěž = 3,39N·m) – 3 periody - axiální směr</i>	<i>48</i>
<i>Graf 23 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 3,39N·m) – radiální směr</i>	<i>49</i>
<i>Graf 24 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 3,39N·m) – axiální směr</i>	<i>49</i>
<i>Graf 25 Zrychlení vibrací (zátěž = 3,39N·m) – 3 periody - radiální směr.....</i>	<i>51</i>
<i>Graf 26 Zrychlení vibrací (zátěž = 3,39N·m) – 3 periody - axiální směr</i>	<i>51</i>
<i>Graf 27 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 3,39N·m) – radiální směr.....</i>	<i>52</i>
<i>Graf 28 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 3,39N·m) – axiální směr.....</i>	<i>53</i>
<i>Graf 29 Rychlost vibrací (zátěž = 7,035N·m) – 3 periody - radiální směr</i>	<i>55</i>
<i>Graf 30 Rychlost vibrací (zátěž = 7,035N·m) – 3 periody - axiální směr</i>	<i>56</i>
<i>Graf 31 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 7,035N·m) – radiální směr</i>	<i>56</i>
<i>Graf 32 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 7,035N·m) – axiální směr</i>	<i>57</i>
<i>Graf 33 Zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – 3 periody - radiální směr.....</i>	<i>59</i>
<i>Graf 34 Zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – 3 periody - axiální směr</i>	<i>59</i>
<i>Graf 35 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – radiální směr.....</i>	<i>60</i>
<i>Graf 36 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – axiální směr.....</i>	<i>60</i>
<i>Graf 37 Deformované napětí 3. harmonickou.....</i>	<i>65</i>
<i>Graf 38 Deformované napětí 2. harmonickou.....</i>	<i>68</i>
<i>Graf 39 Směry výchylek vibrací v osách X a Y.....</i>	<i>73</i>
<i>Graf 40 Průběh velikosti výchylky maximální a ve stanoveném bodě</i>	<i>74</i>



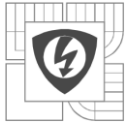
SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>34</i>
<i>Tab. 2 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>37</i>
<i>Tab. 3 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 4 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 5 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 6 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>54</i>
<i>Tab. 7 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 8 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a)radiální směr b)axiální směr.....</i>	<i>61</i>
<i>Tab. 9 Frekvenční složky s největší amplitudou (rychlost vibrací) a)radiální b)axiální</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 10 Frekvenční složky s největší amplitudou (zrychlení vibrací) a)radiální b)axiální.....</i>	<i>63</i>
<i>Tab. 11 Frekvenční složky s největší amplitudou a)radiální b)axiální</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 12 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální</i>	<i>66</i>
<i>Tab. 13 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální</i>	<i>67</i>
<i>Tab. 14 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 15 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 16 Vybrané rozměry a parametry motoru.....</i>	<i>71</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Značka	Název veličiny	Jednotka
a	Zrychlení	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$
α_{el}°	Elektrický úhel ve stupních	$^{\circ}$
α_{geom}°	Geometrický úhel ve stupních	$^{\circ}$
a_n, b_n	Fourierovy koeficienty	-
B	Magnetická indukce	T
c_n	Amplituda Fourierových koeficientů	-
f	Frekvence	Hz
Φ	Magnetický tok	Wb
Φ_n	Fáze Fourierových koeficientů	-
n	Otáčky	min^{-1}
N	Počet diskrétních hodnot	-
p	Počet pólových dvojic	-
s	Výchylka	mm
t	Čas	s
T	Perioda	s
v	Rychlost	$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$
ω	Úhlová rychlost	$\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
W_N	Otáčející činitel	-



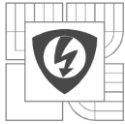
1 ÚVOD

Od dob, kdy byly sestaveny první stroje, ať už byly elektrické nebo ne, se jejich konstruktéři museli potýkat s problémem jejich mechanické stability. Chod stroje totiž vytváří vibrace, které jsou přenášeny na jeho konstrukci. Tyto vibrace mají pochopitelně vliv na jeho mechanickou stabilitu. Do konstrukce jsou vibrace přenášeny i z okolního prostředí. S těmito vlivy, ovlivňující stabilitu stroje, museli konstruktéři při stavbě strojů počítat. V opačném případě by mohlo dojít k poškození stroje, nebo přímo k jeho zničení, už při prvním spuštění. Tyto problémy však je nutné řešit i dnes.

V dnešní době, kdy je lidstvo schopno postavit stroje dosahující obrovských otáček (nebo vysokých rychlostí) je problém vznikajících vibrací nutné řešit mnohem precizněji. Tento problém se netýká pouze elektrických strojů, ale týká se v podstatě téměř všeho co je člověk schopen v dnešní době sestavit (nebo postavit).

V současnosti jsou k dispozici přístroje schopné měřit i nejjemnější vibrace a jsou známy matematické postupy k jejich analýze, mohou posloužit tyto data k diagnostikování případné závady stroje. Vibrodiagnostika se tedy v dnešní době stává nástrojem, jak kontrolovat stav stroje aniž by musel být vyřazen z provozu popřípadě rozebrán.

Cílem této práce je popis vzniku vibrací v asynchronním motoru, rozdělení vibrací podle jejich zdroje vzniku, praktická ukázka měření vibrací motoru. Motor při měření bude napájen z řízeného 3f zdroje. Vibrace budou měřeny při napájení standardní 3f sítí o normovaných parametrech s tím, že měření bude probíhat několikrát, ale vždy s jiným vstupním proudem. Data z těchto měření budou následně podrobeny analýze.



2 ASYNCHRONNÍ STROJ

Asynchronní stroje se používají nejčastěji jako motory. Jsou nejrozšířenějšími elektromotory vůbec a používají se k nejrůznějším pohonům proto, že jsou nejjednodušší a nejlacinější. Jsou rovněž provozně nejspolehlivější a vyžadují malou údržbu. Využívají se k pohonům zařízení, jako jsou čerpadla, ventilátory, kompresory, pásové dopravníky, jeřáby, výtahy, obráběcí stroje, atd.

Asynchronní stroje mohou také pracovat jako asynchronní generátory (přeměna mechanické energie na energii elektrickou) v případě, že poháněním asynchronního motoru dosáhneme jeho mechanických otáček vyšších, než jsou synchronní otáčky, čímž indukovaná napětí a proudy jsou opačného směru a stroj tedy dodává činný elektrický výkon do sítě.

Poháníme-li stroj mechanickým momentem působícím proti smyslu otáčení točivého magnetického pole, pracuje jako asynchronní brzda, tj. moment asynchronního stroje působí proti hnacímu mechanickému momentu. [3]

2.1 Princip funkce asynchronního motoru

Princip činnosti asynchronního motoru je založen na vzájemném elektromagnetickém působení točivého magnetického pole statoru a proudů vytvořených ve vinutí rotoru tímto magnetickým polem. Vzájemným působením magnetických polí vzniká síla, působící na vodiče rotoru ve směru pohybu magnetického pole statoru. Motor je tedy založen na indukci napětí a proudů v rotoru a proto se také nazývá indukčním motorem.

Napětí a proudy v rotoru se podle indukčního zákona mohou indukovat točivým magnetickým polem jen při otáčkách rotoru odlišných od synchronních otáček točivého pole statoru, tedy při asynchronních otáčkách. Při synchronních otáčkách rotoru by se do něj neindukovalo napětí, neprotékaly by jím proudy a stroj by měl nulový moment. Rozdíl otáček statoru a rotoru vztážený na jednu otáčku magnetického pole statoru, je tzv. skluz.

Otáčky magnetického pole statoru závisí na počtu pólů a kmitočtu napájecího napětí. Skluz, a tedy i otáčky motoru, se mění s mechanickým zatížením stroje a je při jmenovitém zatížení u malých motorů asi 10%, u velkých kolem 1%.

Při rozběhu se ve stojícím rotoru indukují napětí, která v uzavřeném obvodu rotoru vyvolají proudy, čímž dojde k silovému působení pole statoru na rotorový obvod. Směr a orientace této síly se určí podle Flemingova pravidla levé ruky. Účinkem těchto sil vzniká točivý moment, který roztočí rotor ve směru točení magnetického pole statoru. Elektrická energie se mění na mechanickou a stroj pracuje jako motor. [1], [3]

2.2 Konstrukce asynchronního motoru

Asynchronní stroj je točivý elektrický stroj, jehož magnetický obvod je malou mezerou rozdělen na dvě části (stator a rotor). Obě části jsou opatřeny vinutím. Jedno vinutí (obvykle statorové) je připojeno na zdroj střídavého proudu a druhé (obvykle rotorové) je spojeno nakrátko.

Nejčastějším druhem indukčního stroje je trojfázový asynchronní motor, který využívá silového působení statorového proudu ze sítě a rotorového proudu. Trojfázový asynchronní motor je jednoduchý, v provozu spolehlivý a nevyžaduje žádnou zvláštní obsluhu a údržbu.

Rozšíření asynchronních strojů napomohla jejich konstrukce, vhodná pro sériovou výrobu.

Stator se skládá z litinové konstrukce a dvou ložiskových štítů. V kostře statoru jsou zalisovány plechy, které jsou navzájem izolovány a tvoří část magnetického obvodu stroje. Rotorové plechy jsou nalisovány na hřídeli, která se otáčí v ložiskách, upevněných v ložiskových štítech, které vymezují polohu rotoru uvnitř statoru. Mezi statorem a rotorem je vzduchová mezera, která umožní pohyb rotoru. V drážkách statorových a rotorových plechů je uloženo vinutí stroje. Na statoru bývá obvykle trojfázové vinutí, ale také jedno a dvoufázové, jehož začátky a konce jsou vyvedeny na svorkovnici.

V rotorových drážkách je uloženo vinutí, kterému se říká kotva. U motoru s kotvou nakrátko jsou v drážkách rotoru neizolované měděné nebo mosazné, nejčastěji však hliníkové spojovací kruhy nakrátko. U motorů menších výkonů se vinutí odlévá spolu s větracími lopatkami z hliníku metodou tlakového lití. Takovému vinutí se říká klec. U motoru s vinutým rotorem a kroužky je v drážkách rotoru uloženo trojfázové vinutí z izolovaných vodičů, začátky fází jsou spojeny do uzlu a konce připojeny ke třem sběracím kroužkům, ke kterým přiléhají kartáče. Takové vinutí rotoru umožňuje připojit zařízení, sloužící k regulaci otáček motoru. [1], [2]

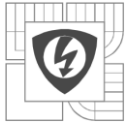
2.3 Magnetický obvod

Magneticky uzavřený obvod je uspořádání magneticky vodivých částí - jádra, kotvy (pohyblivá část), budících cívek (vinutí), permanentních magnetů a případně i vzduchové mezery, kdy se podstatně větší část magnetického toku uzavírá magneticky vodivým materiálem po tzv. střední indukční čáře. Část magnetického toku, uzavírající se mimo magneticky vodivý materiál, je rozptylový magnetický tok.

Magnetický obvod zajišťuje vytvoření magnetického pole pomocí budící cívky (zdroj magnetického napětí).

Magnetické obvody magnetované střídavým proudem se skládají z těchto částí:

1. stator (pevná část) a rotor (pohyblivá část),
2. budící vinutí (cívka) napájené střídavým proudem,
3. pracovní vzduchové mezery ($B = 1,2$ až $1,5$ T pro vzduchovou mezeru $0,2$ až $0,3$ mm, $B = 0,8$ až $0,5$ T pro mezeru 1 až 2 mm).



Magnetické materiály pro střídavé obvody mají rovněž úzkou hysterezní smyčku $B = f(H)$, ale magnetický tok je proměnný, kvůli zmenšení ztrát vířivými proudy se staví z elektrotechnické oceli ve formě plechů, transformátorových plechů (tloušťky 0,35 až 0,5mm, $B_{max} = 1T$) nebo dynamových plechů (pro točivé stroje, tloušťka 0,5 mm, $B_{max} = 1T$) válcovaných za tepla z křemíkové oceli. Dalšími materiály např. pro jádra měřících transformátorů jsou permalloyové plechy, pro obvody složitých tvarů např. magneticky měkké ferity. Plechy jsou od sebe vzájemně izolovány jednostranným polepem papíru, lakováním, oxidováním nebo nátěrem organickými látkami.

Střídavým magnetováním vznikají ztráty, způsobené natáčením magnetických dipólů uvnitř materiálů, které se mění v magnetických obvodech na teplo. Jejich velikost se udává ztrátovým číslem. Periodická změna toku vede ke vzniku hysterezních ztrát (závisí lineárně na frekvenci) a ztrát vířivými proudy (závisí na kvadrátu frekvence).

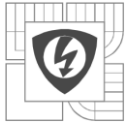
Závislost $\mu = f(B)$ je příčinou nelinearity obvodu. Magnetické obvody různého tvaru a uspořádání mají obvykle zadanou určitou hodnotu indukce B a lze je počítat analogicky jako obvody elektrické. [4]

2.4 Vznik točivého magnetického pole

Základní výhodou vlastností trojfázového proudu je schopnost vytvářet točivé magnetické pole. Předpokládejme troj fázové vinutí asynchronního motoru založené do drážek statoru, které bude napájeno souměrnou soustavou trojfázového proudu. Vinutí každé fáze si zjednodušeně představme soustředěné do jedné cívky, znázorněné jedním závitem.

Jednotlivé cívky trojfázového vinutí jsou umístěny na statoru tak, že jejich aktivní stany jsou vzájemně vzdáleny o polovinu obvodu, takže okamžité hodnoty proudů v cívkách vytváří na statoru jednu dvojici magnetických pólů. Takovému vinutí říkáme dvoupólové a asynchronnímu stroji s takovým vinutím dvoupólový stroj. Začátky fází jsou spojeny do uzlu a konce připojeny na trojfázovou síť. Okamžité hodnoty proudů v jednotlivých fázích obdržíme, jako průměty fázorů do orientované časové přímky t . Okamžité hodnotě proudu ve směru časové přímky odpovídá v cívce směr proudu dopředu u konce cívky. V protější straně téže cívky musí proud téci dozadu. Vodiče v horní polovině statoru mají proudy dopředu, v dolní polovině dozadu. Trojfázový proud vytváří ve vinutí dvě pásma proudů, které budí jediný magnetický tok o velikosti Φ_{I1} - velikost a směr výsledného magnetického toku Φ_{I1} dostaneme součtem okamžitých hodnot toků jednotlivých cívek. Předpokládáme-li úměrnost mezi okamžitou hodnotou proudu a magnetického toku (u nenasyceného stroje), tak pro časový okamžik t_1 platí: $\Phi_{I1} = 1,5 * \Phi_{A1}$

Za $1/6$ periody napájecího napětí, v časovém okamžiku t_2 jsou ve vodičích cívek jiné okamžité hodnoty proudů, ale tyto opět vytvářejí výsledný magnetický tok Φ_{I2} , stejné velikosti, ale pootočený o $1/6$ periody napájecího napětí vzhledem k Φ_{I1} .



Sledujeme-li proudy v trojfázovém vinutí v dalších okamžicích, vytvoří vždy výsledný magnetický tok stejné velikosti, jehož osa se otáčí o takový úhel, o jaký se otočila časová přímka. Výsledný magnetický tok se za jednu periodu napájecího napětí otočí rovnoměrnou rychlostí o jednu otáčku. Za jednu sekundu vykoná f_1 otáček za předpokladu, že f_1 je kmitočet napájecího napětí. Zdvojnásobíme-li počet cívek každé fáze, jsou jejich cívkové strany uloženy ve vzdálenosti jedné čtvrtiny obvodu statoru. Napájením takového vinutí se vytvoří čtyři pásma proudů a tedy i čtyři magnetické póly po obvodu statoru. V případě čtyřpólového stroje se za dobu jedné periody napájecího proudu otočí fázor výsledného magnetického toku po obvodu statoru nikoliv o 360° , ale jen o úhel připadající na jedno dvojpóli, tj. o 180° . Zavádíme pojmy "elektrický úhel" a "geometrický úhel". Elektrický úhel se vztahuje k elektrickým veličinám a měří se v "elektrických stupních". Např. jedna perioda napájecího napětí představuje 360° elektrických. Obvod statoru má 360° geometrických. U dvoupólového stroje se geometrický a elektrický úhel shoduje. U vícepólového stroje platí mezi elektrickým a geometrickým úhlem vztah:

$$\alpha^{\circ}_{el} = p \cdot \alpha^{\circ}_{geom} \quad (2.1)$$

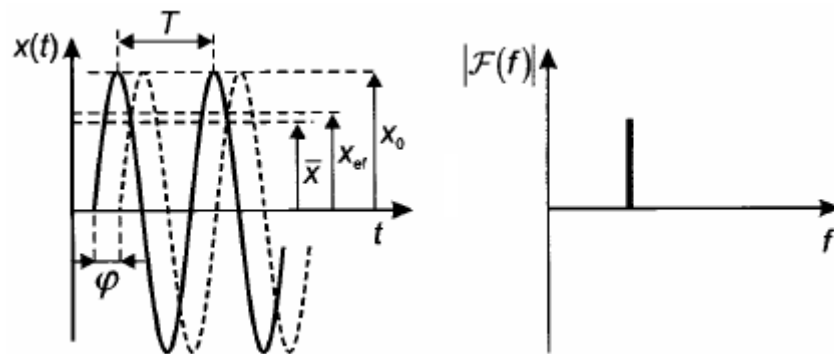
kde p je počet pólových dvojic.

Závěrem lze tedy říci, že trojfázové vinutí, napájené trojfázovou souměrnou soustavou trojfázového proudu, budí výsledné magnetické pole, které se otáčí rovnoměrnými, tzv. synchronními otáčkami n_1 . [1]

3 TEORIE VIBRACÍ

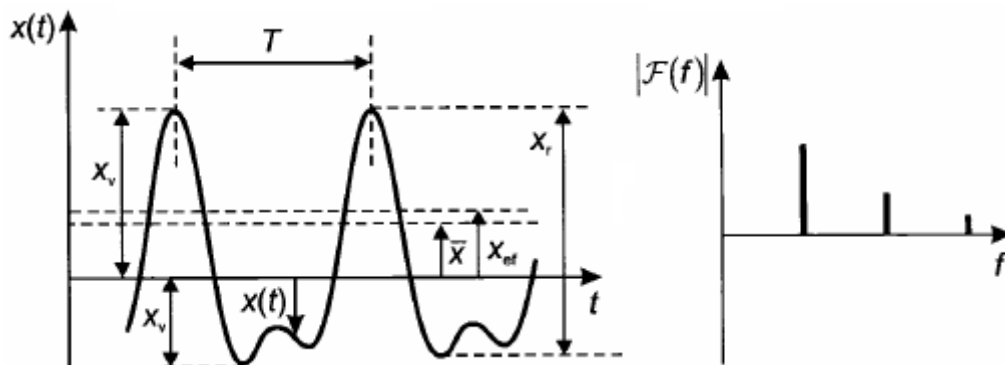
Vibrací se rozumí mechanické kmitání a chvění prostředí. Vibrace vzniká pohybem pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Konkrétně chodem strojů a přístrojů, motorů dopravních či jiných prostředků, ale i třeba lodní paluby vlivem mořských vln. Z těchto zdrojů se přenášejí vibrace přímo nebo prostřednictvím dalších materiálů, médií a zařízení.

Těleso vibruje, pokud vykonává oscilační pohyb kolem své referenční polohy. Pohyb může být čistě harmonický obsahující pouze jednu frekvenci. Zde můžeme určit amplitudu – maximální hodnotu, efektivní hodnotu a střední hodnotu. Ve spektru je potom pouze jedna čára na frekvenci vibrací (Obr. 1).



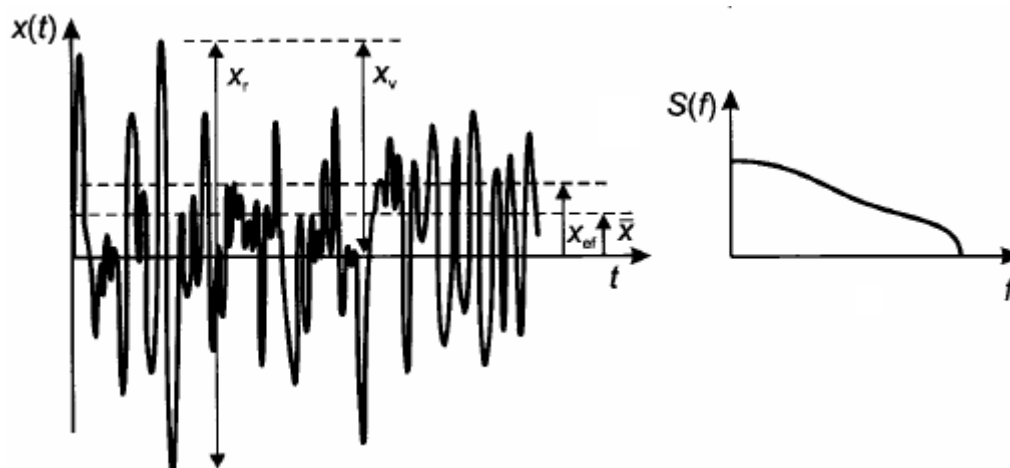
Obr. 1 Harmonický průběh obsahující jednu frekvenci, spektrum signálu [6]

Prakticky ale vibrace obsahují současně velké množství frekvencí o různých amplitudách. Děj je periodický a magnituda spektra většinou obsahuje základní frekvenci, vyšší harmonické a další přídavné frekvence (Obr. 2).



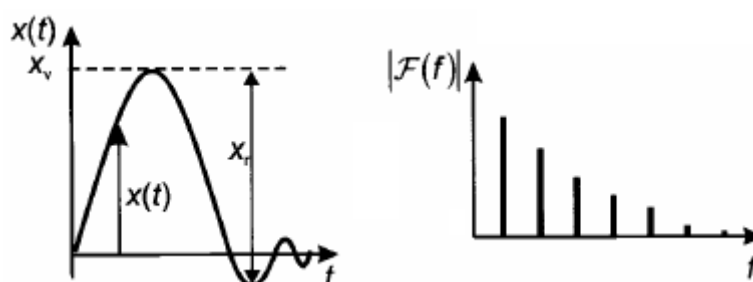
Obr. 2 Periodický průběh s obsahem vyšších harmonických, spektrum signálu [6]

Dále se mohou vyskytovat náhodné, neperiodické vibrace, jejichž základní hodnoty se s časem mění. Spektrum takových náhodných neperiodických vibrací obsahuje plynule všechny frekvence od nuly do maximální frekvence (Obr. 3).



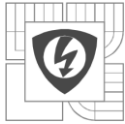
Obr. 3 Průběh obsahující náhodné a neperiodické vibrace, spektrum signálu [6]

Přechodový jev je postupně utlumen a magnituda spektra obsahuje diskrétní frekvence s postupně klesajícími amplitudami (Obr. 4). [5], [6]



Obr. 4 Přechodový jev s postupným útlumem, spektrum signálu [6]

Vibrace stroje či strojního zařízení jsou vždy velmi citlivým ukazatelem jeho stavu a funkce. Na této skutečnosti je založeno sledování stavu strojů a jejich diagnostika prostřednictvím měření vibrací. Principiálně je měření vibrací měřením periodického pohybu (v ideálním stavu harmonického), a to díky tomu, že v naprosté většině případů je diagnostikovaným objektem točivý stroj, jeho rotační uzly, ložiska apod. Jako pro každý pohyb, lze i k popisu vibrací použít celkem tři měřitelné pohybové veličiny, kterými jsou výchylka (s), rychlost (v) a zrychlení (a) kmitavého pohybu (jednotlivě nebo v kombinaci), správně spolu s uvedením frekvence nebo frekvenčního pásma, na niž, popř. v němž se měřilo. Výchylka, rychlostí a zrychlením jsou veličiny navzájem vázány matematickými vztahy. Z tohoto hlediska nezávisí na volbě veličiny, kterou zvolíme pro popis vibračního chování, je to jen otázka měřítka a časového posunu (fáze).



Výchylka vibrací je definována jako vzdálenost objektu od jeho určené referenční (zpravidla rovnovážné) polohy, popř. dvou objektů navzájem. Měří se v jednotkách délky. Pomocí rovnice lze aktuální výchylku vyjádřit jako:

$$x = x_{max} \cdot \sin(\omega t) \quad (3.1)$$

Kde ω představuje úhlovou frekvenci.

Rychlost vibrací je rychlost, jakou se pohybuje kmitající objekt (derivace aktuální výchylky). Udává se v jednotkách délky (metry, milimetry) za sekundu. Jde o nejčastěji používaný způsob vyjádření velikosti vibrací. Matematicky lze pak rychlost vibrací zapsat:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (3.2)$$

Zrychlení vibrací se měří akcelerometry a vyjadřuje se buď v absolutních jednotkách, nebo v násobcích veličiny g (tíhového zrychlení). Matematickým zápisem pak:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3.3)$$

V praxi je ale nutné vzít v úvahu i vlivy, které mohou nepříznivě ovlivnit přesnost měření, a proto je vhodné volit měřenou veličinu tak, aby dávala dostatečný odstup od šumu v měření, který u slabých signálů způsobí větší nepřesnosti až chyby měření. Obecně se dá říci, že pro běžná měření v rozsahu frekvencí 10 Hz až 1000 Hz se používá rychlost, pro vyšší frekvence má přednost zrychlení, pro nižší frekvence výchylka.

V nejjednodušší formě se měří celkové úrovně vibrací v širokém pásmu frekvencí, většinou definovaném v odpovídajících normách či doporučeních platných pro dané zařízení. Mnohem více informací lze získat při použití metod tzv. frekvenční analýzy. Zde se již využívají složitější techniky a přístroje, umožňující zjistit charakteristické vlastnosti frekvenčního spektra vibrací stroje, popř. jeho konstrukčního uzlu. [7], [8], [11], [15]

4 FOURIEROVA TRANSFORMACE

Každá časová vlna se skládá z příspěvků od jednotlivých vibrujících částí, většinou s různými frekvencemi. Frekvenční analýza je nástroj, který je schopen tyto jednotlivé příspěvky přímo ukázat. Vhodné je srovnání s hudbou: Orchester hraje se správnou hlasitostí (= celková hodnota vibrací je v mezích normy), ale některý nástroj může hrát falešně (= některá část stroje má problém). I když to neovlivní celkovou intenzitu, v hudbě to sluchem poznáme, zejména pokud známe skladbu. Stejně tak lze pomocí vibrační diagnostiky poznat závadu stroje na základě frekvenčních složek, které se vyskytují ve vibračním spektru.

Frekvenční analýza se provádí pomocí Fourierovy transformace (rozkladu do Fourierovy řady). Všechny postupy spojené s frekvenční analýzou, jsou implementovány do analyzátorů, které ve vibrační diagnostice jsou využívány.

Pracujeme-li s naměřenými vibračními signály, považujeme funkci za periodickou v naměřeném intervalu T , i když to většinou neodpovídá skutečnosti a je třeba dalších úprav signálu, abychom se nedopustili chyb. Současné analyzátory pro zpracování naměřených signálů nepracují se spojitou časovou vlnou, ale naměřený signál projde na vstupu do analyzátoru A/D převodníkem, který zaznamená časovou vlnu, jako posloupnost N diskretních hodnot s pravidelnými časovými rozestupy v intervalu T . Tomuto postupu se říká diskretizace. Diskretizovanou funkci $x(t)$, která je definována na množině N jednotlivých časových okamžiků t_k [$k \in (1, N)$], můžeme napsat jako konečnou Fourierovu řadu:

$$x_k (= x(t_k)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left(a_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) + b_n \cdot \sin\left(\frac{2\pi n t_k}{T}\right) \right); k \in (1, N) \quad (4.1)$$

Fourierovy koeficienty jsou často zobrazovány ve tvaru amplitudy c_n a fáze Φ_n :

$$c_n (= X_n) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$
$$\Phi_n = \operatorname{arctg}\left(-\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (4.2)$$

Potom se dá konečná Fourierova řada zapsat jako:

$$x_k (= x(t_k)) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{N/2} \left(c_n \cdot \cos\left(\frac{2\pi n t_k}{T} + \phi_n\right) \right) \quad (4.3)$$

Tento tvar Fourierovy transformace se nazývá diskretní Fourierova transformace (DFT). Vzniklé Fourierově řadě, tedy množině sinusovek, ze kterých je možné složit původní časovou vlnu, říkáme frekvenční spektrum. Fourierovou transformací tedy převádíme původní informaci o vibracích z časové oblasti, kde jsou jednotlivé jevy promíchány, do frekvenční oblasti, ve které je každý fyzikální jev (nevyváženost, poškozené ozubení apod.) reprezentován samostatnou sinusovkou odpovídající frekvence (frekvenční neboli spektrální čarou). [8], [12], [14]

4.1 Rychlá Fourierova transformace (FFT)

Do šedesátých let 20. století bylo využití výpočtů DFT omezeno na sálové počítače. Výpočty pro velké počty dat trvaly desítky minut i déle. Pro výpočet N hodnot je třeba N^2 komplexních násobení a $N(N-1)$ komplexních sčítání, takže doba potřebná pro výpočet je přibližně dána časem potřebným pro provedení N^2 operací. S výjimkou speciálních obvodů pro číslicové zpracování signálu (tzv. signálové procesory). Výpočet DFT pro $N = 1024$ trval s prvními procesory desítky sekund, s hardwarovou násobičkou desetiny sekundy. Dnešní signálové procesory pro tento výpočet potřebují čas okolo 1ms nebo kratší.

FFT čili rychlá Fourierova transformace jsou velmi efektivní algoritmy výpočtu DFT. Základní z nich byly popsány v r. 1965 a zaznamenaly revoluci v číslicovém zpracování signálů. Ačkoliv podobné algoritmy byly popsány již začátkem 20. století, vzhledem k tehdejšímu stavu techniky nebyly prakticky využitelné. Dnes existuje algoritmů FFT celá řada.

FFT má pro lineární zpracování signálů základní význam. Používá se pro spektrální analýzu deterministických i stochastických signálů, pro výpočet konvoluce, frekvenčních charakteristik i pro číslicovou filtraci.

Základní a zároveň nepoužívanější algoritmy FFT jsou navrženy pro délku transformace $N = 2^m$, kde m je přirozené číslo. Tyto algoritmy využívají periodičnosti a symetrii komplexní exponenciály (4.4). Exponenciála dle (4.5) se označuje otáčející činitel a označuje se W_N .

