

# 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

## **POSOUZENÍ A VYHODNOCENÍ BEZPEČNOSTI U EL. STROJŮ**

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

Bc. Lukáš Hromek



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## POSOUZENÍ A VYHODNOCENÍ BEZPEČNOSTI U EL. STROJŮ

ASSESSMENT AND EVALUATION OF SAFETY IN POWER MACHINES

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Hromek

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. František Veselka, CSc.

BRNO 2016

# Diplomová práce

Magisterský navazující studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**  
Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** Bc. Lukáš Hromek  
**Ročník:** 2

**ID:** 146834  
**Akademický rok:** 2015/16

## NÁZEV TÉMATU:

### Posouzení a vyhodnocení bezpečnosti u el. strojů

#### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou bezpečnosti a postupy při zlepšování životnosti u el. strojů.
2. Teoreticky ověřte vliv konstrukčního a materiálového provedení klece AM na jeho bezpečnost a životnost.
3. Prakticky analyzujte poskytnutý materiál z mimořádných událostí vybraných el. strojů.
4. Vyhodnoťte a okomentujte dosažené výsledky.

#### DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Cigánek, L.: Stavba elektrických strojů, SNTL Praha 1958, DT 621.313
2. Veselka, F., Valouch, V.: Laboratoře elektrických strojů a přístrojů, VUT v Brně, Akedemické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno 2006, ISBN 80-214-3333-7
3. Hudeczek, M.: Zvyšování spolehlivosti asynchronních elektromotorů včetně poháněcích strojů, Tiskárna Jelínek, s.r.o., Karviná, Vydavatelství a nakladatelství Hudeczek Service Albrechtice, září 2011, ISBN 978-80-905032-0-5
4. Odpovídající normy ČSN

**Termín zadání:** 21.9.2015

**Termín odevzdání:** 24.5.2016

**Vedoucí práce:** doc. Ing. František Veselka, CSc.

**Konzultant diplomové práce:**

**Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.,** předseda oborové rady

#### UPOZORNĚNÍ:

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

## **Abstrakt**

Tato práce je zaměřena na bezpečnost a zlepšování životnosti elektrických točivých strojů, především asynchronních motorů. Zahrnuje popis nejčastějších poruch el. strojů, stručný popis problematiky odlévání klece asynchronního motoru, analýzu poskytnutých vadných el. motorů s fotodokumentací. V poslední, praktické, části se práce zaměřuje na vibrodiagnostiku asynchronního motoru se simulovanou nevyváhou a ustavení stroje pomocí laseru.

## **Abstract**

This thesis is focused on the security and improving of electrical rotating machines service life, especially asynchronous motors. Work includes a description of the most common disorders, short description of the asynchronous motor cage casting, analysis of provided decommissioned motors with photo documentation. The last part of this thesis is focused to vibrodiagnostic of asynchronous motor with simulated imbalance and motor emplacement by laser.

## **Klíčová slova**

Bezpečnost; životnost; elektrický stroj; asynchronní motor; spolehlivost; proud; porucha; klec; analýza; vibrace.

## **Keywords**

Security; service life; electrical machine; asynchronous motor; reliability; current; disorder; cage; analysis; vibration.

## **Bibliografická citace**

HROMEK, L. *Posouzení a vyhodnocení bezpečnosti u el. strojů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 91 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. František Veselka, CSc..

## **Prohlášení**

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

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

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Františku Veselkovi, CSc., Ing. Mečislavu Hudeczkovi, Ph.D. a Ing. Leoši Kuchařovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne .....

Podpis autora .....

## Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM TABULEK .....</b>	<b>12</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>	<b>13</b>
<b>ÚVOD .....</b>	<b>14</b>
<b>1 PROBLEMATIKA BEZPEČNOSTI A POSTUPY PŘI ZAJIŠŤOVÁNÍ A ZLEPŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI U EL. STROJŮ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1 BEZPEČNOST .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 SPOLEHLIVOST ASYNCHRONNÍCH TOČIVÝCH STROJŮ .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 USTÁLENÝ BEZPORUCHOVÝ STAV TOČIVÝCH EL. STROJŮ.....</b>	<b>16</b>
1.3.1 PRINCIP ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....	16
1.3.2 BEZPORUCHOVÝ STAV TOČIVÝCH EL. STROJŮ.....	18
<b>1.4 ELEKTROMECHANICKÝ SYSTÉM.....</b>	<b>18</b>
1.4.1 TYPY KLEČÍ ASM .....	18
1.4.2 VZDUCHOVÁ MEZERA.....	19
1.4.3 VINUTÍ .....	20
1.4.4 VLIV TEPLoty NA STATOROVÉ PLECHY PŘI OPRAVÁCH POŠKOZENÝCH VINUTÍ.....	20
<b>1.5 MOŽNÉ PORUCHOVÉ STAVY TOČIVÝCH EL. STROJŮ .....</b>	<b>21</b>
1.5.1 HLUK A VIBRACE .....	21
1.5.2 DYNAMICKÉ NAMÁHÁNÍ.....	25
1.5.3 IZOLACE.....	25
1.5.4 SVORKOVNICE .....	26
1.5.5 PŘERUŠENÉ ROTOROVÉ VINUTÍ .....	27
1.5.6 NESOUMĚRNÉ NAPÁJENÍ .....	28
1.5.7 OTEPLENÍ.....	28
1.5.8 VLIV FREKVENČNÍCH MĚNIČŮ NA ASYNCHRONNÍ MOTORY .....	29
1.5.9 LOŽISKA.....	29
1.5.10 LOŽISKOVÉ PROUDY .....	31
<b>2 VLIV KONSTRUKČNÍHO A MATERIÁLOVÉHO PROVEDENÍ KLECE ASYNCHRONNÍHO MOTORU NA JEHO BEZPEČNOST A ŽIVOTNOST .....</b>	<b>33</b>
<b>2.1 ODLÉVÁNÍ ROTOROVÉ KLECE ASM.....</b>	<b>35</b>
<b>3 ANALÝZA POSKYTNUTÝCH VZORKŮ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT EL. STROJŮ S EXISTUJÍCÍMI VADAMI .....</b>	<b>37</b>
<b>3.1 NEÚPLNĚ ODLITÉ KLECE .....</b>	<b>37</b>
3.1.1 KLEČ ASYNCHRONNÍHO MOTORU .....	37
3.1.2 KLEČ RELUKTANČNÍHO MOTORU .....	38
<b>3.2 MEZIZÁVITOVÝ ZKRAT .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3 VADNÝ STATOROVÝ PLECH .....</b>	<b>40</b>
<b>3.4 ZADŘENÉ LOŽISKO.....</b>	<b>41</b>
<b>3.5 POŠKOZENÍ VINUTÍ STATORU RÁZOVOU VLNOU.....</b>	<b>42</b>



<b>3.6 PŘERUŠENÉ STATOROVÉ VINUTÍ.....</b>	<b>44</b>
<b>3.7 PŘEHŘÍVAJÍCÍ SE MOTOR .....</b>	<b>45</b>
<b>3.8 MEZIFÁZOVÝ ZKRAT .....</b>	<b>46</b>
<b>3.9 PRASKLÁ ROTOROVÁ KLEC.....</b>	<b>47</b>
<b>3.10 ELEKTROEROZIVNÍ POŠKOZENÍ HŘÍDELE.....</b>	<b>48</b>
<b>3.11 VLIV NESPRÁVNĚ PROVEDENÉ ANALÝZY FREKVENČNÍCH SPEKTER.....</b>	<b>49</b>
<b>3.12 PROTOKOL O POSOUZENÍ PŘÍČIN NADMĚRNÝCH VIBRACÍ A OTEPLENÍ POHONU ČERPADLA...53</b>	
<b>4 VYHODNOCENÍ A ZOBECNĚNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ .....</b>	<b>57</b>
<b>4.1 OVĚŘENÍ VLIVU VELIKOSTI NEVÝVAHY NA VIBRACE STROJE .....</b>	<b>57</b>
4.1.1 POSTUP A PŘÍPRAVA MĚŘENÍ V LABORATOŘI .....	61
4.1.2 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ .....	65
4.1.3 POUŽITÉ STROJE A PŘÍSTROJE .....	69
<b>4.2 DIAGNOSTIKA A USTAVENÍ SOUSTROJÍ ČERPADLA VT5 .....</b>	<b>70</b>
4.2.1 USTAVENÍ MOTORU .....	71
4.2.2 VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	73
<b>5 ZÁVĚR.....</b>	<b>77</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>78</b>
<b>6 PŘÍLOHY .....</b>	<b>80</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 1: Momentová charakteristika asynchronního stroje pro všechny možné funkční stavy ASM</i> .....	17
<i>Obrázek 2: Typy klecí asynchronních motorů [11]</i> .....	19
<i>Obrázek 3: Princip měření řádu kmitání <math>r</math> [1]</i> .....	24
<i>Obrázek 4: Deformace statoru vlivem deformačních sil způsobujících kmity řádu <math>r = 0</math> až <math>r = 4</math> [10]</i> .....	25
<i>Obrázek 5: Zkrat ve vinutí stejné fáze v čele statoru [8]</i> .....	26
<i>Obrázek 6: Svorkovnice s odfuky po zkratové zkoušce 675 MVA, 0,25 s</i> .....	27
<i>Obrázek 7: Poloha čepu v ložisku při různých otáčkách</i> .....	30
<i>Obrázek 8: Ložisko pro vyšší soustřednost čepu</i> .....	31
<i>Obrázek 9: Poškození ložiskovými proudy na vnějším kroužku</i> .....	32
<i>Obrázek 10: Silové působení mezi vodiči</i> .....	33
<i>Obrázek 11: Znázornění závislosti relativní permeability na magnetické indukci</i> .....	34
<i>Obrázek 12: Zkouška rotorových tyčí pomocným magnetickým obvodem</i> .....	35
<i>Obrázek 13: Vzorek č. 1 – Neúplně odlitá klec ASM</i> .....	37
<i>Obrázek 14: Vzorek č. 2 – Neúplně odlitá klec reluktančního motoru</i> .....	38
<i>Obrázek 15: Vzorek č. 3 – Mezifázový zkrat</i> .....	39
<i>Obrázek 16: Vzorek č. 4 – Mezifázový zkrat</i> .....	39
<i>Obrázek 17: Vzorek č. 5 – Ohnutý statorový plech</i> .....	40
<i>Obrázek 18: Vzorek č. 6 – Zadřené ložisko</i> .....	41
<i>Obrázek 19: Vzorek č. 7 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou</i> .....	42
<i>Obrázek 20: Vzorek č. 7 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou – detail vinutí – v tomto případě není poškození viditelné okem</i> .....	42
<i>Obrázek 21: Vzorek č. 8 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou</i> .....	43
<i>Obrázek 22: Vzorek č. 8 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou – detail vinutí – v tomto případě není poškození viditelné okem</i> .....	43
<i>Obrázek 23: Vzorek č. 9 – Přerušené statorové vinutí</i> .....	44
<i>Obrázek 24: Vzorek č. 10 - Přehřívající se stator</i> .....	45
<i>Obrázek 25: Vzorek č. 10 - Přehřívající se stator – čelo vinutí</i> .....	45
<i>Obrázek 26: Vzorek č. 11 – Mezifázový zkrat</i> .....	46
<i>Obrázek 27: Vzorek č. 11 – Mezifázový zkrat – detail vinutí</i> .....	46
<i>Obrázek 28: Vzorek č. 12 – Prasklý zkratovací kruh rotoru ASM [18]</i> .....	47
<i>Obrázek 29: Vzorek č. 13 - Elektroerozivní poškození hřídele [18]</i> .....	48

<i>Obrázek 30: Frekvenční spektrum měřícího bodu diagnostikovaného motoru [18]</i> .....	49
<i>Obrázek 31: Detail změřeného frekvenčního spektra [18]</i> .....	50
<i>Obrázek 32: Vzorek č. 15 - Poškozená izolace odporníku [18]</i> .....	50
<i>Obrázek 33: Vzorek č. 15 - Upadený odporový plech [18]</i> .....	51
<i>Obrázek 34: Vzorek č. 15 - Zkratovaný odporník upadeným plechem [18]</i> .....	51
<i>Obrázek 35: Rozmístění měřících bodů na soustrojí [18]</i> .....	54
<i>Obrázek 36: Průběh teploty na ložisku motoru [18]</i> .....	54
<i>Obrázek 37: Průběh teploty na ložisku čerpadla [18]</i> .....	55
<i>Obrázek 38: Zkušební kotouč nasunutý na hřídeli motoru</i> .....	58
<i>Obrázek 39: Rozmístění otvorů pro závaží na zkušebním kotouči</i> .....	58
<i>Obrázek 40: Zvolená nevyváha</i> .....	58
<i>Obrázek 41: Ověření deformace zkušebního kotouče</i> .....	59
<i>Obrázek 42: Ukotvení zkoušeného motoru k základové desce</i> .....	61
<i>Obrázek 43: Schéma zapojení pracoviště</i> .....	62
<i>Obrázek 44: Zkušební pult</i> .....	62
<i>Obrázek 45: Synchronní generátor použitý pro napájení zkoušeného motoru</i> .....	63
<i>Obrázek 46: Vypínač a obvody pro měření elektrických veličin zkoušeného motoru</i> .....	63
<i>Obrázek 47: Soustava inkriminovaného soustrojí</i> .....	70
<i>Obrázek 48: Instalace ustavovacího přípravku</i> .....	71
<i>Obrázek 49: Laserové ustavení stroje</i> .....	72
<i>Obrázek 50: Měřící body pro měření vibrací</i> .....	73
<i>Obrázek 51: Frekvenční spektrum vibrací nezatíženého motoru bez střídače v bodě L2V [18]</i> ...	75
<i>Obrázek 52: Frekvenční spektrum vibrací zatíženého motoru bez střídače v bodě L2V [18]</i> .....	75
<i>Obrázek 53: Frekvenční spektrum vibrací zatíženého motoru se střídačem v bodě L2V [18]</i> .....	76
<i>Obrázek 54: Frekvenční spektra vibrací motoru bez kotouče pro různé napájecí frekvence</i> .....	80
<i>Obrázek 55: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 45 Hz a různé nevyváhy</i>	81
<i>Obrázek 56: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 47,5 Hz a různé nevyváhy</i> .....	82
<i>Obrázek 57: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 50 Hz a různé nevyváhy</i>	83
<i>Obrázek 58: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 52,5 Hz a různé nevyváhy</i> .....	84
<i>Obrázek 59: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 55 Hz a různé nevyváhy</i>	85
<i>Obrázek 60: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 45 Hz a různé nevyváhy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4</i> .....	86

<i>Obrázek 61: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 47,5 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4.....</i>	<i>87</i>
<i>Obrázek 62: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 50 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4.....</i>	<i>88</i>
<i>Obrázek 63: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 52,5 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4.....</i>	<i>89</i>
<i>Obrázek 64: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 55 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4.....</i>	<i>90</i>

## SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 1: Štítkové parametry měřeného motoru [18] .....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 2: Štítkové údaje elektromotoru a čerpadla [18] .....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 3: Parametry zkoušeného stroje .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabulka 4: Hmotnosti jednotlivých závaží .....</i>	<i>59</i>
<i>Tabulka 5: Vychýlení okraje kotouče v závislosti na pootočení hřídele .....</i>	<i>60</i>
<i>Tabulka 6: Vypočtené a naměřené otáčky a frekvence motoru .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 7: Vypočítané velikosti odstředivé síly působící na jednotlivá závaží .....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 8: Naměřené hodnoty veličin na motoru .....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 9: Naměřené hodnoty veličin na motoru při změně polohy nevývahy o 180° .....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 10: Použité stroje a přístroje .....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 11: Parametry soustrojí [18] .....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 12: Hodnocení technického stavu stroje podle ISO 10816 a podnikových směrnic Hudeczek Service, s.r.o. [18] .....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 13: Naměřené hodnoty vibrací [18] .....</i>	<i>74</i>

## SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

ASM	Asynchronní motor
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
B [T]	Magnetická indukce
$\mu$ [Hm <sup>-1</sup> ]	Permeabilita
Z <sub>T</sub> [Ω]	Impedance lidského těla
U [V]	Napětí
I [A]	Elektrický proud
I <sub>r</sub> [A]	Proud rotoru
R <sub>r</sub> [Ω]	Odpor vinutí rotoru
f <sub>r</sub> [Hz]	Kmitočet otáčení rotoru
f <sub>s</sub> [Hz]	Kmitočet otáčení statorového magnetického pole
t [s]	Čas
n <sub>s</sub> [min <sup>-1</sup> ]	Synchronní otáčky
p	Počet pólů
N	Počet závitů
k <sub>v</sub>	Činitel vinutí
s	Skluz
M [Nm]	Moment
ΔP [W]	Ztráty
P <sub>δ</sub> [W]	Výkon přestupující přes vzduchovou mezeru motoru
ω [rad.s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
α [°]	Úhel natočení rotoru
m	Počet fází
q	Počet drážek na pól a fázi
Q	Počet drážek statoru
PWM	Pulzně šířková modulace

## ÚVOD

Tato diplomová práce je zaměřena na bezpečnost a analýzu poruch točivých elektrických strojů, zejména asynchronních motorů. Toto téma je stále aktuálnější díky současnému trendu zvyšování výkonu strojů téměř na hranice jejich technických možností. Cílem práce je seznámení se s definicí bezpečnosti, principem asynchronního motoru, jeho ustáleným bezporuchovým stavem, jeho posouzením jako elektromechanického systému s ohledem na vlivy, které ovlivňují chod stroje a diagnostikou poruch el. točivých strojů po teoretické i praktické stránce u vybraných jevů, které se v nich mohou vyskytovat, s jejich možnými příčinami a následky. V praktické části diplomové práce budou analyzovány poskytnuté vzorky poškozených motorů. Zobecněné poznatky a zkušenosti budou použity pro analýzu závislosti velikosti vibrací na hmotnosti simulované nevyváhy v laboratorních podmínkách. Následně bude, na základě těchto poznatků, provedeno ustavení pohonu čerpadla pomocí laseru a provedena vibrodiagnostika čerpadla v místě jeho provozu. Na základě výsledků vibrodiagnostiky je totiž možné odhalit velké množství závad na el. točivých strojích a včas předejít náhlé poruše stroje, což se je výhodné v technické praxi například ve výrobě u strojů první důležitosti.

# 1 PROBLEMATIKA BEZPEČNOSTI A POSTUPY PŘI ZAJIŠŤOVÁNÍ A ZLEPŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI U EL. STROJŮ

## 1.1 Bezpečnost

V každé oblasti lidské činnosti je nejprve nutné definovat základní pojmy, aby nedocházelo k nedorozuměním. Stejně tak je tomu i v případě bezpečnosti. Nároky na zajišťování bezpečnosti v elektrotechnice se vyvíjely po řadu desetiletí a dnes bezpečnost tvoří ucelený obor, který zahrnuje zkušebnictví, výzkum, bezpečnostní předpisy, dozorčí činnost nebo soubor sankcí při nesplnění bezpečnostních předpisů. Přesné definice bezpečnosti lze dosáhnout těžko, protože konkrétně bezpečnost elektrických zařízení zahrnuje velké množství činitelů, které se mění ve vzájemných vztazích a s časem. Obecně lze ale bezpečnost definovat jako: „Schopnost nepůsobit škodu.“ Může jít o škody způsobené elektrinou přímo, nebo nepřímo. Přímými škodami se lidé zabývali postupně s vývojem elektrotechniky, což je například škoda na zdraví osob a zvířat nebo škoda na majetku v důsledku přímých účinků el. proudu, požáru, výbuchu, atd až po vývoj zařízení s citlivými obvody jako jsou procesory a jiné prvky náchylné na rušení nebo zničení se nepřímé účinky začaly více sledovat. Tyto citlivé prvky by svým selháním mohly mít za následek například selhání zabezpečovacích zařízení nebo chybnou funkci datových zařízení. Nepřímým účinkům elektrické energie je dnes věnována stejná, ne-li větší pozornost jako účinkům přímým. [5]

Zákon č. 102/2001 Sb. rozlišuje elektrická zařízení z hlediska jejich bezpečnosti jako:

- Bezpečný výrobek, který za běžných a předvídatelných podmínek užití nepředstavuje po dobu obvyklé použitelnosti pro své okolí žádné nebo pouze minimální nebezpečí újm na zdraví osob za předpokladu správného používání výrobku. Za bezpečný výrobek se tedy považuje zařízení, které splňuje požadavky kladené zvláštním právním předpisem a mezinárodními smlouvami. V případě, že je na trh uváděno el. zařízení, které nespĺňuje tento právní předpis, musí splňovat alespoň požadavky dané v českých technických normách nebo musí odpovídat vědeckým a technickým poznatkům, které jsou v době uvedení na trh známy.
- Nebezpečný výrobek naopak nespĺňuje výše uvedené požadavky na bezpečný výrobek. [6]

## 1.2 Spolehlivost asynchronních točivých strojů

Bezpečnost elektrických strojů souvisí se spolehlivostí a bezpečností systému, ve kterém stroj pracuje. Obecně vzato se elektrotechnické výrobky nebo systémy skládají z množství komponent. Každá komponenta má svoji životnost a platí, že čím je systém složitější, tím je větší pravděpodobnost výskytu poruchy, která může mít za následek omezení funkce nebo disfunkčnost celého systému. Z toho důvodu je při návrhu zařízení nutné znát i údaje popisující bezporuchovost součástky, kterou hodlá projektant použít. Každá komponenta má poruchovost jinou a mělo by být možné zjistit tyto údaje od výrobce komponenty nebo jiného důvěryhodného zdroje. Tyto údaje se ovšem mohou lišit v závislosti na typu provozu a provozních podmínkách,



ve kterých daná součástka pracuje a projektant by měl znát pravidla pro převod těchto údajů do podoby odpovídající provozním podmínkám, pro které navrhuje zařízení. Aby měl projektant možnost porovnat bezporuchovost součástky, měla by být bezporuchovost dána následujícími údaji:

- intenzitou poruch,
- podmínkami stanovení intenzity poruch,
- kritérii poruch,
- množstvím hodnot sledovaných v provozu zařízení,
- věrohodností těchto údajů. [7]

Bezporuchovost je dána provedením součástky, použitím, provozními podmínkami a jejím namáháním, ať už vnějšími nebo vnitřními vlivy. Pokud jde o motory, opotřebení a s tím spojená poruchovost narůstá s časem. Z toho důvodu se zároveň se střední intenzitou poruch systému udává i časový interval, pro který je střední hodnota intenzity poruch platná. [7]

Při návrhu asynchronního stroje musí konstruktér respektovat právě spolehlivost všech částí stroje (jako je stator, rotor, magnetický obvod, ložiska, ukotvení, vinutí statoru i rotoru, mazání ložisek, izolační systém, chlazení, vibrace, hluk nebo hřídelové proudy). Při výrobě je nesmírně důležité dodržovat tolerance obrábění, protože přesnost má velký vliv na rozložení vzduchové mezery, čímž je ovlivněna i symetrie elektromagnetického pole ve vzduchové mezeře. Další důležitou částí stroje je magnetický obvod. Je složen ze vzájemně elektricky izolovaných plechů, jejichž výroba je technologicky poměrně náročná ať už po stránce dodržení tloušťky, přesnosti stříhání, nebo materiálu, ze kterého je plech vyroben. Spolehlivost je závislá také na údržbě stroje v průběhu doby jeho technického života. [7]

### **1.3 Ustálený bezporuchový stav točivých el. strojů**

Různé druhy motorů mívají své specifické závady. Po konzultaci a zvážení jsem se rozhodl problematiku bezpečnosti aplikovat zejména na asynchronní motory vzhledem k tomu, že mají široké zastoupení v technické praxi a také z důvodu rozsáhlosti této problematiky.