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{N}nk\right) - j \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N}nk\right) \quad (4.4)$$
$$k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad (4.5)$$

Algoritmy FFT pro $N = 2^m$ redukuje počet operací pro výpočet N bodů DFT na:

$$\frac{N}{2} \log_2 N = \frac{Nm}{2} \quad (4.6)$$

Poměrná úspora v počtu operací a tedy i době výpočtu exponenciálně roste s délkou transformace a výpočet $N = 1024$ proběhne zhruba 200 krát rychleji (pro $N = 64 \cdot 10^3$ zhruba 10^4 krát rychleji) než při výpočtu definice DFT. V současné době je některý z algoritmů FFT součástí většiny technických aplikačních programů.

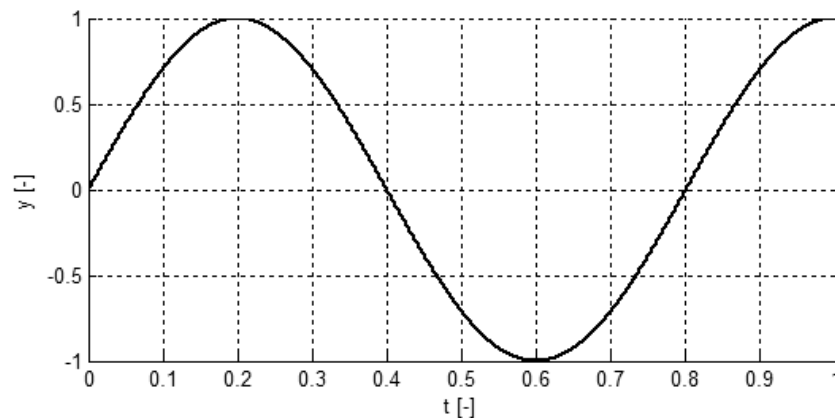
Ač jsou DFT a FFT definovány pro diskrétní signály tak v praxi jsou ale velmi často používány pro přibližný výpočet spekter spojitych signálů, často zjištěných měřeními. Digitální Fourierova transformace má mnoho rysů, které, pokud nejsou správně ošetřeny, mohou vést k chybným výsledkům. Jsou důsledkem diskretizace a nutnosti omezit délku časového signálu, resp. nerealistickým předpokladem, že naměřený úsek signálu délky T se periodicky opakuje. [8], [12], [14]

4.2 Okénková Fourierova transformace

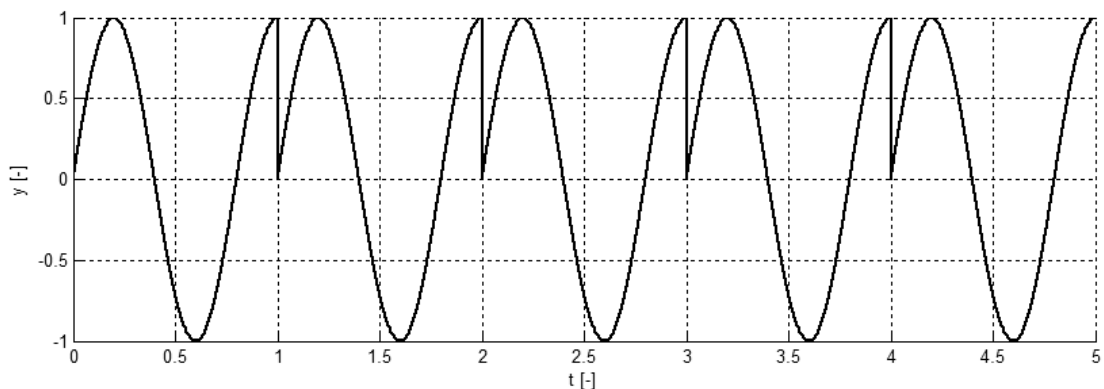
Vstupem ke spektrální analýze je prakticky vždy neperiodický signál, tj. obecná řada vzorků o libovolné délce, je třeba před vlastní DFT provést jeho periodizaci - výběr úseku ke zpracování. Neperiodický signál $f(t)$ nelze analyzovat Fourierovou transformací přímo. Tato transformace je určena k analýze periodických signálů a tak je třeba je analyzovaný signál upravit. To se provádí pomocí okénkových funkcí. Nejjednodušší funkcí je obdélníkové okno, které realizuje prostý výřez úseku ze zdrojové posloupnosti bez úpravy jeho amplitudy. Při výběru úseku mohou nastat dvě situace. Buďto na sebe začátek a konec vybraného úseku spojitě a hladce navazuje nebo ne.

V prvním případě nebude s analýzou pomocí DFT problém, protože periodizovaný signál nebude obsahovat žádné strmé přechody. Tento případ ale v reálu nastane málokdy (s ohledem na zcela náhodný charakter analyzovaného signálu) a periodizovaný signál tak bude často obsahovat nespojitosti. Takto "viděný" signál je samozřejmě odlišný od signálu skutečného, musí být tedy odlišné i jeho spektrum. Tento jev, označovaný též jako "prosakování spektra", tedy skutečně není způsoben pouhým vzorkováním signálu, nýbrž deformací vzniklou jako důsledek jeho zkrácení a následného periodického prodloužení.

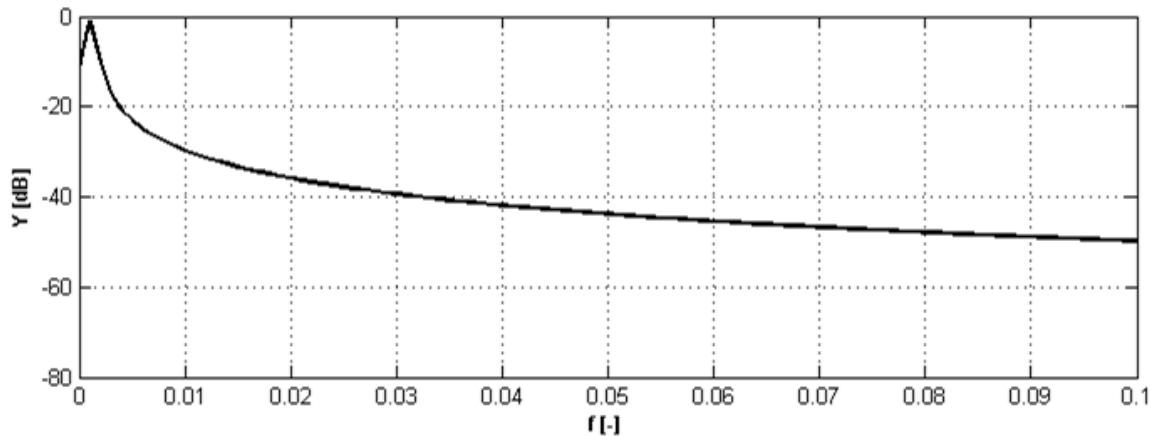
Obr. 5 ukazuje výběr (obdélníkové okno) úseku ze sinusového průběhu, vzhledem k délce úseku má signál frekvenci 1,25 (tedy nekoherentní vzorkování). Obr. 6 ukazuje pár periodizovaného signálu - to je průběh, který ve skutečnosti "vidí" DFT. Výsledné spektrum (Obr. 7) pak obsahuje jasně patrný peak signálu o frekvenci 1,25, ale také všechny frekvenční složky odpovídající nespojitosti v analyzovaném signálu. Frekvenční složky s menšími amplitudami by se zcela ztratily.



Obr. 5 Vybraný úsek s nekoherentním vzorkováním (obdélníkové okno)[14]



Obr. 6 Periodický signál analyzovaný Fourierovou transformací [14]



Obr. 7 Amplitudová frekvenční charakteristika signálu [14]

Řešením tohoto problému je použití funkce okna, které kromě výběru navíc vhodně upravuje amplitudu signálu. Aplikací okna na vstupní signál dochází ke snížení rozlišení, tj. jemnosti detailů podél kmitočtové osy (ztráta rozlišovací schopnosti).

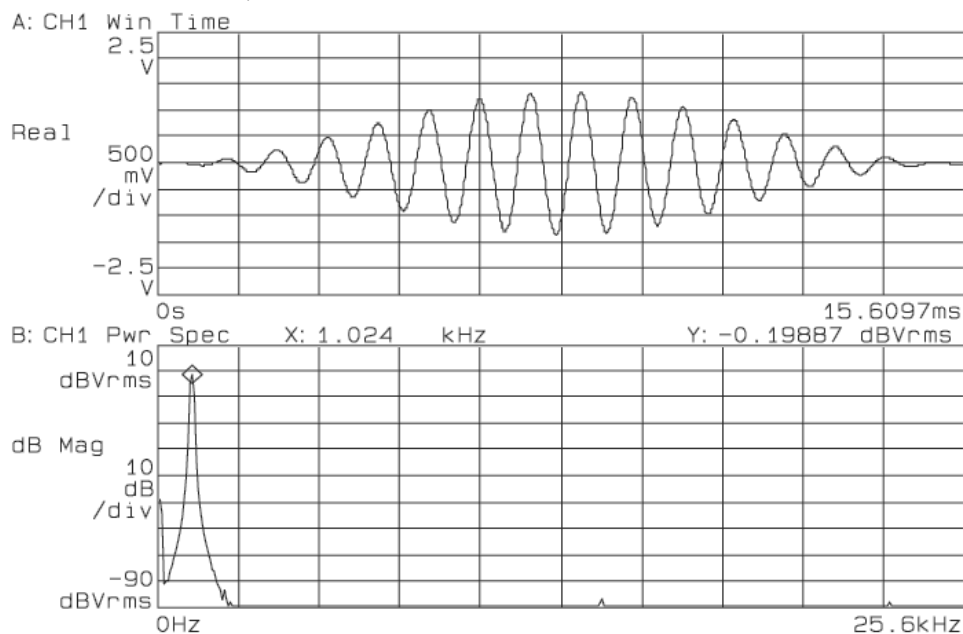
Výběr vhodné okénkové funkce není jednoduchá otázka. Každá okénková funkce má své vlastní charakteristiky a vhodnost pro různé aplikace. Pro volbu funkce okna je nutné odhadnout obsah frekvencí obsažených v signálu.

- Pokud signál obsahuje silný rušivý signál vzdálený od kmitočtů, které jsou předmětem zkoumání, volí se vyhlazovací okno s vysokým útlumem bočních laloků.
- Pokud signál obsahuje silné rušení v blízkosti zkoumaných kmitočtů, volí se funkce okna s nízkou maximální úrovní postraních laloků.
- Jestliže zkoumaný kmitočet obsahuje dva nebo více signálů velmi blízko sobě je velice důležité spektrální rozlišení. V tomto případě je nejlepší zvolit vyhlazovací okno s velmi úzkým hlavním lalokem.
- Jestliže je důležitější amplituda určité frekvence, než její přesné umístění v daném frekvenčním binu (Ze vstupní posloupnosti délky N se získá frekvenční odezva taktéž délky N , každý z těchto bodů frekvenční odezvy se nazývá frekvenční bin), volí se okno s širokým hlavním lalokem.
- Pokud je spektrum signálu spíše ploché, používá se jednotné okno. Jednotné okno v podstatě žádné okno není. Je též někdy nazýváno okno "boxcar". Tato funkce poskytuje nejlepší rozlišení frekvence a přesnost amplitudy. Je možno jej použít pouze v případě, že měřený signál je periodický v časovém záznamu.
- Obecně platí, že v 95% případech je vyhovující funkcí okno Hann (Hanning). Má dobré rozlišení frekvencí a snižuje spektrální únik. V případě, že není známa povaha měřeného signálu, je vhodné při aplikaci vyhlazovacích oken začít s oknem Hanning. [13], [14], [16], [17], [18]

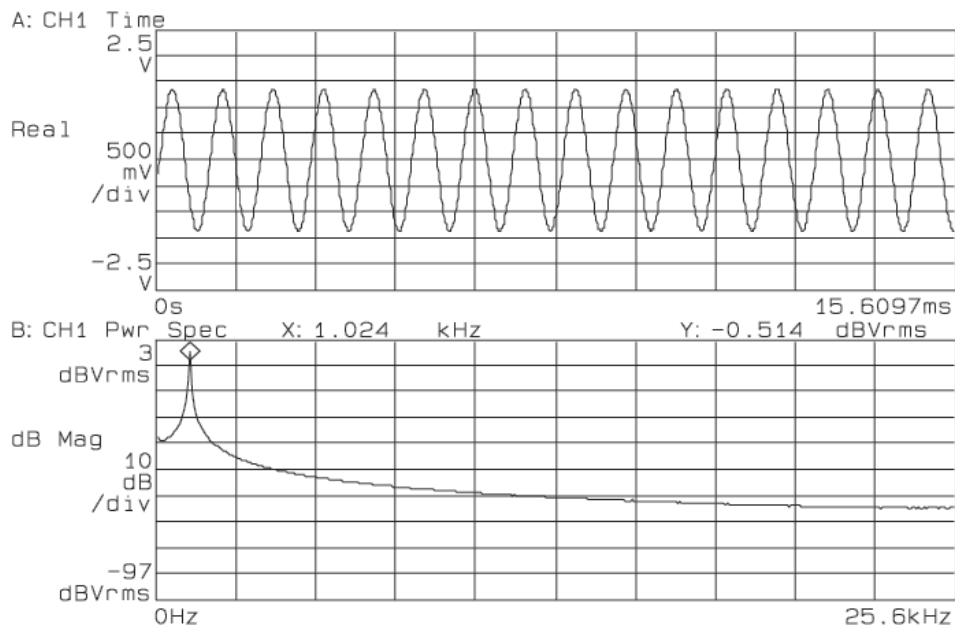
4.3 Okno Hann (hanning, Hanning, von Hann)

Pomocí okna Hann lze identifikovat frekvenční složky blízko sebe nebo pro měření širokopásmového šumu. Funkce Hann má tvar křivky podobný zvonu. Pohybuje se na koncích od nuly a ve středu dosahuje jedničky. Obr. 8 znázorňuje účinek okna Hann. Pro porovnání Obr. 9 ukazuje, co se stane, když není aplikována žádná okénková funkce při měření. Energie se šíří napříč spektrem.

Dobré frekvenční rozlišení okna přichází na úkor špatných přesností amplitudy, nicméně vzhledem k tomu, že FFT se chová jako soubor paralelních filtrů signálu, nebudou ve středu pásmových filtrů vidět nějaký útlum. Při použití okna Hann klesá frekvence na půli cesty mezi filtrem středové frekvence o 1,5dB.



Obr. 8 Příklad Fourierovy transformace signálu s aplikací okna Hann [17]



Obr. 9 Fourierova transformace bez aplikace okna Hann [17]

5 MĚŘENÍ VIBRACÍ

Abychom mohli změřit vibrace stroje nebo zařízení, potřebujeme k tomu nějaké technické vybavení. V praxi se používají různé prostředky od jednoduchých měřidel celkových hodnot vibrací až po vícekanálové analyzátoři vybavené množstvím funkcí, které usnadňují diagnostikovi nejen samotné měření, ale i analýzu naměřených dat.

Podle typu měřené veličiny se snímače dělí na:

- snímače výchylky
- snímače rychlosti (velometry)
- snímače zrychlení (akcelerometry)

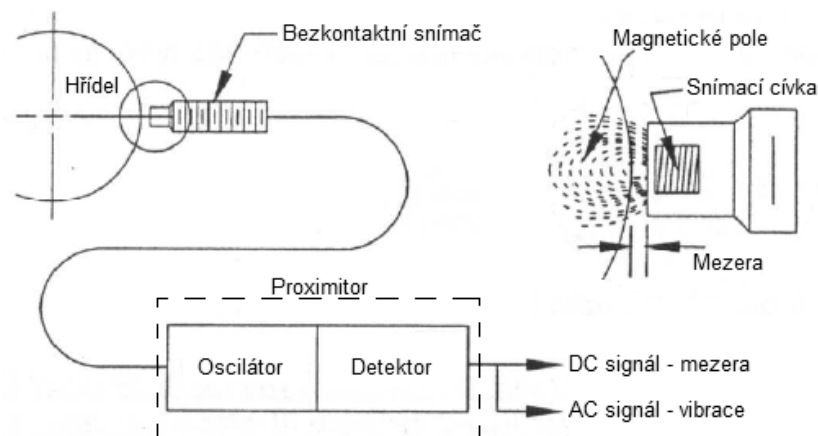
Použitelný frekvenční rozsah a dynamický rozsah se u jednotlivých typů snímačů liší. Dynamický rozsah snímače je rozsah amplitud měřené veličiny, který je možné daným snímačem měřit. Volba vhodného typu snímače závisí jednak na konkrétní aplikaci (např. zda měříme vibrace hřídele nebo vibrace skříně stroje), jednak na frekvenčním rozsahu, který nás zajímá.

Bezkontaktní snímače výchylky jsou limitovány horní frekvencí přibližně 2000 Hz. Ale už v rozmezí od 1000 do 2000 Hz jsou měření bezkontaktními snímači výchylky velmi podezřelá, protože není možné dostatečně eliminovat vliv nerovností povrchu hřídele, které jsou srovnatelné s měřenými výchylkami. [6], [8]

5.1 Snímače výchylky

Existuje několik typů snímačů pro měření výchylky, vzdálenosti nebo polohy. V současné době je často používaným typem bezkontaktní snímač na bázi vířivých proudů, jehož principem činnosti je využití změny Foucaultových proudů při změně odporu prostředí v důsledku změny vzdálenosti. Snímače výchylky tvoří relativně složitý systém, proto se v současnosti používají jen pro měření vibrací hřídelů - měří relativní vibrace hřídele vůči statorové části, obvykle vůči ložisku.

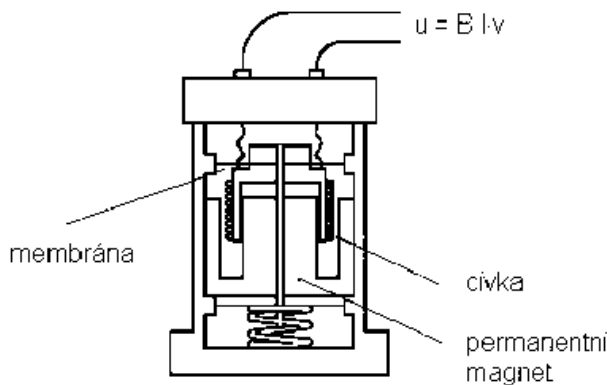
Snímač výchylky na bázi vířivých proudů měří vzdálenost mezi špičkou snímače a vodivým povrchem. Měřicí systém se skládá z vlastního snímače a tzv. proximitoru. Proximitor se skládá z oscilátoru a detektoru. Oscilátor v proximitoru generuje vysokofrekvenční střídavý proud, který prochází cívkou zabudovanou ve snímači a vytváří v okolí špičky snímače vysokofrekvenční elektromagnetické pole. [6], [8]



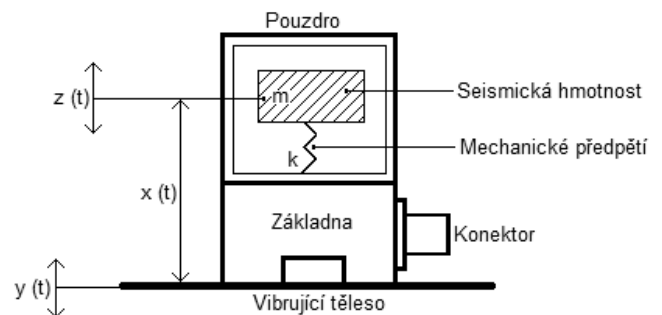
Obr. 10 Snímač výchylky [6]

5.2 Snímače rychlosti

Snímače rychlosti se používají jako snímače vibrací u rotačních strojů. Pracují na principu využití elektromagnetické indukce: když se cívka pohybuje v magnetickém poli, vytváří se na vývodech cívky napětí. Toto indukované napětí je způsobeno přenosem energie z magnetického pole do cívky. Velikost indukovaného napětí je přímo úměrná relativní rychlosti mezi cívkou a magnetickým polem permanentního magnetu. Snímač rychlosti je konstruován tak, aby tato relativní rychlost odpovídala rychlosti vibrací měřeného stroje.



Obr. 11 Snímač rychlosti [6]



Obr. 12 Snímač zrychlení [6]

Vlastní kmitočet elektrodynamických senzorů se pohybuje v rozmezí 5 až 10Hz. Pokud přidáme tlumení (tlumicí závit, uložený pod cívkou) lze dosáhnout frekvence od 1Hz do 3000Hz. [6], [8]

5.3 Snímače zrychlení

Snímač zrychlení se v současnosti používá jako základní snímač vibrací, zejména pro měření na nepohyblivých částech zařízení, protože má ve srovnání s předchozími typy snímačů nejméně nevýhod. Pokud je třeba zjistit rychlost nebo výchylku, dá se tato informace získat integrací signálu ze snímače zrychlení.

Princip funkce akcelerometru je ten, že při deformaci destičky z piezoelektrického keramického materiálu vzniká elektrický náboj, jehož velikost je přímo úměrná této deformaci. Setrvačná hmota (seismická) je pružně uložena - za pružinu je zde považován předepjatý šroub spolu s piezokeramickou destičkou, takže poměr tuhosti a hmotnosti této sestavy je značný a rezonanční frekvence samotného snímače je vysoká. Při samotném měření vibrací kmitá hmota pevně spojená s pouzdem snímače, zatímco referenční seismická hmota zůstává v klidu. Akcelerometr tedy měří absolutní vibrace (referencí je nehybná setrvačná hmota), na rozdíl od snímačů výchylky, které měří relativní vibrace.

Z piezoelektrického prvku je pak snímána výstupní veličina a tou je elektrický náboj – citlivost snímače je udávána v pC/ms^{-2} nebo pC/g . Tato veličina se však nedá přenášet na velké vzdálenosti, proto musely být starší modely akcelerometrů vybaveny externím nábojovým předzesilovačem. Současné typy akcelerometrů již mají v sobě předzesilovač integrován. V tomto případě je pak citlivost snímače udávána v mV/g . [6], [8]

6 ZDROJE VIBRACÍ

Existuje mnoho zdrojů mechanických a strukturálních vibrací, se kterými se musíme potýkat při analýze a návrhu technických systémů. Nejčastější formou problému mechanických vibrací je pohyb vyvolaný strojním zařízením různého typu, často, ale ne vždy rotačního charakteru. [115]

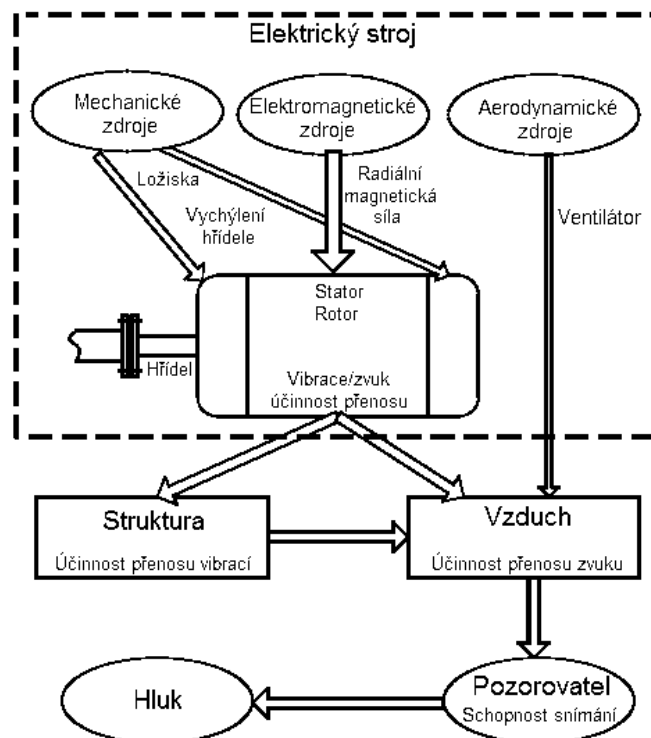
Vibrace a hluk vznikající v elektrických strojích:

- Elektromagnetické vibrace a hluk spojený s parazitními vlivy v důsledku vyšších harmonických napájecího napětí, fázové nesymetrie, magnetického sycení, a magnetostrikční deformace.
- Mechanické vibrace a hluk spojený s mechanické sestavy, např. ložiska.
- Aerodynamické vibrace a hluk spojený s tokem vzduchu vytvářený ventilátorem přes motor.

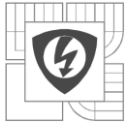
Vibrace a hluk přenášené do elektrického stroje:

- Vibrace vzniklé v důsledku spojení stroje se zátěží, např. vychýlení hřídele, řemenový převod, zuby ozubených kol, spojky.
- Vibrace přenášené do stroje ze základny (nebo jiné struktury) na které je stroj připevněn. Např. vibrace přenášené zemí (nebo konstrukcí budovy) z projíždějících nákladních vozidel, z probíhající stavby, vibrace pocházející z kolejových systémů běžné v mnoha městských oblastech, vibrace vyvolané přírodními jevy (např. zemětřesení, větrné síly), atd.

Hluk i vibrace jsou přenášeny od svého zdroje přes média (vzduch, konstrukce) k pozorovateli (člověk, snímač). Proces vzniku a přenosu vibrací je znázorněn na Obr. 13. [20]



Obr. 13 Schéma vzniku a přenosu vibrací [20]



6.1 Mechanické zdroje vibrací

Vibrace a hluk jsou způsobeny zejména ložisky (jejich vadami), ale také kluznými spoji, ohnutým hřídelem, nevyvážeností rotoru, nesouosostí hřídele spojky, U-klouby, převody atd. Rotor by měl být precizně vyvážen, vede to výraznému snížení vibrací. Nerovnováha rotoru způsobuje dynamické vibrace a excentricitu, která vede ke zvýšení emise hluku ze statoru a rotoru.

Hluk způsobený valivými ložisky závisí na přesnosti, s jakou byly ložiskové díly vyrobeny a sestaveny, mechanické rezonanční frekvenci vnějšího kroužku, rychlosti otáčení, mazání, dovolené výchylky, zatížení, teplotě a na přítomnosti cizích předmětů.

Hluk produkovaný kluznými ložisky je obecně nižší než u valivých ložisek. Vibrace a hluk produkovaný kluznými ložisky závisí na drsnosti kluzných povrchů, mazání, procesu výroby, kvalitě instalace, stabilitě a pohybu olejové vrstvy v ložisku. [20]

6.2 Aerodynamické zdroje hluku

Základním zdrojem hluku aerodynamického charakteru je ventilátor. Každá překážka umístěná v proudu vzduchu vytváří hluk. V neuzavřených motorech hluk pocházející z vnitřního ventilátoru je emitován do prostoru větracími otvory. Ve zcela uzavřených motorech převládá hluk z externího ventilátoru.

Podle spektrálního rozložení hluku ventilátoru jde o širokopásmový hluk (100 až 10 000 Hz) a vysokofrekvenční šum. Vysokofrekvenční hluk může být odstraněn zvětšením vzdálenosti mezi oběžným kolem ventilátoru a stacionárními překážkami. [20]

6.3 Elektromagnetické zdroje vibrací

Vibrace a hluk elektromagnetického původu jsou způsobeny generováním elektromagnetických polí. Stator i rotor produkují magnetický tok o určité hustotě ve vzduchové mezeře. Jestliže stator produkuje magnetický tok $B_{m1} \cdot \cos(\omega_1 t + k\alpha + \Phi_1)$ a rotor vytváří magnetický tok $B_{m2} \cdot \cos(\omega_2 t + l\alpha + \Phi_2)$, pak jejich produkt je:

$$0,5B_{m1}B_{m2}\cos[(\omega_1 + \omega_2)t + (k + l)\alpha + (\Phi_1 + \Phi_2)] \\ + 0,5B_{m1}B_{m2}\cos[(\omega_1 - \omega_2)t + (k - l)\alpha + (\Phi_1 - \Phi_2)] \quad (6.1)$$

Kde B_{m1} a B_{m2} jsou amplitudy statorového a rotorového magnetického toku, ω_1 a ω_2 jsou úhlové rychlosti statorového a rotorového magnetického pole, Φ_1 a Φ_2 fáze statorového a rotorového magnetického toku, $k = 1, 2, 3, \dots$ a $l = 1, 2, 3, \dots$

Výsledek vyjádřený rovnicí 6.1 je přímo úměrný magnetickému napětí ve vzduchové mezeře o amplitudě $P_{mr} = 0,5B_{m1}B_{m2}$, úhlové rychlosti $\omega_r = \omega_1 \pm \omega_2$, řádu $r = k \pm l$ a fázi $\Phi = \Phi_1 \pm \Phi_2$. Vlny magnetického napětí (nebo magnetického tlaku) působí na aktivní plochy statoru a rotoru v radiálním směru a tím způsobují jejich deformaci, což má za následek vyvolávání vibrací a hluku.

Rozložení vinutí v drážkách, zkreslení vstupního proudu, výkyvy propustnosti vzduchové mezery vlivem excentricity rotoru a fázová nesymetrie vedou ke zvýšení mechanických deformací a vibracím. Zvláště pak radiální síla ve střídavých strojích působící na stator a rotor má za následek deformaci magnetického obvodu stroje.

Struktura rámu statoru (nebo krytu statoru) je primárním zdrojem hluku stroje. Jestliže frekvence radiální síly je blízká, nebo přímo rovna přirozené frekvenci rámu statoru, dochází k rezonanci. Rezonance statoru vede k jeho deformaci, což má opět za následek vznik vibrací a akustického hluku.

Hluk vzniklý magnetostrickí u elektrických strojů lze ve většině případů zanedbat vzhledem k nízké frekvenci $2f$ a vysokého řádu $r = 2p$ radiálních sil. Nicméně, radiální síly vyvolané magnetostrickí mohou dosáhnout až 50% z celkových radiálních sil produkovaných ve vzduchové mezeře magnetickým polem.

U motorů napájených z měniče, dochází k vytváření parazitního oscilačního momentu kvůli vzniku vyšších harmonických ve vinutí statoru. Tyto parazitní momenty jsou obecně větší než oscilační moment vytvořený prostorovými harmonickými. Kromě toho, zvlněné napětí z usměrňovače je přenášeno přes meziobvod do měniče, které pak vytváří další druh oscilačního momentu. [20]

7 VÝPOČETNÍ PROGRAM

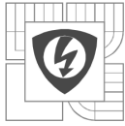
7.1 FEM, Metoda konečných prvků

V obecném pojetí FEM, zahrnujícím Metodu konečných prvků, Metodu hraničních prvků hranice, Metodu konečných vrstev a Metodu konečných pásů, tkví matematická podstata v tzv. diskretizaci úlohy. Názorně řečeno: hledání neznámých funkcí v oblasti Ω s hranicí Γ je nahrazeno hledáním konečného počtu hodnot těchto funkcí nebo parametrů Δ , z nichž lze zkonstruovat přibližné řešení.