#### **1.3.1 Princip asynchronního motoru**

Asynchronní motor je nejjednodušší a v současné době i nejpoužívanější elektrický točivý stroj, který se s napájením přímo ze sítě používal v aplikacích, které nevyžadovaly změny otáček. Po rozšíření frekvenčních měničů se začal používat v kombinaci s měničem i v aplikacích, kde je vyžadována změna otáček.

Konstrukce asynchronního motoru je velmi jednoduchá. Stator je tvořen plechy a trojfázovým statorovým vinutím, které je uloženo do drážek na vnitřním obvodu statoru. Plechy jsou vzájemně elektricky izolované, aby se snížily ztráty vířivými proudy. Rotor stroje je také kvůli ztrátám složen z plechů s drážkami po obvodu, do kterých se ukládá rotorové vinutí. Rotor se provádí dvojího typu. Je to rotor s kotvou nakrátko, které má v drážkách rotoru umístěny rotorové tyče spojené do klece. Touto klecí za chodu motoru teče zkratový proud vyvolaný napětím indukovaným od statoru. Druhým typem rotoru je kroužkový rotor, ve kterém je uloženo trojfázové vinutí vyvedené pomocí kroužků mimo rotor, kde je možné měnit rotorový odpor

zařazením nebo vyřazením odporů. Toto provedení vyžaduje přítomnost sběracího ústrojí s nímž je spojena náročnější údržba, možné rušení okolí, atd.

Asynchronní motor pracuje vlastně na principu transformátoru, kde primární vinutí představuje stator a sekundární vinutí zase rotor. Při připojení na síť 50 Hz se ve statoru vytvoří točivé magnetické pole, které působí na rotor a indukuje v něm napětí. Toto točivé magnetické pole má synchronní rychlost otáčení:

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (1-1)$$

kde  $f$  je frekvence sítě a  $p$  je počet pólových dvojic. Indukované napětí v rotoru je dáno vztahem:

$$U_i = 4,44\Phi \cdot f \cdot N \cdot k_v \quad (1-2)$$

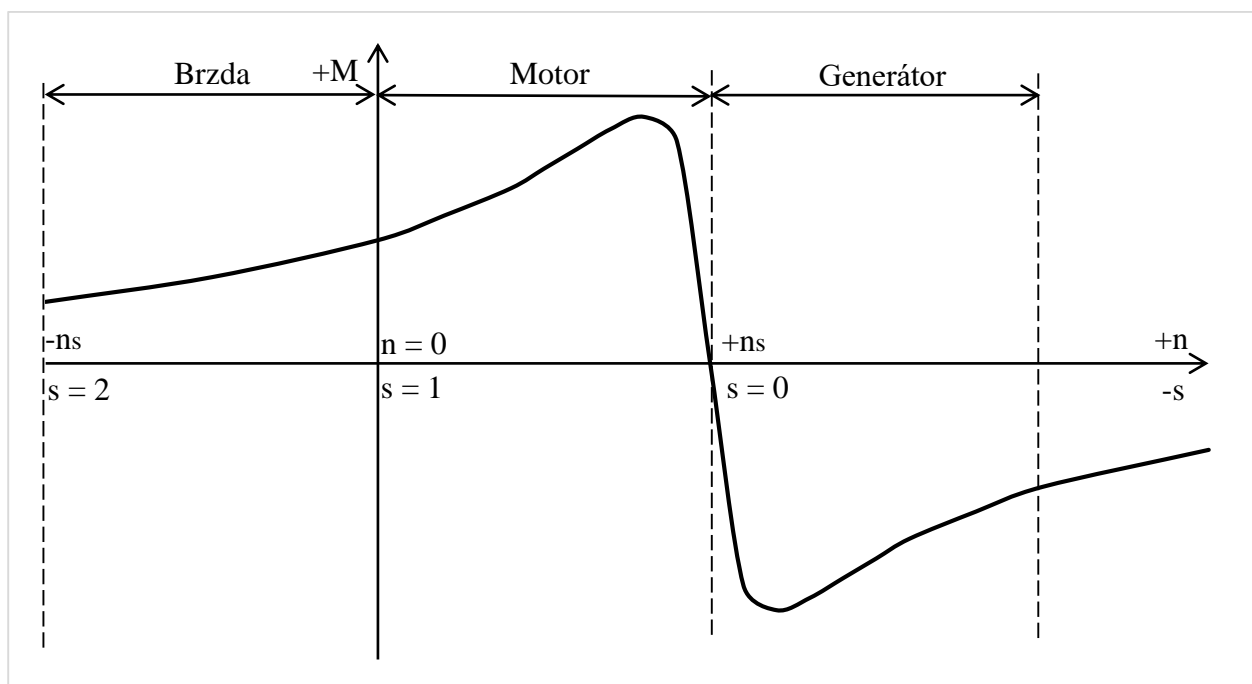
kde  $\Phi$  je magnetický tok ve vzduchové mezeře,  $f$  je rozdíl frekvencí statoru a rotoru,  $N$  je počet závitů a  $k_v$  je činitel vinutí. Při nulových otáčkách rotoru, tedy například při rozběhu, je rozdíl frekvencí rotoru a statoru maximální, tedy 50 Hz a v rotoru teče maximální proud, tzv. rozběhový proud. Na vodič protékající proudem v magnetickém poli působí síla dle Lenzova zákona, která ho má tendenci vychýlit, proto se rotor začne otáčet. Čím rychleji se rotor otáčí, tím menší je rozdíl frekvencí v rotoru a statoru, tím menší proud teče rotorem a působí na rotor menší síla. Zavádí se pojem skluz, který charakterizuje rozdíl otáčení rotoru a synchronních otáček točivého pole statoru:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (1-3)$$

kde  $n_s$  jsou synchronní otáčky točivého pole statoru a  $n_r$  jsou otáčky rotoru. Frekvence proudu tekoucího rotorem je dána skluzem:

$$f_r = f_s \cdot s \quad (1-4)$$

kde  $f_s$  je frekvence proudu statoru a  $f_r$  je rotorová frekvence.



Obrázek 1: Momentová charakteristika asynchronního stroje pro všechny možné funkční stavy  
ASM

Pokud by se rotor točil synchronními otáčkami, tedy skluz by byl nulový, tak by vinutí rotoru i statoru mělo vůči sobě nulovou relativní rychlost a rotorem by neprocházel proud, protože by nedocházelo k časové změně magnetického pole působícího na rotor, nedocházelo by k indukci napětí v rotoru a netekl by proud, který je důležitý pro tvorbu momentu. Z toho plyne, že se asynchronní motor, ze svého principu, nemůže nikdy točit synchronními otáčkami, ale vždy otáčkami nižšími než  $n_s$ . Moment motoru je závislý na výkonu  $P_\delta$  přenášeném přes vzduchovou mezeru a úhlové rychlosti  $\omega$ :

$$M = \frac{P_\delta}{\omega} = \frac{P_1 \cdot s}{\frac{2\pi \cdot n_s}{60}} \quad (1-5)$$

Jak je vidět v momentové charakteristice, asynchronní stroj může pracovat ve třech režimech. Je to brzdňný, motorický a generátorický režim.

### 1.3.2 Bezporuchový stav točivých el. strojů

Bezporuchovým stavem motoru rozumíme takový stav stroje, který je napájen sinusovým napětím, bez parazitních vyšších harmonických, díky kterému ve stroji nezvnikají proudové a momentové rázy a izolační systém není namáhán velkou strmostí  $du/dt$ . Mezi další požadavky na bezporuchový chod patří i minimální vibrace stroje. To souvisí s minimální excentricitou, rovnou hřídelí, pokud možno nejmenší nevyvážeností stroje, správnou volbou ložisek, správné uložení stroje, atd. Bezporuchovost je spojena také s namáháním stroje. Pokud je stroj přetěžován, odebírá velké proudy a ty způsobí nadměrné oteplení stroje, což je opět nežádoucí pro použitou izolaci, průhyb hřídele a další části stroje. Pro každou aplikaci by měl být motor dostatečně nadimenzován. Dnes se většina zařízení provozuje na hranici svých technických možností tak, aby se ušetřil materiál na výrobu, což se často negativně projevuje na spolehlivosti a životnosti stroje. S tím souvisí odpovídající chlazení a povrchová úprava pláště motoru. Motory provozované v oblasti jmenovitých otáček jsou dostatečně chlazeny vlastním ventilátorem stroje. Pokud by ale byl motor provozován v nízkých otáčkách, je třeba instalovat cizí chlazení. Povrchovou úpravou je myšleno například lakování stroje. Jsou známy případy, kdy byl motor nalakován bílou lesklou barvou kvůli desingu a udělání dojmu na zákazníka, ale motor se díky malé emisivitě povrchu přehříval. Dalším aspektem jsou kvalitní materiály a přesné opracování s dodržением minimálních odchylek od výrobního prototypu.

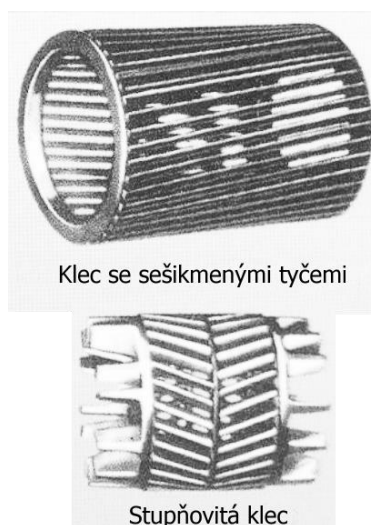
## 1.4 Elektromechanický systém

Elektromechanický systém se skládá z mechanické části, elektrické části, vzduchové mezery a minimálně dvou vinutí, jedno na statoru a druhé na rotoru, které může být nahrazeno permanentním magnetem. V rámci této práce a s ohledem na četnost poruch se budu zabývat pouze vybranými částmi elektromechanického systému.

### 1.4.1 Typy klecí ASM

Asynchronní motory s kotvou nakrátko se vyrábí s různými typy klecí, které se liší tvarem tyčí a jejich délkou. Abychom dosáhli stoupající momentové charakteristiky od rozběhu motoru a omezení vzniku tzv. sedel v této charakteristice, je třeba realizovat rotor s rozdílným počtem

drážek než je počet drážek na statoru. Dále se rotorové drážky dělají šikmo nebo stupňovitě, jak je znázorněno na obrázku. [11]



Obrázek 2: Typy klecí asynchronních motorů [11]

Materiál, ze kterých se klece vyrábí, tvoří například slitiny hliníku, které mají větší odpor než měď, čímž se dosáhne menšího rozběhového proudu při současném zvětšení rozběhového momentu. Těchto výhodných vlastností se dosahuje u hlubokých drážek s dvojitou klecí, kdy je proud při rozběhu vytlačován do vnější klece s větším odporem, čímž se při rozběhu zvýší moment a klesne rozběhový proud. Využívá se obdoby skin efektu. Díky snížení rozběhového proudu má proud větší činnou složku a menší fázový posun rozběhového proudu rotoru za magnetickým tokem potom dosahujeme větších silových účinků. [11]

## 1.4.2 Vzduchová mezera

V točivém stroji je mezi statorom a rotorem vždy přítomna vzduchová mezera, ve které se vytváří žádané magnetické pole působící na vodiče rotoru. Vzduch klade magnetickému toku podstatně větší magnetický odpor než magnetický obvod stroje, proto se při přibližných výpočtech může magnetický odpor plechů zanedbat. Při návrhu stroje se volí vzduchová mezera co nejmenší s ohledem na maximální moment a minimální rozptyl, ale nesmí se zvolit moc malá kvůli excentricitám, deformacím jha, atd. [9]

### 1.4.2.1 Vliv nesymetrie vzduchové mezery na činnost elektromotoru

Mezi statorom a rotorem působí za chodu motoru radiální síly, jejichž velikost je dána mimo jiné i velikostí vzduchové mezery. Čím bude vzduchová mezera menší, tím bude radiální síla větší a naopak. V případě, že máme nesymetrickou vzduchovou mezera, jsou radiální síly po obvodu mezery různé, což může za chodu stroje způsobit vibrace stroje. Nesymetrii vzduchové mezery způsobuje například excentricita rotoru. Podle [10] bude průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře excentrického stroje daný rovnicí

$$B(\alpha, t) = B_p \{ \cos(p\alpha - \omega t) + \varepsilon \cos[(p \pm 1)\alpha - (\omega \pm \omega_\varepsilon)t] \} \quad (1-6)$$

kde  $B_p$  je amplituda magnetické indukce pro pracovní harmonickou,  $\omega$  je úhlová rychlost otáčení stroje,  $\omega_\varepsilon$  je úhlová rychlost rotoru při dynamické excentricitě,  $\varepsilon$  je excentricita,  $p$  je řád harmonické a  $\alpha$  je úhel natočení rotoru. Pokud se jedná o statickou excentricitu, tak je  $\omega_\varepsilon = 0$ .

Kmitočet vibrací, v důsledku excentrické vzduchové mezery, je dvojnásobný proti frekvenci otáčení rotoru. To způsobuje kmitání řádu  $r = 1$  [7][10].

Dalším důvodem nesymetrie vzduchové mezery může být deformace vzduchové mezery v důsledku radiálních sil, které způsobují periodické deformace jha statoru. Tato skutečnost způsobuje vibrace stroje podobně jako excentricita, ale jedná se již o kmitání řádu  $r = 2$  [10].

### 1.4.3 Vinutí

Statorové vinutí střídavých točivých strojů se prování jako třífázové s konci vyvedenými do svorkovnice. Vinutí je uloženo v drážkách statoru, odtud vede přes čelo statoru do následující drážky. Pro vytvoření vhodného magnetického pole platí při návrhu počtu drážek a uložení cívek určitá pravidla. Má-li stroj  $m$ -fázové vinutí s  $2p$  pólů a  $Q$  drážek statoru, potom bude počet drážek na pól a fázi roven:

$$q = \frac{Q}{2p \cdot m} \quad (1-7)$$

Pokud vychází počet drážek na pól a fázi  $q$  celé číslo, jde o vinutí pravidelné, pokud  $q$  není celé číslo, jde o vinutí zlomkové. Dále rozeznáváme vinutí jednovrstvé a dvouvrstvé, podle toho, kolik cívkových stran je uloženo v jedné cívce. Statorové vinutí je prakticky stejné u synchronních i asynchronních motorů a je řešeno jako dvouvrstvé, tedy v jedné drážce jsou dvě cívkové strany různých fází. Toto provedení je výhodné z pohledu elektromagnetických vlastností statoru. Dále existuje vinutí smyčkové a vlnové. Smyčkové vinutí se používá u strojů s menším výkonem a malým počtem pólů z důvodu složitosti zapojení cívek na čelech stroje. Vlnové vinutí je z hlediska konstrukce jednodušší, proto je využíváno u velkých strojů s větším počtem pólů. Cívky mohou být ve vinutí spojeny sériově nebo paralelně, podle potřeby. Ve speciálních a ne tak rozšířených případech se lze setkat s jednofázovým, nebo dvoufázovým asynchronním strojem. [7][9]

Rotorové vinutí se u asynchronních strojů provádí dvojího typu. Jak je již v této práci zmíněno, je to asynchronní stroj s kotvou nakrátko, nebo vinutou kotvou. Kotva nakrátko se vyznačuje tím, že proudovodná dráha rotoru je složena z tyčí, které jsou uloženy v drážkách rotoru a na koncích spojeny nakrátko kruhy. Vinutá kotva má v drážkách navinutý vodič, pomocí něhož je proud rotoru vyveden před sběrací kroužky mimo stroj a umožňuje například změnu rotorového odporu při rozběhu. Toto provedení je ovšem náročnější na údržbu a nemůže být použito ve výbušném prostředí. Vinutý rotor se používá také u synchronních strojů, kde je přes sběrací kroužky rotor buzen stejnosměrným proudem, aby se choval jako elektromagnet, který je otáčen synchronně s točivým polem statoru. Pro menší synchronní motory se používá kotva s permanentními magnety místo vinutí.

### 1.4.4 Vliv teploty na statorové plechy při opravách poškozených vinutí

Kvalita statorových plechů má také vliv na chování stroje. Plechy mají výrobcem zaručené magnetické vlastnosti pouze do určité teploty. Stejně jako magnety ztrácí své dobré magnetické vlastnosti při překročení Curieho teploty, také plechy v elektrických strojích ztrácí požadované magnetické vlastnosti při nadměrném oteplení. Nevhodné oteplení může nastat při opravě

poškozeného vinutí, kdy je třeba vinutí vyndat z drážky. Vinutí je v drážce uloženo a připevněno pomocí impregnačního laku. Tento lak je třeba zahřát na určitou minimální teplotu měknutí, která je ale blízko teplotě, kdy plechy ztrácí své požadované magnetické vlastnosti. Při nevhodné metodě prohřívání může také dojít k lokálním změnám magnetických vlastností plechů. To může nastat například při prohřívání hořáky, které způsobí lokální přehřátí a tím nesymetrii magnetických vlastností v objemu plechu. Motor poté pracuje se sníženým momentem a většími magnetickými ztrátami. [7]

## 1.5 Možné poruchové stavy točivých el. strojů

Jak již bylo zmíněno dříve, z důvodů míry používání v technické praxi a rozsáhlosti problematiky, se v práci zabývám zejména asynchronními motory, mezi jejichž časté poruchové stavy patří například zvýšená míra vibrací a hluku, dynamické namáhání, poruchy vinutí a ložisek, svorkovnice atp.

### 1.5.1 Hluk a vibrace

Zdrojů hluku, nejen v průmyslu, stále přibývá a je známo, že hluk je pro člověka škodlivý. Proto je nutné s hlučností stroje počítat již ve fázi jeho návrhu. Měřením hluku a vibrací stroje lze odhalit většinu možných mechanických závad stroje. Proto je měření vibrací jednou z nejčastějších metod analýzy závad na točivých el. strojích.

#### 1.5.1.1 Mechanické příčiny vibrací točivých elektrických strojů

V důsledku toho, že neumíme vyrobit absolutně vyvážený točivý stroj, usadit jeho části přesně do poloh, které předpokládá teorie, vyrábět s nulovou tolerancí, atd, budou točivé stroje vždy zdrojem vibrací. Proto je důležité sledovat odchylky od velikosti a charakteru vibrací, které odpovídají kvalitnímu stroji.

První příčinou vibrací je nevyváženost stroje. Je způsobena nehomogenitou materiálu stroje, ale ne vždy je považována za škodlivou. Například u klikových hřídelí může být nevyváženost záměrem konstruktéra. Naopak u rotačních strojů se projevuje materiálová nevyváženost s nežádoucími vibracemi, protože zde vznikají odstředivé síly, které nutí rotor následovat směr, kterým se v daném okamžiku pohybuje těžší část rotoru vzhledem ke vzdálenosti od osy rotace. Tyto vibrace se neprojevují pouze v rotoru, ale přenáší se na stator a tím na celou konstrukci, ke které je stroj připevněn. Nevyváženost se projevuje pouze při chodu stroje a je důležité ji sledovat a správně určit její druh také z důvodu existence vlastní rezonance stroje. Pokud by byl točivý stroj provozován v otáčkách blízkých vlastní rezonanční frekvenci, mohly by vibrace významně přispět ke vzniku rezonance a k možné havárii stroje v důsledku neúnosně velkých amplitud mechanických kmitů. Rezananční, kritické, otáčky pro hřídel jsou dány tímto vztahem:

$$\omega = 2\pi \cdot f_{kr} = \sqrt{\frac{k_z}{m_z}} \quad (1-8)$$

kde  $k_z$  je náhradní tuhost soustavy a  $m_z$  je náhradní hmota soustavy. [7]

Nevyváženost se dělí na několik druhů podle amplitudy a fáze vibrací.