Takto postupovaly i starší metody: Klasické variační metody hledaly součinitele předem zvolených funkcí, které měly obecně nenulové hodnoty v celé oblasti Ω . Známa metoda sítí, zvaná též diferenční, nahrazovala derivace diferencemi, obecněji lineárními kombinacemi několika funkčních hodnot v uzlech sítě. Metoda kolokační se omezila na přibližné splnění daných podmínek v několika vybraných bodech Ω a Γ . Formálně se tím vždy převedlo analytické řešení diferenciálních rovnic na řešení soustav algebraických lineárních rovnic. Tak je tomu i v případě FEM. Pokrok je ve způsobu, kterým se tento převod provádí, matematicky řečeno ve volbě báze funkcí, do nichž rozkládáme hledané funkce. Rozklad úzce vážeme na rozdělení oblasti Ω (nebo Γ u metody hraničních prvků) na podoblasti Ω_e , stručně zvané konečné prvky na rozdíl od „nekonečně malých diferenciálů“ $d\Omega$, $d\Gamma$ přesné analýzy.

Metoda konečných prvků vzešla z potřeby řešení komplexních úloh statické mechaniky ve stavebním a leteckém inženýrství. Z matematického hlediska je metoda konečných prvků (MKP) používána pro nalezení aproximovaného řešení parciálních diferenciálních rovnic (PDR) i integrálních rovnic např. rovnice vedení tepla. Postup řešení je založen jednak na úplné eliminaci diferenciální rovnice (stacionární úlohy), nebo na převedení PDR na ekvivalentní obyčejnou diferenciální rovnici, jež je následně řešena standardními postupy jako např. metodou konečných diferencí a další.

Při řešení parciálních diferenciálních rovnic je základním krokem sestavení rovnice, která aproximuje řešenou rovnici a která je numericky stabilní ve smyslu, že chyby ve vstupních datech a pomocných výpočtech se neakumulují a nevedou tak k nesmyslným výsledkům. Existuje celá řada možných postupů, všechny s určitými výhodami i nevýhodami. Metoda konečných prvků je rozumnou volbou pro řešení parciálních diferenciálních rovnic na složitých oblastech (jakými jsou např. automobily či potrubní rozvody) nebo v případě kdy požadovaná přesnost se mění po celé oblasti řešení. Například při simulaci místního počasí na Zemi je mnohem důležitější dosáhnout přesné predikce nad zemí než nad oceánem, to je požadavek, který je právě dosažitelný metodou konečných prvků. [22], [23]



7.2 ANSYS, Workbench

ANSYS je obecně nelineární, multifyzikální program zahrnující strukturální a termodynamickou analýzu, analýzu proudění kontinua, analýzu elektrostatických a elektromagnetických polí a akustické analýzy. Veškeré tyto analýzy lze jednak provádět jednotlivě, ale díky multifyzikálnímu pojetí programu ANSYS je lze také zahrnout do jediné, společné analýzy. Umožňuje nejen kontrolní výpočty, ale díky parametrizovaným výpočtovým modelům i citlivostní a optimalizační analýzy a rovněž výpočty spolehlivosti. Od počátku své existence patří ke špičkovým inženýrským systémům využívajících metodu konečných prvků (FEM).

Od začátku je to průkopník multifyzikálních analýz s vedoucí pozicí v klasických oborech, jakými jsou strojírenství, automobilová a dopravní technika, energetika a také stavební aplikace s procesním inženýrstvím. Tento software lze s velkou výhodou používat i v dalších oborech, jako je např. mikroelektronika nebo biomechanika.

ANSYS patří do kategorie strategický software, jeho vývoz z USA je pečlivě kontrolován a podléhá příslušným vývozním předpisům pro tuto exportní kategorii. Všechny programy ANSYS mají certifikaci ISO 9001 a další speciální certifikace podle typu užití, kupříkladu pro jadernou energetiku (USNRC), nebo vojenské aplikace. ANSYS podléhá kvalitativní kontrole, což obnáší složitý proces vývoje nových verzí, které mohou být uvolněny k dispozici uživatelům teprve po vyhodnocení komplexního testování na specializovaných pracovištích. [24]

Workbench je moderní prostředí sdružující řadu programů ANSYS a to jak pro FEM (MKP) výpočty pevnosti, dynamiky, teplotních polí, elektromagnetismu a akustiky, tak i pro CFD analýzy proudění a jejich interakci. Toto prostředí obsahuje pre a post procesory pro jednotlivé typy analýz a zároveň zabezpečuje výměnu dat mezi jednotlivými programy pro modelování multifyzikálních problémů, jako je např. vzájemné ovlivňování proudění a pevné fáze. [21]

8 PRAKTICKÉ MĚŘENÍ VIBRACÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU

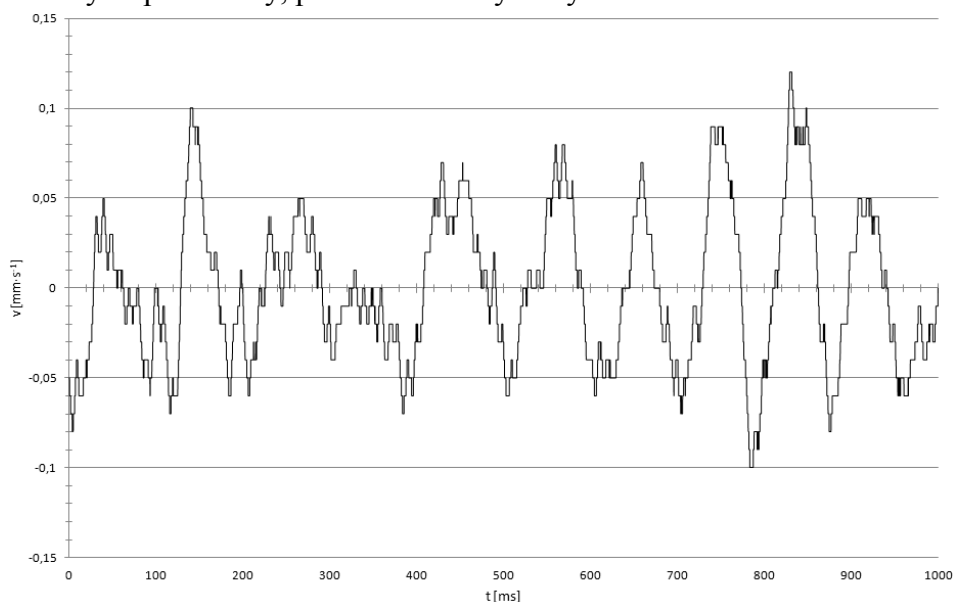
Jeden z cílů této práce je provedení praktického měření vibrací na asynchronním motoru při různých vstupních proudech. Jako měřený motor byl zvolen 3f motor LENZE A – 4470 o výkonu 1,5kW. Motor je uzpůsoben pro napájení z 3f sítě o kmitočtu 50Hz a 60Hz.

Při měření vibrací byl motor připojen přes spojku k dynamometru. Pomocí změny zátěžného momentu dynamometru, který představoval zátěž pro motor, bylo dosaženo změny vstupních proudů do motoru. Na této sestavě probíhalo měření celkem pětkrát. Při každém měření byl motor napájen 3f soustavou 3x230V/50Hz. Při měření byly zaznamenány rychlosti vibrací a zrychlení vibrací pomocí dvou čidel. Čidla byla připevněna na motoru pomocí magnetů. Signály z čidel byly přenášeny do měřicího přístroje PRÜFTECHNIK, který je schopen uchovávat ve své paměti naměřené průběhy. Dále je schopen naměřené signály analyzovat pomocí FFT. Výsledky získané z přístroje byly převedeny do počítače, kde byly dále zpracovány.

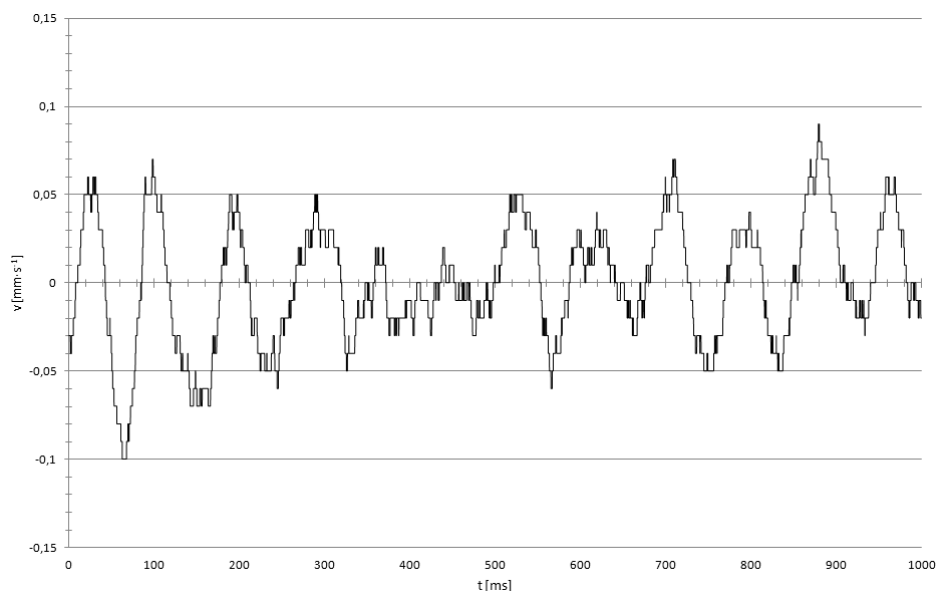
8.1 Měření okolních vibrací

Před zahájením vlastního měření vibrací na běžícím motoru, byly změřeny vibrace přenášené do motoru z okolí. Tyto vibrace z okolí pak zanáší do výsledků získaných při vlastním měření běžícího motoru chybu. Tyto vibrace mohou pocházet od stavebních strojů nacházejících se na stavbě, která je poměrně blízko budově, kde probíhalo měření vibrací. Stejně tak mohou mít tyto vibrace původ přímo v budově, jako zdroje těchto vibrací může být považováno prakticky cokoli, co nějakým způsobem působí na konstrukci budovy. Mohou to například stroje pracující v jiných laboratořích, ale také třeba osoby pohybující se uvnitř budovy. Stejně tak původem těchto vibrací mohou být i povětrnostní vlivy z okolí působící na plášť budovy. Zdrojů okolních vibrací je opravdu mnoho a při vyhodnocování výsledků je nutné tyto okolnosti zohlednit.

Odstínění okolních vibrací je poměrně složitá záležitost na realizaci a fakulta bohužel nedisponuje takovými prostředky, pomocí nichž by to bylo možné.

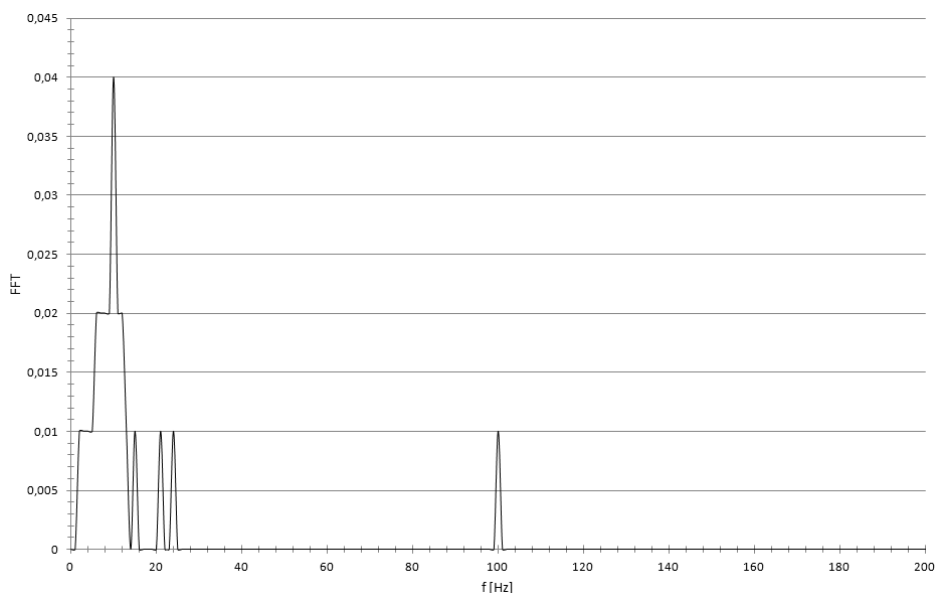


Graf 1 Rychlost okolních vibrací – radiální směr

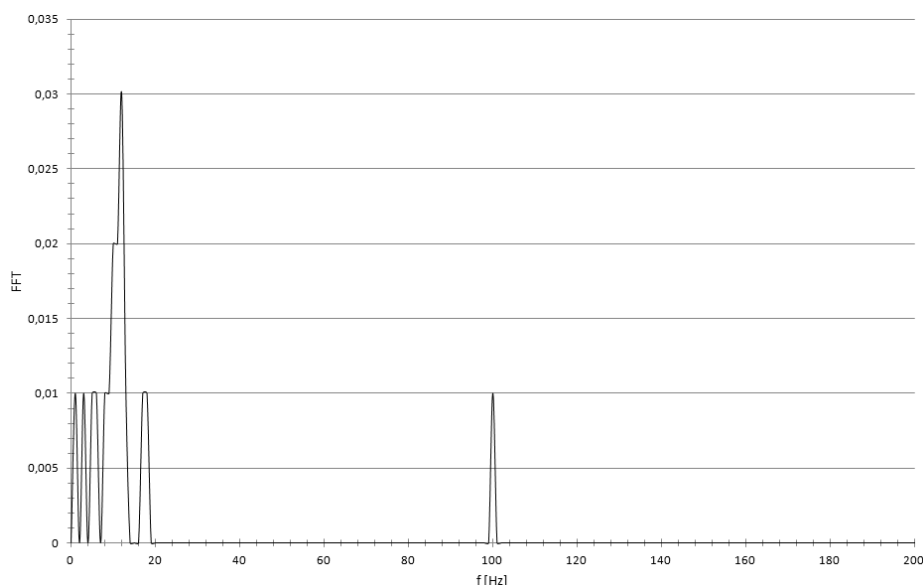


Graf 2 Rychlost okolních vibrací – axiální směr

V grafech zobrazující průběhy rychlostí vibrací v daných směrech šíření je vidět, že ač nedosahují velkých hodnot, budou se podílet na výsledcích získaných při měření pracujícího asynchronního motoru. Aby však bylo možné přesněji identifikovat, jakých kmitočtů dosahuje rušení z okolí, bylo nutné provést rychlou Fourierovu transformaci. Na signál získaný z měření byla aplikována okénková funkce, konkrétně okno typu Hanning. Tento typ funkce bude použit při každé další FFT signálů získaných z naměřených dat.



Graf 3 FFT rychlosti okolních vibrací – radiální směr



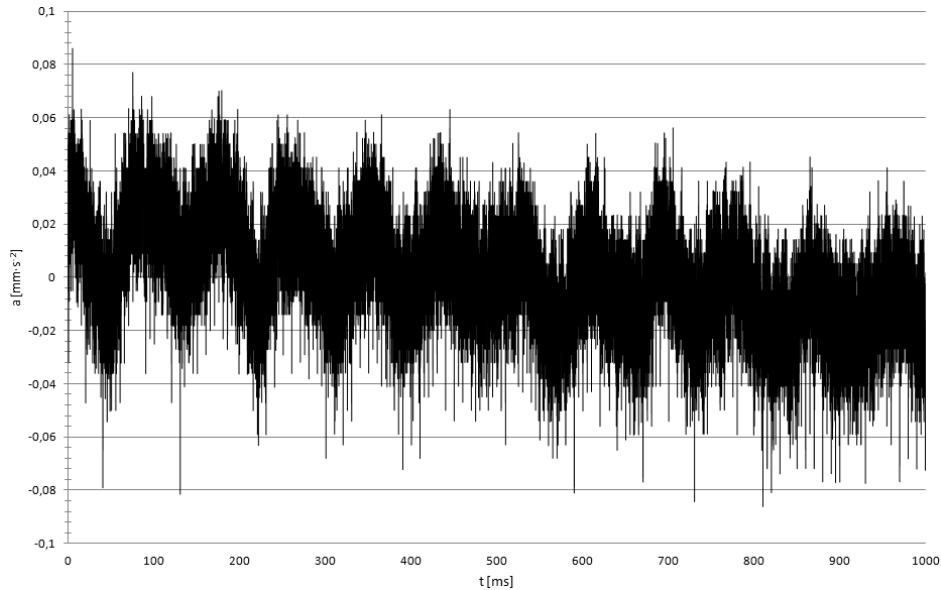
Graf 4 FFT rychlosti okolních vibrací – axiální směr

Z frekvenčních spekter zrychlení vibrací je vidět, že dominantní zastoupení mají frekvenční složky o kmitočtu od 1 do 20Hz. Při měření rychlostí vibrací na běžícím stroji, lze tedy tyto frekvenční složky považovat za rušení z okolí. Za povšimnutí stojí frekvenční složka vyskytující se v obou směrech šíření. Její kmitočet 100Hz je roven dvojnásobku kmitočtu sítě, bude tedy nutné brát v úvahu, že vibrace motoru pohybující se v této oblasti kmitočtu budou zkresleny. Je však možné, že tato složka nebude obsažena ve spektru neustále. Stejně tak je možné, že se ve spektru budou objevovat i frekvenční složky o jiných kmitočtech než byly zjištěny při tomto měření.

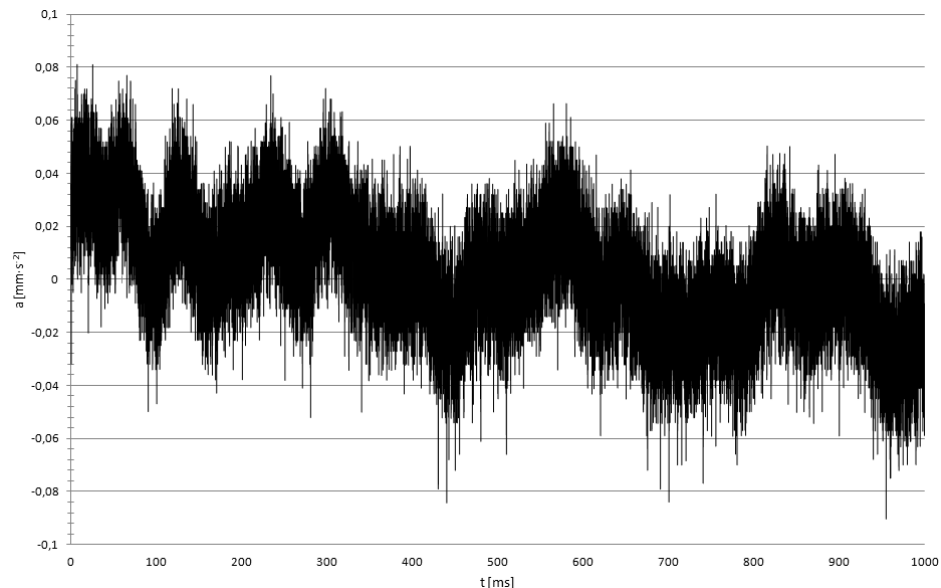
f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
10	0,04	12	0,03
6	0,02	10	0,02
7	0,02	11	0,02
8	0,02	1	0,01
9	0,02	3	0,01
11	0,02	5	0,01
12	0,02	6	0,01
2	0,01	8	0,01
3	0,01	9	0,01
4	0,01	13	0,01
5	0,01	17	0,01
13	0,01	18	0,01
15	0,01	100,01	0,01
21	0,01	0	0
24	0,01	2	0
100,01	0,01	4	0
0	0	7	0
1	0	14	0
14	0	15	0
16	0	16	0

Tab. 1 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Přehlednější náhled na frekvenční složky obsažené ve spektrech seřazené podle velikosti dosahovaných amplitud poskytuje tabulky 1a), 1b). Barevné označení v tabulkách označuje frekvenční složky vyskytující se pouze v příslušném směru šíření.

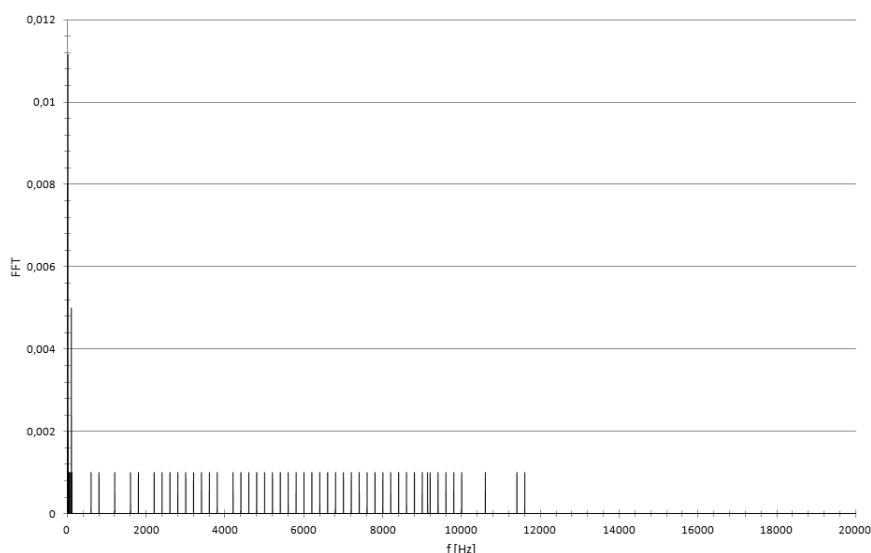


Graf 5 Zrychlení okolních vibrací – radiální směr

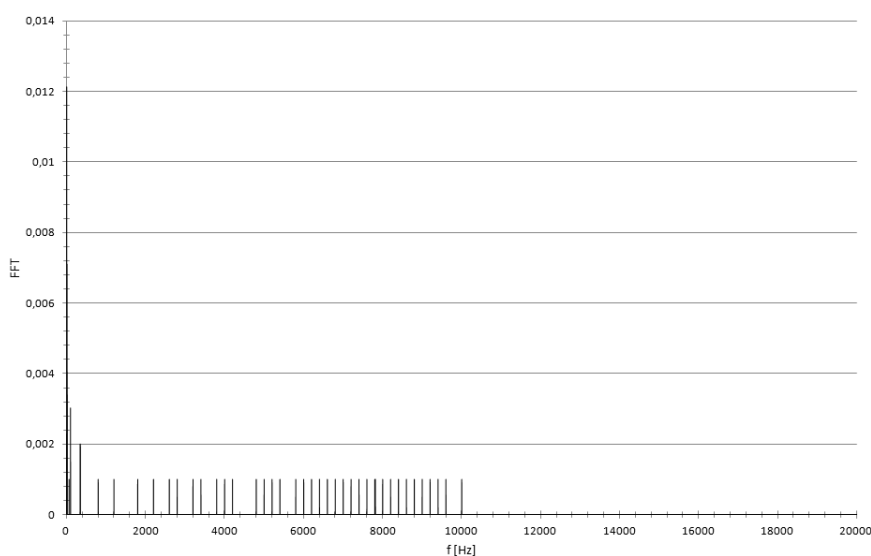


Graf 6 Zrychlení okolních vibrací – axiální směr

Dalším způsobem jak nahlížet na velikost vibrací přenášených do stroje z okolí je změřit velikost zrychlení těchto vibrací. Grafy 5 a 6 představují záznam zrychlení vibrací pocházející z okolí o délce 1000ms. Jelikož nebylo možné určit konkrétní původ těchto vibrací, nebylo ani možné určit jejich periodu a vykreslit pro větší přehlednost pouze několik period těchto vibrací. Nicméně z obecného hlediska se nemusí jednat ani o periodické vibrace.



Graf 7 FFT zrychlení okolních vibrací – radiální směr



Graf 8 FFT zrychlení okolních vibrací – axiální směr

Grafy 7 a 8 zobrazují frekvenční spektra naměřených okolních vibrací. Frekvenční spektra byla získána pomocí FFT a aplikace stejné okénkové funkce jako v předchozím případě. Je dosti zajímavé, že téměř všechny frekvenční složky mají přibližně stejnou velikost amplitud. V celku se však tyto frekvenční složky vyskytují rozprostřeny v pásmu od 1 Hz do 10 kHz. Výjimku tvoří několik frekvenčních složek v radiálním směru šíření, jejichž kmitočet přesahuje zmíněných 10 kHz.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
12	0,011	3	0,012
11	0,009	4	0,011
1	0,008	1	0,01
100	0,005	12	0,007
4	0,003	11	0,006
2	0,002	5	0,004
3	0,002	17	0,004
13	0,002	18	0,003
14	0,002	100	0,003
18	0,002	99	0,002
99	0,002	343	0,002
101	0,002	344	0,002
5	0,001	350	0,002
6	0,001	2	0,001
7	0,001	6	0,001
8	0,001	7	0,001
9	0,001	8	0,001
10	0,001	9	0,001
15	0,001	10	0,001
16	0,001	13	0,001

Tab. 2 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Přehlednější pohled na zastoupení nejvýraznějších frekvenčních složek poskytují tabulky 2a, 2b. V těchto tabulkách je vypsáno pouze 20 frekvenčních složek, které dosahují nejvyšších amplitud a mají tedy největší podíl na výsledném tvaru zaznamenaného průběhu zrychlení vibrací z obou směrů šíření. Barevné označení představuje frekvenční složky vyskytující se pouze v příslušném směru šíření vibrací. Při vyhodnocení velikosti vlastních amplitud je patrné, že nedosahují vysokých hodnot. Je však nutné i s takto nízkými hodnotami počítat, protože jak již bylo zmíněno výše, zanáší tyto hodnoty do veškerých měření vibrací chyby. Nutné je ovšem zdůraznit, že okolní vibrace nejsou konstantní a mění se v každém časovém okamžiku. Je tedy nutné brát v úvahu, že okolní vibrace přenášené do stroje při každém měření nejsou stejné. Potom lze hodnoty získané z tohoto měření považovat pouze za orientační, ale ne však bezvýznamné.

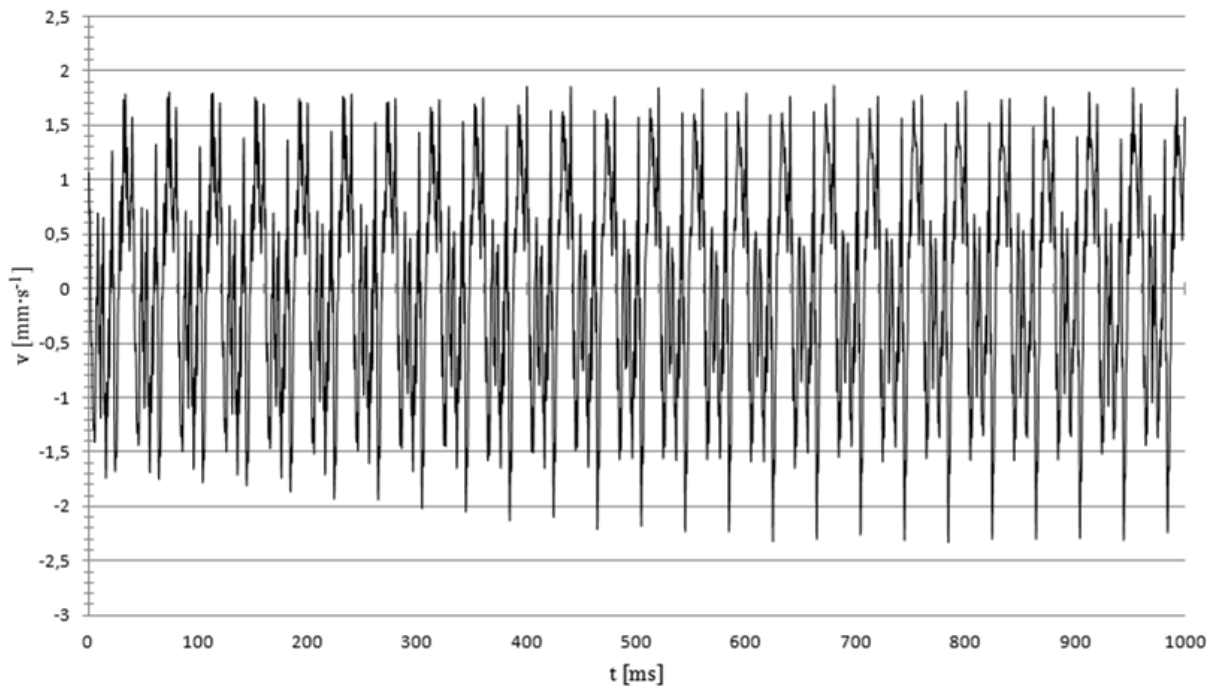
8.2 Měření vibrací na nezatíženém motoru

První měření probíhalo za stavu, kdy na dynamometru nebyl nastaven žádný zatěžovací moment. Samotný dynamometr pak nepředstavuje téměř žádnou zátěž a zle tedy měření na takové sestavě považovat za měření na nezatíženém motoru.

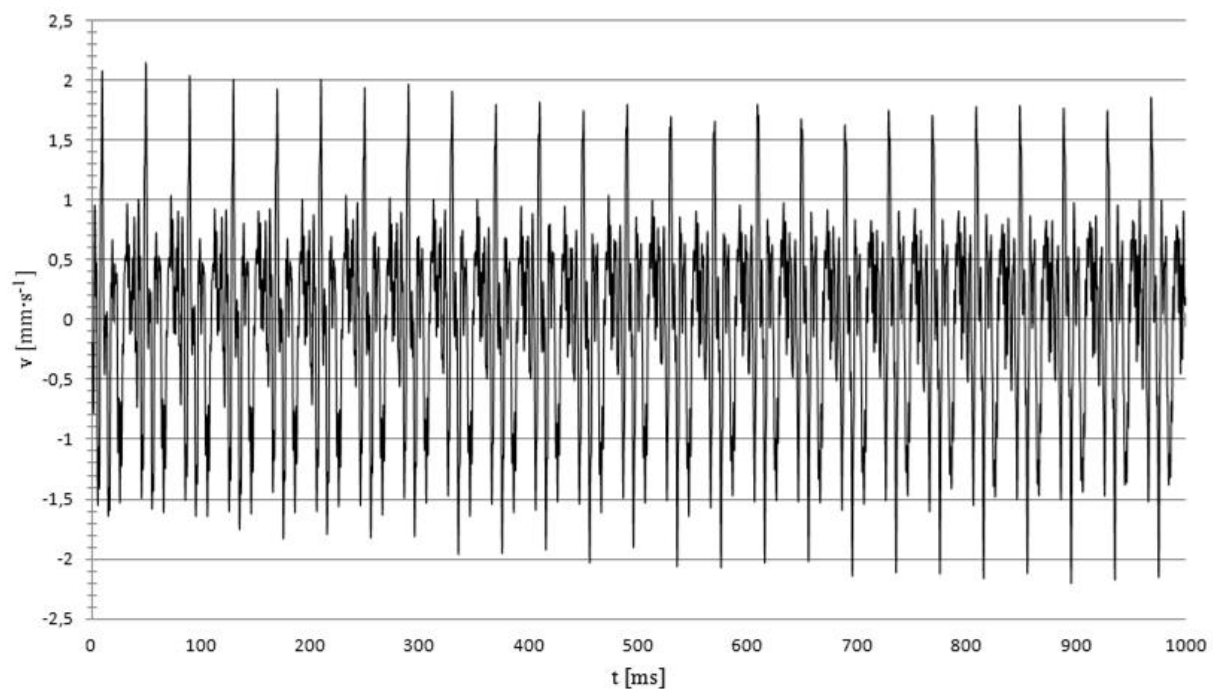
Při napájení z 3f sítě o kmitočtu 50Hz. Výrobce uvádí, že motor napájen ze sítě o těchto parametrech dosahuje 1400 otáček za minutu. Vzhledem k tomu, že měření probíhalo na nezatíženém motoru (naprázdno), dosáhl motor 1498,3 otáček za minutu. Motor byl napájen z řízeného 3f zdroje, který umožňuje měření elektrických veličin v jednotlivých fázích. Zdroj dodával průměrně 2,341A v každé fázi. Při napájení běžnou 3f sítí, kterou zdroj vytvářel, pak vyplývá, že zdroj dodával průměrně 64,67W do každé fáze.

8.2.1 Měření rychlosti vibrací – nezatížený motor

Z hodnot získaných z měřicího přístroje pak byly vykresleny grafy zobrazující průběhy rychlostí a zrychlení vibrací vždy pro každé čidlo zvlášť.



Graf 9 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – radiální směr



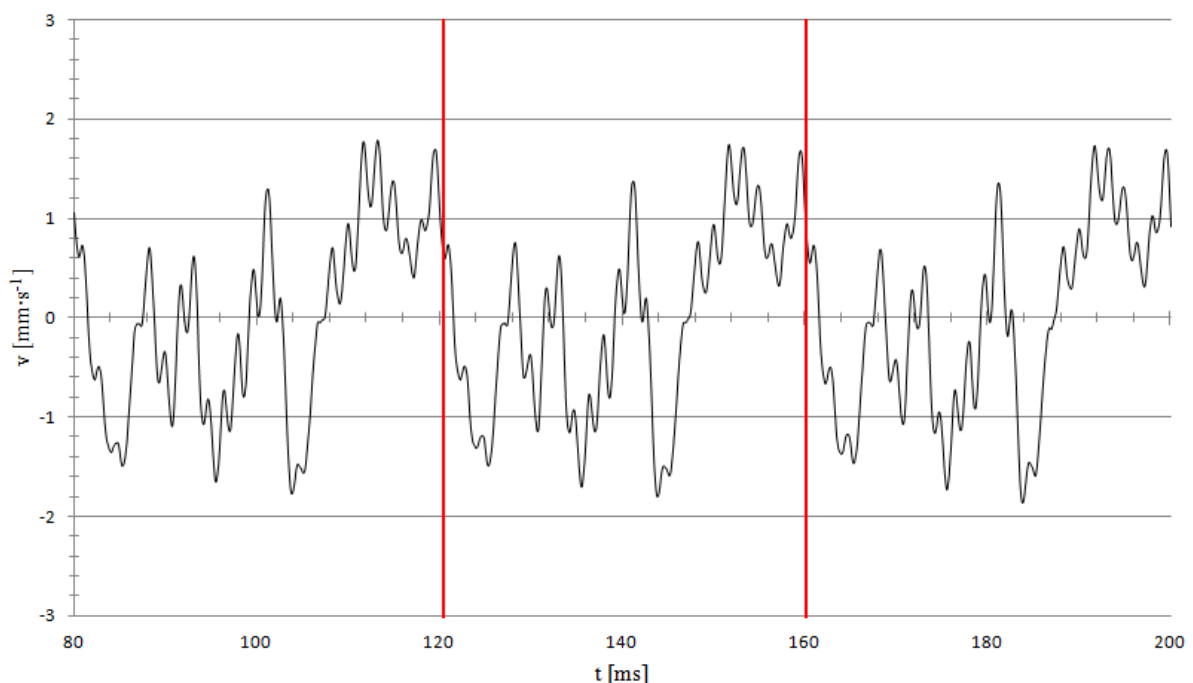
Graf 10 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – axiální směr

Takto zobrazené výsledky průběhů rychlostí vibrací jsou pro vzájemné porovnání signálů z obou čidel špatně přehledné. Jelikož lze signál do jisté míry považovat za periodický, byly pro lepší přehlednost a následné porovnání výsledků zobrazeny průběhy pro kratší časový úsek než je 1000ms. Protože se jedná o měření vibrací na točivém stroji, který se periodicky otáčí tak i vibrace které vytváří, mají téměř periodický průběh. Z čehož lze vyvodit, že perioda vibrací je pevně spjata s periodou otáčení rotoru stroje.

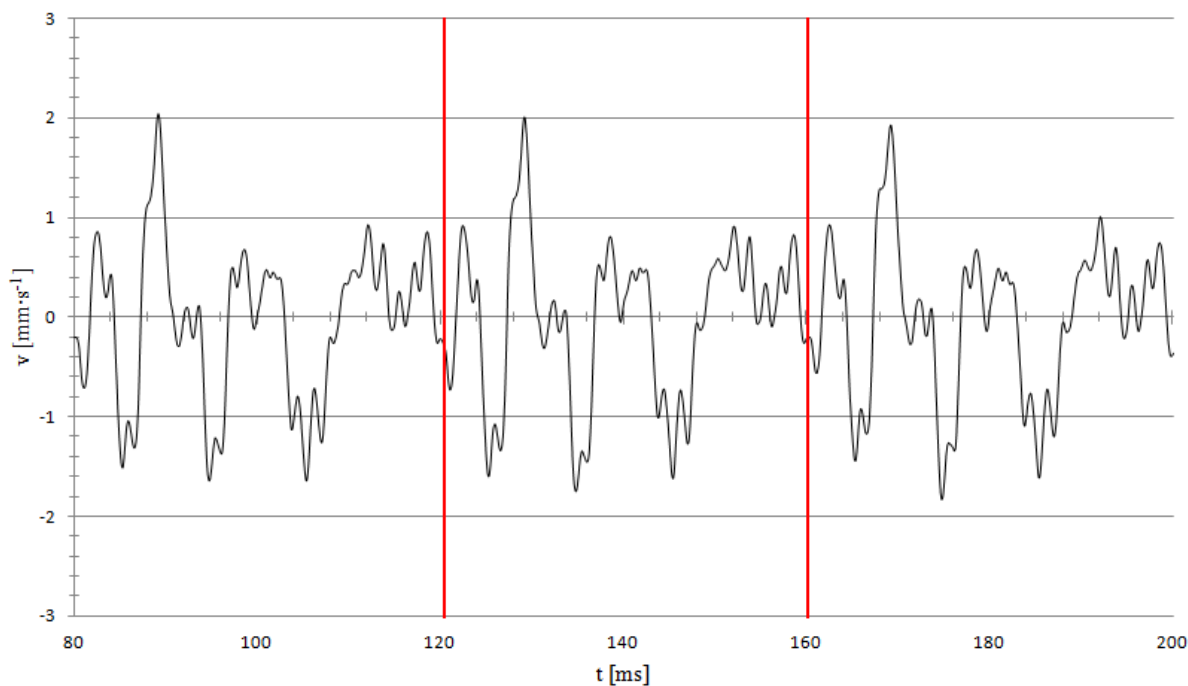
Pro určení délky trvání jedné periody vibrací bylo nutné vypočítat dobu jedné periody otáčení rotoru.

$$T_{rotor} = \frac{1000}{\frac{n}{60}} = \frac{1000}{\frac{1498,3}{60}} = 40,05ms$$
$$T_{rotor} = T_{vibr} \quad (7.1)$$

Díky vztahu, který je uveden výše (7.1) pak bylo možné vybrat nový časový úsek pro sestavení nových grafů. Počet zobrazených period byl zvolen s ohledem na přehlednost a zachování jisté vypovídací hodnoty. Nový časový úsek, ve kterém jsou zobrazeny rychlosti vibrací, se rovná 3 periodám naměřených vibrací (= 3 periody otáčení rotoru).



Graf 11 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - radiální směr



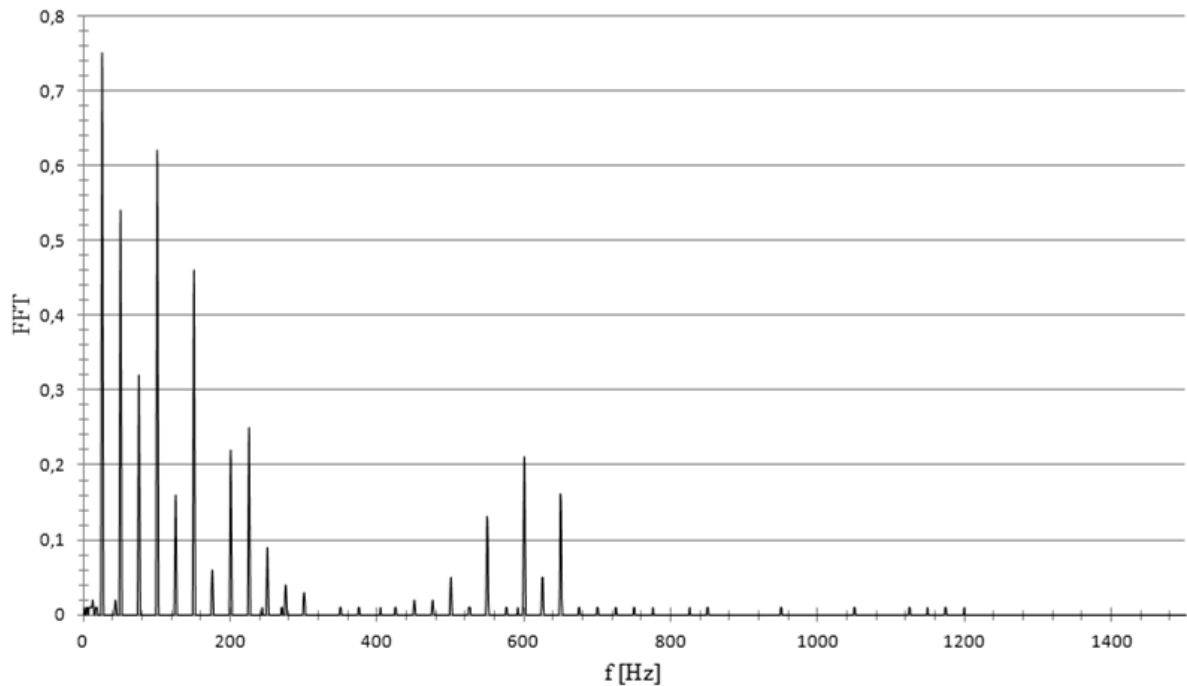
Graf 12 Rychlost vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - axiální směr

Nyní po zobrazení rychlosti vibrací v kratším časovém úseku (Graf 11 a 12) si lze všimnout nezanedbatelných rozdílů mezi oběma průběhy. Je to dáno tím, že se všechny zdroje vibrací neprojevují v obou směrech (axiální a radiální), ale vždy pouze v jednom směru. Vzhledem k tomu, že nebyla známa přesná poloha rotoru při zahájení měření, nebylo tedy možné s jistotou říci, ve kterém bodě začíná a končí jedna perioda. Proto určení začátku a konce časového úseku, proběhlo pouze na základě znalosti doby trvání jedné periody. Stejně tak i rozdělení signálu červenými čarami zobrazuje pouze přibližné začátky a konce jednotlivých period.

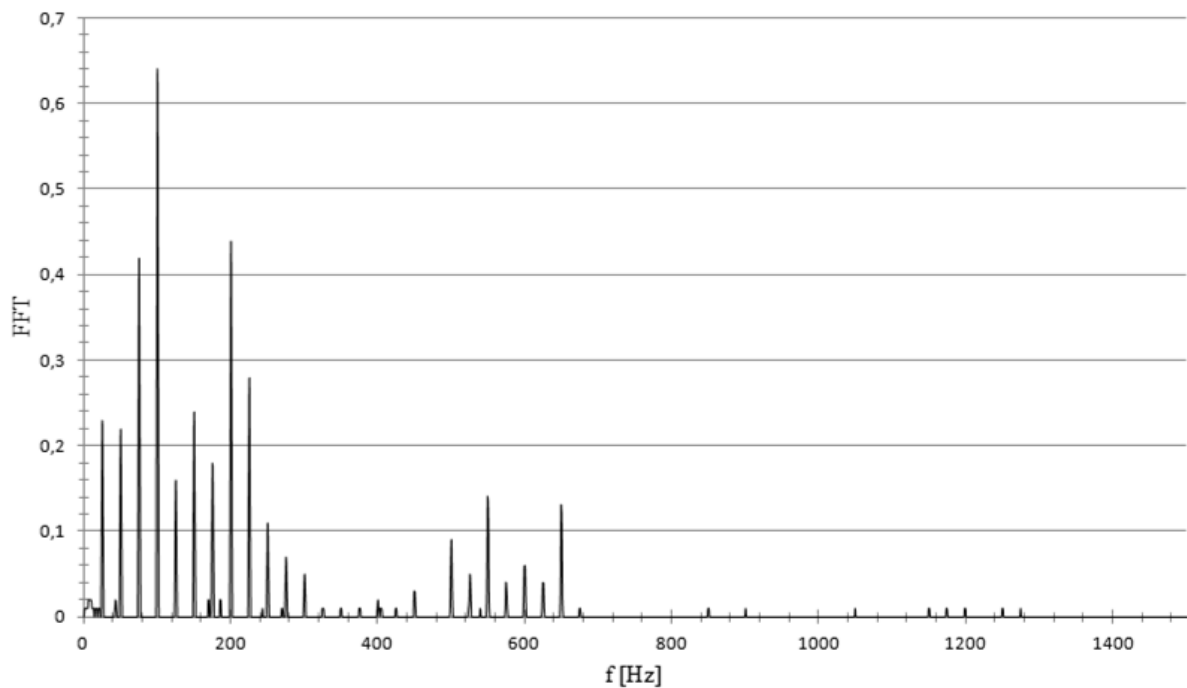
U obou signálů si lze všimnout, že jejich základem je sinusový průběh, na který jsou namodulovány signály, které pochází od veškerých zdrojů vibrací, které stroj obsahuje. Samozřejmě je také k tomuto signálu přičteno rušení z okolí, které je do stroje přenášeno přes ukotvení motoru k pracovnímu stolu a z hřídele, na které je přes spojku připojen dynamometr.

Mezi nejvýraznější rozdíl mezi oběma směry lze považovat špici, která se objevuje v každé periodě signálu v axiálním směru. Tyto špice se vyskytují pouze v kladné části a dosahují velikosti přibližně $2\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Záporné části signálů se od sebe příliš neliší, až na počet výrazných špic v záporné části. V radiálním směru se objevuje vždy o jednu výraznou špici více, než ve směru axiálním. Rozdílnost signálů z obou směrů je dána tím, že se některé vibrace pocházející z příslušných zdrojů projevují v jednom směru více a v druhém méně, nebo vůbec.

V praxi však nestačí podrobit zkoumání pouze průběh získaný z naměřených hodnot rychlostí vibrací. Je nutné zjistit jeho frekvenční spektrum. K tomuto účelu slouží rychlá Fourierova transformace (FFT). Vzhledem k tomu, že měřicí přístroj umožňuje provedení FFT přímo ze získaného signálu, je možné provést zběžné vyhodnocení stavu stroje téměř ihned a není zapotřebí další techniky. Pohodlnější však je provést FFT signálu až v počítači pomocí programu dodávaného k měřicímu přístroji.



Graf 13 FFT rychlosti vibrací (nezatížený motor) – radiální směr



Graf 14 FFT rychlosti vibrací (nezatížený motor) – axiální směr

V grafech 13 a 14 jsou zobrazeny výsledky FFT naměřeného signálu. Při provádění FFT bylo na signál aplikováno okno typu Hanning. Pro přesnější a přehlednější vyhodnocení frekvenčních spekter signálů byly vyhotoveny dvě tabulky, v nichž jsou zaneseny frekvence, které dosahují nejvyšších amplitud.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
25	0,75	100,01	0,64
100,01	0,62	200,01	0,44
50	0,54	75	0,42
150,01	0,46	99,01	0,32
24	0,39	101,01	0,31
26	0,36	225,01	0,28
75	0,32	150,01	0,24
99,01	0,31	25	0,23
101,01	0,3	50	0,22
49	0,27	199,01	0,22
51	0,27	201,01	0,22
149,01	0,25	74	0,21
225,01	0,25	76	0,21
151,01	0,22	175,01	0,18
200,01	0,22	125,01	0,16
600,04	0,21	224,01	0,15
76	0,17	549,03	0,14
125,01	0,16	149,01	0,13
649,04	0,16	226,01	0,13
74	0,15	649,04	0,13

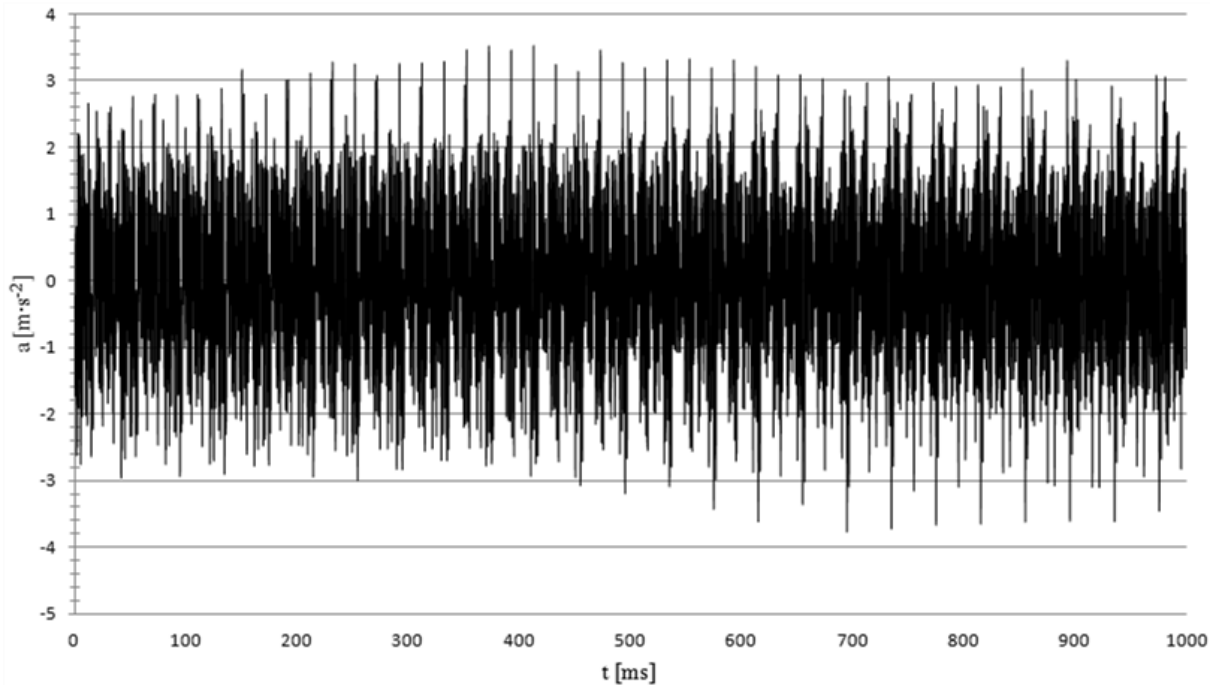
Tab. 3 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Při porovnání dvaceti frekvencí (Tab. 3a, 3b), které dosahují nejvyšších amplitud pro daný směr šíření vibrací je vidět, že nejvyšších hodnot dosahují frekvence okolo 100Hz a to v obou směrech. Dále v radiálním směru jsou výrazné frekvenční složky okolo 50Hz a 150Hz, v axiálním směru jsou pak dosti výrazné frekvence okolo 75Hz a 200Hz. V axiálním směru šíření si lze všimnout nemalého zastoupení frekvencí v oblasti 225Hz. V obou směrech se dále výrazně prezentují frekvenční složky z oblasti 25Hz. Vibrace o tak nízké frekvenci pochází ze samotného otáčení rotoru, při změřených otáčkách se rotor otočí 25x za sekundu. Barevné označení v tabulkách uvedených výše ukazuje frekvenční složky objevující se pouze v příslušných směrech šíření.

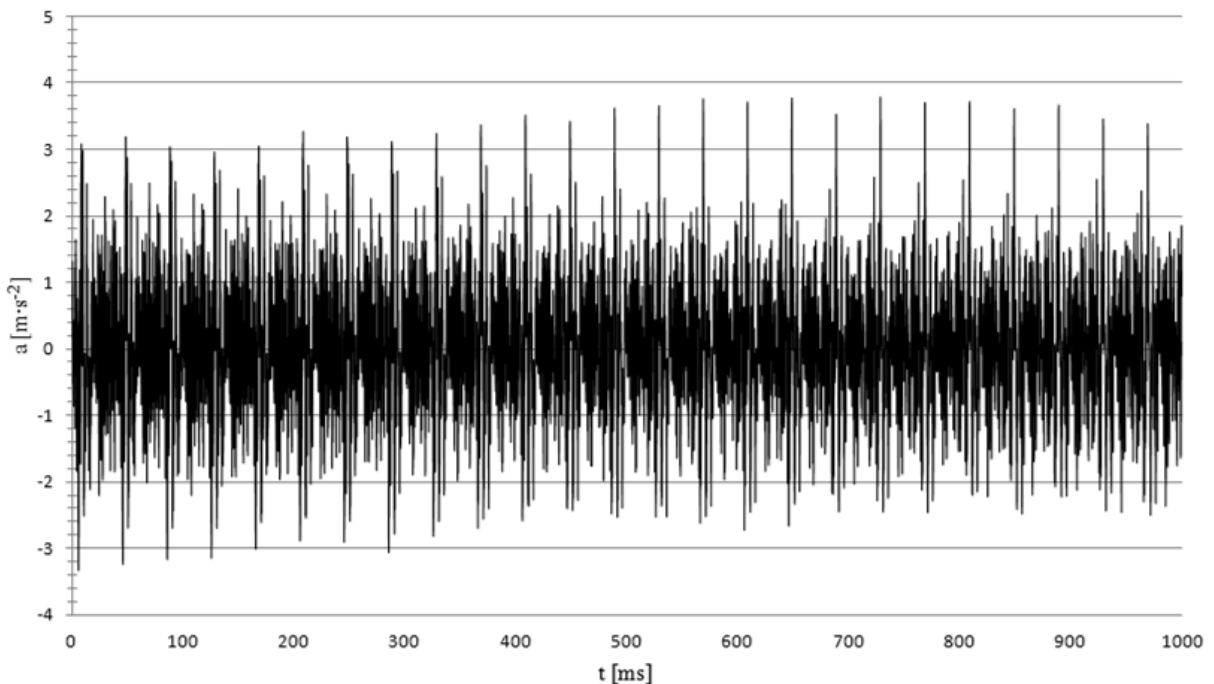
U obou směrů šíření vibrací si můžeme všimnout, že se ve spektru kromě výše zmiňovaných frekvencí vyskytují frekvenční složky jiných frekvencí. Jejich amplitudy ve spektru jsou však téměř zanedbatelné a může se jednat pouze o rušení z okolí, nebo o chybu způsobenou čidlem.

8.2.2 Měření zrychlení vibrací – nezatížený motor

Jak již bylo psáno výše, nebyly měřeny pouze rychlosti vibrací, ale bylo měřeno i zrychlení vibrací. Měření zrychlení opět probíhalo ve dvou směrech (axiální a radiální) přičemž umístění čidel na motoru i to který směr šíření vibrací čidlo snímá, zůstává stejné. Toho mohlo být dosaženo díky tomu, že měřicí přístroj PRŮFTECHNIK dokáže za pomoci stejných čidel, jako byly použity při měření rychlostí vibrací měřit i zrychlení a výchylku vibrací.

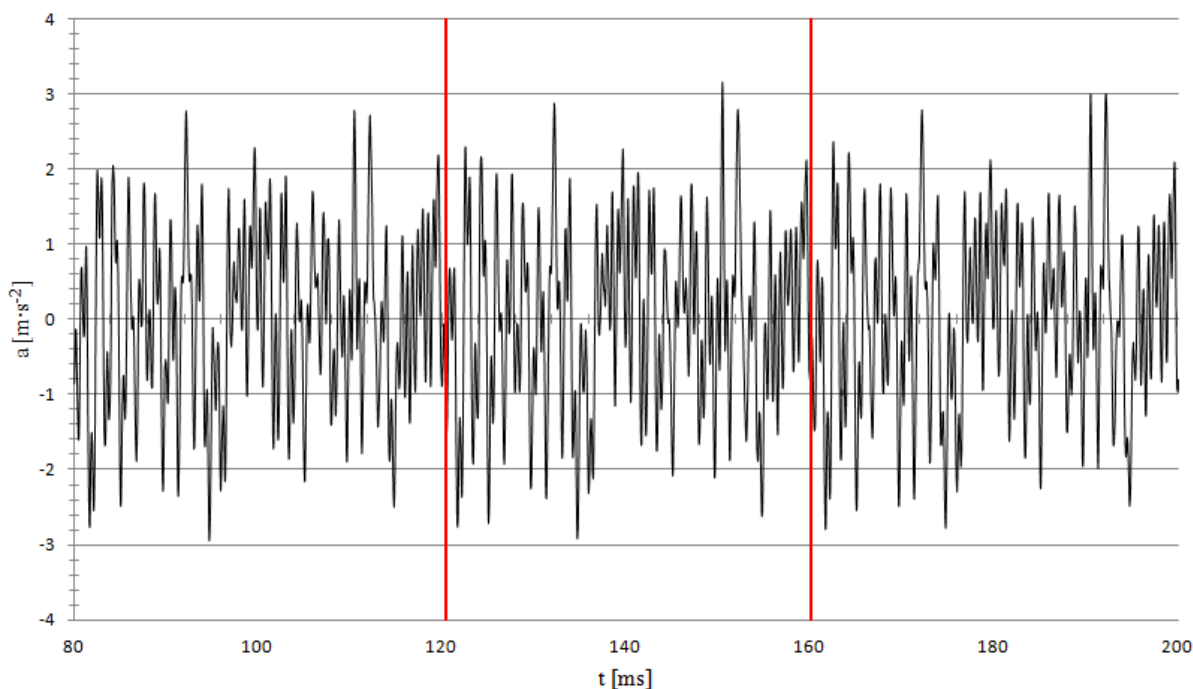


Graf 15 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) - radiální směr

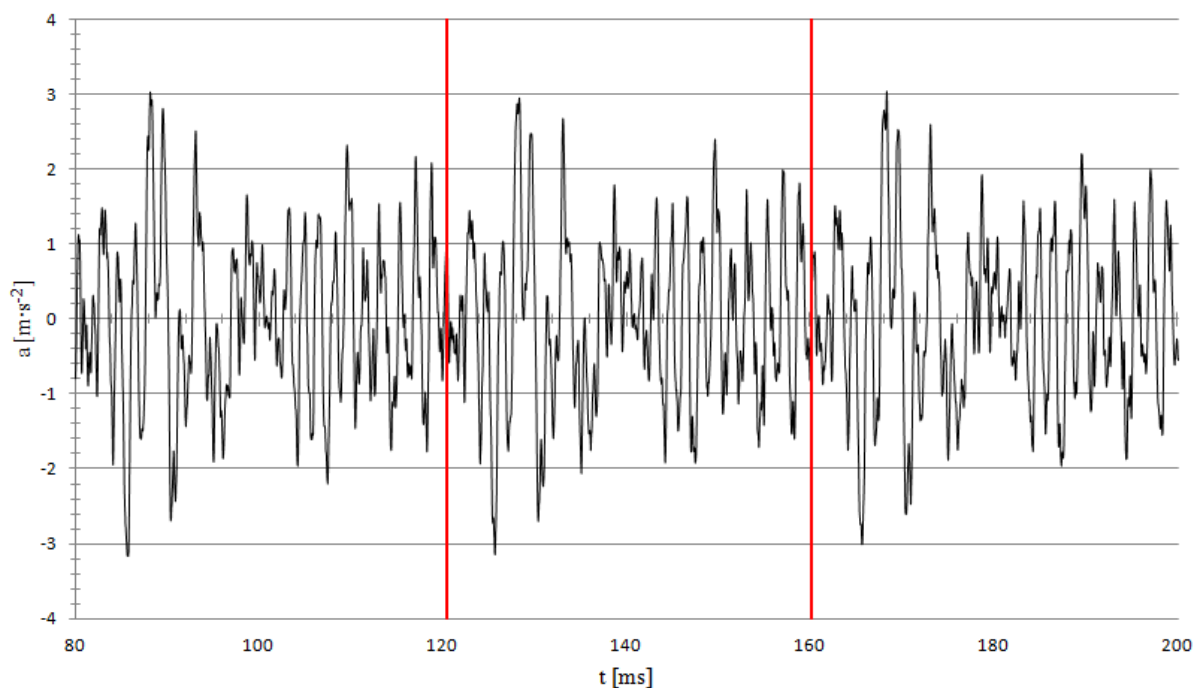


Graf 16 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) - axiální směr

Jako ukázkou získaných hodnot jsou zde uvedeny dva grafy (Graf 15 a 16) zobrazující celý průběh zrychlení vibrací, který zaznamenal přístroj z každého čidla. Opět takovoto vyobrazení neposkytuje příliš dobré podmínky pro vyhodnocení měřené veličiny. Z toho důvodu jsem naměřené údaje vykreslil pro kratší časový úsek stejně jako v předcházejícím případě. Volbu kratšího časového úseku jsem prováděl rovněž stejně (rov. 7.1)