- Statická nevyváženost je stav, kdy je ve vzdálenosti  $r$  od osy rotace umístěna přídavná hmota o hmotnosti  $m_h$ . Tato přidaná hmota způsobuje vibrace, které je možno měřit na

ložiscích. Frekvence kmitů přenášených do okolí stroje odpovídá frekvenci otáčení rotoru podle:

$$f_k = \frac{n}{60} = \frac{\omega_0}{2\pi}. \quad (1-9)$$

- Momentová nevyváženost znamená, že jsou v rotoru dvě místa s nevyváženou hmotou, která jsou symetricky vzdálená od těžiště rotoru podle osy otáčení a zároveň jsou ve stejné vzdálenosti  $r$  od osy otáčení. Na jednotlivých ložiscích tedy vznikají kmity otočenou fází o  $180^\circ$ . Osa setrvačnosti prochází těžištěm rotoru.
- Kvazistatická nevyváženost je podobná momentové nevyváženosti, ale osa setrvačnosti vede mimo těžiště rotoru. Jinými slovy, nevyvážená hmota je uložena kdekoli v objemu rotoru kromě osy otáčení rotoru. Na ložiskových stojanech se potom objevují vibrace se stejnou fází, ale různými velikostmi výchylek.
- Dynamická nevyváženost znamená, že osa setrvačnosti není stabilní vůči ose otáčení rotoru. Velikosti výchylek vibrací jsou na ložiskových stojanech proměnlivé a fázově posunuté o  $180^\circ$ . Jedná se o nejčastější nevyváženost. [7]

Dalším mechanickým zdrojem vibrací je ohnutá hřídel. Hřídel se ohne nárazem nebo vlivem vysokých teplot a projevuje se v radiálním, ale i axiálním směru. V axiálním směru působí síly dovnitř stroje po ose otáčení, v radiálním směru působí obě síly stejným směrem a to ve směru odstředivé síly, která vychyluje rotor. [7]

Zdrojem vibrací může být i nesouosost hřídelů při spojování hnacích a poháněných soustav. Při spojování soustav vznikne prakticky vždy nesouosost a rozlišuje se na úhlovou a paralelní nesouosost. Úhlová nesouosost vznikne v situaci, kdy uložení osy otáčení poháněné soustavy není přesně v ose hnacího stroje, ale osy otáčení svírají malý úhel. To je doprovázeno silnou axiální složkou vibrací, která může být i větší než radiální a fázovým posunem  $180^\circ$ . Paralelní nesouosost je způsobena uložení strojů tak, že mají osy otáčení rovnoběžné, ale jsou vůči sobě posunuty v radiálním směru. Na sousedních ložiskových stojanech mají vibrace opačnou fázi a mají radiální směr. Oba tyto typy nesouososti způsobují vibrace s dvojnásobnou frekvencí než je frekvence otáčení stroje. [7]

Spojky používané ke spojování rotujících soustav jsou jedním u dalších zdrojů vibrací. Použití pevných spojek, tvořených dvěma přírubami spojenými pomocí šroubů, vyžaduje velkou přesnost při usazování stroje. Pevné spojky přenáší vibrace a při nesouososti strojů zároveň vytváří výše zmíněné vibrace. K eliminaci přenášených i vznikajících vibrací se používají spojky pružné. Pružné spojky jsou vyrobeny z materiálu, který do určité míry přenáší vibrace, ale tlumí jejich amplitudu. Platí, že čím je spojka pružnější, tím lépe tlumí kmity. Zubové spojky dávají možnost usazení stroje s větší nesouosostí, ale v tomto případě jsou zároveň zdrojem vibrací o frekvenci otáčení násobené počtem zubů spojky. [7]

Pokud nejsou postaveny pevné základy a stroj k nim není pevně připevněn, dochází opět ke generování vibrací. Stroj může být při své instalaci pevně uložen, přesto existuje možnost postupného uvolnění stroje, tedy vzniku vůle mezi strojem a základnou, vlivem vibrací z jiných zdrojů buď v samotném motoru nebo na motor působících. Tyto vibrace mohou mít frekvenci stejnou nebo dvojnásobnou s frekvencí otáčení stroje. Zvětšování vůlí mezi strojem a základnou může v extrémním případě způsobit i přetržení šroubu, uvolnění stroje a havárii celého zařízení. [7]

Ložiska stroje jsou dalším zdrojem vibrací a důležitou součástí každého točivého stroje. Kluzná ložiska generují subharmonické vibrace vlivem nestabilních provozních vlastností v důsledku vůlí, maziva a jeho kvality, zatížení a samozřejmě velikosti ložiska, protože větší ložiska mají i větší vůli. Vibrace jsou v rozsahu  $(0,1 - 1) f_0$ . V mazivu vznikají víry v okamžiku, kdy není rovnoměrně rozložena tlak v ložisku, což se nazývá olejový vír. Dalším je třecí vír, který vzniká díky velkým vůlím ložiska nebo zadřenému ložisku, s čímž mimo jiné souvisí špatné mazání. Tyto vibrace mohou nabýt nebezpečných hodnot, pokud je stroj provozován v blízkosti rezonanční frekvence soustavy a pohybují se kolem  $0,5 f_0$ . Také valivá ložiska mají svá negativa, pokud jde o vznik vibrací. Jsou pochopitelně vyrobená s určitými tolerancemi co do rozměrů i kulatosti, které se v průběhu provozu zvětšují opotřebením částí. Valivá ložiska mají výhodu v tom, že přenáší také působící síly, ale s tímto se pojí i přenos vibrací a samotná valivá ložiska jsou zdroji vibrací, které způsobuje odvalování valivých elementů, což bývají válce nebo koule. Z toho lze vyvodit, že vibrace jsou periodické a úměrné počtu valivých elementů. [7]

### 1.5.1.2 Obecné pokyny pro měření vibrací

Při měření vibrací sledujeme hodnoty výchylky kmitů  $x$  [ $\mu\text{m}$ ], rychlosti kmitání v [ $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$ ] a zrychlení a [ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]. Dále lze vibrace stroje klasifikovat podle časového průběhu a směru. Mají negativní vliv například na polovodičové prvky, rezistory a jiné součástky, vodiče, které se vlivem relativních pohybů mohou ulamovat nebo nosné struktury, které jsou namáhány velkými silami.

Při měření vibrací je důležité dbát na správné uložení zkoušeného stroje. Stroj by měl být měkce usazen, podepřen nebo zavěšen pomocí odpružení, které zajistí nízké ladění, což znamená, že je stroj uložen tak, aby všechny přirozené kmitočty soustavy byly pod 0,25-násobkem kmitočtu základních kmitů. Závěsná soustava by zároveň neměla mít větší hmotnost, než 0,1-násobek hmotnosti zkoušeného stroje. Pro věrnější napodobení provozních podmínek se menší a středně velké stroje upínají na speciální základové desky, které jsou nízko laděné ve všech třech směrech. Pokud není možné stroj přemístit na zkušební desku, zkouší se stroj v místě instalace za běžného chodu. Umístění snímačů vibrací se provádí tam, kde se vibrace přenáší na další části soustavy, nejčastěji konstrukci zařízení, například u ložisek, na patkách, přírubách stroje, atp. [2]

Moderní měřiče vibrací jsou schopny zobrazovat a analyzovat časové průběhy i spektra vibrací právě měřených strojů a využívají snímačů pracujících na různých principech:

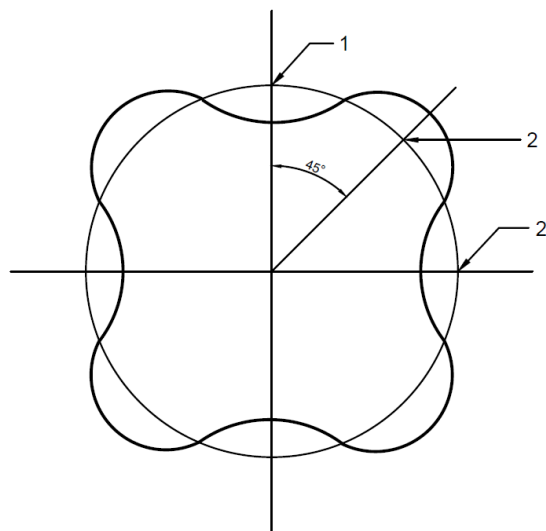
- Pasivní snímače
  - Odporové snímače výchylky – Základem jsou odporové potenciometry, jejichž jezdec se posouvá po odporové dráze. Mají velkou rozlišovací schopnost a dlouhou životnost.
  - Indukční snímače výchylky – Jsou vhodné pro měření otáček nebo fáze. Jsou ale velmi citlivé na změnu teploty nebo nehomogenity měřených objektů. Téměř se nepoužívají.
  - Kapacitní snímače výchylky – Díky změně geometrie elektrod, v důsledku výchylky vibrací, se mění kapacita snímače. Jsou využívány v náročných podmínkách, např. ve vysokých teplotách a tlacích.
- Aktivní snímače - přímá přeměna mechanické energie na elektrickou



- Elektrodynamické snímače rychlosti – Pohybem snímače se rozpohybuje cívka v elektromagnetickém poli, ve které se indukují napětí úměrné rychlosti vibrací.
- Piezoelektrické snímače rychlosti – Využívají vlastnosti piezoelektrických krystalů, které při mechanickém namáhání generují elektrický náboj a ten je dále přímo, či nepřímo, vyhodnocován. [3]

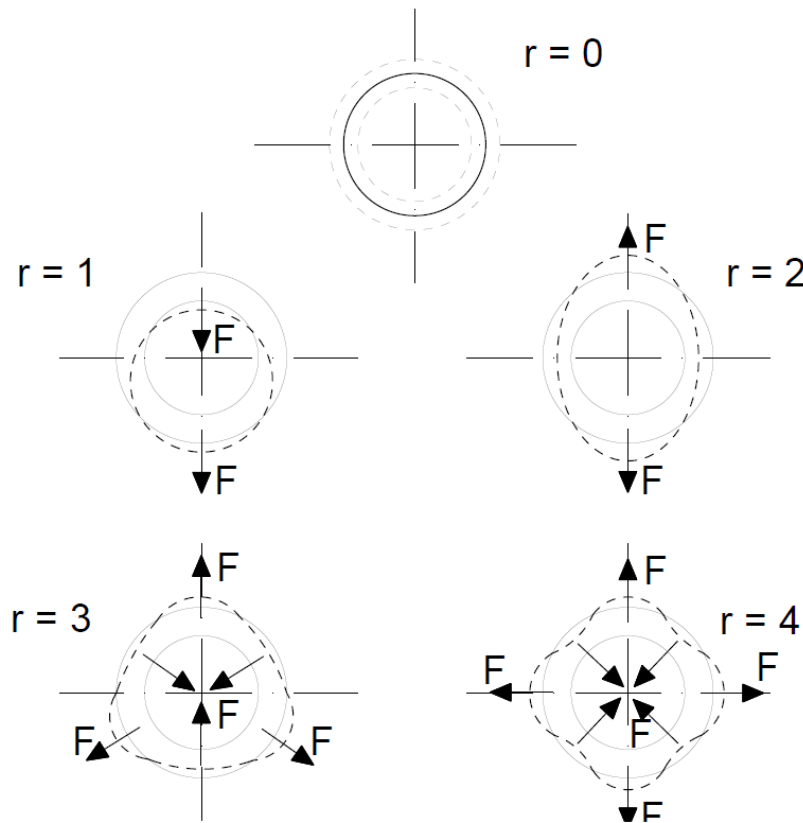
### 1.5.1.3 Experimentální vyšetřování řádu kmitání $r$

Jeden z důležitých parametrů, tzv. řád kmitání  $r$ , popisuje hluk vyzařovaný statorovým jhem. Po obvodu statorového paketu postupují vlny se stejnou frekvencí a teoreticky stejnou amplitudou, ale s různým fázovým posunem, který je dán počtem vln na obvodu a geometrickým místem dvou bodů, mezi kterými je fázový posun měřen. Měření řádu kmitání  $r$  tedy znamená určení fáze mezi dvěma sousedními amplitudami a určí se jako podíl fáze dvou měřených bodů a prostorového úhlu na obvodu statoru, které jsou těmito dvěma body svírány. Hluk vyzařující ze stroje nebo obklopujícího pláště stroje má stejnou frekvenci jako je frekvence kmitání stroje.



Obrázek 3: Princip měření řádu kmitání  $r$  [1]

Snímač vibrací 1 během měření nemění svou polohu, snímačem 2 se pohybuje po obvodu statorového jha. Prakticky je možné určit pouze body, kde jsou kmity ve fázi nebo protifázi s kmity v bodě 1. Pro vyhodnocení tohoto měření je možné použít například dvoukanálový osciloskop pro sledování průběhu kmitů obou snímačů, nebo měřicí přístroj na měření fáze. Metodu měření řádu kmitání  $r$  je možné aplikovat na všechny druhy elektrických točivých strojů. [1]



Obrázek 4: Deformace statoru vlivem deformačních sil způsobujících kmity řádu  $r = 0$  až  $r = 4$   
[10]

### 1.5.2 Dynamické namáhání

Elektrické točivé stroje jsou namáhány také dynamicky. Dynamické namáhání úzce souvisí s vibracemi, protože vibrace vytvářejí síly působící na mechanické části stroje. Souvisí tedy s nevyvážeností, nesouosostí, stavem převodovky, stavem ložisek, trhlinami v částech stroje k nim náchylným a celkovým opotřebením stroje. Proto je velmi podstatné sledovat vibrace strojů, aby se předešlo vážným závadám. [14]

Dalším významným namáháním je proudový ráz při rozběhu motoru přímým připojením na plné napájecí napětí nebo při náhlé velké změně zatížení. Potom zkratové proudy jsou zdrojem velkých dynamických sil. Při výpadku napájení jedné z fází ve statoru dochází k momentovým pulzacím a dalšímu dynamickému namáhání stroje.

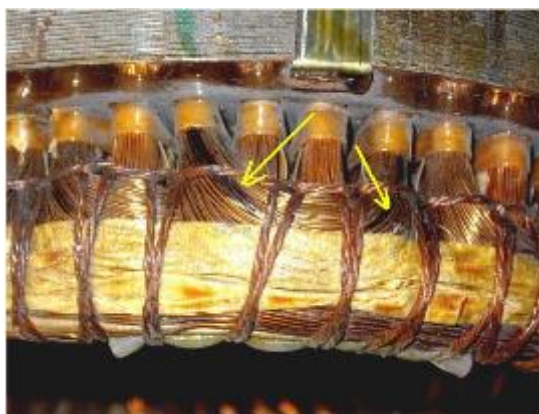
### 1.5.3 Izolace

Při provozu elektrických motorů je nutné počítat s možností vzniku poruch a následných zkratů. To může být důsledek poškozené izolace vinutí při výrobě nebo během provozu motoru. Zkrat v důsledku porušené izolace je považován za jednu z nejzávažnějších poruch motoru.

Kvalita izolace není dokonalá, protože se nechová jako ideální dielektrikum, ale má určitý velký konečný odpor. Izolace mezi vodiči s různým potenciálem se chová jako kondenzátor s reálným

dielektrikem a prosakuje jím nějaký malý kapacitní proud. Kvalita izolace se udává jako velikost ztrátového činitele  $\tan \delta$ , vyplývajícího z fázorového diagramu reálného kondenzátoru. Čím je úhel  $\delta$  menší, tím lepší je izolace. Ztrátový činitel se měří na celé délce vinutí. Dobrá izolace vinutí je důležitá z hlediska zamezení zkratů. [7]

Zkrat ve vinutí statoru, tedy porušení izolace vinutí, je považován za nejméně závažnější poruchu statoru. Může nastat mezizávitový zkrat jedné cívky, což je méně škodlivý případ, kdy dojde k proražení izolace na sousedních závitěch cívky stejné fáze. Tato situace není v počáteční fázi kritická a zásadně neovlivňuje chod motoru, protože napětí mezi sousedními závitě cívky není velké.



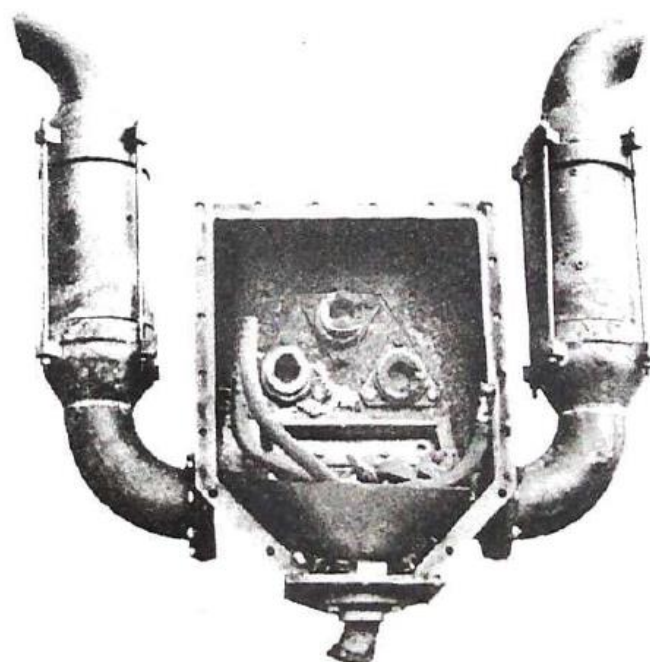
Obrázek 5: Zkrat ve vinutí stejné fáze v čele statoru [8]

Postupně ale může vlivem tohoto zkratu docházet k opalování okolní, dosud neporušené, izolace, k její tepelné degradaci a tím rozšiřování poruchy a možnému vzniku mezifázového zkratu. Mezifázový zkrat je závažnou poruchou motoru a je nutno ho odstavit a opravit nebo vyměnit.

#### 1.5.4 Svorkovnice

Svorkovnice slouží k připojení napájecích vodičů k vinutí stroje. Poruchy mohou nastat také ve svorkovnici a to v důsledku zkratu. Při provozu stroje je svorkovnice uzavřena, ale nikdy ne dokonale, takže dovnitř mohou vnikat nečistoty a vlhkost ve větší či menší míře. Pokud není svorkovnici věnována dostatečná pozornost a pravidelná údržba, dochází postupně ke zhoršování izolačních vlastností na povrchových cestách mezi připojenými fázemi. Při velké míře znečištění a vlhkosti může dojít až ke zkratu mezi všemi třemi fázemi a tím k roztržení svorkovnice rychle se rozpínajícími plyny při uvolnění velké energie při zkratu, což má při nárůstu tlaku asi  $1,26 \text{ at.ms}^{-1}$ , nebo i vyšším, charakter výbuchu. Ohroženo je také okolí odletujícími střepinami a šířením žhavého plynu. Oblouk hoří po celou dobu od zapálení až do okamžiku odpojení od napájení, což může být několik desetin sekundy. V lepším případě nemusí dojít k roztržení celé svorkovnice, ale může se roztrhnout pouze víko nebo se může víko vytrhnout. Akustický výkon detonace ve svorkovnici je závislý na zkratovém výkonu a uspořádání svorkovnice. Ve firmě VUES byly provedeny testy několika typů svorkovnic a u některých dosahoval akustický výkon 100 až 120 dB/A v bezprostřední blízkosti svorkovnice. Na následujícím obrázku je ukázka svorkovnice testované zkratovým výkonem 675 MVA po dobu 0,25 s. Vnitřní uspořádání

svorkovnice je zničeno akustickými a tepelnými účinky zkratu, ale díky vhodně provedeným odfukům se svorkovnice neroztrhla. [15]



Obrázek 6: Svorkovnice s odfuky po zkratové zkoušce 675 MVA, 0,25 s

Dnes se používají svorkovnice se zeslabenými místy ve stěně, abychom mohli alespoň částečně ovlivnit místo a směr odvodu plynu. Stěna svorkovnice se protrhne v místě zeslabení a neohrozí svoje okolí explozí jako v případě, kdy se nekontrolovaně roztrhla a střepy a žhavé plyny odlétaly náhodně do okolí. Další variantou pro větší výkony je realizace odfuků ze svorkovnice. Tyto odfuky také směřují odcházející plyny na místo, kde nedojde k ohrožení osob či majetku, ale zároveň nedochází k roztržení svorkovnice a po výměně vnitřních komponent se dá znovu použít. [15]

### 1.5.5 Přerušené rotorové vinutí

U asynchronních motorů s kotvou nakrátko může dojít vlivem oteplení nebo vibrací k rozpojení klece prasknutím, nebo vytavením vodivého materiálu. Jedná se o přerušení proudovodné dráhy v tyčích nebo ve zkratovacích kruzích. Proud se začne uzavírat pouze zbylými nepřerušenými cestami, což způsobí větší proudovou hustotu v těchto částech a tím se rotor bude víc zahřívat, způsobí nesymetrii magnetického pole a projeví se v úrovni vydávaného hluku. V důsledku zahřívání a tepelné roztažnosti může dojít ke zničení motoru rozpojením zkratovacího kruhu nebo poškozením izolace tyčí rotoru. Ztrátový výkon, způsobující oteplení je dán vztahem

$$\Delta P = m \cdot R_t \cdot I_t^2 \quad (1-10)$$

kde  $m$  je počet nepřerušených rotorových tyčí,  $R_t$  je odpor jedné tyče a  $I_t$  proud tyčí rotoru.

Přerušené rotorové vinutí se projevuje snížením momentu motoru, který je způsobený snížením magnetického toku a tím i magnetomotorické síly působící na rotor. [7]

### 1.5.6 Nesouměrné napájení

Malé rozdíly ve velikostech napětí jednotlivých fází asynchronního motoru mohou způsobit značné rozdíly ve velikostech proudů ve fázích. Nesouměrné napětí na statoru vytváří zpětnou složku napětí a složku magnetického toku otáčející se proti směru otáčení rotoru, díky čemuž tečou do motoru velké proudy. To způsobuje zvýšené oteplení motoru. V rotoru dojde ke zvýšení frekvence na dvojnásobek a tím ke zvýšení ztrát v rotoru v důsledku většího vlivu skin efektu. Nesouměrné napájení se projeví také na momentu motoru. Celá momentová charakteristika poklesne a bude generován oscilační moment s dvojnásobnou frekvencí, než je frekvence sítě. S tím se pojí i možnost rezonance motoru, pokud jsou kritické otáčky motoru v blízkosti dvojnásobku kmitočtu sítě. Pokud se vyskytne v motoru zpětná složka napětí větší než 1% velikosti sousledné složky, je nutné snížit dovolený výkon motoru. [16]

Při provozu motoru může dojít k výpadku napájení jedné z fází vlivem rozpojení vodiče vinutí nebo uvolnění a upadení přívodního vodiče ve svorkovnici. Pokud nastane výpadek jedné fáze, dojde ke snížení momentu stroje a jeho zastavení. Stojící motor odebírá velké proudy ze zbylých dvou fází a pokud včas nezareagují ochrany, může dojít k tepelnému zničení stroje.