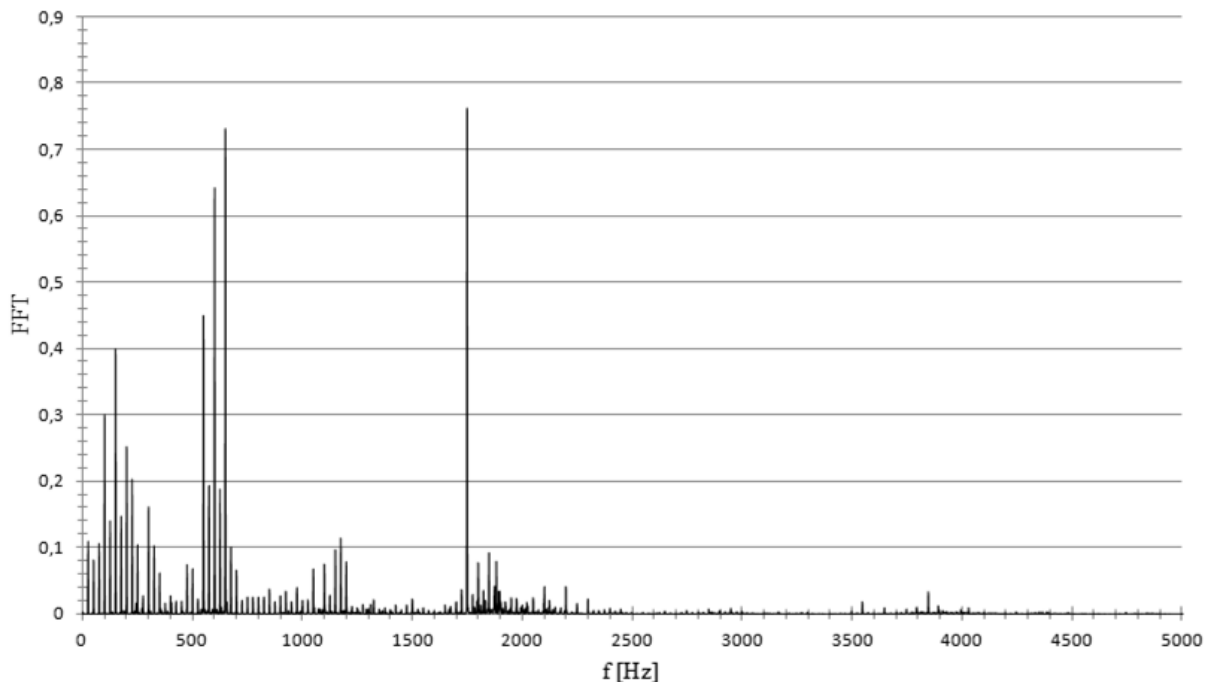
Graf 17 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - radiální směr



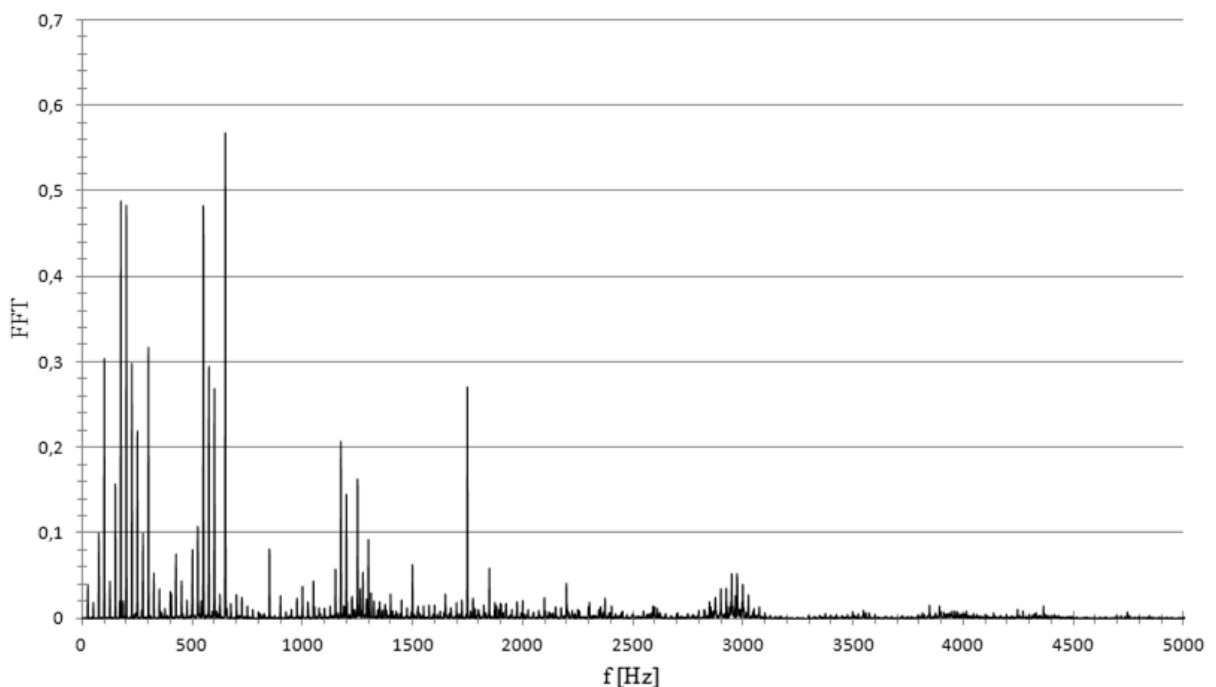
Graf 18 Zrychlení vibrací (nezatížený motor) – 3 periody - axiální směr

Na první pohled si můžeme všimnout, že signály jsou opět navzájem rozdílné. Mezi největší rozdíl patří zjevný vyšší výskyt frekvenčních složek o vysoké frekvenci v radiálním směru. Dalším výraznějším rozdílem je větší počet špiček s vyšší amplitudou v záporné části signálu získaného z čidla měřící vibrace v radiálním směru. Stejně jako v případě měření rychlosti vibrací červené čáry rozdělující signály představují přibližné začátky a konce period vibrací.

Aby bylo možné podrobněji analyzovat získaný průběh zrychlení vibrací motoru, muselo být zjištěno jeho frekvenční spektrum. K těmto účelům, stejně jako v předchozím případě, slouží rychlá Fourierova transformace.



Graf 19 FFT zrychlení vibrací (nezatížený motor) – radiální směr



Graf 20 FFT zrychlení vibrací (nezatížený motor) – axiální směr

Pro zachování stejného postupu zpracování výsledků měření bylo tedy i v tomto případě aplikováno na signál okno typu Hanning. Grafy 19 a 20 pak zobrazují výsledek FFT získaného průběhu. Při porovnání spekter obou čidel si lze všimnout vzájemných podobností. Zejména pak výrazného zastoupení frekvenčních složek v oblasti 100Hz, 200Hz, 550Hz až 650Hz a 1750Hz. I zde se u obou čidel projevuje rušení, které do motoru přichází z okolí. Toto rušení se projevuje velmi malými amplitudami frekvenčních složek ve spektrech. Malými amplitudami se může projevovat i chyba čidla pro daný směr.

Mezi výraznější hodnoty amplitud spektra je možné považovat frekvenční složky v oblasti okolo 3kHz (axiální směr) a 1,2kHz (oba směry).

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
1748,01	0,759	649	0,561
649	0,726	175	0,488
650	0,663	200	0,483
600	0,643	549	0,478
1749,01	0,486	650	0,466
549	0,446	550	0,43
150	0,4	300	0,318
550	0,393	100	0,305
599	0,344	225	0,299
601	0,306	575	0,294
100	0,301	574	0,279
1747,01	0,282	1748,01	0,27
200	0,253	600	0,267
149	0,216	174	0,257
225	0,204	201	0,248
575	0,194	199	0,236
574	0,191	176	0,235
625	0,187	250	0,22
151	0,186	599	0,22
648	0,17	1174,01	0,207

Tab. 4 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Sestavením tabulek obsahující dvacet frekvencí, které mají ve spektru největší zastoupení (nejvyšší amplitudy) umožňuje přehlednější porovnání nejvýraznějších frekvenčních složek. V tabulce jsou frekvence seřazeny podle velikosti amplitudy v sestupném smyslu. Pro radiální směr je pak nejvýraznější oblast frekvencí okolo 650Hz, 550Hz a výše zmiňovaných 1750Hz. Pro axiální směr pak oblast 650 a 550Hz. I v tomto případě se setkáváme s výraznějším zastoupením frekvencí, a to v obou směrech, z oblasti 100Hz a 200Hz. V případě složky 100Hz se jedná o dvojnásobek frekvence sítě (50Hz), který se projevuje při neustálém přemagnetování statoru. Složka 200Hz s velkou pravděpodobností představuje vyšší harmonickou základního kmitočtu sítě. Nejedná se tedy o závady na stroji. Barevné značení jednotlivých frekvenčních složek spektra označuje složky vyskytující se pouze v příslušném směru šíření.

8.3 Měření vibrací při zatíženém motoru – $M = 3,39N \cdot m$

Druhé měření vibrací asynchronního motoru probíhalo naprosto totožně jako měření první. Jediný a zároveň velmi podstatný rozdíl byl v tom, že na dynamometru byl nastaven zatěžovací moment $3,39N \cdot m$. Díky zatížení motoru pochopitelně klesly otáčky a zvýšil se proud tekoucí do motoru.

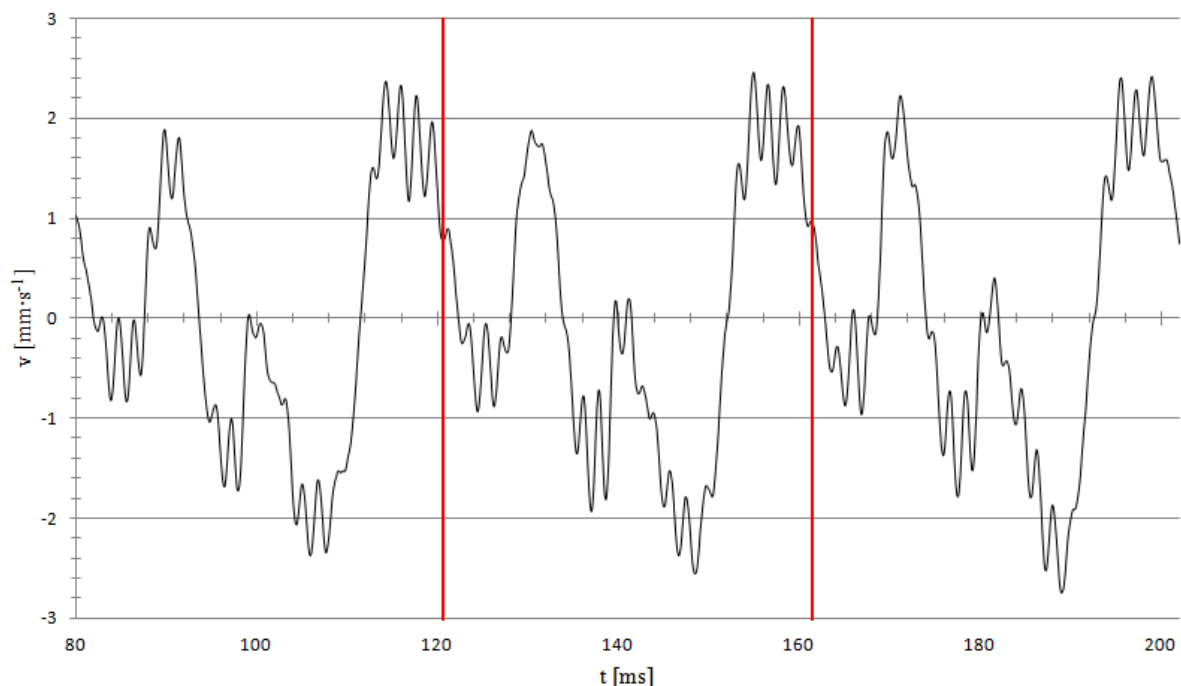
Využitím funkce řízeného zdroje měřit sám sebe bylo zjištěno, že dodává průměrně do každé fáze $241W$ což odpovídá průměrné hodnotě proudu ve fázi $2,416A$. Pomocí dynamometru pak byly změřeny otáčky motoru 1475 min^{-1} . Při tak malém zatížení motoru se nepatrně změnil akustický hluk vydávaný motorem. Tato změna hluku se ale jistě projeví v naměřených hodnotách rychlostí a zrychlení vibrací motoru.

8.3.1 Měření rychlosti vibrací při zatíženém motoru – $M = 3,39N \cdot m$

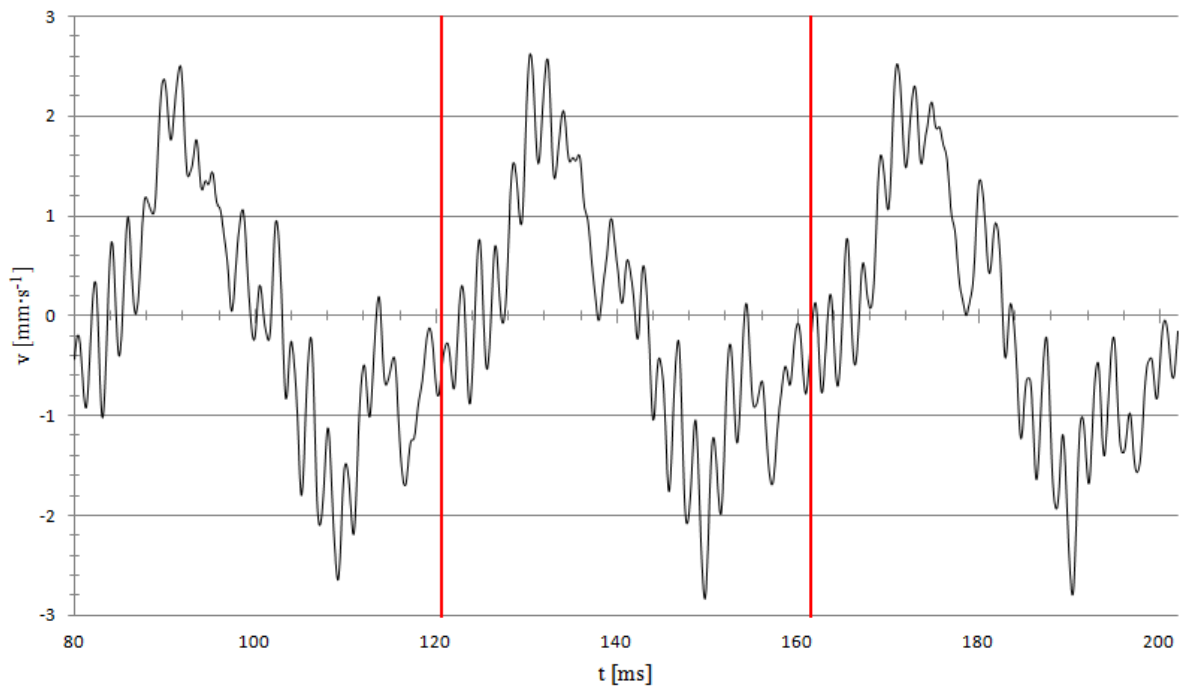
Jak již bylo uvedeno výše, měření probíhalo stejně jako v předchozím bodě. Grafy zobrazující průběhy rychlosti vibrací, které byly získány z přístroje, nejsou nijak zvlášť přehledné a pro vyhodnocení nevyhovující. Mnohem přehlednější je zobrazení několika period vibrací, které jsou odvozeny z periody otáčení rotoru. Bylo ovšem nutné pro zobrazení požadovaných průběhů vypočítat délku jedné periody otáčení rotoru, aby mohla být stanovena délka nového kratšího časového úseku.

$$T_{rotor} = T_{vibr} = \frac{1000}{\frac{n}{60}} = \frac{1000}{\frac{1475}{60}} = 40,68ms \quad (7.2)$$

Na základě rovnice 7.2 byla stanovena délka trvání jedné periody otáčení rotoru a tedy i vibrací. Délka nového časového úseku byla zvolena jako trojnásobek délky jedné periody. V grafech jsou zobrazeny tedy 3 periody vibrací.



Graf 21 Rychlost vibrací (zátěž = $3,39N \cdot m$) – 3 periody - radiální směr

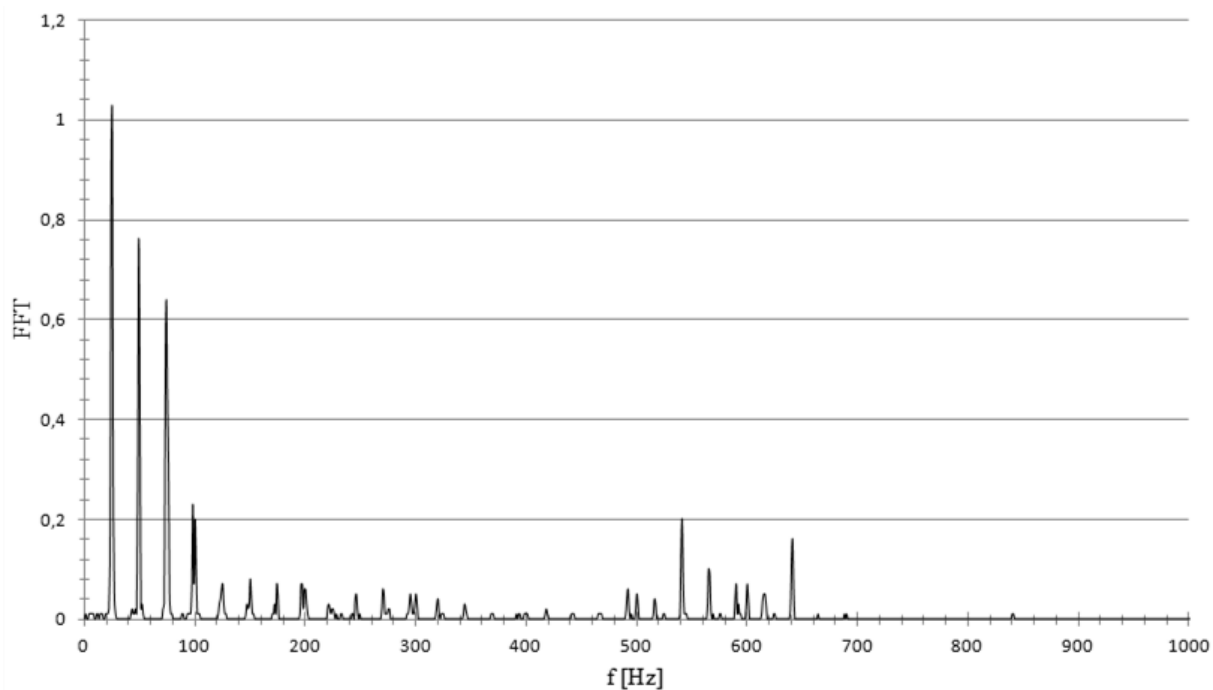


Graf 22 Rychlost vibrací (zátěž = 3,39N·m) – 3 periody - axiální směr

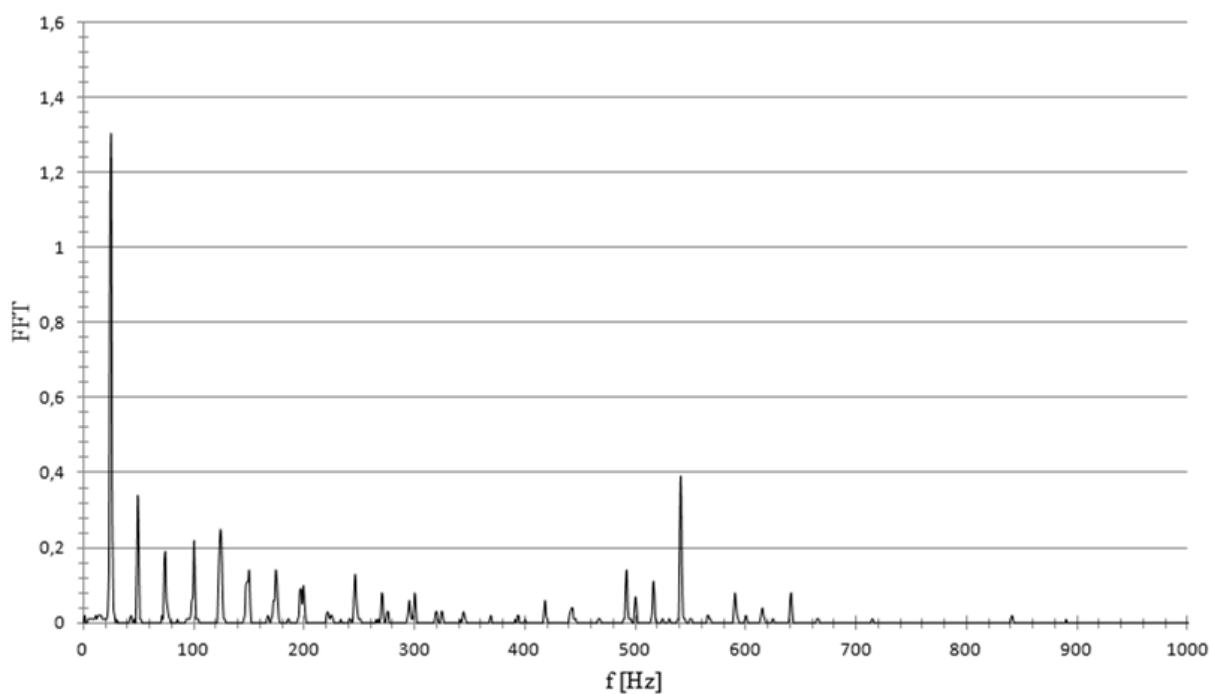
Porovnáním průběhů uvedených výše (Graf 21 a 22) si můžeme všimnout opět vzájemných rozdílů. V axiálním směru je vidět větší zastoupení frekvencí o vyšších kmitočtech. Ve směru axiálním je patrný základní sinusový průběh, na který jsou opět namodulovány další frekvenční složky vibrací s nižší amplitudou, ale s vyšší frekvencí. V radiálním směru je situace poněkud odlišná. Na nosný signál je opět namodulováno množství frekvenčních složek vibrací, ale v tomto směru mají podstatně větší amplitudy než ve směru axiálním. To se projevuje obrovskou deformací základního sinusového průběhu.

Při bližším pohledu však mají rychlosti vibrací z obou směrů společný základ a tím je výše zmiňovaný průběh. Tento průběh lze do jisté míry považovat za sinusový s délkou periody přibližně 40ms, což je právě perioda otáčení rotoru.

Podrobnější pohled na rychlosti vibrací získáme až pomocí frekvenčního spektra, které získáme díky FFT. Aby bylo možné porovnat rozdíly ve frekvenčních spektrech, je nutné zachovat i postup při jeho vytvoření. Z toho vyplývá nutnost aplikace okna typu Hanning na signál před provedením samotné FFT.



Graf 23 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 3,39N·m) – radiální směr



Graf 24 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 3,39N·m) – axiální směr

Porovnáním obou spekter zjistíme, že velký podíl na tvaru průběhu rychlosti vibrací mají právě frekvenční složky z oblasti okolo 24Hz a 100Hz. Jedná se opět o frekvenci otáčení rotoru a dvojnásobek kmitočtu sítě projevující se při neustálém přemagnetování statoru. Výrazné frekvenční složky se nachází v oblasti 540Hz.

Ve frekvenčním spektru axiálního směru šíření je vidět výskyt frekvenčních složek, které se sice nachází i ve směru radiálním, ale dosahují podstatně nižších hodnot (50Hz a 75Hz). V radiálním směru se objevují poměrně výrazně složky z oblasti okolo 640Hz. Tyto složky se sice vyskytují i v axiálním směru, ale tam nedosahují tak vysokých hodnot. S největší pravděpodobností jedná o vibrace vzniklé v některém ložisku. Tyto složky však nedosahují alarmujících hodnot, ale i tak mají nemalý podíl na tvaru zaznamenaného průběhu (Graf 21).

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
25	1,02	25	1,29
24	0,92	24	1,15
49	0,76	541,03	0,39
74	0,64	49	0,34
50	0,47	26	0,31
73	0,45	124,01	0,25
75	0,45	540,03	0,25
48	0,3	100,01	0,22
76	0,29	50	0,21
26	0,23	125,01	0,21
98,01	0,23	123,01	0,2
100,01	0,2	74	0,19
541,03	0,2	23	0,18
641,04	0,16	73	0,16
23	0,15	542,03	0,15
540,03	0,13	48	0,14
640,04	0,11	150,01	0,14
101,01	0,1	174,01	0,14
565,03	0,1	492,03	0,14
566,03	0,09	246,02	0,13

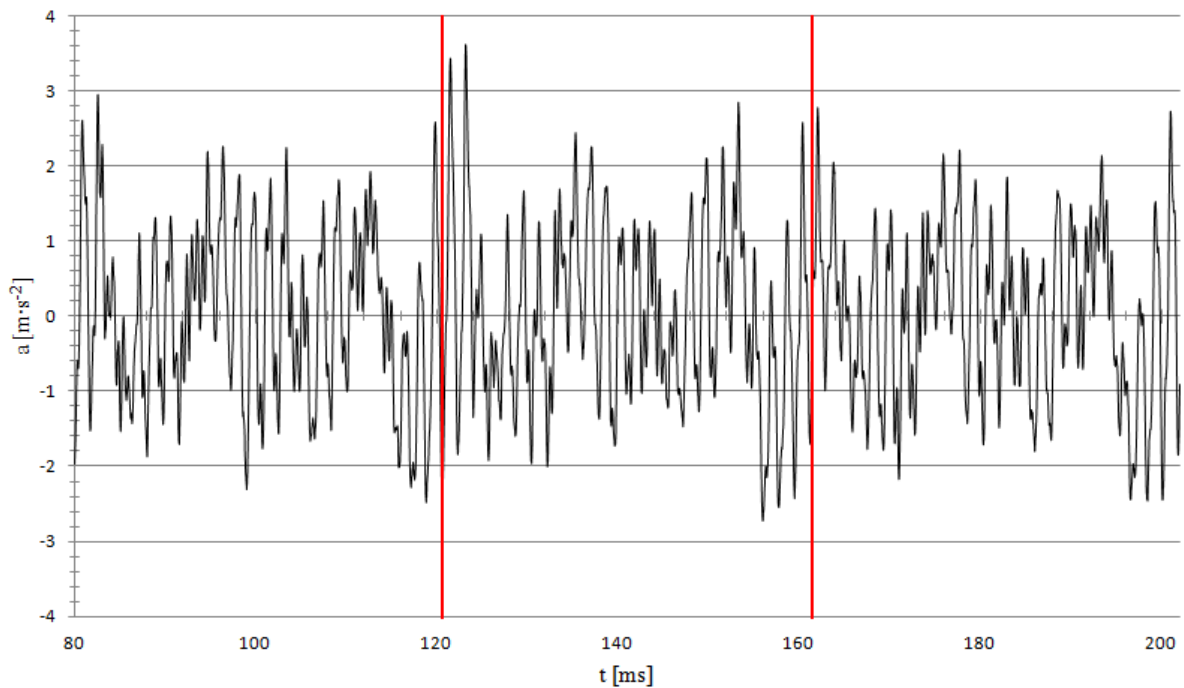
Tab. 5 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Kvůli větší přehlednosti zastoupení frekvenčních složek ve spektrech signálů získaných z čidel, je vhodné zde uvést tabulky obsahující dvacet frekvencí, které dosahují nejvyšších amplitud ve frekvenčním spektru. V tabulkách je patrné značné zastoupení frekvencí o kmitočtech 24Hz až 26Hz. Vibrace o takovýchto frekvencích vznikají důsledkem otáčení rotoru. Složky o kmitočtech okolo 540Hz a 640Hz jsou pravděpodobně pevně spjaty s činností ložisek. Barevně vyznačené frekvenční složky se pouze vyskytují pouze v konkrétním směru šíření.

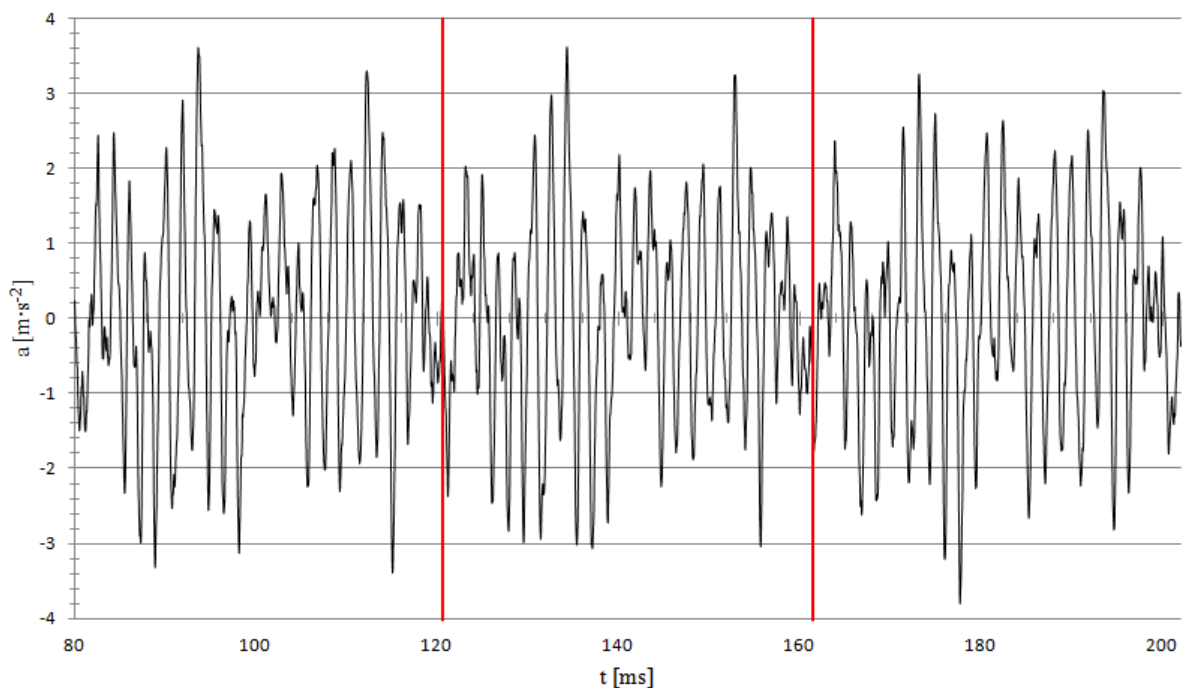
8.3.2 Měření zrychlení vibrací při zatíženém motoru – $M = 3,39\text{N}\cdot\text{m}$

V následující části měření byly změřeny velikosti zrychlení vibrací v obou směrech šíření. Měření zrychlení vibrací probíhalo opět stejně jako v předchozím případě. Tedy zaznamenání průběhu do měřicího přístroje, export dat do počítače a následné zpracování dat pomocí softwaru dodávaného spolu s přístrojem.

Pro větší přehlednost naměřených hodnot zde nebudou uvedeny kompletní zaznamenané průběhy, ale pouze 3 periody zaznamenaných signálů.



Graf 25 Zrychlení vibrací (zátěž = $3,39\text{N}\cdot\text{m}$) – 3 periody - radiální směr

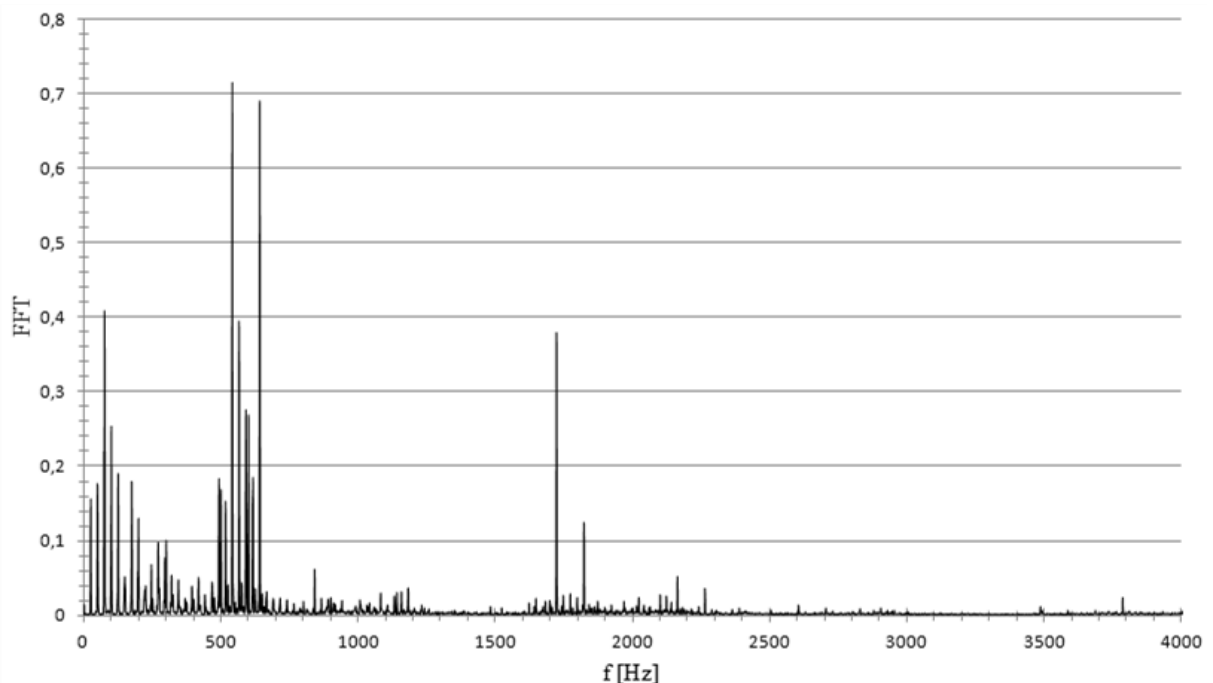


Graf 26 Zrychlení vibrací (zátěž = $3,39\text{N}\cdot\text{m}$) – 3 periody - axiální směr

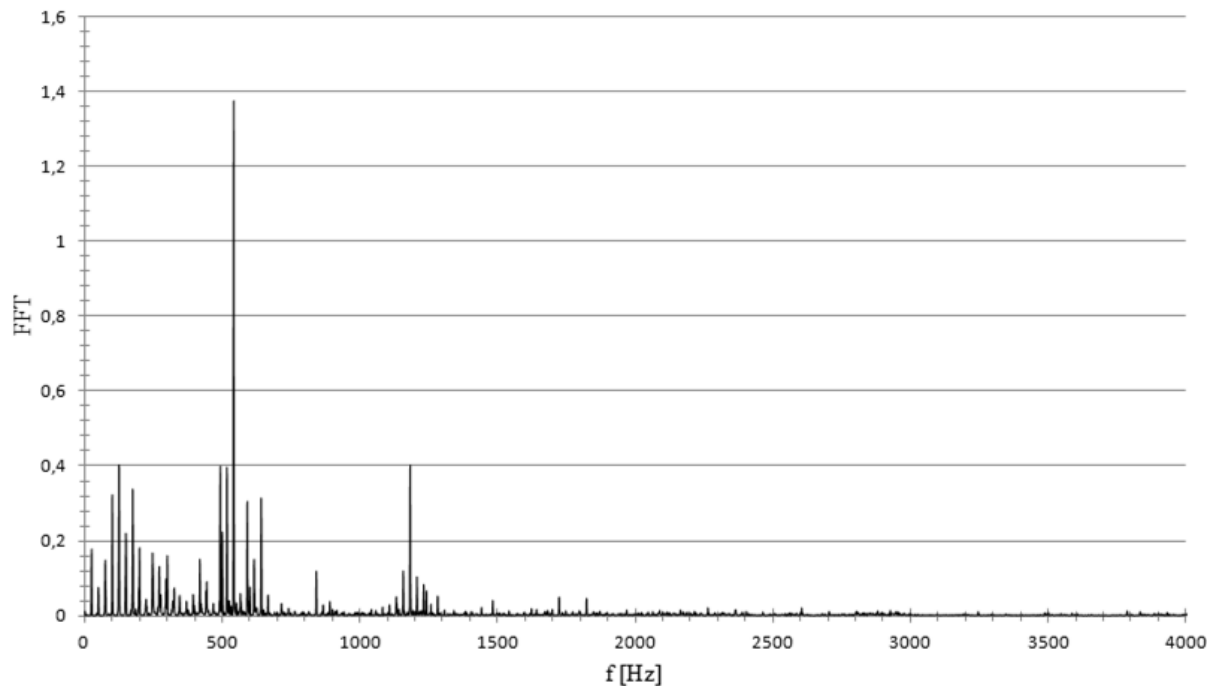
Při porovnání průběhu znázorněných výše (graf 25 a 26), můžeme říci, že jsou si poměrně podobné. Rozdílnosti tvoří hlavně zastoupení frekvenčních složek vibrací, které se projevují více či méně v daném směru šíření. V axiálním směru si můžeme všimnout velkého zastoupení složek s vyšší frekvencí, než je základní. Tyto složky se podstatným způsobem podílí na finálním tvaru zaznamenaného signálu. Je to dáno jejich vyšší amplitudou oproti výskytu stejných složek ve směru radiálním. Podobně je tvarován průběh vibrací i v radiálním směru. Zde je patrné výrazné zastoupení frekvenčních složek z oblasti, která je kmitočtově vyš, než složky formující signál v axiálním směru.

Podrobnější analýzu zrychlení vibrací můžeme provést pomocí FFT, díky čemuž získáme frekvenční spektrum naměřených signálů. Bude tedy možné přesněji identifikovat frekvenční složky, které se nejvíce podílí na výsledném tvaru zaznamenaných vibrací. Stejně jako v případech předchozích bylo na signál aplikováno okno typu Hanning před zahájením vlastní FFT.

Červené čáry rozdělující grafy na 3 stejné části představují přibližné začátky a konce period zrychlení vibrací. Dobu přesného začátku a konce jedné periody nelze s přesností určit, neboť při zahájení měření nebyla známa přesná poloha rotoru.



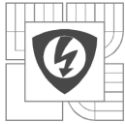
Graf 27 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 3,39N·m) – radiální směr



Graf 28 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 3,39N·m) – axiální směr

Porovnáním obou spekter vidíme, že v obou směrech se hodně projevují vibrace vzniklé přemagnetováváním statoru (oblast frekvencí okolo 100Hz) a vibrace vzniklé činností ložisek motoru. Obě tyto složky mají největší podíl na tvaru změřeného signálu. Za povšimnutí stojí složky okolo 1720Hz (radiální směr) a 1180Hz (axiální směr). Jak bude vidět z následujících měření, tak tyto složky mění svou frekvenci v závislosti na změně otáček. Pravděpodobně se tedy jedná o vibrace mechanického původu. Jejich zdroj může být spojkové propojení motoru a dynamometru, nebo dynamometr samotný.

Frekvence, ze kterých lze vyvodit stav stroje, se v tomto případě nachází v pásmu od 1Hz do přibližně 3kHz. Frekvenční složky s vyšší frekvencí lze v tomto případě považovat za šum a nemají výrazný vliv na výsledný tvar průběhu zrychlení vibrací.



f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
541	0,709	541	1,364
641	0,684	540	0,916
640	0,472	542	0,485
540	0,462	124	0,402
75	0,404	1182,01	0,398
565	0,391	492	0,397
1722,01	0,376	516	0,394
566	0,364	125	0,378
1723,01	0,349	174	0,339
76	0,327	1181,01	0,332
590	0,275	100	0,324
600	0,268	641	0,314
642	0,266	590	0,306
100	0,253	491	0,288
542	0,246	517	0,271
73	0,217	500	0,224
125	0,188	149	0,22
616	0,184	175	0,203
492	0,181	150	0,198
174	0,178	640	0,198

Tab. 6 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Tabulky 6a, 6b obsahují soupis dvaceti frekvencí, které dosahují ve frekvenčních spektrech nejvyšších amplitud a mají tedy největší vliv na výsledný tvar průběhu zrychlení vibrací. Frekvenční složky jsou seřazeny sestupně podle velikosti amplitudy na příslušné frekvenci ve spektru. Frekvenční složky, které se vyskytují pouze v příslušném směru, jsou barevně označeny.

8.4 Měření vibrací při zatíženém motoru – $M = 7,035N \cdot m$

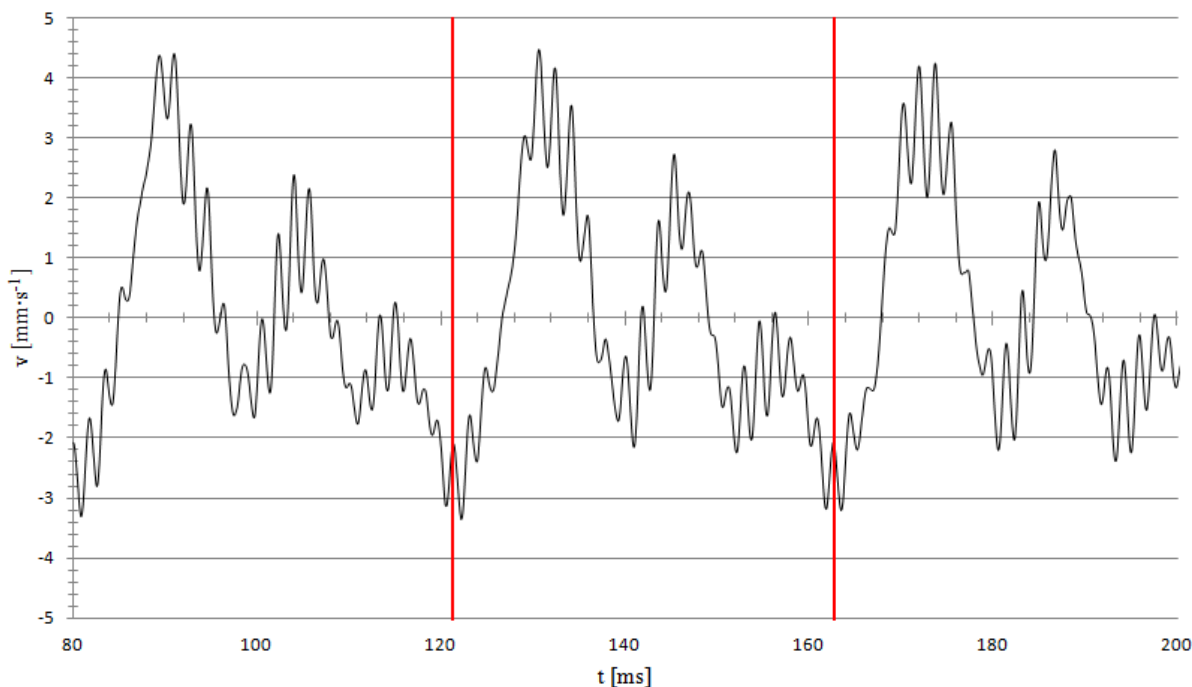
Třetí měření vibrací asynchronního motoru probíhalo při větším zatížení než v předchozím případě. Vlivem většího zatížení bylo dosaženo snížení otáček a zvýšení proudu tekoucího do motoru. Na dynamometru byl nastaven zatěžovací moment $7,035N \cdot m$, otáčky byly změřeny pomocí dynamometru $1450,6\text{min}^{-1}$. Stejně jako při předcházejícím měření byla znatelná změna akustického hluku vycházejícího z motoru. Analýza vydávaného hluku motorem není předmětem této práce, ale generovaný hluk je úzce spjat s vibracemi motoru.

Využitím měřicí funkce zdroje bylo zjištěno, že zdroj dodává do každé fáze průměrný výkon $44,57W$. Proud v každé fázi pak dosahuje průměrně $2,93A$. Patrný je rozdíl v naměřených hodnotách proudu a výkonu ve fázi od hodnot naměřených při předchozích dvou měřeních.

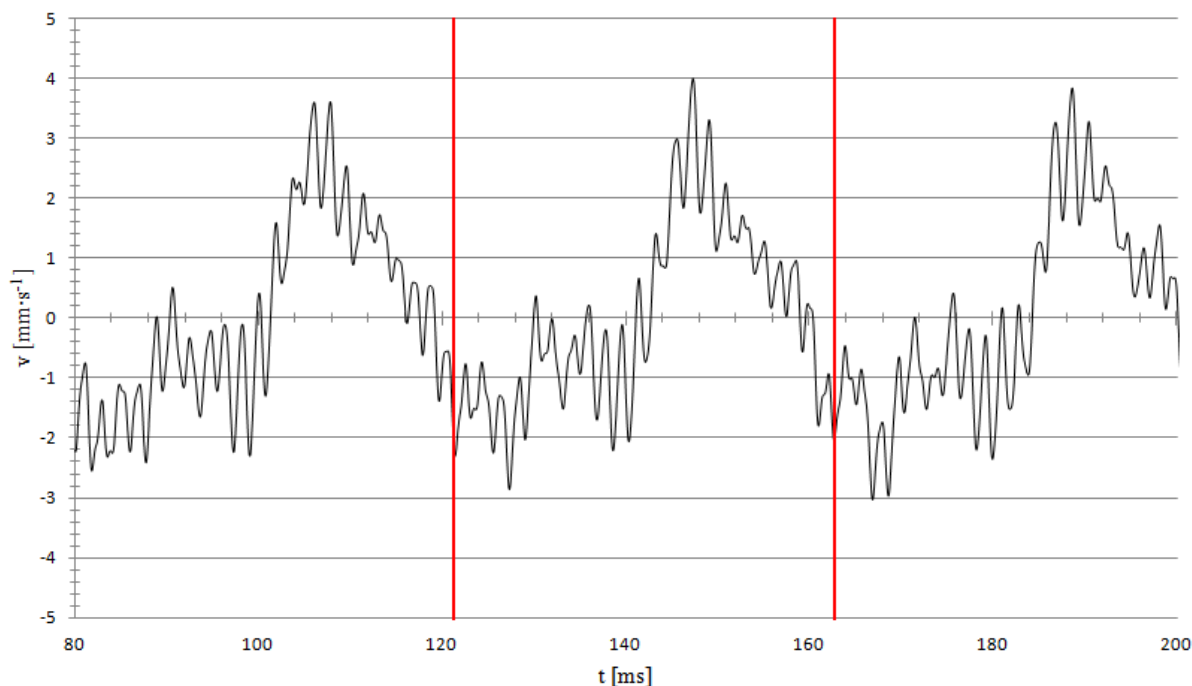
8.4.1 Měření rychlosti vibrací při zatíženém motoru – $M = 7,035N \cdot m$

Z faktu, že otáčky rotoru měly odlišnou velikost, bylo nutné znovu vypočítat délku trvání jedné otáčky. Užitím rovnice 7.1 byla stanovena délka jedné periody (otáčky rotoru) $41,36\text{ms}$.

Kvůli zachování přehlednosti výsledků zde nebudou opět uvedeny celé zaznamenané průběhy rychlostí vibrací, ale pouze jejich 3 periody.

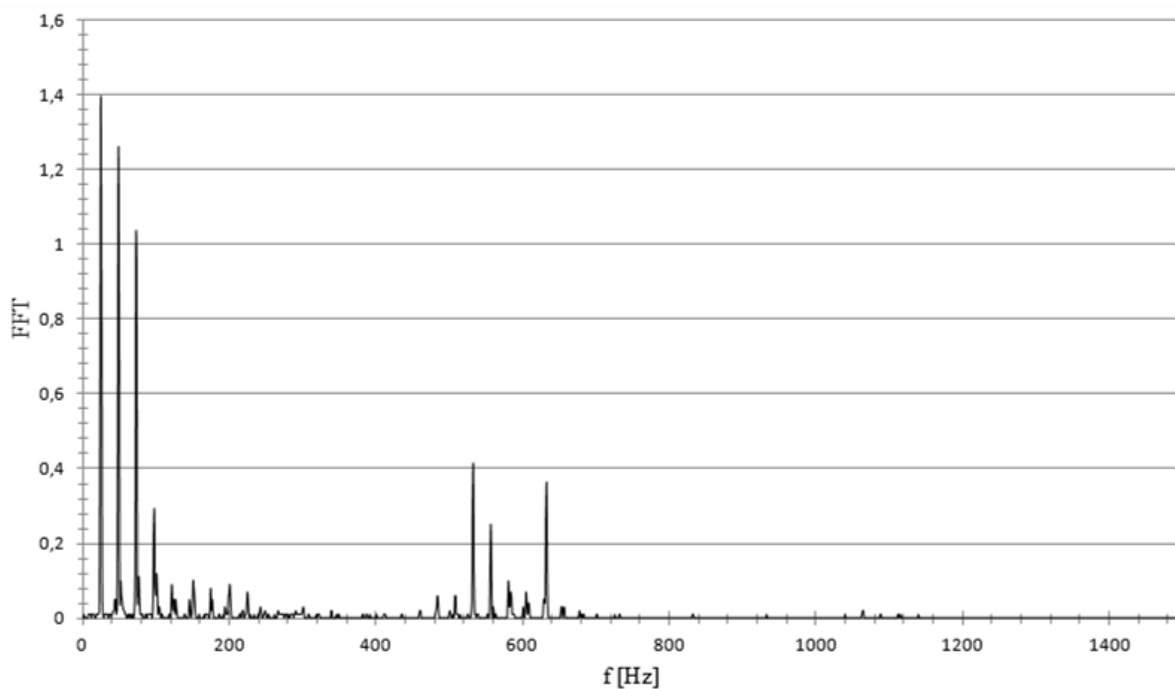


Graf 29 Rychlost vibrací (zátěž = $7,035N \cdot m$) – 3 periody - radiální směr

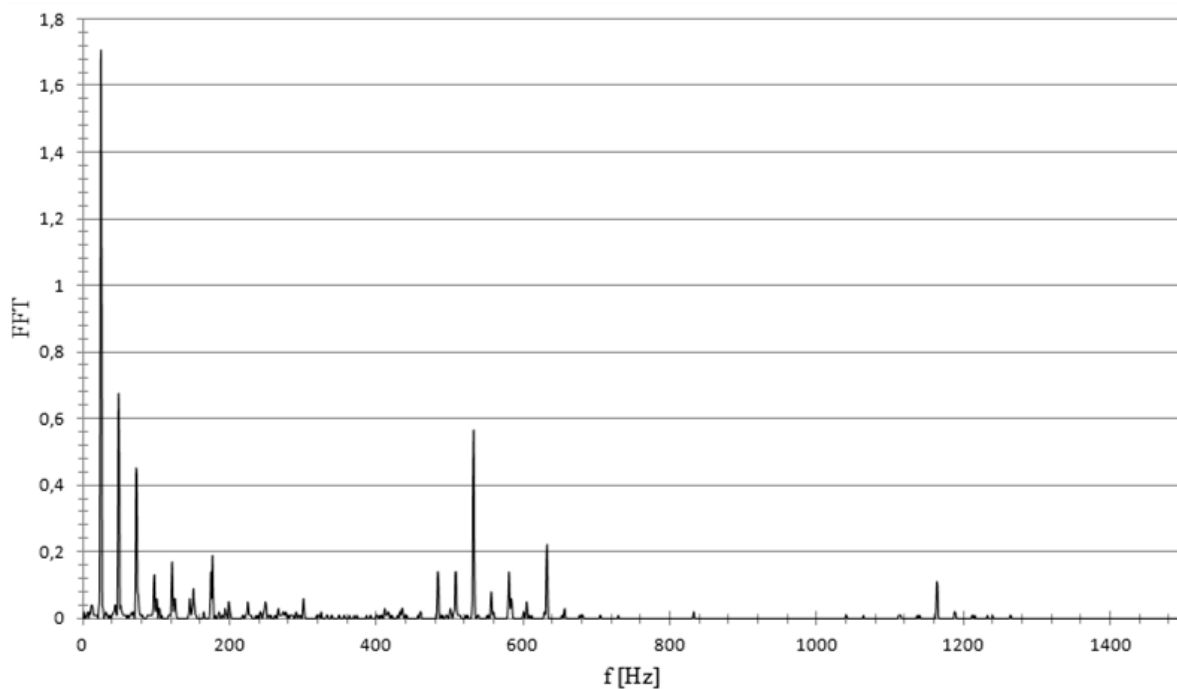


Graf 30 Rychlost vibrací (zátěž = 7,035N·m) – 3 periody - axiální směr

Na první pohled je vidět, že v axiálním směru nedošlo k nijak zvlášť velké změně zaznamenaného průběhu vibrací. V radiálním směru šíření už došlo k poněkud výraznější změně, co se týče tvaru průběhu vibrací. V obou směrech však došlo k podstatné změně z pohledu velikosti amplitudy. V axiálním směru došlo k nárůstu o přibližně $1\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, v radiálním směru o $2\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Ke zvýšení rychlosti vibrací v obou směrech došlo pouze v kladné části zaznamenaných průběhů. Tato rozdílnost se mimo jiné projevila již zmíněnou vyšší produkcí hluku. Změna vibrací byla znatelná i při pouhém kontaktu ruky a motoru.



Graf 31 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 7,035N·m) – radiální směr



Graf 32 FFT rychlosti vibrací (zátěž = 7,035N·m) – axiální směr

Při podrobnějším zkoumání rychlostí vibrací, které frekvenční spektrum získané rychlou Fourierovou transformací poskytuje, jsou hned na první pohled znatelné rozdíly ve velikostech jednotlivých frekvenčních složek. Výrazně se opět projevují složky o kmitočtu, který vychází ze samotného otáčení rotoru, tedy okolo 24Hz. Nemale zastoupení mají v obou směrech šíření složky z oblasti okolo 530Hz a 630Hz. Pochopitelně i dvojnásobný kmitočet sítě má zde své podstatné zastoupení. V axiálním směru si pak můžeme všimnout frekvenční složky s kmitočtem přibližně 1160Hz. Vzhledem k velikosti amplitudy této složky se zřejmě jedná o rušení z okolí, ale i tak se podílí na výsledném tvaru průběhu vibrací zaznamenaném v tomto směru.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
24	1,39	24	1,7
48	1,25	25	1,06
72	1,03	48	0,67
73	0,95	23	0,65
25	0,89	532,03	0,56
49	0,89	49	0,5
23	0,54	72	0,45
47	0,42	73	0,43
532,03	0,41	531,03	0,43
632,04	0,36	47	0,23
531,03	0,32	632,04	0,22
97,01	0,29	176,01	0,19
631,04	0,28	121,01	0,17
556,03	0,25	533,03	0,17
96,01	0,23	631,04	0,17
71	0,21	174,01	0,14
555,03	0,16	483,03	0,14
100,01	0,12	507,03	0,14
533,03	0,12	508,03	0,14
76	0,11	580,04	0,14

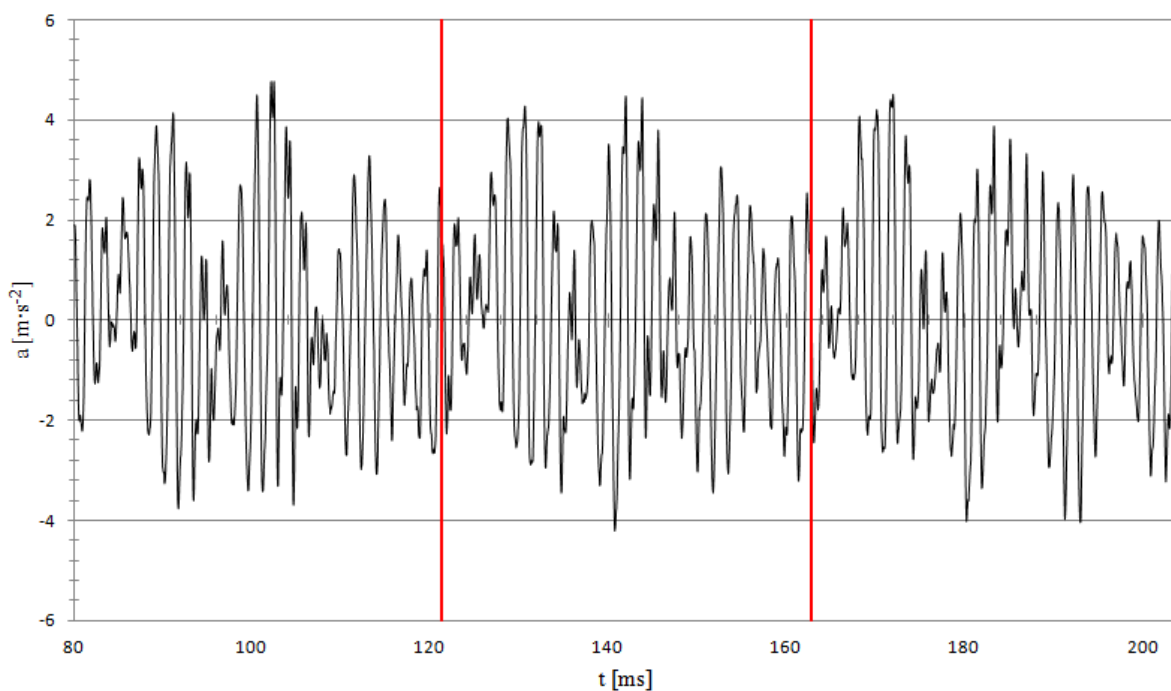
Tab. 7 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Tabulky 7a, 7b uvádí číselné hodnoty velikostí amplitud nejvíce zastoupených frekvenčních složek obsažených ve spektrech. Barevné odlišení některých složek představuje složky, které jsou obsaženy pouze v příslušném směru šíření.

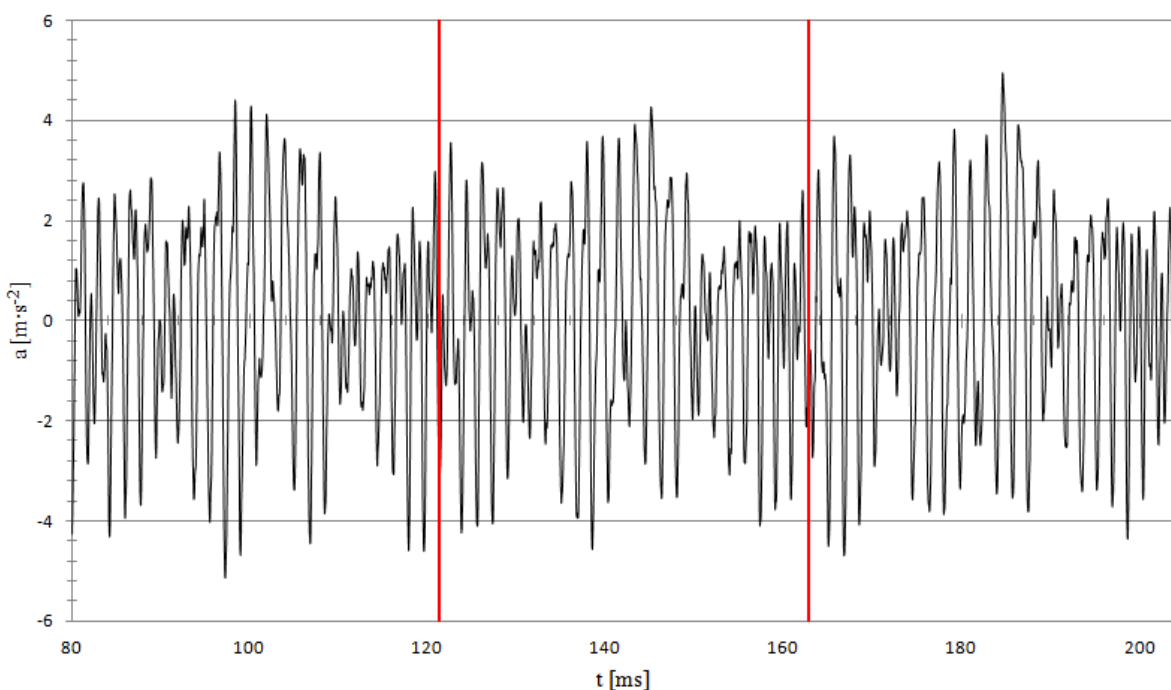
8.4.2 Měření zrychlení vibrací při zatíženém motoru – $M = 7,035\text{N}\cdot\text{m}$

Změna zatížení se samozřejmě projeví i v případě měření zrychlení vibrací, které stejně jako v předchozích stavech probíhalo bez nutnosti změny měřicího aparátu.

Průběhy získané pomocí naměřených dat poskytují poměrně nepřehledné zobrazení výsledného zrychlení vibrací. Stejně jako v předchozích případech byly pro lepší přehlednost vykresleny pouze 3 periody naměřeného signálu. Délka periody zrychlení vibrací byla určena pomocí vztahu 7.1.