### 1.5.7 Oteplení

Oteplení motoru je za chodu způsobeno ztrátami, které vznikají ve stroji. Tyto ztráty jsou elektrické, vznikající ve vodičích a všech vodivých částech stroje protékaných proudem, ztráty feromagnetické, což jsou magnetické ztráty v železe, ztráty dielektrické a ztráty mechanické. S rostoucím zatížením ztráty rostou. V ustáleném chodu asynchronního motoru zaujímají největší část ztráty ve vinutí statoru a následně rotoru. Oteplení má velký vliv na jednotlivé části stroje, v první řadě na izolační systém, který vlivem nadměrné teploty ztrácí potřebné izolační vlastnosti a tepelně stárne a může dojít ke zkratům nebo jiným elektrickým poruchám. Na oteplení bývá dimenzováno chlazení pomocí ventilátoru připevněného k hřídeli, který při chodu stroje zajišťuje průtok dostatečného množství chladicího vzduchu. Chladicím médiem nemusí být pouze vzduch, používá se například voda, vodík, atd. V praxi je ale často požadavek na častý rozběh a zastavení motoru, kdy vinutím teče proud několikanásobně vyšší, než je jmenovitá hodnota proudu v ustáleném chodu. Navíc je v důsledku poklesů otáček proměnlivý průtok chladicího média. Je proto nutné zajistit cizí chlazení motoru, jinak by mohlo dojít i ke zničení stroje. Větší oteplení způsobují také frekvenční měniče, které v důsledku vysokých napájecích frekvencí způsobují větší dielektrické ztráty, než při napájení ze sítě harmonickým napětím.

Chlazení může být realizováno jako přímé, kdy přichází do styku chladicí médium přímo s chlazenou částí nebo nepřímé, kdy je předáváno teplo chladicímu médiu přes jinou část stroje. Ventilátory se používají axiální, kdy je chladicí vzduch poháněn vodorovně s hřídelí do stroje. Axiální ventilátor žene do stroje menší množství vzduchu, ale teplo je odváděno s menšími ztrátami. Dalším druhem ventilátoru je radiální, který dodává větší množství vzduchu pod větším tlakem. V některých případech nemá stroj žádný ventilátor a je chlazen pouze prouděním chladicího média v důsledku rozdílu teplot, nebo otáčením rotoru. [13]

### 1.5.8 Vliv frekvenčních měničů na asynchronní motory

Původní asynchronní motor byl navržen a provozován v trojfázové síti s harmonickým napětím a po celou dobu existence tohoto typu motoru byly jeho vlastnosti a chování navrhovány tak, aby byly maximálně potlačeny parazitní vlastnosti, které mají negativní dopad na účinnost stroje, izolační systém, životnost, atd. Velká část těchto potlačovaných vlastností, především děje, které jsou závislé na časovém průběhu magnetických a elektrických veličin, se zvýraznila po masovém nasazování frekvenčních měničů do běžného provozu na konci minulého století. Frekvenční měniče mají výhodu v tom, že pomocí nich lze motor řídit efektivněji a s větší přesností. Zpočátku byl asynchronní stroj konstruován pro sinusový průběh napájecího napětí, což frekvenční měniče nemají. Při použití pulzně šířkové modulace (PWM) napětí na výstupu z měniče sinusový průběh ani nepřipomíná a vnáší množství nežádoucích vyšších harmonických do soustavy měnič – motor. Průběh napětí s PWM má velkou strmost, která může dosahovat i  $10 \text{ kV} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ , což značně namáhá izolační systém. Nejčastějšími vyššími harmonickými, které se vyskytují u PWM měničů, jsou 5. a 7. nebo 11. a 16. harmonická, které jsou typické pro šesti a 12-pulzní měniče. Tyto vyšší harmonické jsou příčinou vzniku radiálních sil mezi statorem a rotorem a ovlivňují tak chování stroje a vznikající vibrace. [7][8]

### 1.5.9 Ložiska

Kvalita ložisek má velký vliv na chod točivého stroje a jsou vnímána jako nejdůležitější součást stroje z pohledu bezdemontážní diagnostiky. Je třeba jim věnovat pozornost již při návrhu stroje. Jsou to konstrukční prvky zajišťující uchycení hřídele rotoru ke štítům stroje a zároveň umožňující otáčení rotoru. Používají se ložiska valivá a kluzná.

#### 1.5.9.1 Valivá ložiska

Jak již bylo zmíněno, valivá ložiska jsou sama o sobě zdrojem vibrací. Skládají se z vnějšího a vnitřního kroužku, valivých elementů mezi kroužky a klece zajišťující rovnoměrné rozložení valivých elementů po obvodu. Valivé elementy mohou být válce nebo koule, které se při otáčení stroje odvalují ve svých drahách. [7]

Teoreticky by se měly kuličky odvalovat v ose ložiska, tedy po přímce a dotyk kuličky s kroužkem by měl nastat pouze v jednom bodě. Takový stav se nazývá čistý valivý pohyb. Vlivem výrobních a konstrukčních tolerancí nedochází k čistému valení. Vibrace na ložiscích se měří na vnějším kroužku, nebo na pouzdře.

Na kmity valivých ložisek má vliv:

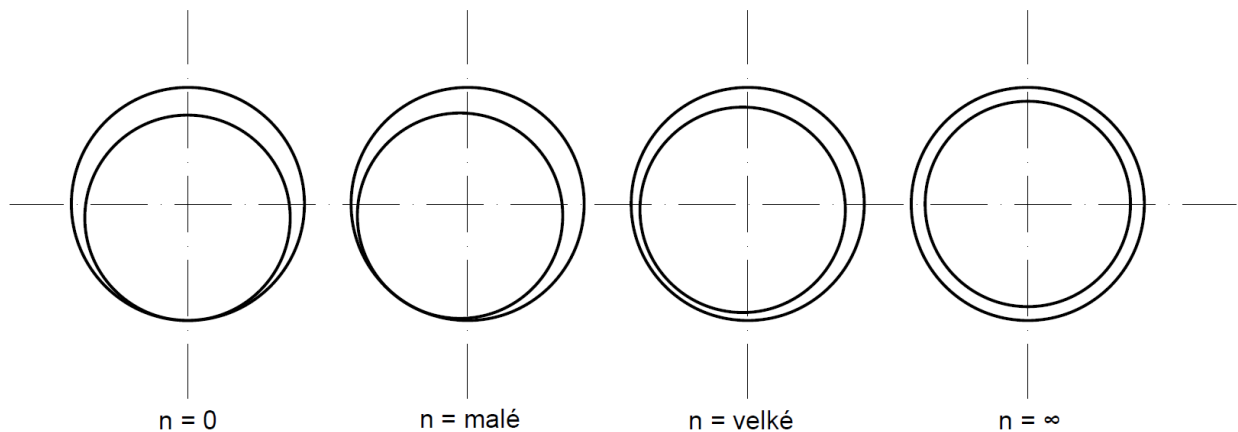
- druh zatížení,
- výrobní kvalita a konstrukce ložiska,
- otáčky,
- mazání,
- četnost a druh škodlivých procesů.

Tyto podněty mohou způsobit kmitání v rozsahu 1 Hz až 100 kHz, kam patří i pro člověka slyšitelná oblast. Výrazné jsou ve spektru vibrací rotační frekvence klece ložiska, převalovací frekvence vnitřního a vnějšího kroužku, frekvence rotace valivého elementu a frekvence

převalování valivého elementu na obou valivých drahách. Jednotlivé součásti valivých ložisek jsou vyrobeny s určitým zvlněním, které má největší vliv na vibrace ložisek. Největší podíl vibrací má vnější kroužek, takže právě ten by měl být nejlépe usazen a opracován. Druhý největší vliv na vibrace valivých ložisek má tvar a rozměr valivých elementů. [7]

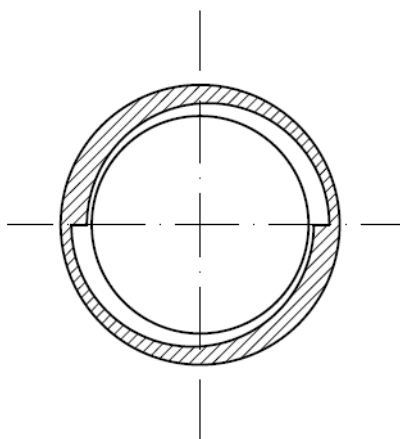
### 1.5.9.2 Kluzná ložiska

Tento typ ložisek umožňuje rotační pohyb dvou těles díky vzájemnému klouzání dvou kroužků s malým třením a využitím kluzné kapaliny. Ložisko má záměrně vytvořenou vůli mezi kluznými plochami, kde se nachází mazací kapalina, tzv. klínová mazací vrstva. Při nulových otáčkách dochází k poklesu hřídele a přiblížení kluzných kroužků až k dosedu vnitřního kroužku na vnější. Tím se vytvoří kapalinový klín. Otáčení hřídele působí na mazací kapalinu a tlačí ji ve směru otáčení, což při určitých otáčkách vyvolá vztakovou sílu větší než je síla působící na čep (například gravitace) a dojde ke zdvihu čepu směrem k ose vnějšího kroužku. Čím jsou otáčky vyšší, tím větší vztlak působí na hřídel a dochází k přibližování osy čepu k ose vnějšího kroužku. [7]



Obrázek 7: Poloha čepu v ložisku při různých otáčkách

Skutečnost, že čep při otáčení plave a netře o vnější kroužek je důležitá z pohledu bezpečného provozování stroje. Pokud jsou kluzné plochy ložiska dostatečně kvalitně opracovány, tak jako plavání čepu je považována i situace, kdy je mezi čepem a vnějším kroužkem minimální vrstva mazací kapaliny, což může být i 0,001 mm. Zlepšení soustřednosti se dosahuje úpravou vnitřního opracování ložisek tak, že jsou vytvořeny dvě nebo tři klínové vrstvy po obvodu vnějšího kroužku s náběhem ve směru otáčení. Tím je dosaženo dvou nebo tří míst s pomocným vztlakem a hřídeli stroje je ložiskem vnučena přesnější poloha vůči ose statoru. [7]



Obrázek 8: Ložisko pro vyšší soustřednost čepu

Pro vyšší bezpečnost ložiska je dobré, když je minimální mazací vrstva co nejsilnější. Čím je ale větší minimální mazací vrstva, tím je vyžadována větší ložisková vůle, což je nepřijatelné z pohledu třecích ztrát a větší náchylnosti ke kmitání hřídele. Proto se jako maximální tloušťka mazací vrstvy používá čtvrtina ložiskové vůle. Nosnost mazací vrstvy klesá s druhou mocninou velikosti ložiskové vůle, takže čím je ložisková vůle menší, tím je nosnost mazací vrstvy větší a tím je i zatížitelnost ložiska větší. Tato vůle se ovšem musí navrhovat také s ohledem na minimální tloušťku mazací vrstvy. Se správným mazáním souvisí také nutnost přivádět mazací kapalinu do ložiska. Pro vhodný výběr místa přívodu je důležitý směr otáčení hřídele a místo největšího zatížení ložiska. Mazací kapalinu je nutné přivádět do ložiska v místě, které je při běhu stroje vzdáleno od čepu, aby byl zaručen vznik klínové vrstvy a místo zatížení bylo mazáno co nejdříve a bez předehtání. Pokud nejsou ložiska správně mazána, dochází k jejich opotřebení vlivem tření, které je dále závislé na dokonalosti opracování kluzných ploch, povaze zatížení, materiálu ložisek, nevhodně řešených mazacích drážkách, atd. Opotřebení a následným poruchám ložisek je nejtěžší zabránit při mimořádných provozních událostech, což může být například porucha mazacího zařízení, tepelné nebo mechanické přetížení. [7]

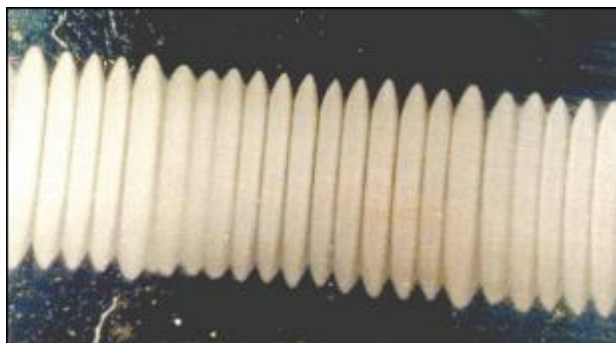
### 1.5.10 Ložiskové proudy

Ložiska jsou důležitou částí točivých strojů, která umožňují otáčení rotoru. Kromě mechanických poruch se v ložiscích vyskytují i poruchy způsobené elektrickým proudem. Ložiskové proudy jsou jako pojem známy téměř stejně dlouho jako existují elektrické motory, ale v současné době je tato problematika ještě aktuálnější, například díky rozšířenému používání frekvenčních měničů. V případě, že je motor napájen ze sítě, uvažujeme jen galvanicky spojené cesty proudu, ale při napájení z měniče je třeba uvažovat i vysokofrekvenční proudy tekoucí kapacitními vazbami, které mohou v některých případech převládat nad galvanickými. Ložiskové proudy se velmi obtížně měří a obtížně se zjišťuje příčina této poruchy. Elektrické opotřebení ložisek je dáno třemi ději:

- Působením trvale procházejícího proudu ložiskem v důsledku trvalého styku valivých tělísek s kroužky ložiska.
- Opotřebením maziva vlivem jiskrových, či obloukových výbojů, vlivem kapacit. Oblouky a jiskření je mazivo znehodnocováno a jeho mazací schopnost klesá.



- Elektrochemickými ději v ložisku.



*Obrázek 9: Poškození ložiskovými proudy na vnějším kroužku*

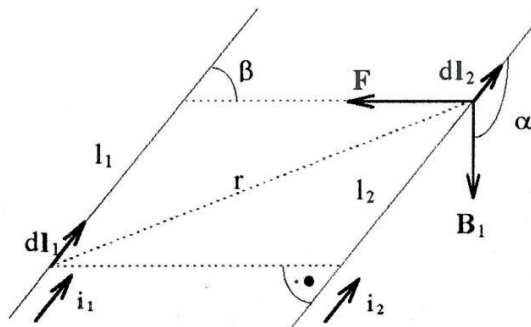
Na obrázku 9 je znázorněn příklad poškození ložiskovými proudy na vnějším kroužku ložiska. Jsou to příčné rýhy v kroužku viditelné okem, šířka asi 5 mm a tloušťka 0,5 až 0,6 mm. Toto poškození se nazývá valcha a vyskytuje se na vnějším i vnitřním ložiskovém kroužku. Poškození v podobě mikrokráterů na valivých tělískách jen výjimečně přesahují 20  $\mu\text{m}$ . Ložiskovým proudům se zabráňuje například kvalitně provedeným překlenutím ložisek tak, aby proudy tekoucí v motoru neprotékaly ložisky. K tomuto účelu se používají vhodně umístěné kartáče vodivě spojující stator se hřídelí. [12]

## 2 VLIV KONSTRUKČNÍHO A MATERIÁLOVÉHO PROVEDENÍ KLECE ASYNCHRONNÍHO MOTORU NA JEHO BEZPEČNOST A ŽIVOTNOST

Jak už bylo uvedeno výše, rotor má velký vliv na chod celého motoru. Asynchronní motory se nejčastěji používají s kotvou nakrátko, které s sebou nesou také specifické požadavky a závady. Dnes je v průmyslu důležitá nejen kvalita a spolehlivost vyrobeného rotoru, ale čím dál větší důležitost má i cena a úspora materiálu, která současně nutí k provozu motorů na hranici jejich možností. To způsobuje častější poruchy klecí vlivem nadměrného namáhání elektrodynamickými silami, které mohou přesahovat mez pevnosti materiálu klece. Tyto elektrodynamické síly jsou způsobeny protékajícími proudy ve vodičích statoru a rotoru a při vysokých proudech mají nežádoucí vliv, který mechanicky namáhá i rotorovou klec. Pro vodiče protékané proudem je působící síla dána vztahem

$$\mathbf{F}_2 = i_2 \int_l d\mathbf{l}_2 \times \mathbf{B}_1 \quad (2-1)$$

kde  $\mathbf{F}_2$  je vektor síly působící na element vodiče  $d\mathbf{l}_2$ ,  $i_2$  je proud protékající elementem vodiče  $d\mathbf{l}_2$  a  $\mathbf{B}_1$  je vektor magnetické indukce vytvořené proudem  $i_1$  ve vodiči  $l_1$ . [17]

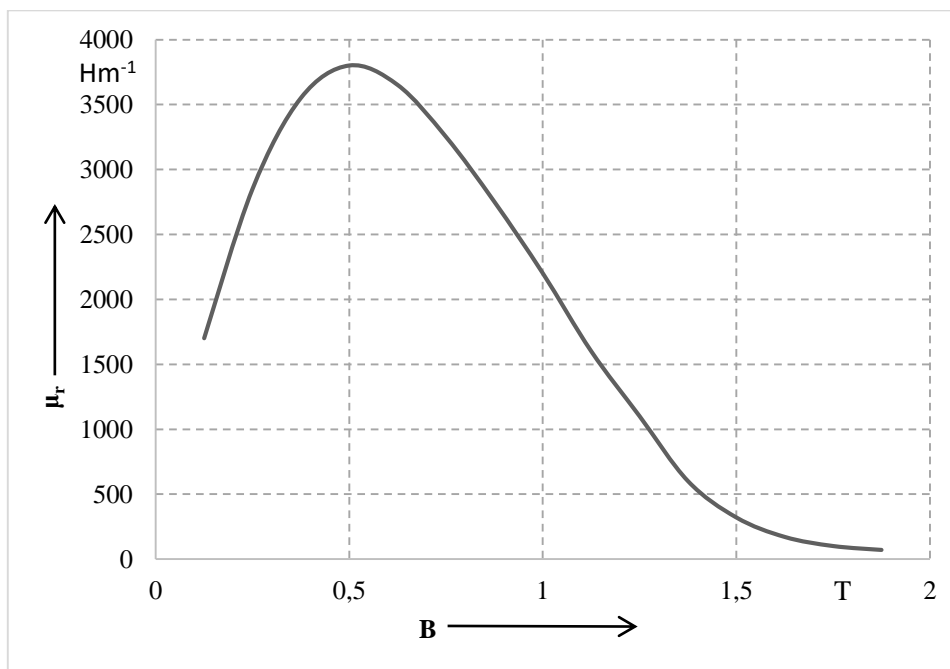


Obrázek 10: Silové působení mezi vodiči

Po matematickém vyjádření magnetické indukce a úpravě vztahu pro nepřímé vodiče dostaneme vztah pro působící sílu na vodič 1

$$F_1 = \frac{2l_1\mu_r}{a} i_1 i_2 \left[ \sqrt{\left(\frac{a}{l_1}\right)^2 + 1} - \frac{a}{l_1} \right] \cdot 10^{-7} \quad (2-2)$$

kde  $\mu_r$  je relativní permeabilita,  $a$  je vzdálenost působících vodičů,  $i_1$  a  $i_2$  jsou proudy jednotlivých vodičů. Relativní permeabilita není konstantní a je závislá na magnetické indukci, resp. na její okamžité hodnotě, v zubu rotoru. [17]



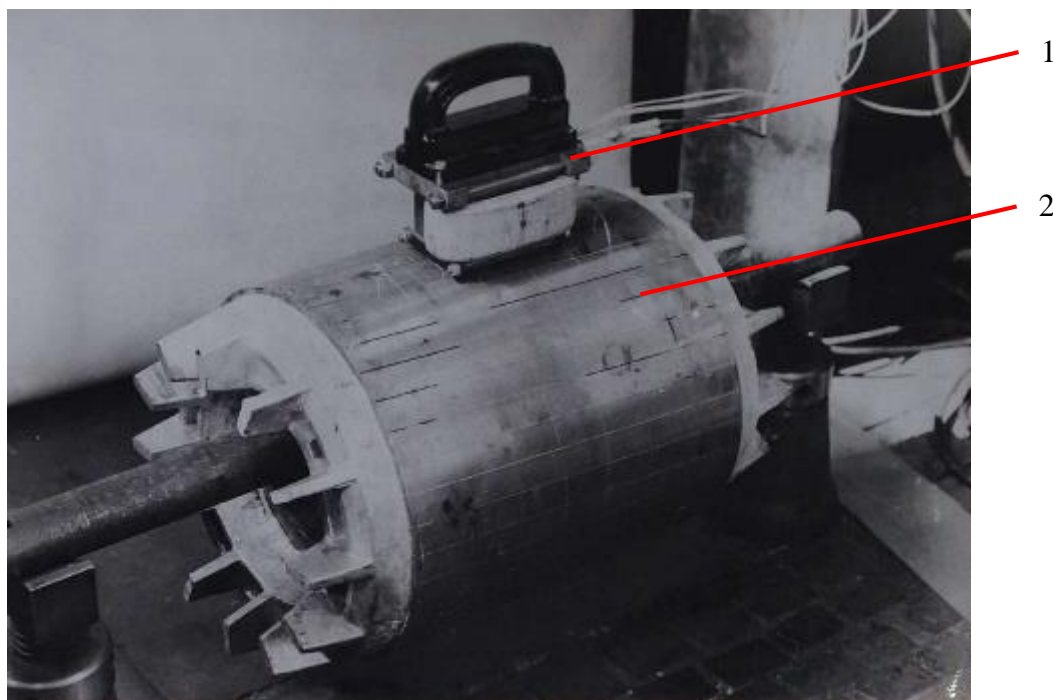
Obrázek 11: Znáznornění závislosti relativní permeability na magnetické indukci

Pro materiál s maximální relativní permeabilitou  $\mu_{\text{rmax}} = 4000$  jsou působící síly na rotorové tyče 4000x větší, než v případě umístění tyčí ve vzduchu. Tyto síly se opakují 4x za periodu skluzové frekvence, protože magnetická indukce se v zubu rotoru změní 2x za půlperiodu skluzové frekvence. Cyklické namáhání snižuje mez pevnosti tyčí. Ty nejsou hladké jako zkušební tyčinka, ale mají podstatně hrubší povrch daný drsností drážky a důsledností uložení plechů rotoru. Tyče se z těchto důvodů neposuzují podle meze pevnosti, ale spíše podle meze únavy materiálu, která může vést ke vzniku trhlin vlivem cyklických namáhání. Trhliny mohou být velmi malé, ale postupně se rozšiřují a zvyšují hlučnost stroje. V mezním případě může dojít až k roztržení tyče, nebo kruhu a přerušení proudové cesty. Na vznik trhlin má vliv také chlazení klece po odlití, po přechodových stavech nebo po rozběhu díky rozdílným teplotním roztažnostem klece a plechů rotoru. Při těžkém rozběhu motoru je proud v rotoru vytlačen, vlivem skin efektu, do horní části tyčí a teplota zde může dosahovat krátkodobě až 500 °C zatímco spodní část tyčí má asi 80 °C. Tímto vzniká v tyči elasticko-plastické namáhání. Velký teplotní rozdíl má snahu tyč ohnout, což může mít také za následek vznik trhlin. [17]

K nežádoucím silovým účinkům dochází v případech, kdy:

- vede více proudovodičů paralelně,
- vodiče se nachází v blízkosti feromagnetika,
- v proudové dráze se nachází zakřivení vodiče nebo změna jeho průřezu.

Všechny tyto vlivy vznikají v rotoru a působí na klec. Tyče rotoru představují paralelní vodiče, plechy jsou feromagnetikum, na které tyče těsně doléhají a zakřivení a změny v průřezu vodičů představují přechody tyč – kruh.



Obrázek 12: Zkouška rotorových tyčí pomocným magnetickým obvodem

Legenda: (1) Pomocný magnetický obvod, (2) Zkoušený rotor

Zda je rotor správně vyroben je nutno ověřit předmontážní zkouškou. Pro měření je možné použít například pomocný magnetický obvod na ose zvolené rotorové tyče a měří se jeho hodnoty, např. příkon, v závislosti na vlastnostech jednotlivých tyčí pro různé frekvence, typicky 0,5, 5 a 50 Hz. [4]

## 2.1 Odlévání rotorové klece ASM

Odlévání hliníkových rotorových klecí asynchronních motorů se provádí podle přesně definovaných výrobních postupů, při kterých je nutno dodržovat čistotu, dané teploty, způsob přehřívání, rychlost chládnutí, atp. [4]

Klece asynchronních motorů se vyrábí odléváním ze slitin hliníku nebo svažováním měděných tyčí a kruhů. Nejčastěji se používá slitina Al 99,5 s pevností v tahu 100 MPa. Tato pevnost platí pro zkušební tyčinku, ale odlévané tyče mají pevnost nižší. [17]

Díky nestejnému pootočení rotorových plechů může docházet k lokálním zúžením tyčí a vytvoření schodovitého tvaru tyčí. Takový tvar odlitku je popsán v kapitole 3 a usnadňuje vznik trhlin v tyčích, podobně jako nedodržení technologie lití nebo výroby rotorového svazku, nebo použití nevhodného materiálu pro výrobu klece. V průběhu provozu se tvoří trhliny vlivem odstředivých sil, elektrodynamických sil, tepelnou roztažností a vibracemi.

Slitina Al 99,5 se skládá z 99,5% Al, 0,3% Fe, který se tavením zvyšuje, 0,1% Si a zbylých 0,1% tvoří Cu, Mn, Ni, Ti, Zn. Al 99,5 není příliš vhodná pro velké stroje a má větší, přibližně dvojnásobný, tepelný součinitel roztažnosti než rotorový svazek. Při pokojové teplotě má tato slitina pevnost v tahu 100 MPa, ale při 100 °C je pevnost asi poloviční. I malý podíl železa ve slitině má negativní dopad na možnost tvorby trhlin kvůli snížení plasticity materiálu. To je

částečně kompenzováno přítomností křemíku a mědi, které naopak zvyšují celkovou plasticitu klece. [17]

Při odlévání se dodržuje teplota 760 – 765 °C. Při této teplotě má hliník malou viskozitu, která je ale zhoršována povrchovými oxidovými vrstvami. Teplota tuhnutí klece je 658 °C. Kvalitu odlitého rotoru ovlivňuje možnost nerušeného smrštění při chládnutí, což je v praxi velmi obtížné splnit. Aby byla klec pevně upevněna na rotorovém svazku, nesmí být mezi nimi žádná vůle a to představuje problém při chládnutí klece, protože rotorový svazek v určitém okamžiku zastaví smršťování klece a způsobí v ní značné pnutí. V první fázi se dostanou tyče do stavu pružné napjatosti, ale při dalším smršťování budou tyče namáhány až k mezi pevnosti nebo i za ni a dojde k přetržení nebo značnému porušení jedné nebo více tyčí. Smrštění tyčí při chládnutí je závislé na nečistotách, materiálu plechů a jejich izolace, ale pro slitinu Al 99,5 je to asi 0,75% celkové délky tyče. To může znamenat smrštění např. 3,6 mm při délce rotoru 500 mm. K porušení klecí dochází v zúžených místech tyče, což může být případ zmíněné špatně odlité tyče schodovitého tvaru nebo vlivem chybějícího materiálu tyče. Dalším rizikovým místem je přechod tyč – zkratovací kruh. [17]

### 3 ANALÝZA POSKYTNUTÝCH VZORKŮ JEDNOTLIVÝCH KOMPONENT EL. STROJŮ S EXISTUJÍCÍMI VADAMI

Na následujících stranách jsou analyzovány poruchy částí el. motorů, které byly, spolu s důležitými informacemi, pro tyto účely poskytnuty výrobcem. Jedná se o vadné části, které byly vyřazeny v průběhu výroby nebo zkoušení a není možné je v jejich stávajícím stavu používat v provozu. V další části kapitoly jsou rozebrány záznamy ze servisních zásahů z mimořádných událostí na el. strojích.

#### 3.1 Neúplně odlité klece

##### 3.1.1 Klec asynchronního motoru



Obrázek 13: Vzorek č. 1 – Neúplně odlitá klec ASM

Na obrázku 13 je klec asynchronního motoru se sešikmenými tyčemi, která se používá k odstranění kývání rotoru. Jednou z vad tohoto vzorku je, že forma klece nebyla při odlévání úplně vyplněna slitinou hliníku, protože jedna z lopatek je neúplná. Tyto lopatky pomáhají víření vzduchu v uzavřeném motoru. Pokud by byla tato klec použita v motoru, způsobovala by hmotovou nevyváženost rotoru a tím nežádoucí vibrace. Nedolitá lopatka by zároveň zhoršovala proudění vzduchu a tím i chlazení. Důvodem této vady může být sesypaný písek z formy do prostoru lopatky, chybně zvolený odlévaný materiál, který nevyplnil celou formu nebo jiné nedodržení výrobního postupu.

### 3.1.2 Klec reluktančního motoru



Obrázek 14: Vzorek č. 2 – Neúplně odlitá klec reluktančního motoru

Vzorek č. 2 je klec reluktančního motoru, která nebyla kompletně vyplněna materiálem při odlévání a tyče jsou v některých případech dokonce přerušené. Motor s tímto rotorem by měl výrazně horší vlastnosti. Vznikaly by velké proudové špičky, díky kterým by vybavovala proudová ochrana a pravděpodobně by se motor ani nerozběhl. Jedná se o závažnou vadu odlévání a klec je tedy naprosto nevhodná pro použití v motoru a musí být odlita klec nová. Pórovitost na povrchu klece je pravděpodobně způsobena odléváním v pískové formě a nemusí nutně znamenat, že je klec pórovitá i uvnitř materiálu.

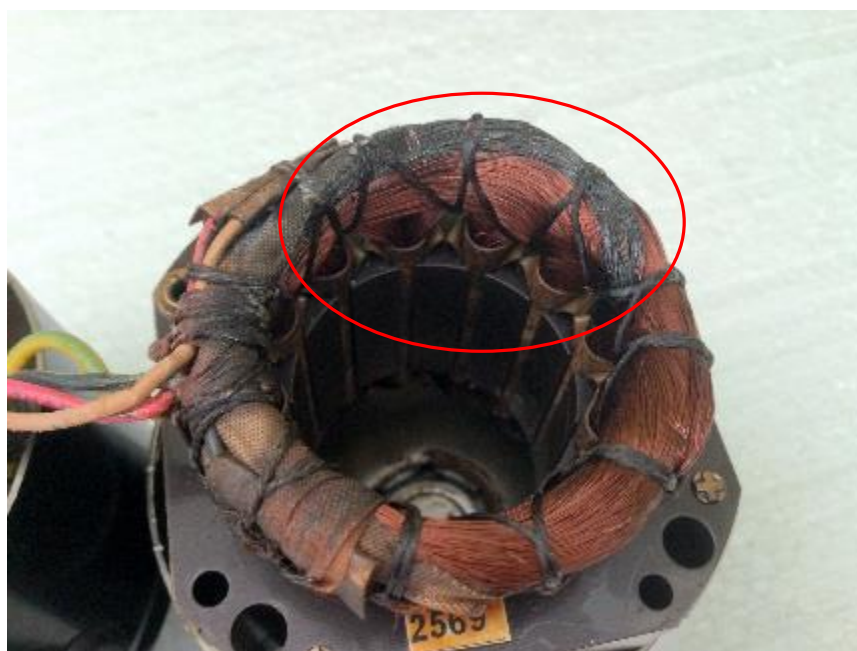
Nedokonale odlitá klec se při výrobě indukčních strojů vyskytuje přibližně v 0,25% případů. [19]



### 3.2 Mezizávitový zkrat



Obrázek 15: Vzorek č. 3 – Mezizávitový zkrat



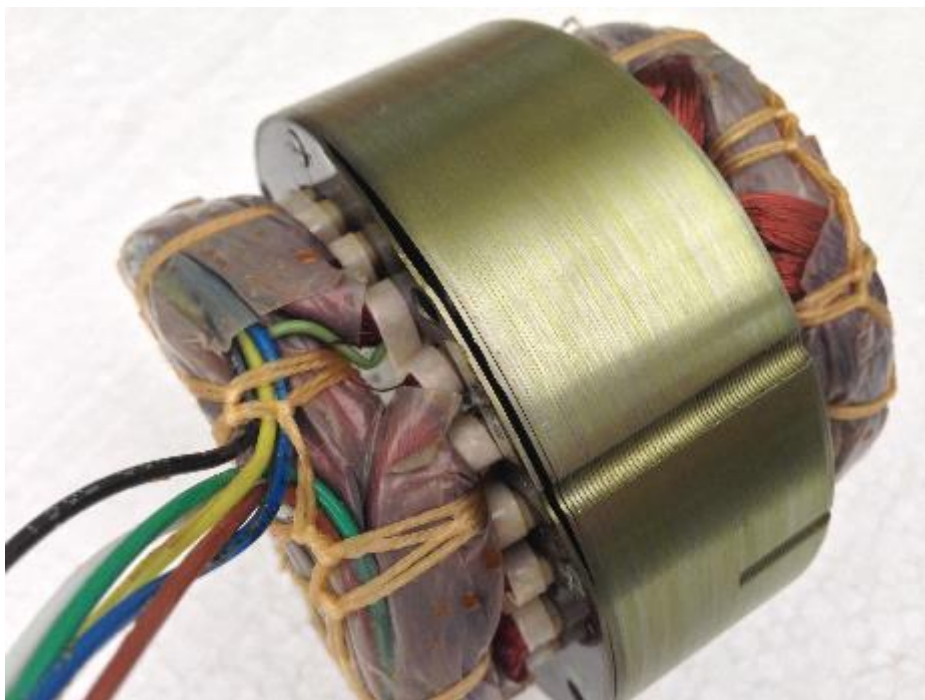
Obrázek 16: Vzorek č. 4 – Mezizávitový zkrat

Vada vzorků č. 3 a 4 je opět patrná z obrázků 15 a 16. Jedná se o stator s vadou izolace vinutí, která způsobila mezizávitový zkrat v jedné z fází. Jak již bylo zmíněno v kapitole 1, mezizávitový zkrat je způsoben porušením izolace vlivem mechanického namáhání, nebo napěťovými pulzy o velké amplitudě a strmosti. Následkem mechanického nebo elektrického opotřebení vznikne zkrat nejprve v jenom místě a pokud není porucha včas odhalena a stroj odpojen od napájení, bude zkrat tepelně namáhat izolaci ve svém okolí a rychle dojde k vypálení izolace na velké ploše. To se projeví zvýšeným odběrem proudu, zápachem a opálením vinutí ve



všech místech zkratu. Další možnou příčinou je vniknutí vlhkosti do vnitřních částí vinutí motoru nebo vniknutí mazacího tuku, který na sebe vlivem kondenzace naváže vlhkost a ta v narušené izolaci způsobí snížení elektrické pevnosti izolace. Ke kondenzaci vlhkosti může dojít také při provozování v prostředí s velkými teplotními výkyvy. Tato vada se vyskytuje u 0,14% vyrobených strojů. [19]

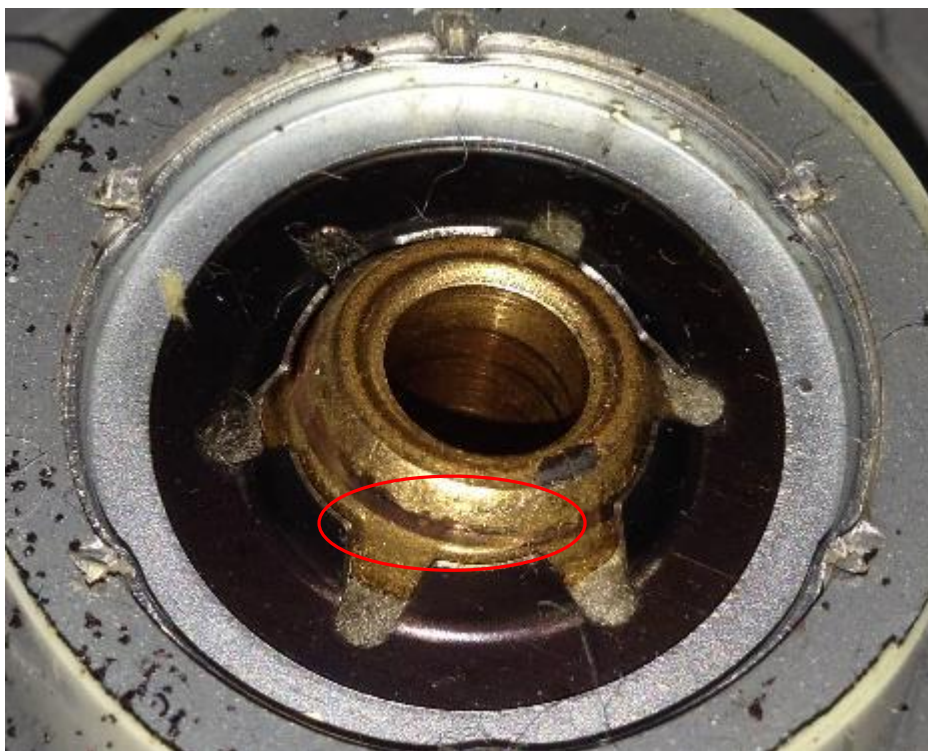
### 3.3 Vadný satorový plech



Obrázek 17: Vzorek č. 5 – Ohnutý satorový plech

Tento vzorek představuje stator, který má ve svazku plechů jeden plech ohnutý. Z pohledu elektromagnetického to podstatný vliv na magnetické vlastnosti statoru nemá, protože se jedná o krajní plech. Tato vada ovšem má vliv na produkovaný hluk stroje. Vlivem proměnného magnetického pole v místě průhybu, působí na odstávající část plechu proměnná síla. Tato síla přerušovaně přitahuje odstávající část plechu a pokud je síla větší, než tuhost plechu, bude docházet ke kontaktu plechu se zbytkem satorového svazku, což bude generovat hluk a axiální vibrace. Ohnutý plech ve svazku může být způsoben chybou ve výrobě, například ohnutím před slisováním statoru vlivem nevhodné manipulace nebo nedodržením roztečí děr pro nýty, čímž dojde k prohnutí plechu při lisování s plechy jiných rozměrů. Další možnou příčinou této vady je pád nebo jiná neopatrná manipulace po ukončení výroby nebo v provozu. Rozměrová vada statoru se vyskytuje asi u 0,13% strojů [19]. Je také možné si všimnout volného otvoru pro stahovací šroub nebo tyč uprostřed ohnuté části plechu. Pokud by byly osazeny všechny stahovací šrouby, pro které byly ve svazku vytvořeny otvory, došlo by k rozdělení odstávající části na dvě menší a také k podstatnému zmenšení vzdálenosti mezi satorovým svazkem a ohnutou částí posledního plechu.

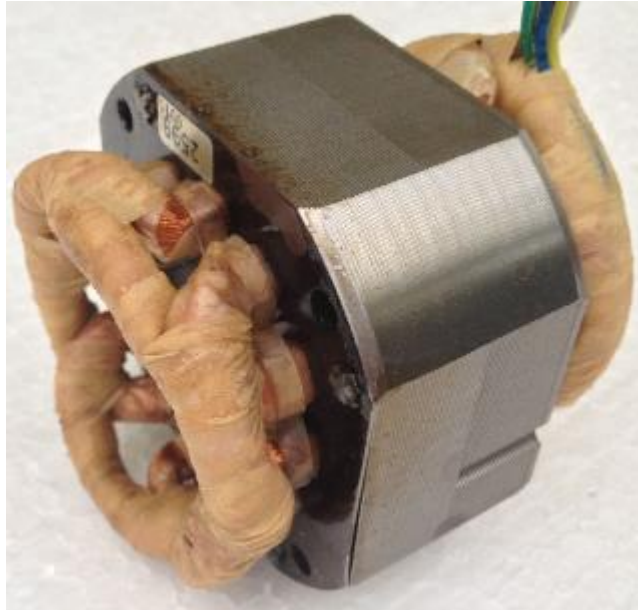
### 3.4 Zadřené ložisko



*Obrázek 18: Vzorek č. 6 – Zadřené ložisko*

Toto kluzné ložisko se nachází ve štítu motoru a nese známky zadření, což by za provozu stroje mohlo být zdrojem hluku a vibrací. Na obrázku je viditelná obroušená lesklá oblast, která se za chodu motoru dotýká jednoho nebo více upevňovacích elementů. Během focení bylo ložisko pootočeno mimo svou osu, aby byla vidět obroušená místa. Takové ložisko musí být vyměněno. Příčinou zadřené ložiska může být například porucha mazání nebo nadměrné přetěžování stroje. Ložiska mohou být přetěžována také vlivem nesymetrického elektromagnetického pole statoru nebo přítomností nevývahy v rotoru. Zadřené ložisko se vyskytuje asi ve 2,1% vyrobených strojů [19].

### 3.5 Poškození vinutí statoru rázovou vlnou

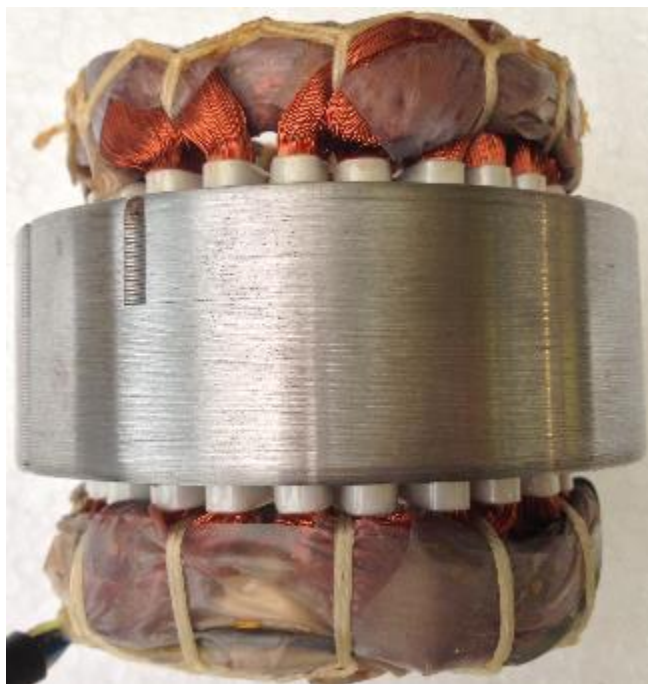


Obrázek 19: Vzorek č. 7 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou



Obrázek 20: Vzorek č. 7 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou – detail vinutí – v tomto případě není poškození viditelné okem





*Obrázek 21: Vzorek č. 8 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou*



*Obrázek 22: Vzorek č. 8 – Poškození vinutí statoru rázovou vlnou – detail vinutí – v tomto případě není poškození viditelné okem*

Vzorky č. 7 a 8 byly poškozeny při testování elektrické odolnosti izolace. Tato zkouška se provádí při výstupní kontrole. Testuje se tím elektrická pevnost izolace vinutí mezi závity jedné fáze i mezi jednotlivými fázemi tak, že se sleduje průběh rázu a porovnává se s průběhy jiných fází stejného motoru. Ze statistického hlediska je nepravděpodobné, že by měly dvě fáze v motoru identickou poruchu, proto se takto porovnávají mezi sebou. Před tím, než byla zavedena zkouška rázovou vlnou, se zkoušela elektrická pevnost vinutí vůči zemi nebo kostře. Vzorky č. 7

a 8 neprošly touto zkouškou, což znamená, že byla elektricky proražena izolace vinutí a toto proražené vinutí musí být vyměněno za nové. Místo, kde došlo k proražení izolace se hledá obtížně a pouhým okem je prakticky nepozorovatelné. Proražené místo se může nacházet kdekoli ve vinutí, takže i kdyby bylo pozorovatelné okem, ale nacházelo se uvnitř drážky, tak nejsme schopni určit polohu průrazu. Pokud by se motor připojil k napájení, došlo by k mezizávitovému zkratu a jeho rozšíření po vinutí, podobně jako u vzorků č. 3 a 4. Porušenou izolací po zkoušce rázovou vlnou bývá postiženo asi 0,7% strojů. [19]

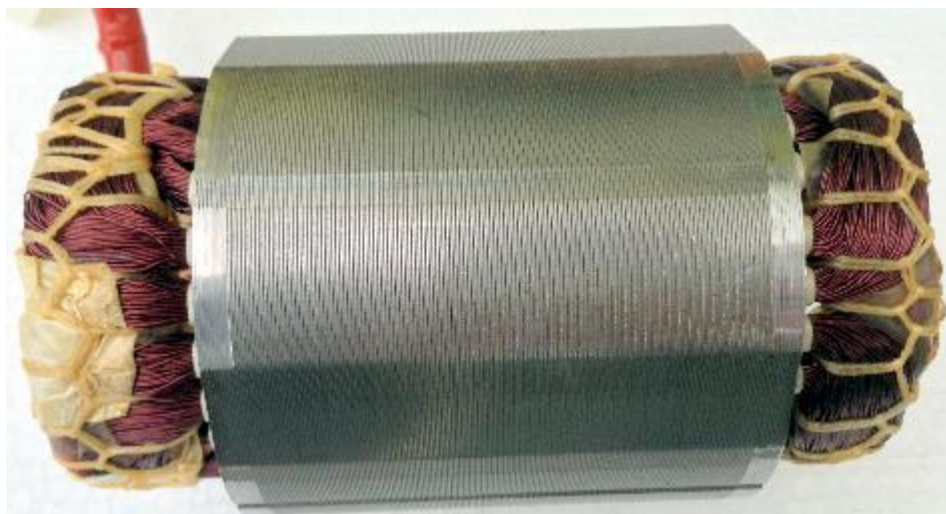
### 3.6 Přerušené statorové vinutí



Obrázek 23: Vzorek č. 9 – Přerušené statorové vinutí

Přerušené statorové vinutí je jedna z méně častých vad elektrických strojů, ale způsobuje disfunkčnost motoru, protože jednou z fází neteče proud a nemůže tedy být vytvořeno třífázové točité magnetické pole. Vytvoří se nesouměrné dvoufázové pole. Motor by se pravděpodobně sám nerozběhl, ale pokud ano, protékaly by zbylými dvěma fázemi velké proudy a mohlo by dojít i ke spálení motoru. Dalšími projevy mohou být například jiskření mezi přerušenými částmi vinutí, zvýšená teplota motoru, zápach v okolí motoru nebo nepravidelný chod. Motor je nutné vyměnit nebo demontovat a převinout. Asi 0,19% elektrických indukčních strojů má, po ukončení výrobního procesu, přerušené statorové vinutí. [19]

### 3.7 Přehřívající se motor



Obrázek 24: Vzorek č. 10 - Přehřívající se stator



Obrázek 25: Vzorek č. 10 - Přehřívající se stator – čelo vinutí

U tohoto vzorku motoru docházelo k vybavování tepelné ochrany. Tepelná ochrana bývá řešena pomocí bimetalového pásku, přes který prochází proud. V případě, že některá z fází je namáhána nadproudem, bimetal se ohřeje a vlivem zvýšené teploty, nad určitou mez, vybaví ochrana a přeruší se obvod. Opětovné spuštění motoru je možné po ochlazení bimetalu. Vada tohoto motoru může být v některé z fází, ze které pravděpodobně uniká proud jinou cestou a tato fáze tedy odebírá větší proud než je jeho jmenovitá hodnota. Únik proudu může být způsoben porušenou izolací vinutí jedné fáze a proud uniká přes kostru stroje. Zvýšení proudu o 5% může znamenat oteplení vinutí o 10 °C a tím snížení životnosti izolace vinutí na polovinu. Tato vada není viditelná pouhým okem a k diagnostice je zapotřebí laboratorní vybavení.