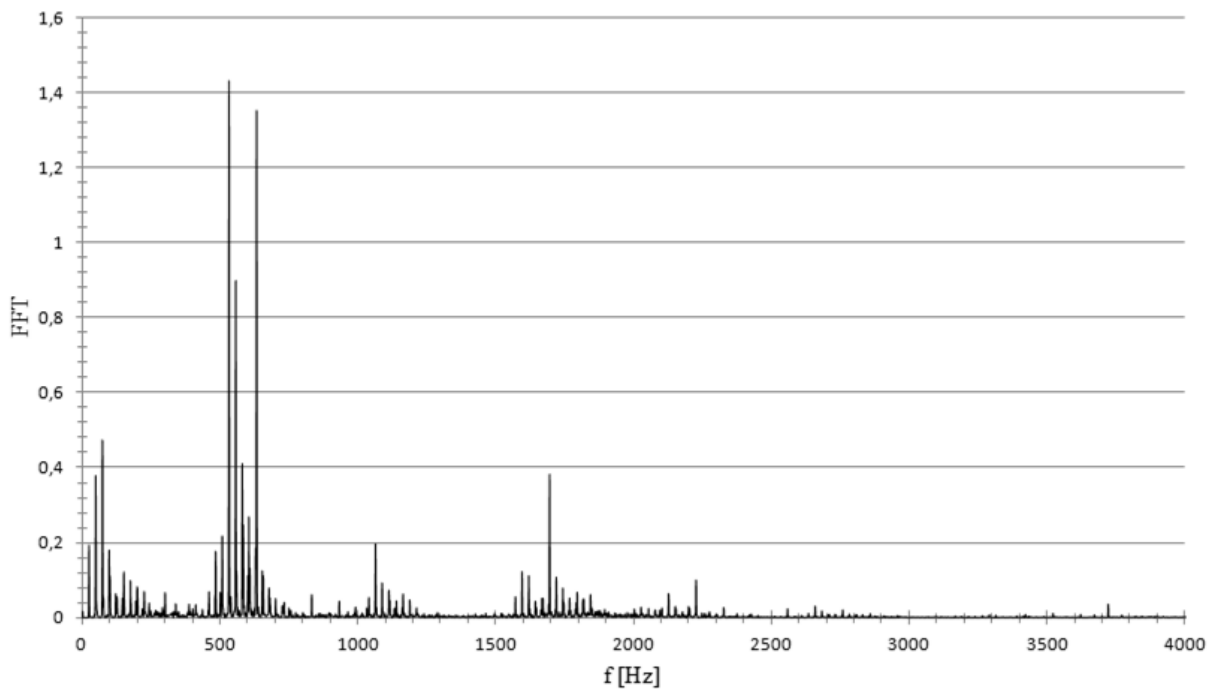
Graf 33 Zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – 3 periody - radiální směr



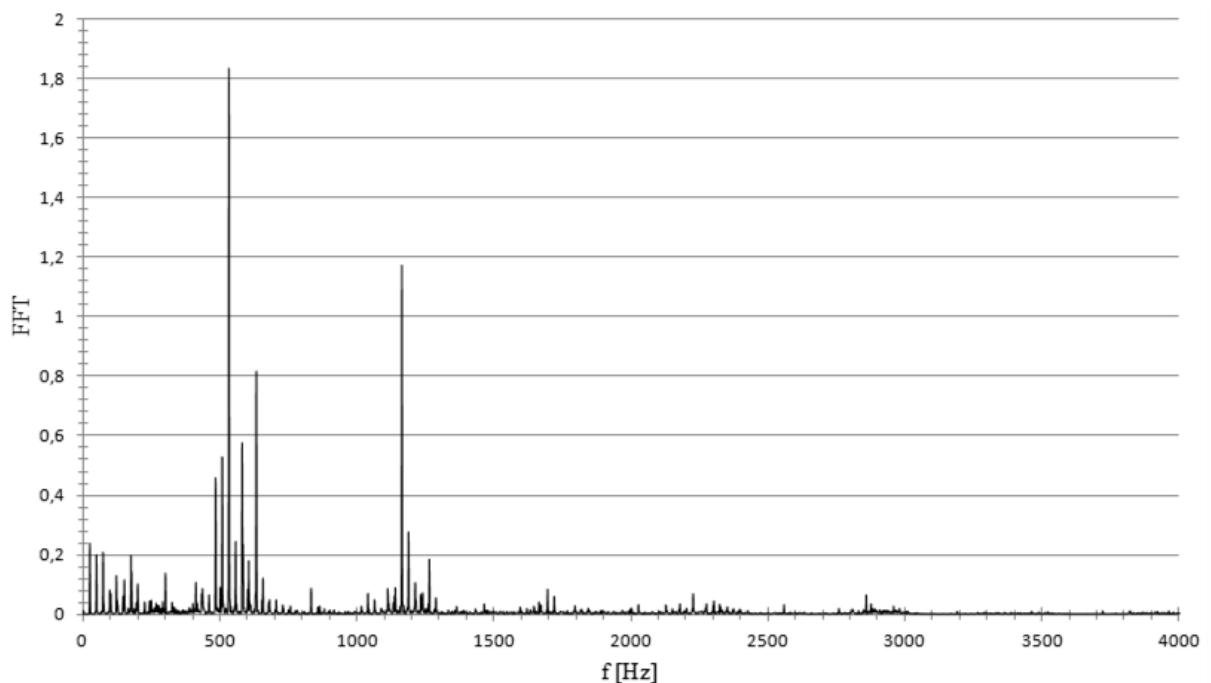
Graf 34 Zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – 3 periody - axiální směr

Získané grafické závislosti jsou si dosti podobné s průběhy z předchozího měření. Patrný je opět nárůst velikosti zrychlení vibrací. V obou směrech došlo k drobnému vyhlazení tvarů zaznamenaných signálů. To však znamená, že frekvenční složky s vyššími kmitočty, než jsou kmitočty přímo vyplývající z otáčení rotoru a z dvojnásobku frekvence sítě, dosahují vyšších amplitud. Je to způsobeno větším zatížením stroje.

Červené čáry rozdělující grafy 33 a 34 představují přibližné počátky a konce period získaného signálu. Aby bylo možné naměřený signál zkoumat podrobněji bylo opět nutné provést FFT. Samozřejmě i v tomto případě bylo na signál aplikováno okno typu Hanning.



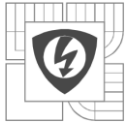
Graf 35 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – radiální směr



Graf 36 FFT zrychlení vibrací (zátěž = 7,035N·m) – axiální směr

Díky analýze signálu pomocí FFT vidíme, že největší podíl na tom jak vypadají grafy zrychlení v jednotlivých směrech, mají frekvenční složky z oblasti kmitočtů 530Hz a 630Hz. Poměrně hodně se projevují také frekvence z oblasti 1160Hz (axiální směr) a 1695Hz (radiální směr).

Ve výsledku se svým tvarem získané frekvenční spektra nijak zvlášť neliší od frekvenčních spekter získaných při měření motoru s menším zatížením. Rozdílnost je z velké části pouze ve velikosti amplitud jednotlivých frekvenčních složek a nijak zvlášť velkou změnou kmitočtu dominantních složek.



f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
532	1,415	532	1,813
632	1,337	531	1,571
531	1,218	1163,01	1,166
631	1,144	632	0,809
556	0,891	1164,01	0,783
555	0,607	631	0,696
72	0,472	580	0,577
73	0,461	507	0,528
580	0,41	508	0,514
1695,01	0,38	483	0,455
48	0,374	533	0,445
533	0,364	1162,01	0,416
633	0,349	484	0,344
557	0,319	579	0,306
49	0,292	581	0,294
604	0,269	1187,01	0,274
1694,01	0,249	556	0,242
583	0,244	24	0,238
579	0,226	583	0,234
507	0,217	1188,01	0,228

Tab. 8 Soupis frekvenčních složek s největší amplitudou a) radiální směr b) axiální směr

Tabulky 8a, 8b opět představují soupis frekvenčních složek, které ve spektrech dosahují nejvyšších amplitud. Některé frekvenční složky se vyskytují pouze v příslušném směru šíření, tyto složky jsou barevně odlišeny. V tabulkách je vidět dominantní zastoupení frekvenčních složek v oblastech okolo 530Hz a 630Hz, které byly zmíněny již výše.

8.5 Měření vibrací při zatíženém motoru – $M = 9,818\text{N}\cdot\text{m}$

Následující měření vibrací asynchronního motoru probíhalo opět větším zatížením než v předchozím případě. Vlivem většího zatížení se opět dosáhlo snížení otáček a zvýšení proudu tekoucího do motoru. Na dynamometru byly změřeny otáčky $1424,7\text{min}^{-1}$ a zatěžovací moment $9,818\text{N}\cdot\text{m}$. Znatelná byla samozřejmě i změna akustického hluku.

Na regulovaném zdroji bylo změřeno, že do každé fáze je dodáván průměrný výkon 61W . Proud potom v každé fázi měl průměrnou hodnotu $3,48\text{A}$. Při porovnání s předchozími měřeními je vidět, že se vzrůstajícím zatížením dochází k nárůstu proudu a tedy i dodávaného výkonu.

Měření rychlosti vibrací i zrychlení vibrací probíhalo naprosto totožně jako v předchozích případech. Se zvýšením zatížení se zvýšily i dosahované hodnoty vibrací. Jejich tvar, při zanedbání změny amplitudy, však zůstal téměř stejný. Zaznamenané hodnoty průběhů vibrací byly nutné opět analyzovat pomocí FFT.

V případě rychlostí vibrací se výsledky FFT svým tvarem nijak zvlášť neliší od předcházejícího měření. Pouze některé složky dosahují větších hodnot, což má za následek výše zmiňovaný nárůst amplitudy ve změřeném signálu.

Nárůst velikosti amplitud je podstatně znatelnější v případě měření zrychlení vibrací. Od předchozího měření došlo k nárůstu o téměř $3\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$ v obou směrech šíření vibrací a v obou polaritách signálu. Za tímto nárůstem opět stojí zvýšení zatížení, se kterým motor pracuje. Nárůst vibrací byl znatelný nejen sluchem, ale i pouhým dotykem ruky. Se zvyšujícím se zatížením se začal projevovat i nárůst teploty motoru, tento jev stejně jako akustický hluk není předmětem této práce.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
24	1,37	24	1,97
71	1,37	23	1,41
23	1	522,03	0,89
72	0,94	523,03	0,68
47	0,83	25	0,66
48	0,81	71	0,53
522,03	0,81	47	0,46
523,03	0,61	48	0,45
622,04	0,51	72	0,37
70	0,49	499,03	0,33
25	0,44	622,04	0,31
546,03	0,41	498,03	0,29
623,04	0,38	521,03	0,28
95,01	0,37	95,01	0,27
521,03	0,25	570,03	0,27
570,03	0,24	623,04	0,23
499,03	0,23	475,03	0,2
547,03	0,22	569,03	0,19
76	0,21	1145,07	0,19
498,03	0,21	70	0,17

Tab. 9 Frekvenční složky s největší amplitudou (rychlost vibrací) a)radiální b)axiální

Jelikož naměřené průběhy vibrací a jejich FFT jsou dosti podobné s předchozím měřením, nebudou zde uvedeny, jsou však součástí přílohy na přiloženém CD.

Pro představu o výsledcích jsou zde uvedeny tabulky (Tab. 9) obsahující soupis frekvenčních složek, které dosahují nejvyšších hodnot ve spektrech jednotlivých směrů šíření. Z tabulek je očividné, že při měření rychlosti vibrací se nejvíce projevují složky o kmitočtech z oblastí okolo 23, 520 a 620Hz pro oba směry. Pochopitelně i zde má na výsledný průběh vliv i dvojnásobek kmitočtu sítě, který souvisí s přemagnetováváním statoru a tedy i vzniku vibrací na tomto kmitočtu. Předchozí tři zmíněné složky mají svůj základ v mechanické činnosti motoru.

Podobné frekvenční složky se objevují i v případě frekvenčního spektra obou směrů získaného z FFT analýzy zrychlení vibrací (Tab. 10). Ovšem zde mají dominantní zastoupení složky okolo 520Hz a 620Hz. Tyto složky mají opět základ v mechanické činnosti motoru, konkrétně ložisek. Při narůstajícím zatížení se však čím dál více projevují frekvenční složky, které téměř sousedí s výše zmíněnými složkami. Pravděpodobně se jedná o vibrace mechanického původu, protože jejich kmitočet a velikost se mění v závislosti na otáčkách a velikosti zatížení. V axiálním směru se celkem výrazně projevují i složky z oblastí kmitočtů okolo 1145Hz a 1167Hz.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
522	2,532	522	2,719
523	2,432	523	2,568
622	1,82	1145,01	2,044
623	1,735	622	1,166
546	1,454	1144,01	1,14
547	0,987	623	1,111
570	0,912	499	1,086
499	0,836	570	1,042
71	0,613	1146,01	0,934
498	0,605	498	0,83
594	0,565	475	0,604
521	0,537	1169,01	0,589
545	0,516	521	0,574
569	0,515	569	0,549
524	0,479	1667,01	0,472
593	0,433	571	0,469
72	0,43	546	0,466
571	0,416	524	0,458
621	0,4	1168,01	0,448
617	0,383	1668,01	0,405

Tab. 10 Frekvenční složky s největší amplitudou (zrychlení vibrací) a) radiální b) axiální

8.6 Měření vibrací při zatíženém motoru – $M = 11,255\text{N}\cdot\text{m}$

Poslední měření vibrací na zatíženém motoru probíhalo naprosto totožně jako v předchozích případech. Na dynamometru byl nastaven zatěžovací moment $11,255\text{N}\cdot\text{m}$ čímž se dosáhlo opětovného snížení otáček a nárůstu proudu. Průměrná hodnota proudu byla odečtena na řízeném zdroji v každé fázi $3,82\text{A}$ a průměrný dodávaný výkon do každé fáze 700W . Na dynamometru pak bylo změřeno, že motor má výkon $1659,1\text{W}$ na hřídeli. Při porovnání této hodnoty výstupního výkonu z motoru s hodnotou udávanou výrobcem bylo zjištěno, že motor je lehce přetěžován. Výrobce udává, že při napájení ze standardní $3f$ sítě dosahuje motor 1400min^{-1} při výkonu $1,5\text{kW}$ na hřídeli.

S mírným přetížením se míra akustického hluku a vibrací přenášených z motoru do blízkého vybavení laboratoře (ukotvení motoru, pracovní stůl, atd.) podstatně zvýšila. Na pokyn vedoucího bylo měření předčasně ukončeno.

Změřeny byly pouze hodnoty zrychlení vibrací pro oba směry šíření. V maximu tyto hodnoty zrychlení blížily ke $12\text{mm}\cdot\text{s}^{-2}$. Grafický záznam průběhů vibrací je přiložen na CD, které je součástí této práce. Níže jsou uvedeny tabulky (Tab. 11) představující soupis nejvýraznějších frekvenčních složek objevujících se ve frekvenčním spektru, které bylo získáno FFT analýzou naměřeného signálu.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
516	4,252	516	3,483
616	2,698	1132,01	2,251
517	2,432	517	2,027
515	1,84	616	1,876
540	1,56	515	1,513
617	1,554	1133,01	1,486
539	1,493	563	1,2
493	1,334	493	1,16
563	1,263	617	1,083
615	1,154	492	0,928
492	1,133	1131,01	0,83
586	0,821	615	0,799
587	0,764	1648,01	0,724
564	0,634	469	0,681
562	0,593	564	0,606
610	0,539	562	0,593
593	0,463	540	0,585
70	0,447	1649,01	0,542
569	0,427	539	0,491
566	0,422	586	0,49

Tab. 11 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální

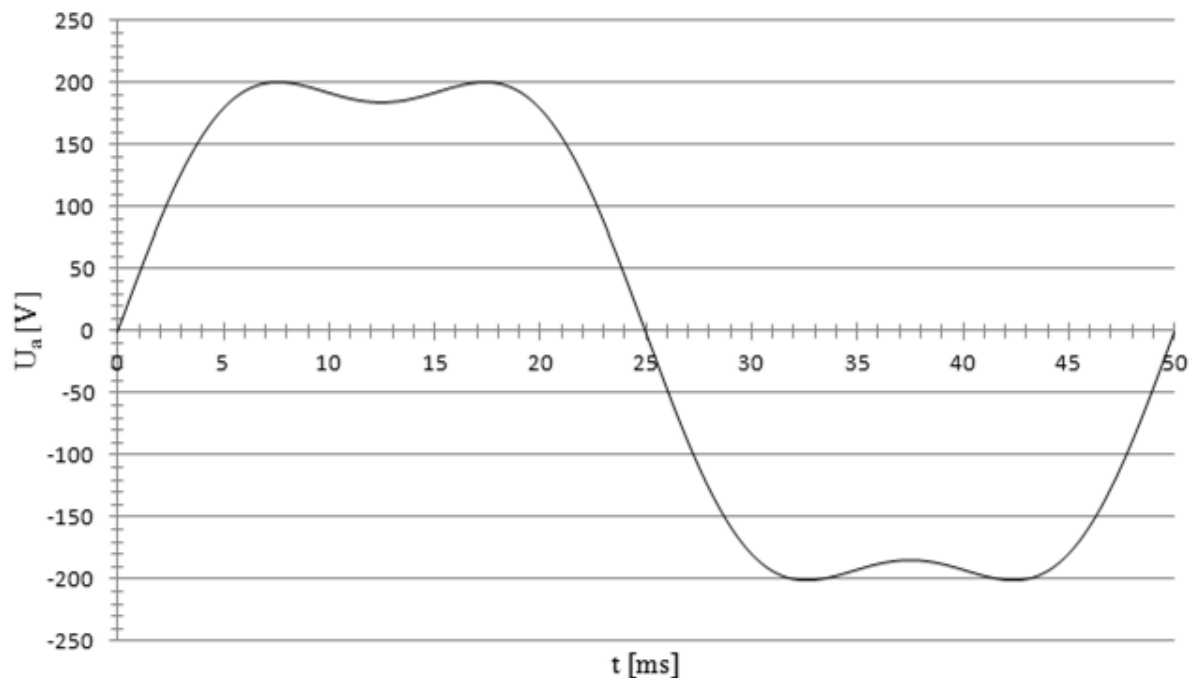
Ze soupisu nejvýraznějších složek utvářejících naměřený signál se nejvíce projevují právě složky související s mechanickou činností motoru. Konkrétně pak složky z oblastí okolo 515Hz a 615Hz. V axiálním směru pak velmi výrazně vystupují složky okolo 1133Hz a 1648Hz. Pravděpodobně jsou i tyto složky mechanického původu. Tyto vibrace však nemusí mít původ v motoru samotném, ale mohou se do něj přenášet přes hřídel. Původcem těchto vibrací může být například spojkové propojení hřídele motoru a dynamometru.

8.7 Měření vibrací motoru při změně tvaru napájecího napětí

Následující tři měření probíhaly na tomtéž motoru, ale na rozdíl od předcházejících několika měření nebyl motor připojen přes spojku k dynamometru. Motor tedy pracoval naprázdno. Smyslem těchto měření je ukázat jak se mění spektrum naměřených vibrací, když se mění tvar napájecího napětí. Ze zjištěných změn pak bude možné přibližně určit, které frekvenční složky jsou původu elektromagnetického.

První měření probíhalo při napájení standardním sinusovým napětím, čili běžnou 3f sítí s parametry 3x230V/50Hz. Výsledky z tohoto měření pak poslouží pro srovnání s měřeními, kde již bude napětí nějakým způsobem deformováno. Rozmístění čidel snímajících vibrace zůstalo stejné jako při předchozích měřeních. Výsledné zaznamenané průběhy i s analýzami pomocí FFT a soupisem nejvýraznějších frekvenčních složek jsou obsahem příloženého CD.

Druhé měření již probíhalo při napájení motoru deformovaným napětím. Díky funkci řízeného zdroje generovat výstupní napětí o námi zvolených parametrech, nebyla deformace napětí nijak zvlášť složitá. V softwaru, kterým je možno ovládat zdroj pomocí počítače bylo napájecí napětí pro měření utvořeno jako součet dvou sinusových průběhu. První z nich dosahoval amplitudy 230V s frekvencí 50Hz. Druhý sinusový průběh dosahoval pouze 20% amplitudy prvního průběhu, ale měl 3x vyšší frekvenci. Ve výsledku se jedná o deformaci základního kmitočtu 3. harmonickou (Graf 37).



Graf 37 Deformované napětí 3. harmonickou

Takto deformované napětí bylo pouze v jedné ze tří fází. Ve zbylých dvou fázích bylo čistě sinusové napětí. Stejnou metodou použitou v předchozích případech byly vyhodnoceny i vibrace motoru napájeného výše zmiňovaným napětím. Ve spektru získaném pomocí FFT změřených rychlostí vibrací se nově projevují složky o dvojnásobném kmitočtu 3. harmonické, tedy 300Hz. Výrazně však v obou směrech vystupují vibrace o kmitočtu 200Hz, které pravděpodobně vznikají následkem deformovaného napájecího napětí ve statoru.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
1	0,95	1	1,15
25	0,88	2	0,52
200	0,57	25	0,34
549	0,51	100	0,31
550	0,48	549	0,29
24	0,47	550	0,27
100	0,42	24	0,18
26	0,41	26	0,16
2	0,34	99	0,15
201	0,29	101	0,15
199	0,28	200	0,15
649	0,23	649	0,15
650	0,22	650	0,14
99	0,21	600	0,11
101	0,21	4	0,07
3	0,2	199	0,07
548	0,11	201	0,07
574	0,1	300	0,07
575	0,1	574	0,07
551	0,09	575	0,07

Tab. 12 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální

V tabulce výše (Tab. 12) jsou uvedeny nejvýraznější frekvenční složky, které nejvíce utváří zaznamenané průběhy rychlostí vibrací. Nízké kmitočty 1 až 4Hz jsou pravděpodobně rušení z okolí i když dosahují poměrně vysokých hodnot. I v těchto spektrech se objevují složky, které pocházejí z mechanické činnosti motoru (25,550 a 650Hz). Velké zastoupení mají výše zmiňované frekvence rovnající se dvojnásobkům základních frekvencí napájecího napětí. Dalším rozdílem ve výsledném spektru je velikost jednotlivých složek vibrací. Důvodem toho je právě deformace vstupního napětí, jehož následek můžeme pozorovat i ve složkách vibrací mechanického původu.

Analýzou zrychlení vibrací rovněž dostáváme podrobnější pohled na frekvenční složky obsažené v zaznamenaném signálu (Tab. 13). V tomto případě nacházíme ve spektru složky okolo 1200Hz v obou směrech šíření. V radiálním směru ještě navíc výrazná složka 1748Hz. Vibrace o takovýchto kmitočtech se sice objevují i při napájení čistě sinusovým napětím, ale některé složky z těchto oblastí dosahují nepatrně vyšších hodnot.

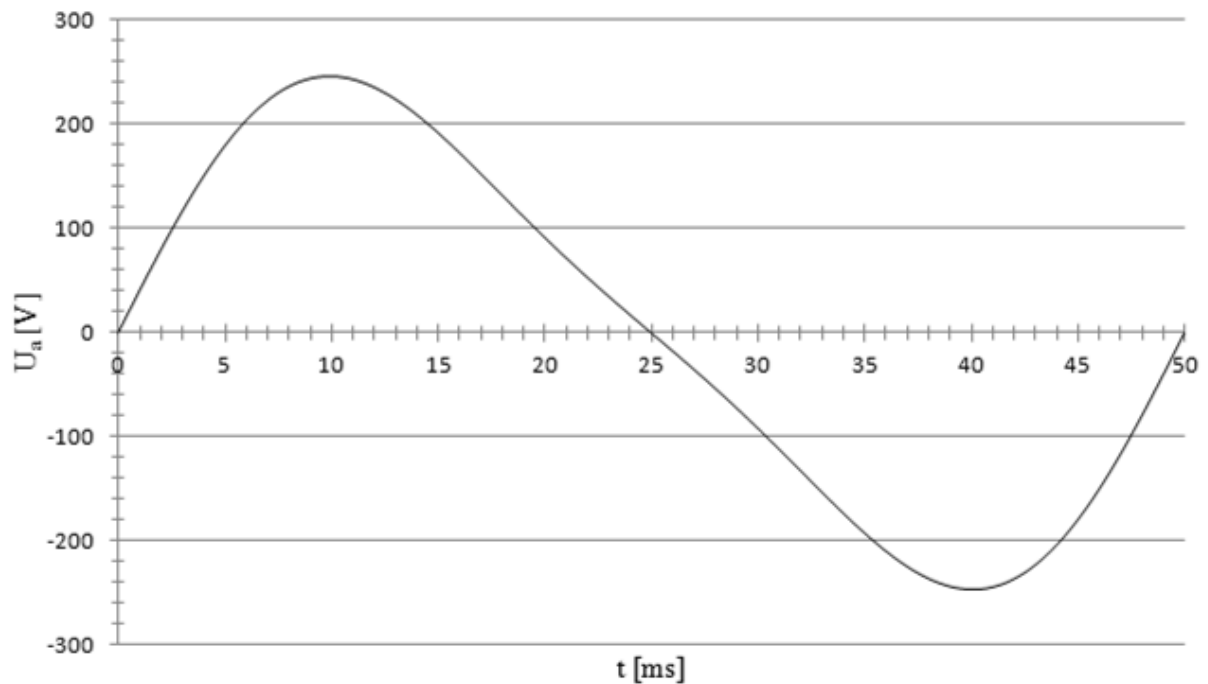
Porovnáním spekter tohoto měření s měřením předchozím, kdy motor byl napájen čistě sinusovým napětím, si můžeme všimnout několika odlišností. Mezi největší patří výše zmiňovaný výskyt dvojnásobku 3. harmonické. Následkem deformace napětí došlo i ke zvýšení hodnoty vibrační, jejichž zdrojem jsou s největší pravděpodobností ložiska motoru. Tento jev je způsoben následkem deformace magnetického pole statoru, které tak ovlivňuje činnost rotoru a tedy i ložisek. V praxi zjištění vibrační pohybujících se v oblasti vyšších harmonických základního kmitočtu mohlo nasvědčovat například poruše frekvenčního měniče, ze kterého by byl motor napájen.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
549,5	1,938	549,5	1,114
549	1,209	649,5	0,754
649,5	1,065	549	0,698
550	0,762	649	0,468
200	0,708	550	0,43
649	0,662	600	0,417
650	0,418	1199	0,317
200,5	0,36	650	0,304
199,5	0,348	574,5	0,28
574,5	0,345	600,5	0,245
574	0,223	1198,5	0,236
100	0,179	1174	0,182
300	0,161	200	0,179
1748,5	0,146	574	0,166
1748	0,137	1249	0,158
1249,5	0,135	599,5	0,153
25	0,13	300	0,146
575	0,126	1224	0,144
849,5	0,109	575	0,141
1249	0,109	1199,5	0,138

Tab. 13 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální

Poslední měření v této části je podobné předcházejícímu. Rozdíl je pouze v tom, že na řízeném zdroji byl pozměněn tvar napájecího napětí. Základ opět tvoří sinusový průběh o amplitudě 230V a frekvenci 50Hz k němuž se přičítá 2. harmonická (100Hz) dosahující 20% amplitudy základního průběhu. Ve výsledku se tedy znovu jedná o deformaci síťového napětí, ale v tomto případě 2. harmonickou (Graf 38). Stejně jako v předešlém případě je toto napětí přítomno pouze v jedné ze tří fází. Ve zbylých dvou je čistě sinusové napětí.

Postup vlastního měření a následného vyhodnocování dat je stejný jako v předcházejících dvou měřeních.



Graf 38 Deformované napětí 2. harmonickou

Ve frekvenčním spektru se objevují nové složky, které jsou utvořeny vlivem přítomnosti 2. harmonické v jedné fázi napájení. Složky vibrací mající základ v mechanické činnosti motoru dosahují vyšších hodnot, než při čistě sinusovém napájení. Původcem těchto nárůstů vibrací je deformace elektromagnetického pole statoru. V tabulce 14 je uveden soupis nejvýraznějších frekvenčních složek, které se nejvíce podílí na utváření zaznamenaného signálu rychlostí vibrací.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
150	1,51	1	1,15
50	0,92	150	0,8
1	0,91	2	0,48
25	0,89	149	0,4
149	0,76	151	0,4
151	0,76	50	0,35
549	0,7	25	0,33
550	0,58	549	0,33
24	0,48	550	0,27
49	0,46	649	0,2
51	0,45	24	0,18
26	0,41	49	0,18
2	0,31	51	0,17
649	0,26	100	0,16
100	0,22	650	0,16
650	0,22	26	0,15
548	0,19	499	0,15
3	0,18	500	0,13
99	0,11	599	0,1
101	0,11	600	0,1

Tab. 14 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální

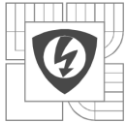
Frekvenční složky s kmitočtem 1 až 3Hz nejspíše pochází z okolního rušení i když dosahují poměrně vysokých hodnot. Dále jsou zde velkou měrou zastoupeny vibrace s frekvencemi okolo 550Hz a 650Hz, které dosahují vyšších hodnot než v případě prvního měření. I v tomto případě se jedná o vibrace mechanického původu, za jejichž nárůstem stojí právě deformace elektromagnetického pole.

f [Hz]	FFT - radial	f [Hz]	FFT - axial
549,5	2,166	549,5	1,096
549	1,698	649,5	0,885
150	1,425	549	0,871
649,5	1,098	150	0,758
649	0,831	599,5	0,681
150,5	0,721	649	0,673
149,5	0,707	499,5	0,485
599,5	0,56	599	0,465
550	0,536	600	0,393
599	0,436	699,5	0,392
574,5	0,321	150,5	0,383
650	0,317	149,5	0,378
50	0,284	574,5	0,377
574	0,26	1198,5	0,345
1198,5	0,251	1223,5	0,334
499,5	0,249	499	0,333
699,5	0,243	1224	0,303
548,5	0,188	699	0,296
300	0,187	1199	0,296
699	0,178	574	0,285

Tab. 15 Frekvenční složky s největší amplitudou a) radiální b) axiální

V tabulce 15 je uveden seznam frekvenčních složek, které se nejvíce podílí na tvaru zaznamenaného průběhu zrychlení vibrací. Složky jsou seřazeny v sestupném smyslu. Je vidět, že největší vliv na výsledné vibrace mají složky z oblasti kmitočtu 550Hz a 650Hz (stejně jako předešlý případ). Mimo tyto složky se zde objevují frekvence související přítomností 2. harmonické základního kmitočtu v jedné fázi napájení. Tato deformace, jak již zde bylo řečeno, má podstatný vliv na velikosti těchto vibrací. Za pozornost stojí fakt, že v tomto měření frekvenční složky vibrací nacházející se v oblasti 1750Hz dosahují nižších hodnot než při měření předcházejícím (deformace 3. harmonickou). V tomto měření spíše dominují složky z oblasti 550Hz a 650Hz

Na základě poznatků získaných během těchto tří měření je možné snadněji rozpoznat složky vibrací, které se výrazněji projeví v případě nesinusového (nebo jinak deformovaného) napájecího napětí v jedné fázi. Situace by byla zřejmě podobná, kdyby se takové průběhy napájecího napětí objevovaly i v ostatních fázích.