### 3.8 Mezifázový zkrat



Obrázek 26: Vzorek č. 11 – Mezifázový zkrat



Obrázek 27: Vzorek č. 11 – Mezifázový zkrat – detail vinutí

Vzorek č. 11 obsahuje mezifázový zkrat ve vinutí statoru. Tento zkrat byl zjištěn v ranném stádiu, je obtížně pozorovatelný pouhým okem, ale představuje pro motor závažnější riziko než mezizávitový zkrat v jedné fázi, protože mezi jednotlivými fázemi je nesrovnatelně větší rozdíl potenciálů a tedy i zkratový proud je velký. Průchod zkratového proudu zároveň ovlivňuje okolní

vodiče svým silným elektromagnetickým polem. Na obrázku 27 je porušená izolace označena, ale i přes to je obtížně viditelná. Při zjištění mezifázového zkratu musí být motor ihned odpojen, čímž se zamezí úplnému zničení vinutí a případnému požáru. Proražené vinutí je možné vysekat a navinout nové, ale je to na zvážení u každého motoru dle náročnosti a výhodnosti tohoto řešení. V některých případech je výhodnější motor vyměnit za nový. Tato vada se projevuje asi u 0,47% vyrobených motorů. [19]

### 3.9 Prasklá rotorová klec

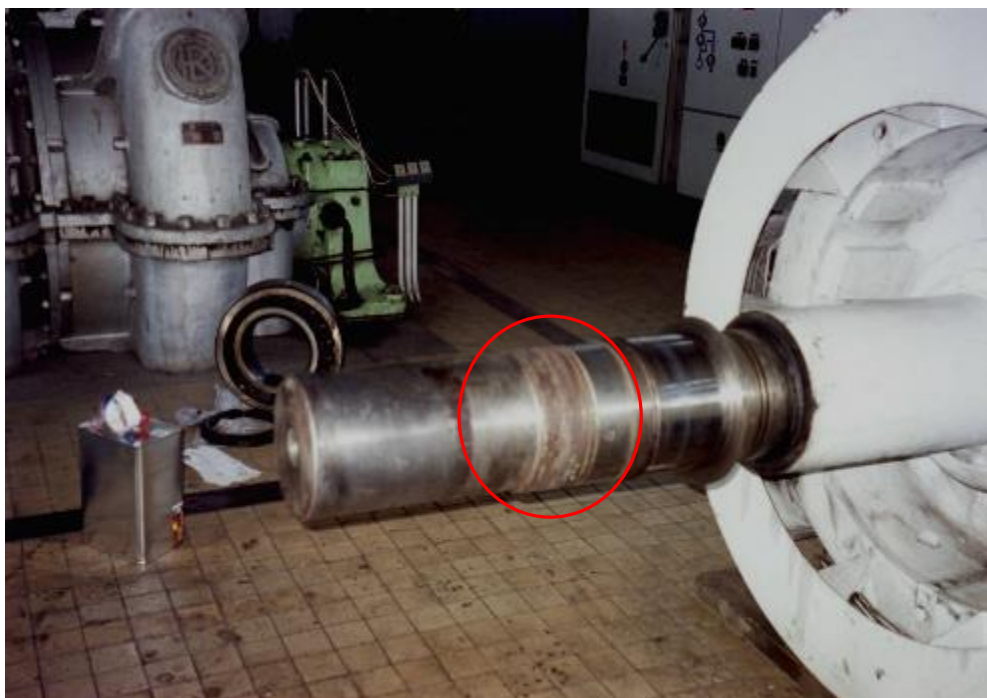


Obrázek 28: Vzorek č. 12 – Prasklý zkratovací kruh rotoru ASM [18]

Na obrázku vzorku č. 12 se nachází rotor velkého asynchronního motoru s kotvou nakrátko, který má prasklý zkratovací kruh. K závadě mohlo dojít v důsledku značného přetěžování motoru, což způsobovalo nadměrné oteplení rotoru. Tím byla snížena pevnost kruhu a došlo k jeho většímu roztažení. Při následném chládnutí došlo k roztržení kruhu díky pnutí při smršťování. Protože se jedná o motor poměrně velkých rozměrů a výkonu, síla potřebná k roztržení masivního zkratovacího kruhu musí být značná a je proto třeba v daných provozních podmínkách zvážit použití stroje o vyšším výkonu, který nebude tak přetěžován. V tomto případě se jedná o neopravitelnou závadu a rotor nebo celý stroj musí být nahrazen jiným.



### 3.10 Elektroerozivní poškození hřídele



*Obrázek 29: Vzorek č. 13 - Elektroerozivní poškození hřídele [18]*

Vzorek č. 13 má zničenou část hřídele v místě, kde bylo uloženo ložisko. Hřídel je poškozená, pravděpodobně od výbojů mezi hřídelí a ložiskem, takže se jedná o elektroerozivní poškození. Elektroeroze spočívá v působení výbojů mezi vodivými materiály, které se po částech taví a z malé části odpařují. Podle míry poškození je po stažení ložiska možné zkorodovaný materiál hřídele obrobit, navařit nový materiál a vybrousit na požadovanou hrubost. Ložisko bude pravděpodobně použito nové, protože je pravděpodobné, že je původní ložisko také poškozeno výboji.

### 3.11 Vliv nesprávně provedené analýzy frekvenčních spekter

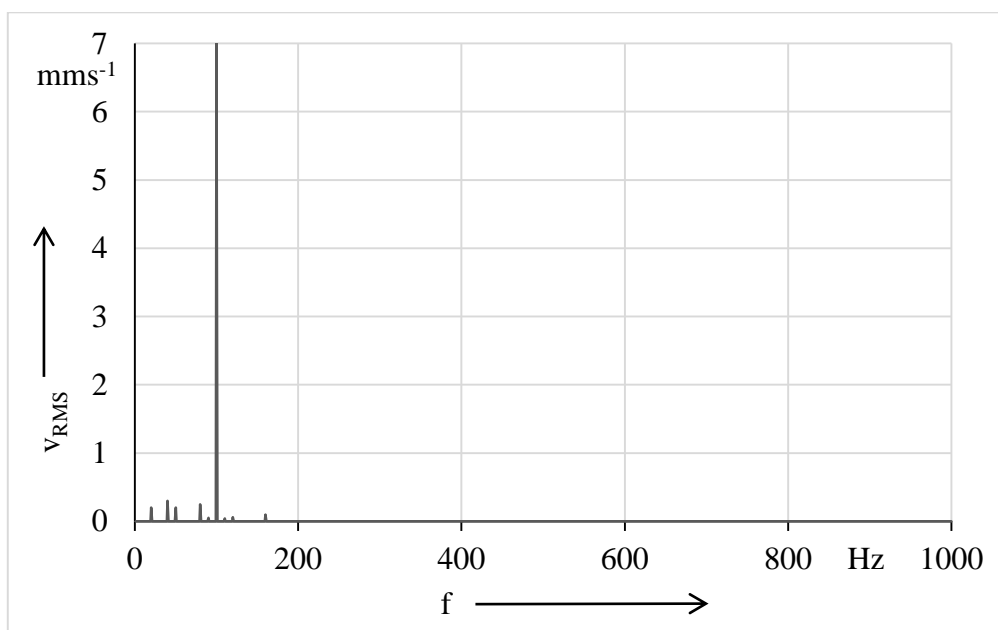
Na základě spolupráce vedoucího diplomové práce, doc. Veselky, s firmou Hudeczek Service, s.r.o. mi bylo umožněno realizovat praktickou část práce s touto firmou a získat k analýze některé podklady z firemního archivu pro seznámení s problematikou. Jedním z poskytnutých podkladů je pojednání o vlivu nesprávně provedené analýzy frekvenčních spekter.

V nejmenované firmě se nacházel asynchronní motor s kroužkovou kotvou, u kterého předchozí diagnostická firma prováděla diagnostiku měřením vibrací stroje. V protokolu bylo uvedeno, že se jedná o vadná ložiska a motor by měl být odeslán na opravu. Jednalo se o důležitý motor, bez kterého nebyl možný provoz celé firmy. Parametry motoru byly:

Typ motoru	1V6 7104-8
Stator	6 kV, 74,8 A
Rotor	1 kV, 389 A
Výkon	630 kW, S1
Otáčky	743 min <sup>-1</sup>
Hmotnost	5790 kg
Rok výroby	1981

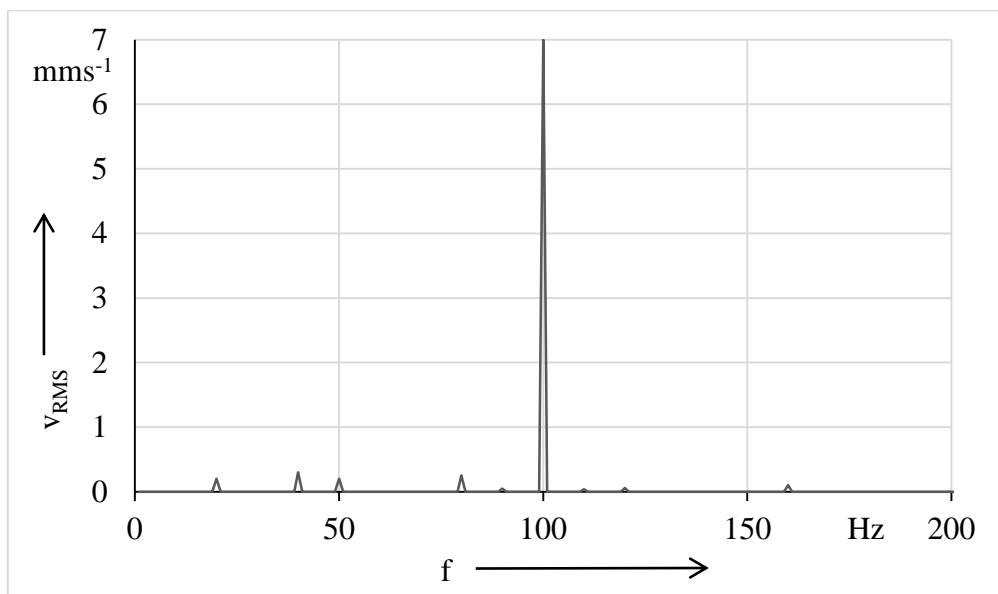
Tabulka 1: Štítkové parametry měřeného motoru [18]

Provozovatel měl k dispozici jeden náhradní motor, za který ten původní vyměnil a odeslal na opravu ložisek. Nahrazený motor se ale choval podobně a byla znovu přizvána stejná diagnostická firma, jejíž pracovníci opět dospěli k názoru, že se jedná o vadná ložiska. Poté byla k případu pozvána jiná firma, aby provedla analýzu motoru. [18]



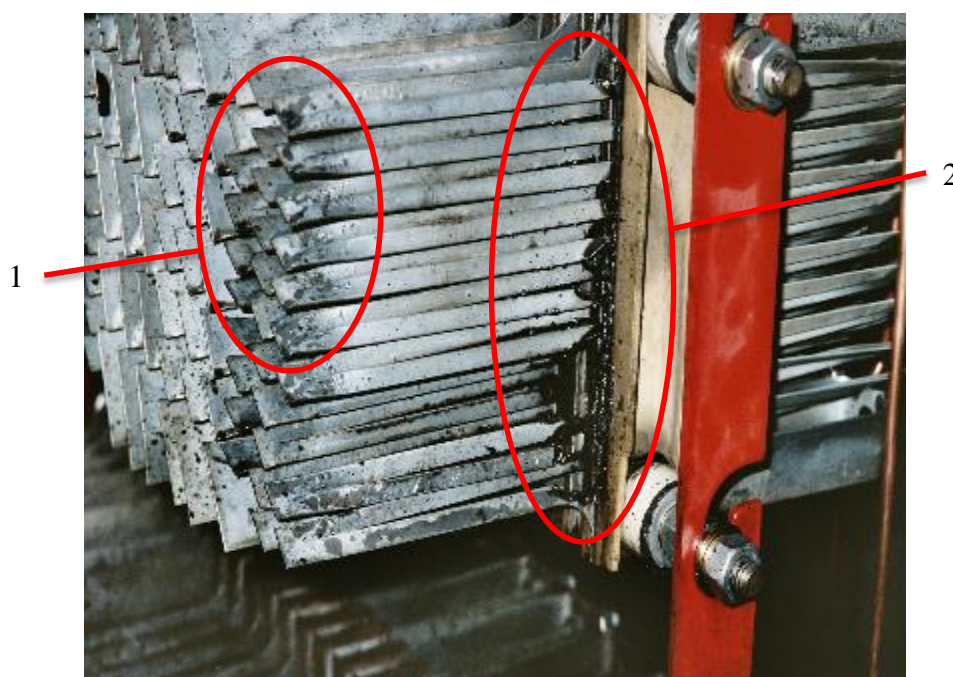
Obrázek 30: Frekvenční spektrum měřícího bodu diagnostikovaného motoru [18]

V uvedeném frekvenčním spektru, které měřila původní diagnostická firma, se nenachází známky poškozeného ložiska. U valivých ložisek se poruchy, dle jejich pokročilosti, projevují v pásmu 400 Hz až 60 kHz.



Obrázek 31: Detail změřeného frekvenčního spektra [18]

Z detailu diagnostikovaného frekvenčního spektra je zřejmé, že maximální amplituda vibrací má frekvenci 100 Hz, což nasvědčuje nesymetrii elektromagnetického pole statoru. Proměřením vyměněného motoru nebyla odhalena žádná závada. Vzhledem k tomu, že motor byl spouštěn pomocí odporového spouštěče chlazeného izolačním olejem, byla přesunuta pozornost ke spouštěči. Analýza izolačního oleje ukázala, že olej nevyhovoval v žádném z požadavků a díky snížené izolační schopnosti docházelo k vypalování a znečišťování odporníků. [18]



Obrázek 32: Vzorek č. 15 - Poškozená izolace odporníku [18]

Legenda: (1) Znečištěné odporové plechy, (2) Elektrické průrazy

Z výše uvedeného obrázku je patrné znečištění od propáleného izolačního oleje na segmentech odporníku. Při startu motoru, kdy odporníkem procházely velké proudy, docházelo v oleji k průrazům a opalování segmentů odporníku.



Obrázek 33: Vzorek č. 15 - Upadený odporový plech [18]



Obrázek 34: Vzorek č. 15 - Zkratovaný odporník upadeným plechem [18]

Jeden z odporových plechů byl dokonce upadený a ležel na spodní řadě odporových segmentů. K provozu motorů s odporovými spouštěči se pojí také údržba odporníků a ochrana před jejich

zkratem nebo jiným poškozením. Při provozu může docházet k porušení izolace odporových plechů a následným zemním zkratům, které sebou nesou i přenášení materiálu plechů a jejich upalování. Pokud v důsledku výbojů upadne některý z odporových plechů, změní se celkový odpor odporníku a nastavování parametrů motoru pomocí tohoto odporníku nebude přesné. V horším případě může upálený plech spadnout na jiné funkční segmenty a vyřadit je tím z celkové hodnoty odporu spouštěče. Takto vzniklá nesymetrie napětí a proudu ovlivňovala chod motoru. Provozovateli bylo proto doporučeno, aby demontoval motor a provedl kontrolu vinutí, drážkových klínů a drážkové izolace. Po demontáži byl objeven odřený pruh po celém obvodu rotoru v jedné sekci rotorových plechů. Toto odřené místo bylo nalezeno také na statoru. Důvodem bylo to, že při poruše spouštěče došlo v motoru k velké nesymetrii magnetického pole a průrazu magnetického obvodu, přičemž kousek odlétajícího kovu způsobil zkrat magnetického obvodu. Provozovatel stroje se poté rozhodl vyměnit poškozený spouštěč za nový elektronický spouštěč a po opravě byl motor opět nasazen do provozu. [18]

Při měření vibrací, za účelem diagnostiky poruchy stroje, je nutné dobře ovládat nejen měřící přístroje, ale i diagnostické metody. Díky opakované špatné diagnostice motoru původní firmou byl provozovatel nucen investovat do opravy dvou poškozených motorů a na šest týdnů zastavit provoz továrny.