9 POČÍTAČOVÁ SIMULACE ELEKTROMAGNETICKÝCH VIBRACÍ MOTORU

Cílem této práce je analyzování vibrací elektromagnetického původu. Běžným měřením vibrací motoru však nelze s jistotou určit, jak velký podíl na výsledných vibracích má právě elektromagnetické pole statoru. Samotné měření těchto vibrací by sice bylo zřejmě možné, ale musela by se zajistit nehybnost rotoru. Což by mělo za následek v lepším případě útlum vzniklých vibrací přes brzdící mechanismus, v horším případě pak zničení motoru.

Při uvážení těchto možných rizik bylo nutné vymyslet jiný a bezpečnější způsob jak tyto vibrace změřit a později analyzovat. Při zkoumání různých možností jak tato měření provést vyplynulo jako nejlepší řešení počítačová simulace.

Jelikož na tento typ úlohy není vytvořen žádný dostupný program, bylo nutné tuto metodu řešení pečlivě promyslet. V první řadě bylo třeba najít vhodný software, který dokáže vypočítat rozložení magnetického pole stroje. Program pro tuto úlohu byl zvolen Ansoft Maxwell, který je schopen vypočítat rozložení magnetického pole na základě uživatelem definovaných fyzických rozměrů a parametrů stroje. Mimo to dokáže vypočítat silové působení magnetického pole na zvolenou geometrii (těleso), momentovou charakteristiku, proudy tekoucí motorem, atd. Tento program ale sám o sobě k potřebné analýze nestačí.

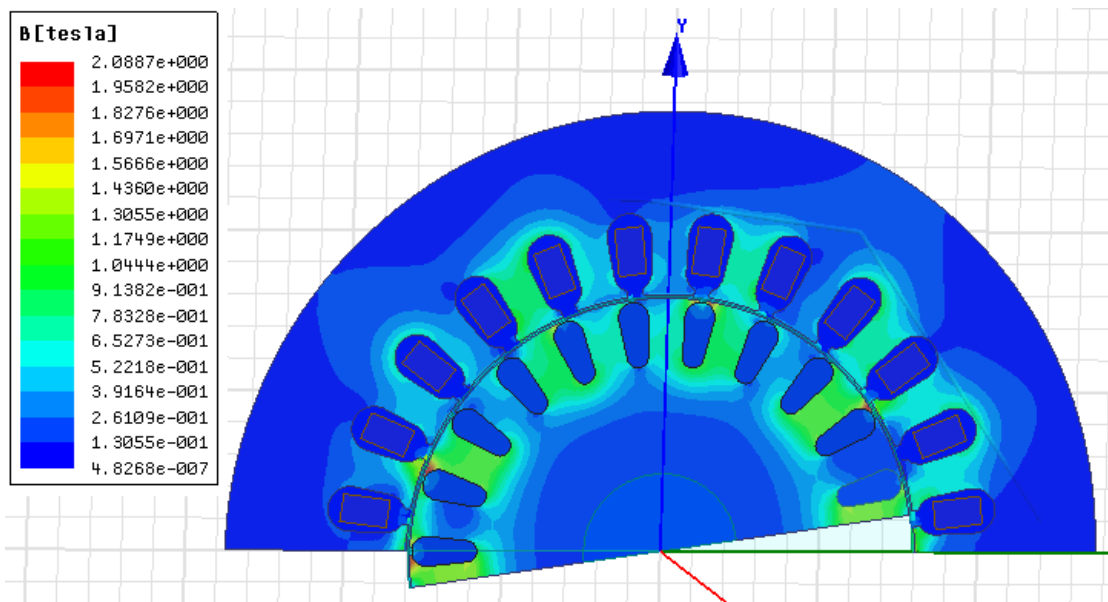
Jako další zvolený program pro tuto analýzu byl zvolen Ansys. Který, mimo jiné, dokáže pomocí metody konečných prvků řešit složité úlohy v oblasti mechaniky. Jednou z jeho funkcí je, že dokáže simulovat působení síly na určitou část modelu a následně zaznamenávat projevy takového působení na zvolené části. Nemusí se však jednat o působení konstantní síly, ale je možné definovat změny i směr působení. Zadání může probíhat formou matematické funkce, nebo jako tabulka hodnot popisující změny ve velikosti i směru působící síly. Zadávání parametrů síly pomocí tabulky je pro tento případ ideální. Umožňuje totiž přesně definovat silové působení v jednotlivých časových úsecích, čímž se dají simulovat silové účinky proměnného magnetického pole.

Aby bylo možné analýzy ve výše zmíněných programech spustit, bylo nutné nejdříve zjistit fyzické rozměry a parametry motoru, na němž probíhala veškerá měření. Pro tyto účely byl rozmontován stejný model motoru, jako byl použit pro měření. Bylo nutné však některé jeho části zničit, aby bylo možné přesněji změřit potřebné rozměry. Tabulka 16 uvádí přehled vybraných rozměrů a parametrů motoru.

Na základě těchto parametrů mohl být spuštěn výpočet rozložení magnetického pole v motoru a jeho silové účinky na motor jako těleso. Ukázkou výsledného rozložení magnetické indukce v motoru pak lze vidět na obrázku 14. Pro urychlení výpočtu je program schopen vyhledat v objektu symetrii a poté počítat pouze s polovičním modelem jako je tomu v tomto případě. Tato zjednodušení, které program dělá, nemají na výsledek žádný vliv. Na ukázkou, že program přepočítává rozložení indukce v každém časovém okamžiku ve stroji je na obrázku rotor pootočen vůči statoru. Z toho vyplývá, že Ansoft uvažuje i otáčení rotoru při výpočtu rozložení magnetické indukce. Tento fakt pak přispívá k přesnějším výsledkům.

Stator	Vnitřní průměr [mm]	80,13
	Vnější průměr [mm]	137,32
	Délka drážky [mm]	108
	Počet drážek	24
	Počet pólů	4
Rotor	Půměr [mm]	79,3
	Délka včetně kroužků [mm]	123,24
	Vnější průměr kroužku [mm]	76,5
	Vnitřní průměr kroužku [mm]	47,36
	Tloušťka kroužku [mm]	8,58
	Počet tyčí	22
Vinutí statoru	Počet vstev	1
	Počet vodičů v drážce	118
	Průměr vodiče [mm]	0,6

Tab. 16 Vybrané rozměry a parametry motoru



Obr. 14 Rozložení magnetické indukce v motoru

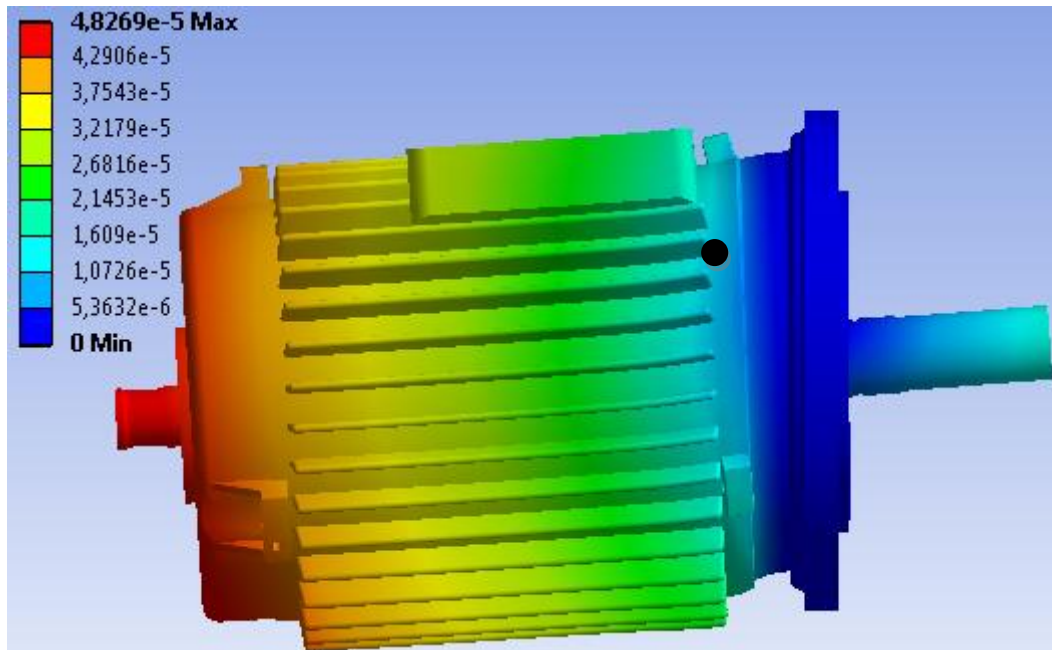
Dalším krokem ke spuštění finální analýzy v programu Ansys bylo nutné vytvoření 3D modelu motoru. Díky znalosti fyzických rozměrů motoru bylo možné tento model vytvořit. K vytvoření samotného modelu bylo zapotřebí použít vhodný software umožňující práci s 3D objekty. Na obrázku 15 je zobrazen hotový model vytvořený v programu Autodesk Inventor. Model obsahuje všechny nezbytné části motoru od plastového krytu svorkovnice, přes obě ložiska až po samotné tělo statoru.



Obr. 15 Rozložený 3D model motoru

S hotovým modelem motoru a s výsledky získanými z programu Ansoft již bylo možné přistoupit k definování vstupních parametrů pro konečný výpočet prováděný programem Ansys. Z pohledu programu Ansys se nejedná o výpočet samotných vibrací vzniklých působením magnetického pole uvnitř motoru. Bylo nutné zajistit, aby program zaznamenával změny v geometrii modelu, jinými slovy program počítá deformace objektů vlivem působení definované síly. Jak již bylo řečeno dříve, síla je definovaná pomocí tabulky hodnot, které byla importována do nastavení výpočtu z programu Ansoft.

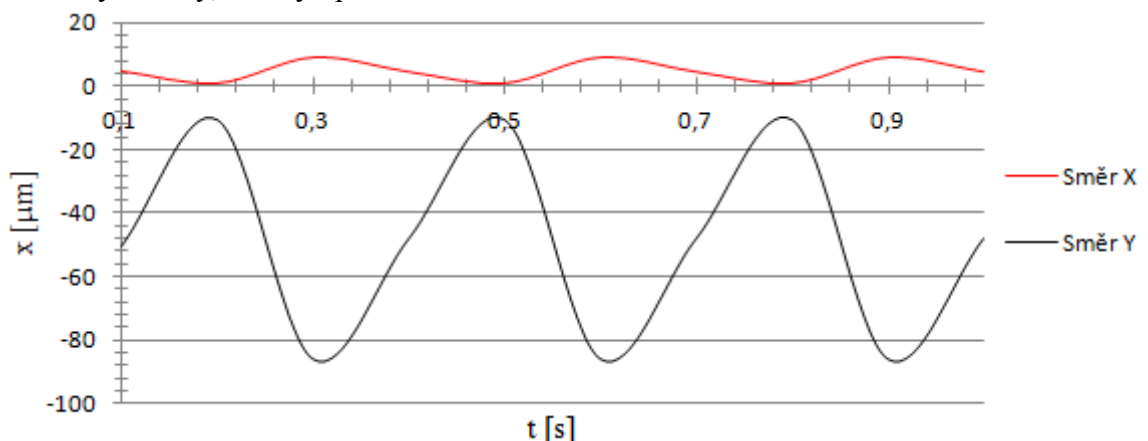
Před zahájením finálního výpočtu bylo ještě zapotřebí definovat materiály jednotlivých částí motoru. V tomto bodě byla do analýzy zanesena chyba kvůli neznalosti přesných materiálových vlastností, ze kterých byl skutečný motor sestaven. Vzhledem k tomu, že se jednalo o časově velmi náročný výpočet, bylo nutné model motoru zjednodušit. Vymazány byly plastové části motoru, na které nemá magnetické pole vliv. Tyto části mohou zanechat do výsledku nepatrnou chybu. Tyto části by se mohli projevit jako tlumiče vibrací, jejich skutečný tlumicí efekt je však na reálném motoru zanedbatelný. Proto je tedy možné tyto části z výpočtu vyloučit. Program si dále před zahájením výpočtu model rozdělí na konečný počet prvků, jejichž velikost a tvar může definovat uživatel. Jelikož by se opět jednalo o velmi časově náročnou záležitost, byla volba vhodného tvaru ponechána na programu. Nastavená byla pouze maximální hustota sítě prvků. Model byl tedy rozdělen na 147153 prvků se 245685 uzly. Takováto hustota sítě pak poskytuje ve všech bodech modelu adekvátně přesný výpočet. Ukázka jak takové rozdělení modelu vypadá je vidět na obrázku, který je umístěn na příloženém CD.



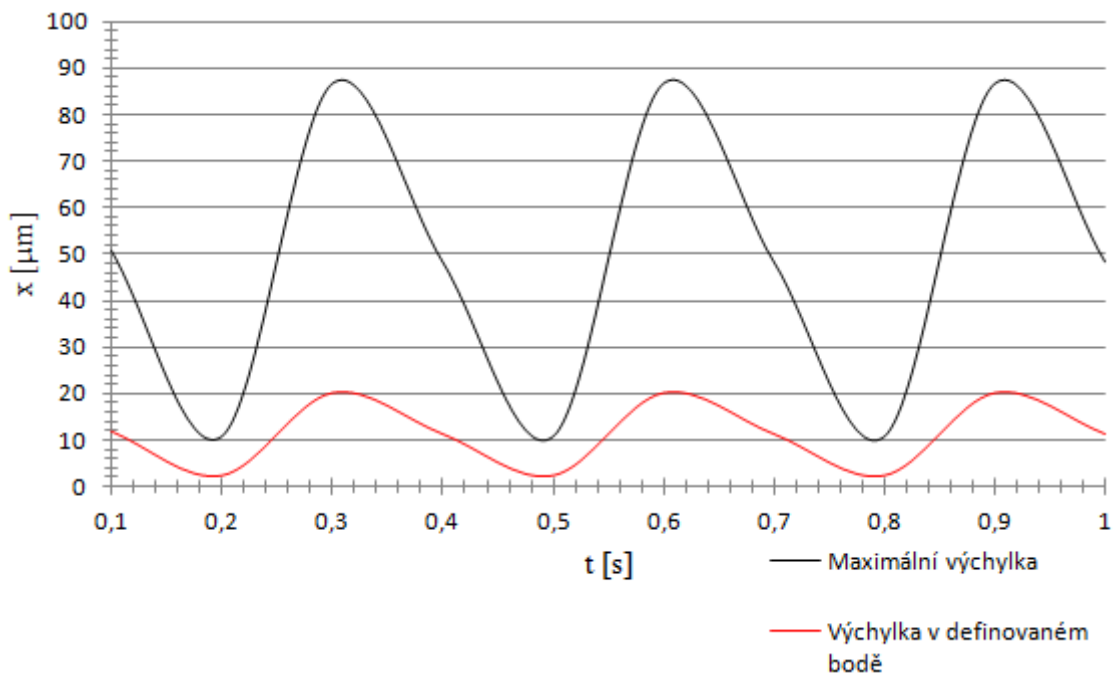
Obr. 16 Výsledek výpočtu programem Ansys

Na obrázku 16 je výsledek výpočtu v jednom časovém okamžiku. Důležité je říci, že grafické zobrazení výchylky je 400x zvětšeno, aby bylo názorněji ukázáno, kde dochází k největším deformacím modelu, tedy k největším vibracím. Černý bod na obrázku 16 ukazuje místo, kde byly zaznamenávány vibrace, jejichž průběh je zakreslen pro srovnání s maximálními výchylkami modelu v grafu 40. Modře zobrazená část vykazuje téměř nulovou deformaci. Je to dáno tím, že programu bylo nastaveno, aby považoval plochu tohoto čela motoru za fixně upevněnou. Ve skutečnosti by však vibrace vznikaly i v těchto místech, ale připravení takové simulace kdy je motor upnut k reálné konstrukci by vyžadovalo další množství času.

Výsledné výchylky vibrací jsou složeny z výchylek modelu do jednotlivých směrů ve smyslu souřadnicového systému. Zadání velikostí a směrů síly pro jednotlivé časové úseky bylo definováno pouze ve 2D rovině, proto jsou výchylky ve směru osy Z minimální. Velikost výchylek do jednotlivých směrů ukazuje graf 39. Výchylky v ose Z nejsou v grafu zakresleny, protože dosahují minimálních hodnot. To však neznamená, že by se vibrace v tomto směru nešířily, bylo by pouze nutné provést výpočet programem Ansoft ve 3D prostoru a simulaci provádět s novými daty, což by opět vedlo k velké časové náročnosti celé simulace.



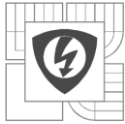
Graf 39 Směry výchylek vibrací v osách X a Y



Graf 40 Průběh velikosti výchylky maximální a ve stanoveném bodě

Z obrázku 16 je pak vidět, že maximální hodnota výchylky v konkrétním časovém úseku je $48\mu\text{m}$. Maximální hodnota výchylky v průběhu celého výpočtu však dosahovala $85\mu\text{m}$ (Graf 40). Při porovnávání s výsledky z reálného měření, kdy výchylka na motoru se pohybovala v rozmezí $96\mu\text{m}$ až $120\mu\text{m}$ je hodnota vypočtená programem vcelku reálná. Nutno však zdůraznit, že velikosti výchylek vibrací motoru vypočítané programem jsou pouze elektromagnetického původu.

Výstupem této simulace, jak již bylo zmíněno, jsou výchylky vibrací. Pro získání velikostí rychlostí a zrychlení vibrací je nutné výsledné průběhy přepočítat způsobem, který je uveden v kapitole 3. Takto je tedy možno analyzovat vibrace elektromagnetického původu v motoru. Kdyby byly známy přesné materiálové parametry, pak by simulace mohla dosáhnout přesnějších výsledků a tedy i větší relevantnosti. Kvůli velké časové náročnosti celého postupu nebyly přesně definovány kontaktní místa. Tím je myšleno jakým způsobem na sebe reagují jednotlivé části motoru, které se navzájem dotýkají. Jestli je možné, aby po sobě klouzali, byly fixně k sobě připevněny, nebo nějakým jiným způsobem reagovali na změnu polohy (nebo tvaru) sousedního tělesa.



10 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo seznámit se s problémem vzniku a přenosu vibrací v asynchronním motoru, následně provést praktické měření vibrací na motoru při rozdílných vstupních proudech a vyhodnocení získaných dat. Práce je rozdělena do deseti kapitol.

Ve druhé kapitole je uveden obecný popis konstrukce asynchronního motoru. V této kapitole je také uveden princip funkce motoru, popis magnetického obvodu stroje a vznik točivého magnetického pole, který je nezbytný pro funkci motoru.

Třetí kapitola je věnována teoretickému popisu obecných vibrací. Je zde uveden přehled a stručný popis včetně základního matematického vyjádření veličin, které jsou měřeny a dále vyhodnocovány.

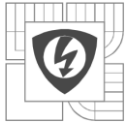
Cílem čtvrté kapitoly obecný rozbor matematického aparátu sloužící k vyhodnocení dat získaných při měření některé veličiny sloužící k popisu vibrací. Samotná Fourierova transformace však není úplně vhodná ke zpracování dat z měření, proto je i v této kapitole popsána mnohem vhodnější rychlá Fourierova transformace. S aplikací FFT v praxi souvisí i okénková Fourierova transformace, jejíž popis a základní rozdělení jednotlivých okénkových funkcí s uvedením vhodných aplikací je zde také popsán.

Pátá kapitola je věnována teoretickému popisu vlastního měření vibrací a rozdělení snímačů určených pro tato měření. Snímače jsou rozděleny podle veličiny, které jsou schopny měřit. Nejsou rozděleny podle jejich technologického řešení. Ke každému typu snímače je uveden stručný popis jejich funkce a vhodné aplikace.

Obsahem šesté kapitoly je popis a rozdělení zdrojů vibrací. Vzhledem k tomu, že tato práce je věnována vibracím elektromagnetického původu je podstatná část této kapitoly věnována právě tomuto zdroji vibrací. Součástí této kapitoly je princip přenosu a vzniku vibrací uvnitř stroje, které nejlépe vystihuje uvedené schéma.

Sedmá kapitola popisuje stručné představení výpočetního programu Ansys. Pomocí tohoto programu byla provedena simulace elektromagnetických vibrací motoru

V osmé kapitole je pak ukázán samotný postup při měření a následná analýza získaných dat. Měření bylo rozděleno na 3 hlavní části. V první části byly změřeny hodnoty rychlostí a zrychlení okolních vibrací. Motor v této části byl vypnut. Ve druhé části probíhalo měření vibrací na motoru, který byl spojen s dynamometrem představující zátěž motoru. Tato část je rozdělená do dalších pěti částí, z nichž v každé je měření prováděno stejným způsobem, ale při rozdílném zatížení. Z rozdílného zatížení vyplývá, že při každém měření motorem protékal jiný proud. Poslední ze tří hlavních částí bylo měření vibrací na motoru, který nebyl ničím zatížen. Cílem poslední části bylo určit, jak se změni spektra frekvenčních složek vibrací při deformaci napájecího napětí v jedné fázi.



Devátá kapitola popisuje možnou metodu analyzování elektromagnetických vibrací za pomoci počítačové simulace. K těmto účelům byl využit výpočetní program Ansys. před spuštěním simulace bylo nutné provést několik nezbytných kroků. Vytvoření co nejpřesnějšího 3D modelu a vypočítat rozložení magnetického pole a jeho silového působení na motor. K výpočtu rozložení magnetického pole posloužil program Ansoft Maxwell. Z tohoto programu pak byla data importována do programu Ansys a aplikována na 3D model, který byl rovněž do tohoto programu importován. Samotná simulace a výsledky takto získané jsou do jisté míry pouze orientační, protože nebyly známy některé důležité parametry, které by mohli výsledek zpřesnit. Stejně tak v programu Ansoft Maxwell probíhal výpočet na zjednodušeném modelu pouze ve 2D rovině. Veškeré zjednodušování však bylo nutné, kvůli velké časové náročnosti celé přípravy na simulaci a simulaci samotné. Porovnáním výsledků ze simulace a z reálného měření jsem došel k závěru, že i přes zanesení jistých chyb do výpočtu, nejsou výsledky nikterak nereálné.

Tato metoda by určitě stála za zdokonalení, jelikož se domnívám, že postupovat při analýze vibrací elektromagnetického původu touto cestou může vést k lepšímu pochopení celého systému vzniku vibrací. Což by se dalo využít při porovnávání frekvenčních spekter vibrací z reálného měření s výsledky získanými ze simulací. Následkem čehož by bylo snadnější identifikovat případnou závadu na měřeném stroji. Tato metoda by se dala využít například i ve fázi vývoje samotného stroje k odhalení případných lokálních maxim vibrací, které by vznikaly následkem působení elektromagnetického pole. Tím by se dalo případně předejít zavedení konstrukční chyby ještě před zahájením výroby prototypů. Tato metoda je však dosti složitá a její podrobné zpracování by vydalo minimálně na další diplomovou práci. V této práci je však ukázán stručný náčrt směru, kterým by se analýzy tohoto typu mohli ubírat.

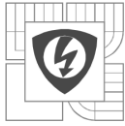
Analýzou naměřených údajů jsem došel k závěru, že motor nemá žádnou vážnou závadu. Ve frekvenčních spektrech se projevovaly pouze frekvence, které mají původ v otáčení rotoru, ve stálém přemagnetování statoru stroje, v ložiskách, atd. Tyto vibrace nelze úplně odstranit, ale vhodným konstrukčním řešením je lze alespoň snížit. Ve frekvenčních spektrech si objevovaly i složky související s přítomností vyšších harmonických základního kmitočtu napájecího napětí. Je to dáno tím, že řízený zdroj negeneruje ideální sinusový průběh, ale je vždy nějak ovlivněn některými vyššími harmonickými základního kmitočtu.

Vibrodiagnostika jako nástroj pro zkoumání stavu stroje je nástroj sice užitečný, ale ne vždy se vyplatí dlouhodobé sledování daného stroje a tak předcházet závadám. Význam dlouhodobějšího sledování stroje a kvanta dat, která je třeba analyzovat, pozbývá významu u malých strojů, nebo menších provozů. Je to dáno finanční nákladností na vybavení, která jsou pro tyto účely potřebná. Význam diagnostiky vibrací pak roste u velkých podniku, nebo u velkých a drahých strojů, jejichž závada by mohla způsobit nemalé škody, v horším případě zavinit smrt osob nacházejících se v blízkosti stroje.



LITERATURA

- [1] ONDRŮŠEK, Čestmír. Elektrické stroje. 107 s. Vysoké učení technické v Brně. Skripta.
- [2] Katedra Elektroniky při VŠB- TUO : Asynchronní (indukční) stroje (motory) [online]. 2004 [cit.2011-12-06]. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Dostupné z WWW: <<http://fei1.vsb.cz/kat430/old/Studium/Materialy/VS/kap23.pdf>>.
- [3] KOČMAN, Stanislav. Asynchronní stroje. 2002. Dostupné z: <http://p.kobrle.sweb.cz/stroje/as-skriptum.pdf>
- [4] KONEČNÁ, Eva a Aleš RICHTER. Elektrické stroje. Ústav mechatroniky a technické informatiky [online]. Upravené vydání. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2000, 27. 5. 2011 [cit. 2013-10-31]. Dostupné z: http://www.mti.tul.cz/files/ele/El_Str1_h.pdf
- [5] MATOUŠEK, Oldřich a Jaroslav BAUMRUK. Vibrace. BOZPinfo [online]. 1. vyd. Praha, 1998, 13. 7. 2009 [cit. 2013-11-02]. Dostupné z: <http://www.bozpinfo.cz/priloha/vibrace.pdf>
- [6] JAKSCH, Ivan. Technická diagnostika: Měření a diagnostika vibrací [online]. Liberec, 2010, 26. 10. 2011 [cit. 2013-11-02]. Dostupné z: http://www.rss.tul.cz/ftppub/tdg/P8_vibrace%20_ESF.pdf
- [7] ZUTH, Daniel a František VDOLEČEK. Možnosti a problémy moderní (vibro)diagnostiky. AUTOMA. 2009, roč. 15, č. 10, s. 10-13. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/39703.pdf>
- [8] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. Aplikovaný mechanik jako součást týmu konstruktérů a vývojářů: studijní opora [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2012, 1 DVD-ROM [cit. 2013-11-02]. ISBN 978-80-248-2755-1. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2755-1.pdf>
- [9] Diskrétní a rychlá Fourierova transformace. ČVUT-FEL: Katedra telekomunikační techniky [online]. 2004 [cit. 2013-11-03]. Dostupné z: <http://www.comtel.cz/files/download.php?id=3362>
- [10] BAŘTIPÁN, Jan. Filtrace snímků ve frekvenční oblasti: Rychlá fourierova transformace [online]. Plzeň, 2007, 11. 12. 2007 [cit. 2013-11-03]. Dostupné z: <http://bartipan.net/zvi/fft.pdf>. Semestrální práce. Západočeská univerzita.
- [11] BILOŠOVÁ, Alena. Týmová cvičení předmětu Vibrační diagnostika: návody do cvičení předmětu „Vibrační diagnostika“ [online]. Vyd. 1. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2011, 1 DVD-ROM [cit. 2013-11-04]. ISBN 978-80-248-2757-5. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/147/ucebniopory/978-80-248-2757-5.pdf>
- [12] HLAVÁČ, Václav a Miloš SEDLÁČEK. Zpracování signálů a obrazů. 2. přeprac. vyd. Praha: ČVUT, 2007, 255 s. ISBN 978-80-01-03110-0.
- [13] Možnosti analýzy signálu akustické emise pomocí okénkové Fourierovy transformace. In: Výpočtová mechanika 95 [online]. Plzeň, 1995 [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: http://www.cdm.cas.cz/publications/hora/ph_vm1995a.pdf



- [14] MAŠLÁŇ, Stanislav. Rychlá Fourierova transformace (FFT) pro AVR. Elektronika, bastlení, návody [online]. 28.2.2012 [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://elektronika.kvalitne.cz/ATMEL/necoteorie/transformation/AVRFFT/AVRFFT.html>
- [15] WEIGL, Martin. Měření vibrací [online]. Brno, 2011 [cit. 2013-11-22]. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/6359/Martin%20Weigl%20-%20Měření%20Vibrací.pdf?sequence=1>. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [16] Vlastnosti oken pro spektrální analýzu pomocí DFT: návod ke cvičení z X37LBR. 2008. Dostupné z: <http://radio.feld.cvut.cz/personal/matejka/wiki/lib/exe/fetch.php?id=root:cz:x37lbr:navy&media=root:cz:x37lbr:lbr2.pdf>
- [17] A Refresher Course on Windowing and Measurements. Agilent Technologies [online]. 1995/1996, 28.2.2004 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: http://www.home.agilent.com/upload/cmcc_upload/All/6C06DATAACQ_WINDOWS.pdf?&cc=CZ&lc=eng
- [18] Windowing: Optimizing FFTs Using Window Functions. National Instruments [online]. 2011 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/4844/en/>
- [19] Mechanical vibration. Answers [online]. c 2013 [cit. 2013-12-02]. Dostupné z: <http://www.answers.com/topic/mechanical-vibration>
- [20] GIERAS, Jacek F, Joseph Cho LAI a Chong WANG. Noise of polyphase electric motors. Boca Raton, FL: CRC/Taylor, 2006, 372 p., [4] p. of plates. ISBN 978-082-4723-811.
- [21] TechSoft Engineering, spol. s r.o. [online]. 2007 [cit. 2011-11-29]. ANSYS Workbench Entry Solver Product. Dostupné z WWW: <http://www.techsoft-eng.cz/služby/ANSYS_Multiphysics/ansys_workbench_entry_solver_product/>.
- [22] KOLÁŘ, Vladimír; NĚMEC, Ivan; KANICKÝ, Viktor. FEM : Principy a praxe metody konečných prvků. Praha : Computer Press, 1997. 401 s. ISBN 80-7226-021-9.
- [23] BLAHETA, Radim. MATEMATICKÉ MODELOVÁNÍ A METODA KONEČNÝCH PRVKU. In [online]. [s.l.] : [s.n.], 2011 [cit. 2011-11-29]. Dostupné z WWW: <http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mm_mkp_2011b.pdf>.
- [24] SVS FEM s.r.o. [online]. 2011 [cit. 2011-11-29]. Produkty firmy ANSYS Inc. Dostupné z WWW: <<http://www.svsfem.cz/content/produkty-firmy-ansys-inc>>.