### 3.12 Protokol o posouzení příčin nadměrných vibrací a oteplení pohonu čerpadla

Dalším poskytnutým podkladem je protokol z opravy čerpací stanice sestávající z čerpadla, poháněcího elektromotoru a frekvenčního měniče, který napájel elektromotor. Tato sestava vykazovala nadměrné oteplení a vibrace. Technici provedli diagnostiku a návrh opatření. Poháněcí elektromotor měl parametry 250 kW, 400 V, 990 min<sup>-1</sup>. Napájen byl z frekvenčního měniče a provozován na 1230 min<sup>-1</sup>, což byly jmenovité otáčky poháněného čerpadla. Vyšších otáček motoru bylo dosaženo zvýšením frekvence z 50 Hz na asi 61 Hz, při nichž výrobce motoru údajně schválil provozování zařízení. [18]

Poháněcí motor		Poháněné čerpadlo	
Krytí	IP55	Průtok	444 l/min <sup>-1</sup>
Norma	EN 60034-1	Otáčky	1230 min <sup>-1</sup>
Napájecí síť	50 Hz	Dopravní výška	38 m
Výkon	250 kW	Výkon	191 kW
Jmenovité napětí	D/Y 400/690 V	Průměr oběž. kola	470 mm
Jmenovitý proud	D/Y 433/251 A	Hmotnost	2150 kg
cos φ	0,88		
Jmenovité otáčky	990 min <sup>-1</sup>		
Hmotnost	1700 kg		

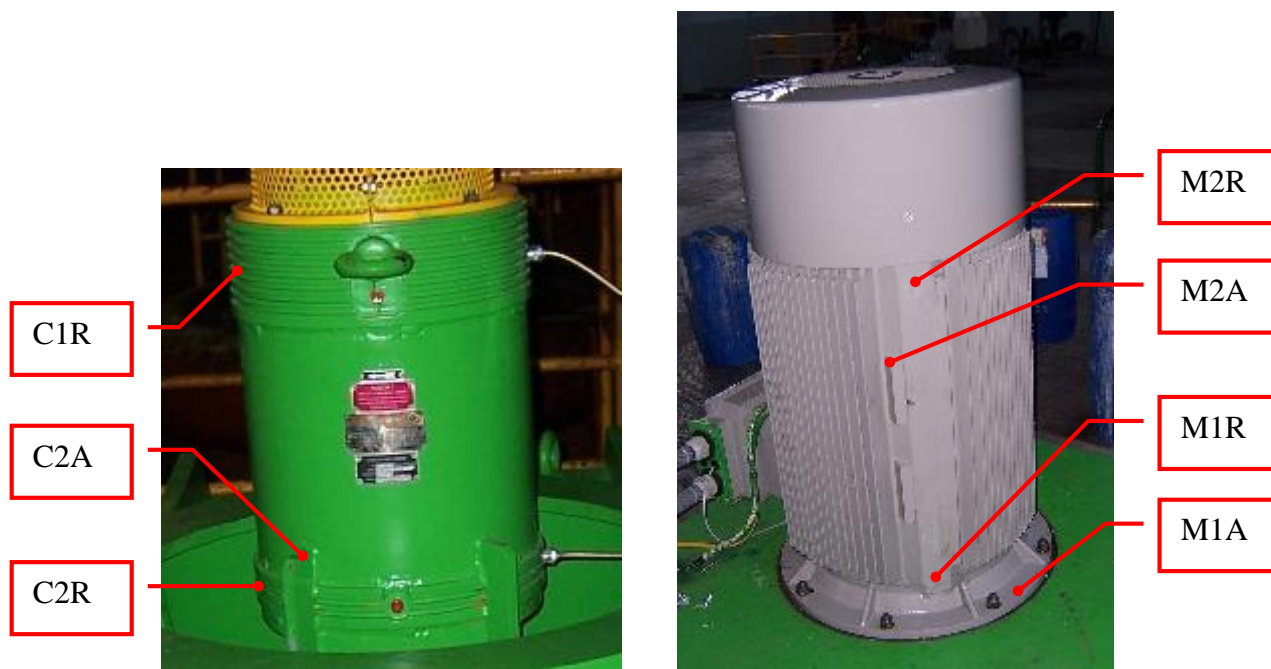
*Tabulka 2: Štítkové údaje elektromotoru a čerpadla [18]*

Při diagnostice byly sledovány následující parametry:

- teploty ložisek elektromotoru a čerpadla,
- vibrace ložisek elektromotoru a čerpadla,
- napájecí napětí a proud odebíraný elektromotorem s analýzou vyšších harmonických,
- posouzení provedení a uložení konstrukce pro spojení čerpadla a elektromotoru,
- posouzení technické dokumentace soustrojí z hlediska dimenzování napájecích obvodů soustrojí. [18]

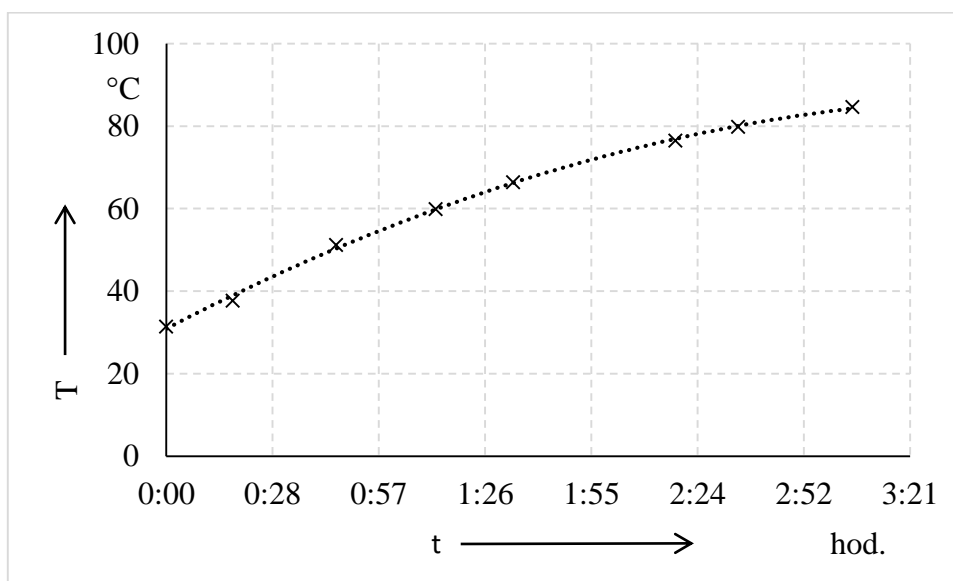
Měření teplot a vibrací bylo provedeno na sedmi místech soustrojí podle přiložené fotodokumentace.





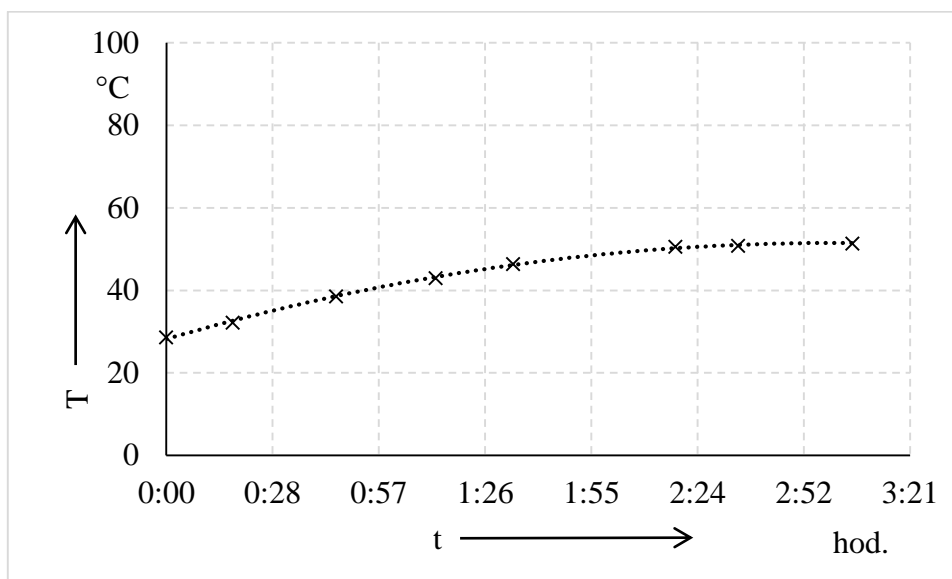
Obrázek 35: Rozmístění měřících bodů na soustrojí [18]

Označení C značí body měření na čerpadle, M body při měření na motoru, A je axiální směr a R je radiální směr měření vibrací. V průběhu měření se teplota ložiska motoru stále zvyšovala, jak ukazuje následující průběh.



Obrázek 36: Průběh teploty na ložisku motoru [18]

Z grafu je zřejmé, že po 3 hodinách provozu motoru na plný výkon se teplota ložiska motoru neustálila a stále rostla s náznakem pomalého ustalování. Takto by teplota pravděpodobně rostla odhadem ke 100 °C. Pro bližší určení zdroje tepla byla změřena také teplota ložiska čerpadla.



Obrázek 37: Průběh teploty na ložisku čerpadla [18]

Z průběhu teploty ložiska čerpadla je patrné, že teplota se ustálila přibližně po 2 hodinách provozu na plný výkon a to na hodnotě 51 °C, takže se nejedná o zdroj nadměrného oteplení a problémové místo soustrojí.

Měřením efektivních hodnot rychlosti, zrychlení a amplitud vibrací a pomocí rychlé Fourierovy transformace byla sledována frekvenční spektra amplitud a jejich změny při oteplování motoru. Na začátku zkoušky, když měl motor teplotu okolí, byla ve spektru dominantní amplituda vibrací o frekvenci 122,5 Hz, což odpovídá nesymetrickému elektromagnetickému poli motoru. S nárůstem teploty se tato amplituda zásadně neměnila. Vibrace na 1x a 2x otáčkové frekvence motoru nebyly výrazné. V měřicím bodě M2R byly naměřeny zvýšené vibrace ve všech významných složkách, ale zpočátku nedosahovaly varovných hodnot. S oteplením rostly amplitudy radiálních vibrací v bodech M1R a M2R přibližně na pětinasobek hodnot naměřených za studena. Po 2 hodinách provozu dosáhla radiální složka vibrací v bodě M1R nebezpečných hodnot na frekvenci 20 Hz. V bodě M2R byl nárůst vibrací s teplotou rovněž alarmující. Skutečnost, že byl motor napájen z frekvenčního měniče, je do určité míry zdůvodněním nadměrných vibrací a oteplení. Zásadní vliv ale mělo nedostatečné chlazení spodního ložiska, které bylo chlazeno pouze vedením tepla konstrukcí soustrojí, jak bylo sledováním zjištěno. Dále pak provoz motoru na 1200 min<sup>-1</sup>, tedy za jmenovitými otáčkami, je zdrojem tepla. Zvýšení frekvence napájecího napětí z 50 Hz na 61 Hz způsobilo snížení momentu motoru, což plyne z momentové charakteristiky asynchronního motoru. Aby byl zachován potřebný moment na hřídeli čerpadla, vzrostl proud odebíraný motorem a s druhou mocninou proudu také teplota motoru. [18]

Ve spektru vibrací čerpadla se v radiálním směru projevovaly frekvence 75 Hz a 122,5 Hz, které se přenášely z motoru po hřídeli. V axiálním směru se projevovaly frekvence 75 Hz, 102,5 Hz a 122,5 Hz, jejichž amplitudy také nedosahují nebezpečných hodnot a jedná se opět o vibrace přenášené z motoru.

Z naměřených hodnot a pozorovaných jevů byly doporučeny následující opatření a návrhy řešení situace:



- vhodnější řešení pohonu čerpadla by bylo použití čtyřpólového elektromotoru, jehož otáčky by byly sníženy frekvenčním měničem na požadované otáčky pro chod čerpadla,
- navrhnout cizí chlazení motoru, zvláště spodního nedostatečně chlazeného ložiska po úpravě konstrukce soustrojí,
- umístit frekvenční měnič co nejbližší k motoru, tím zkrátit vedení na 3 m, v nejhorším případě 5 m a použít filtry chránící motor i napájecí síť před šířením vyšších harmonických a dořešit zařízení z hlediska EMC. [18]

## 4 VYHODNOCENÍ A ZOBECNĚNÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Tato kapitola se zabývá praktickým měřením a vibrodiagnostikou čerpadla odpadních vod prováděných ve spolupráci s firmou Hudeczek Service, s.r.o. a dále ověření vlivu velikosti nevývahy rotoru na vibrace stroje.

### 4.1 Ověření vlivu velikosti nevývahy na vibrace stroje

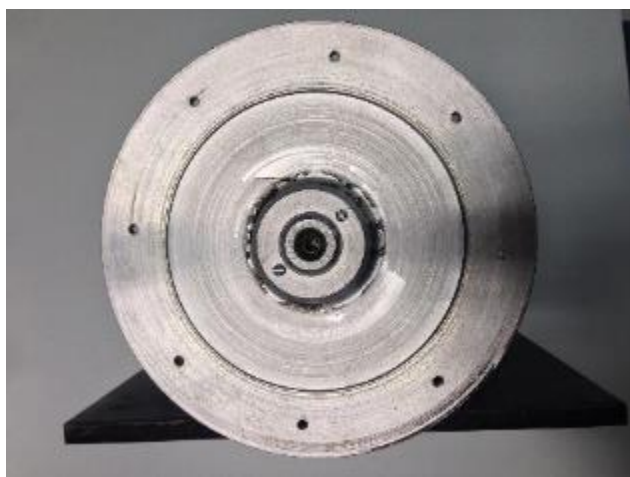
Cílem měření v laboratoři je posoudit velikost vibrací v závislosti na velikosti přidané nevývahy rotoru v rozsahu frekvencí napájení 45 - 55 Hz a také simulovat stav měřeného čerpadla VT5 v čerpací stanici odpadních vod z následující kapitoly. Toto měření lze považovat za simulaci vibrodiagnostiky při ustavení čerpadla VT5, protože nesymetrie elektromagnetického pole se při zatížení stroje projeví zvýšenou 1. harmonickou otáčkovou frekvencí rotoru, stejně jako nesymetrie rotujících hmot.

Pro měření byl vybrán třífázový asynchronní motor s parametry:

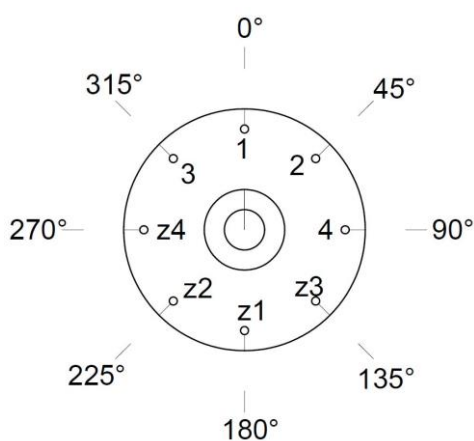
Výrobce	EMP Slavkov u Brna
Typ	TM90-4X B3
Výkon	2200 W
Napětí	Y/D 400/230 V
Proud	Y/D 4,9/8,5 A
Jmenovité otáčky	1400 min <sup>-1</sup>
Frekvence	50 Hz
Počet pólů	4
cos φ	0,83
Výrobní číslo	00339606
Rok výroby	2014

*Tabulka 3: Parametry zkoušeného stroje*

V první fázi byl v dílně zhotoven zkušební kotouč o průměru 200 mm, deska pro uchycení motoru a upraveno pracoviště ve školní laboratoři. Na kotouči se nachází 8 děr se závity pro umístění zkušebních závaží. Tyto otvory jsou rozmístěny po 45° a vzdáleny 85 mm od osy motoru. Kotouč je vyroben ze dvou železných částí, které jsou k sobě přivařeny. Na hřídeli motoru je kotouč nasunut a zajištěn pomocí šroubu M8 zašroubovaného radiálně do drážky pro pero, aby nedocházelo k prokluzu kotouče. Proti tomuto šroubu je pro jistotu radiálně umístěn další šroub M4. Oba šrouby jsou jištěny proti povolení axiálně umístěnými šrouby M3, které jsou viditelné na obrázku kotouče č. 38.



Obrázek 38: Zkušební kotouč nasunutý na hřídeli motoru



Obrázek 39: Rozmístění otvorů pro závaží na zkušebním kotouči

Legenda: 1 až 4 - rozmístění závaží při 1. měření,  
z1 až z4 - rozmístění závaží při opakovaném měření

Rozmístění závaží je voleno tak, aby výsledná nevyváha působila na kotouč v místě mezi 0° a 22,5°, resp. 180° a 202,5°. Tím je zajištěna přibližná ekvivalence mezi umístěním závaží o různé hmotnosti do jednoho bodu a postupným umístěním více stejných závaží do bodů 1 až 4, resp. z1 až z4.



Obrázek 40: Zvolená nevyváha

Jako závaží je pro měření použit šroub M5x20 se dvěma maticemi a závlačkou, která je pro zvýšení bezpečnosti zasunuta do připraveného otvoru ve šroubu. Každému ze 4, resp. 8, umístění na kotouči odpovídá jedno ze 4 závaží o konkrétní hmotnosti. Tyto závaží byly váženy s přesností  $\pm 0,01$  g.

Polohy 1, z1	Závaží 1	6,09 g
Polohy 2, z2	Závaží 2	6,05 g
Polohy 3, z3	Závaží 3	6,15 g
Polohy 4, z4	Závaží 4	6,05 g

*Tabulka 4: Hmotnosti jednotlivých závaží*

Po nasazení kotouče na hřídel motoru bylo prověřováno, zda není kotouč deformován. Toto měření je realizováno pomocí setinového indikátoru na přední straně kotouče při postupném otáčení kotouče po  $22,5^\circ$ .



*Obrázek 41: Ověření deformace zkušebního kotouče*

Pootočení kotouče [°]	Výchylka [μm]
0,0	0,0
22,5	49,0
45,0	134,0
67,5	222,0
90,0	275,0
112,5	282,0
135,0	282,0
157,5	294,0
180,0	318,0
202,5	325,0
225,0	332,0
247,5	334,0
270,0	331,0
292,5	240,0
315,0	105,0
337,5	19,0

*Tabulka 5: Vychýlení okraje kotouče v závislosti na pootočení hřídele*

Z naměřených odchylek vyplývá, že kotouč je v okolí 0° prohnutý o 334 μm směrem k motoru. Tato odchylka může být sama o sobě zdrojem vibrací, což je jeden z důvodů měření vibrací motoru nejprve bez kotouče a poté s nezatíženým kotoučem, aby bylo možné posoudit vliv samotného kotouče na celkové vibrace stroje.



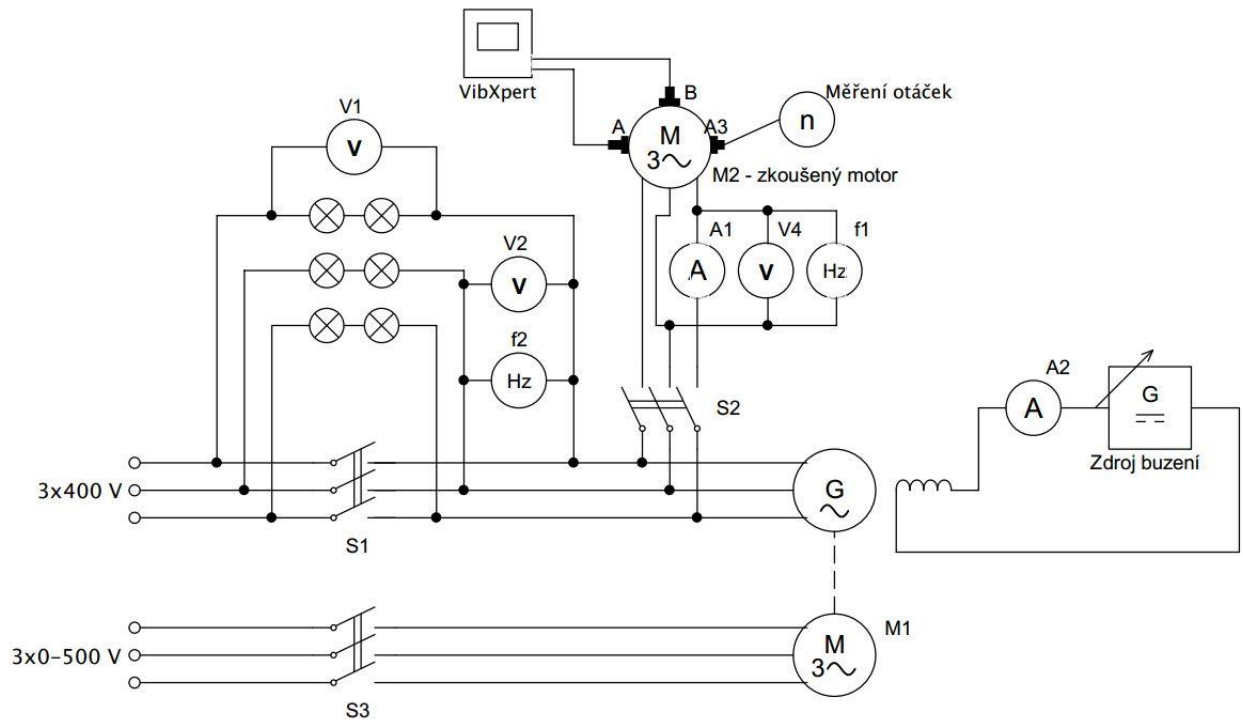
Obrázek 42: Ukotvení zkoušeného motoru k základové desce

Pro ukotvení motoru byla použita železná deska o rozměrech 355 x 291 x 12 mm, do které byly v místech patek motoru vytvořeny závity pro šrouby M8 k uchycení motoru. Tato deska s motorem je dále přichycena k základové desce v laboratoři tak, aby byl zkušební kotouč umístěn mimo základ a nemohlo tak dojít ke kontaktu kotouče se základovou deskou a ovlivnění měření.

V důsledku požadavku na měření při různých otáčkách je vyžadováno zapojení umožňující změnu frekvence napájení zkoušeného motoru. K tomuto účelu je využito pracoviště pro laboratorní úlohu fázování synchronního generátoru na síť. Změnou otáček synchronního generátoru se mění frekvence napájení zkoušeného motoru při současně regulaci buzení generátoru tak, aby byl zkoušený motor stále napájen sdruženým napětím 400 V.

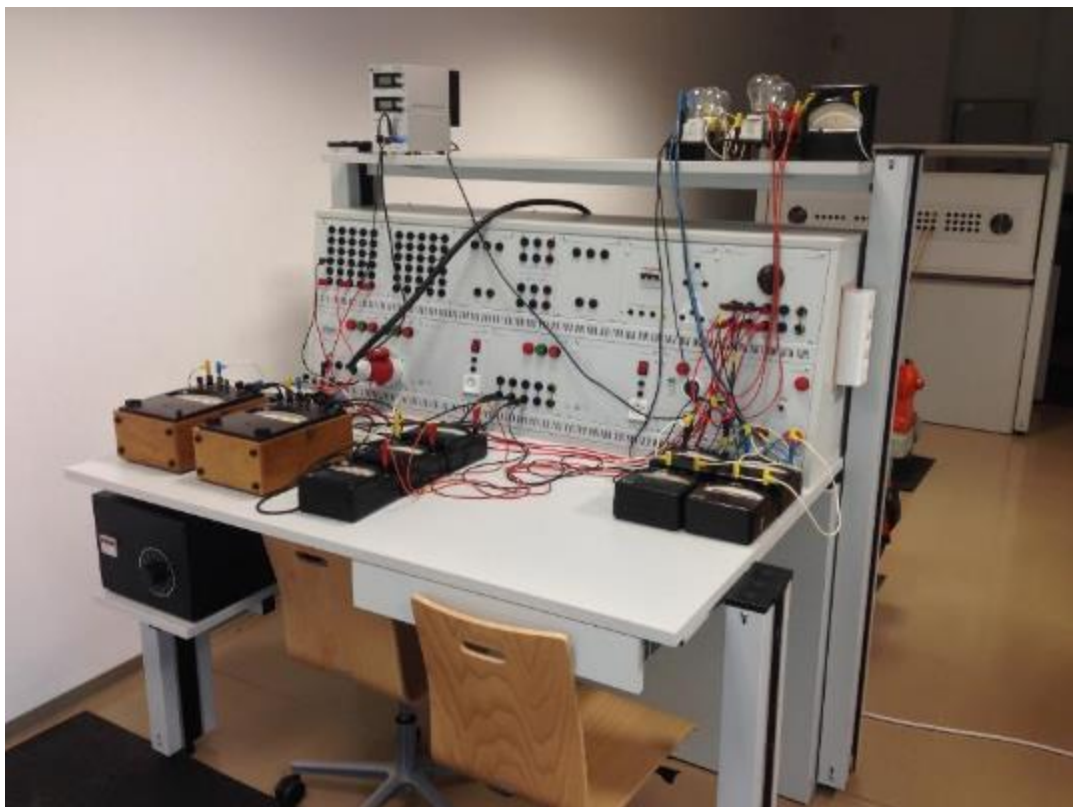
#### 4.1.1 Postup a příprava měření v laboratoři

1. Příprava pracoviště
2. Spuštění soustrojí.
  - a. Rozběh poháněcího stroje s minimálními otáčkami.
  - b. Nastavení otáček odpovídajících výstupní frekvenci 45 Hz.
  - c. Nabuzení synchronního generátoru k dosažení výstupního fázového napětí 196 V.
3. Spuštění zkoušeného motoru bez kotouče.
4. Měření napětí, proudu, frekvence, otáček a vibrací na motoru.
5. Postup opakovat pro frekvence generátoru v rozsahu 45 - 55 Hz s krokem 2,5 Hz.
6. Nasazení zkušebního kotouče bez závaží na hřídel motoru a opětovné měření.
7. Přidání závaží 1 na pozici 1 na kotouči a měření stejným způsobem v rozsahu frekvencí 45 – 55 Hz. Tento postup opakovat s postupným přidáváním závaží na kotouč.
8. Export naměřených dat o vibracích motoru z přístroje VibXpert a provedení Rychlé Fourierovy transformace.
9. Porovnání a vyhodnocení výsledků.



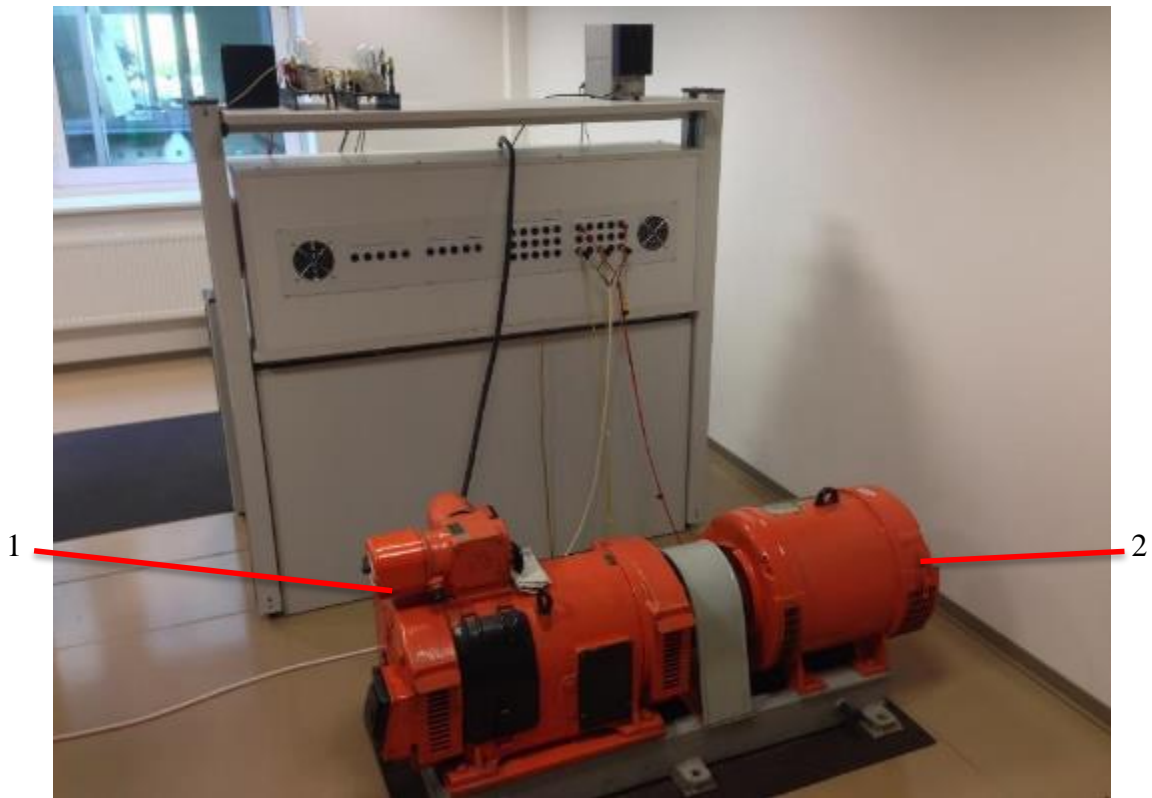
Obrázek 43: Schéma zapojení pracoviště

Jak již bylo zmíněno, pro vytvoření vlastní napájecí sítě zkoušeného motoru byl použit synchronní generátor zapojený pro laboratorní úlohu fázování synchronního generátoru na síť.



Obrázek 44: Zkušební pult





*Obrázek 45: Synchronní generátor použitý pro napájení zkoušeného motoru*

Legenda: (1) poháněcí stroj, (2) synchronní generátor



*Obrázek 46: Vypínač a obvody pro měření elektrických veličin zkoušeného motoru*

Legenda: (3) zkoušený motor



Teoretickým výpočtem je možné určit přibližnou hodnotu frekvence, na které se ve frekvenčním spektru bude nevyváha projevovat zvýšenou amplitudou rychlosti vibrací.

$$f_r = \frac{n_r}{60} \quad (4-1)$$

Při měření z1, tedy měření při nezátíženém kotouči, byly naměřeny otáčky motoru pro různé frekvence napájení, ze kterých budu vycházet pro přibližný výpočet otáčkové frekvence, na které by se měla projevit nevyváha.

<b>f [Hz]</b>	<b>45,00</b>	<b>47,50</b>	<b>50,00</b>	<b>52,50</b>	<b>55,00</b>
n <sub>s</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1350	1425	1500	1575	1650
n <sub>r</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1332	1409	1467	1548	1626
f <sub>r</sub> [Hz]	22,20	23,48	24,45	25,80	27,10

*Tabulka 6: Vypočtené a naměřené otáčky a frekvence motoru*

Z naměřených otáček, znalosti rozměrů kotouče a hmotnosti jednotlivých závaží je možné, pro představu, vypočítat odstředivé síly působící na závaží podle vztahu

$$F_o = m\omega^2 r \quad (4-2)$$

<b>f [Hz]</b>	<b>45,00</b>	<b>47,50</b>	<b>50,00</b>	<b>52,50</b>	<b>55,00</b>
n <sub>r</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1332	1409	1467	1548	1626
ω <sub>r</sub> [rad.s <sup>-1</sup> ]	139,49	147,55	153,62	162,11	170,27
F <sub>o-závaží 1</sub> [N]	10,07	11,27	12,22	13,60	15,01
F <sub>o-závaží 2</sub> [N]	10,01	11,20	12,14	13,51	14,91
F <sub>o-závaží 3</sub> [N]	10,17	11,38	12,34	13,74	15,16
F <sub>o-závaží 4</sub> [N]	10,01	11,20	12,14	13,51	14,91

*Tabulka 7: Vypočítané velikosti odstředivé síly působící na jednotlivá závaží*

### 4.1.2 Vyhodnocení měření

V následující tabulce jsou zaznamenány hodnoty napětí, proudu, frekvence a otáček měřené na zkoušeném motoru. Při frekvenci 45 Hz nebylo možné nabudit synchronní generátor na požadované sdružené napětí 400 V, ale pouze na 375 V, kvůli omezenému rozsahu zdroje v obvodu buzení.

	<b>f [Hz]</b>	<b>45,00</b>	<b>47,50</b>	<b>50,00</b>	<b>52,50</b>	<b>55,00</b>
Měření 0 Bez kotouče	U <sub>m</sub> [V]	375,00	400,00	405,00	400,00	405,00
	I <sub>m</sub> [A]	3,20	3,20	2,84	2,48	2,26
	f <sub>m</sub> [Hz]	45,00	47,50	49,50	51,50	54,75
	n <sub>m</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1335	1422	1494	1538	1643
Měření 1 Bez závaží	U <sub>m</sub> [V]	375,00	400,00	400,00	400,00	405,00
	I <sub>m</sub> [A]	3,20	3,20	2,85	2,53	2,28
	f <sub>m</sub> [Hz]	45,00	47,50	49,50	52,00	55,00
	n <sub>m</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1324	1419	1481	1551	1634
Měření 2 Se závažím 1	U <sub>m</sub> [V]	375,00	400,00	402,00	400,00	404,00
	I <sub>m</sub> [A]	3,15	3,15	2,80	2,52	2,26
	f <sub>m</sub> [Hz]	45,00	47,50	49,50	51,50	55,00
	n <sub>m</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1322	1420	1486	1556	1642
Měření 3 Se závažími 1, 2	U <sub>m</sub> [V]	376,00	400,00	400,00	404,00	402,00
	I <sub>m</sub> [A]	3,15	3,15	2,75	2,55	2,22
	f <sub>m</sub> [Hz]	45,00	47,50	49,50	52,00	55,00
	n <sub>m</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1328	1414	1491	1552	1639
Měření 4 Se závažími 1, 2, 3	U <sub>m</sub> [V]	375,00	400,00	402,00	400,00	402,00
	I <sub>m</sub> [A]	3,15	3,13	2,80	2,54	2,24
	f <sub>m</sub> [Hz]	45,00	47,50	49,50	52,00	55,00
	n <sub>m</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1334	1421	1487	1549	1634
Měření 5 Se závažími 1, 2, 3, 4	U <sub>m</sub> [V]	375,00	398,00	402,00	400,00	405,00
	I <sub>m</sub> [A]	3,15	3,14	2,80	2,52	2,25
	f <sub>m</sub> [Hz]	45,00	47,50	50,00	51,50	55,00
	n <sub>m</sub> [min <sup>-1</sup> ]	1329	1416	1490	1555	1638

*Tabulka 8: Naměřené hodnoty veličin na motoru*

Naměřené hodnoty otáček mají velký rozptyl. To mohlo být způsobeno tím, že použitý kontaktní měřicí přístroj otáček měří s velkou chybou a v laboratoři nebyl dostupný jiný přístroj, který by měřil s větší přesností.

V přílohách této práce se nachází naměřená frekvenční spektra vibrací zkoušeného motoru v rozsahu do 200 Hz. Vibrace o vyšších frekvencích se projevovaly pouze v okolí 800 Hz, což by mohlo naznačovat poškozená ložiska motoru, ale tyto složky rychlosti vibrací dosahovaly amplitud do  $0,04 \text{ mms}^{-1}$ , což jsou zanedbatelné hodnoty.

Vibrodiagnostika byla provedena nejprve na samotném motoru bez zkušebního kotouče, aby bylo možné posoudit stav motoru a zda absence pera nezpůsobuje nevývahu (Obrázek 54). Nevyváženost rotujících hmot by se, podle výpočtu, měla projevit zvýšenou amplitudou otáčkové frekvence 25 Hz, resp. v okolí této frekvence v závislosti na otáčkách motoru. Spektra ukazují zanedbatelné hodnoty hmotové nevývahy, ale v okolí frekvence 100 Hz dosahují amplitudy rychlosti vibrací  $0,04 \text{ mms}^{-1}$ . Nejedná se o excentricitu rotoru, i když se obvykle projevuje zvýšenou amplitudou na dvojnásobku frekvence sítě, tedy 100 Hz, ale bývá obklopena postranními pásmy s odstupem dvojnásobku skluzové frekvence. [7] Proto se při chodu naprázdno pravděpodobně jedná o malou nesymetrii elektromagnetického pole. Stav zkoušeného motoru lze tedy považovat za bezvadný.

Po připevnění zkušebního kotouče bez závaží došlo ke zvýšení zmíněných amplitud rychlosti vibrací na frekvencích 25 Hz a 100 Hz, které se mírně zvyšovaly s rostoucími otáčkami a tím způsobeným nárůstem odstředivých sil. Amplituda rychlosti vibrací způsobená hmotovou nevývahou dosahovala ovšem pouze  $0,02 \text{ mms}^{-1}$ , což je opět zanedbatelná hodnota, která potvrzuje, že zkušební kotouč nezavádí do soustavy výraznou nevývahu. Zvýšená amplituda na frekvenci 100 Hz dosahovala hodnot od  $0,04 \text{ mms}^{-1}$  do  $0,07 \text{ mms}^{-1}$  a pohybovala v tomto rozmezí po zbytek měření nezávisle na velikosti přidávané nevývahy. Obrázek 55 ukazuje změny amplitud složek rychlosti vibrací při otáčkách motoru odpovídajícím frekvenci napájení motoru 45 Hz v závislosti na změnách velikosti nevývahy. Při přidávání jednotlivých závaží na kotouč docházelo ke zvyšování amplitudy rychlosti vibrací na otáčkové frekvenci rotoru přímoúměrně vzhledem ke zvyšování celkové hmotnosti přidané nevývahy, což odpovídá předpokladu, že čím větší je hmotnost nevývahy rotoru, tím větší vibrace ve stroji vznikají. Tyto vibrace vznikají také u zatíženého stroje s nesymetrií elektromagnetického pole v závislosti na zatížení stroje. Při frekvenci napájení 45 Hz, tedy při minimálních měřených otáčkách, dosahovala amplituda rychlosti vibrací na otáčkové frekvenci, po použití všech čtyř závaží, hodnoty  $0,14 \text{ mms}^{-1}$ . Na obrázcích 56 až 59 se nachází frekvenční spektra vibrací zkoušeného motoru při vyšších otáčkách odpovídajících frekvencím napájení 47,5 Hz, 50 Hz, 52,5 Hz a 55 Hz. Se zvyšujícími se otáčkami rostou odstředivé síly působící na závaží a také amplituda rychlosti vibrací odpovídající nevyváženosti rotujících hmot. Při maximální hmotnosti nevývahy a maximálních měřených otáčkách dosahovala tato amplituda hodnoty  $0,42 \text{ mms}^{-1}$ . Tato hodnota vibrací nepředstavuje pro motor zvýšené riziko poruchy, ale odpovídá nárůstu odstředivých sil použitých závaží.

Měření na obrázku 57 při frekvenci napájení 50 Hz ale ukazuje vždy nižší hodnoty vibrací pro otáčkovou frekvenci 25 Hz. Příčinou toho může být fakt, že zkoušený motor je konstruován právě na jmenovitou napájecí frekvenci 50 Hz a právě zde by měl být motor odladěn pro dosažení minimálních vibrací.

Ve spektrech při měření se závažím 1 v poloze 1 jsou velikosti amplitud rychlosti vibrací srovnatelné s měřením kotouče bez závaží. Takto zvolenou hmotností a umístěním nevývahy byla pravděpodobně kompenzována nevývaha samotného zkušebního kotouče.

Ve všech naměřených frekvenčních spektrech se vedle výše zmíněných frekvencí projevují také složky vibrací v okolí frekvence 135 Hz. Velikosti jejich amplitud se pohybují v rozmezí od  $0,02 \text{ mms}^{-1}$  do  $0,13 \text{ mms}^{-1}$  v závislosti na velikosti otáček motoru. Vzhledem k tomu, že se poloha této harmonické nemění v závislosti na otáčkách motoru, nepodařilo se původ těchto vibrací zjistit.

Protože nebylo možné umístit snímač pro měření vibrací v axiálním směru kvůli rozměrům zkušebního kotouče, měřeny byly směry vertikální a horizontální na štítu motoru na straně volného konce hřídele se zkušebním kotoučem. Vibrace v horizontálním směru byly naměřeny ve všech případech přibližně 10x menší než ve vertikálním směru. To může být způsobeno například sníženou citlivostí sondy nebo jejím nesprávným upevněním k motoru. Pravděpodobnou se zdá být i možnost, že horizontální snímač vibrací byl umístěn blízko bodu uzlu kmitů, viz kapitola 1.5.1.3 Experimentální vyšetřování řádu kmitání r.

Celé měření bylo následně opakováno s rozmístěním závaží na polohách z1 až z4 z důvodu vyloučení možnosti vyvažování nevývahy samotného zkušebního kotouče. Opět bylo měřeno napětí, proud, frekvence, otáčky motoru a vibrace pro frekvence napájení 45 až 55 Hz.

	<b>f [Hz]</b>	<b>45,00</b>	<b>47,50</b>	<b>50,00</b>	<b>52,50</b>	<b>55,00</b>
Měření 0 Bez kotouče	$U_m$ [V]	375,00	400,00	405,00	400,00	405,00
	$I_m$ [A]	3,20	3,20	2,84	2,48	2,26
	$f_m$ [Hz]	45,00	47,50	49,50	51,50	54,75
	$n_m$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1335	1422	1494	1538	1643
Měření z1 Bez závaží	$U_m$ [V]	377,00	400,00	402,00	402,00	403,00
	$I_m$ [A]	3,18	3,19	2,81	2,52	2,22
	$f_m$ [Hz]	45,00	47,25	49,50	52,00	55,00
	$n_m$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1322	1409	1467	1548	1626
Měření z2 Se závažím 1	$U_m$ [V]	380,00	400,00	402,00	400,00	402,00
	$I_m$ [A]	3,20	3,20	2,83	2,55	2,23
	$f_m$ [Hz]	45,00	47,50	49,50	52,00	54,75
	$n_m$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1328	1422	1491	1551	1624
Měření z3 Se závažími 1, 2	$U_m$ [V]	375,00	400,00	400,00	400,00	404,00
	$I_m$ [A]	3,20	3,18	2,80	2,48	2,25
	$f_m$ [Hz]	45,00	47,50	49,50	52,00	55,00
	$n_m$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1329	1423	1488	1551	1629

Měření z4 Se závažími 1, 2, 3	$U_m$ [V]	378,00	400,00	402,00	400,00	405,00
	$I_m$ [A]	3,18	3,17	2,80	2,50	2,27
	$f_m$ [Hz]	45,00	47,50	49,50	51,75	55,00
	$n_m$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1337	1418	1492	1550	1644
Měření z5 Se závažími 1, 2, 3, 4	$U_m$ [V]	375,00	400,00	402,00	400,00	402,00
	$I_m$ [A]	3,15	3,17	2,80	2,48	2,23
	$f_m$ [Hz]	45,00	47,50	49,50	51,50	54,50
	$n_m$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	1332	1417	1487	1559	1633

*Tabulka 9: Naměřené hodnoty veličin na motoru při změně polohy nevyváhy o  $180^\circ$*

Toto opakované měření (Obrázek 60 až 64) potvrdilo výše uvedené závěry o závislosti velikosti vibrací na hmotnosti nevyváhy a velikosti otáček motoru. Mimo to byla potvrzena hypotéza, že umístění závaží 1 do polohy 1 částečně kompenzovalo nevyváhu samotného zkušebního kotouče, protože při umístění závaží 1 do polohy z1, tedy posunutí závaží na kotouči o  $180^\circ$  od jeho původní polohy, byly naměřeny větší amplitudy rychlosti vibrací na otáčkové frekvenci rotoru. Umístěním jednotlivých závaží do poloh s označením „z“ bylo celkově dosaženo větších hodnot vibrací. Při maximálním zatížení kotouče a maximálních otáčkách měla amplituda otáčkové frekvence velikost  $0,47 \text{ mms}^{-1}$ .

### 4.1.3 Použité stroje a přístroje

Zde je soupis všech použitých strojů a přístrojů pro měření této úlohy:

Označení	Výrobce	Typ	Výr. číslo	Poznámka
Synchronní generátor G	MEZ Frenštát	A8A4 03	547610	Pro 50 Hz: 5,2 kW, 6,5 kVA, 1500 min <sup>-1</sup> , Y 400 V, 9,5 A, cos φ = 0,8 , buzení: 13 - 34 V, 3,1 - 5,7 A
Pohon generátoru M1	Škoda	2T2733E	819896	9 kW, 2160 min <sup>-1</sup> , Stator: 79 V, 34 A, Rotor: 380 V, 18 A, 50 Hz
Mikrometr	ZVL	-	251858.2	-
Vibrační kmitoměr f1	Metra	VL20	7064639	Rozsah 45 - 120 Hz, zvolený rozsah napětí 380 V, TP 0,5
Vibrační kmitoměr f2	Metra	-	671781	Rozsah 45 - 55 Hz, zvolený rozsah napětí 380 V, TP 0,5
Měření vibrací	DB Průftechnik	VibXpert II	030539	-
Voltmetr V1	Metra	-	5549782	Elektromagnetický MP, rozsah 500 V, TP 0,5
Voltmetr V2	Metra	-	4174186	Elektromagnetický MP, rozsah 500 V, TP 0,5
Voltmetr V3	Metra	-	4789212	Magnetoelektrický MP s usměrňovačem, rozsah 600 V, TP 1,5
Ampérmetr A1	Metra	MTL 10	72022	Elektromagnetický MP, rozsah 6 A, TP 0,5
Ampérmetr A2	Metra	-	101306	Magnetoelektrický MP, rozsah 600 V, TP 0,5, bočník TP 0,2, 60 mV, 5Ω
Stejnoseměrný zdroj buzení	Statron	3231.1	1110023	Rozsah 0 - 32 V, 0 - 6,4 A
Pracovní stůl	Diametral	Variolab+	650	-
Měřák otáček	Lutron	DT-2236	L821188	Mechanický MP, Rozsah 100000 min <sup>-1</sup> , odchylka 0,05%
Váha	Excell	SI-132/3000	A142020 10	Rozsahy 0,5kg/2kg/3kg; Odchylka 0,01g/0,02g/0,05g

*Tabulka 10: Použité stroje a přístroje*

## 4.2 Diagnostika a ustavení soustrojí čerpadla VT5

Pro měření ve spolupráci s firmou Hudeczek Service, s.r.o. se jistou dobu hledal vhodný stroj z hlediska názornosti a přístupnosti. Měření bylo provedeno v čerpací stanici odpadních vod, kde se nachází čerpadlo, v jehož elektromotoru došlo k poškození ložisek a zkratu ve vinutí. Z těchto důvodů bylo nutné vyměnit část soustrojí motor - čerpadlo. Původní motor byl nahrazen jiným motorem, který měl provozovatel k dispozici pro tyto účely. Štítky motoru i čerpadla nebyly čitelné, ale technici věděli, že se jedná o soustrojí s následujícími parametry:

	Motor	Čerpadlo
Výkon	160 kW	160 kW
Jmenovité otáčky	1480 min <sup>-1</sup>	1460 min <sup>-1</sup>
Frekvence	50 Hz	-
Jmenovité napětí	500 V (Δ)	-
Jmenovitý proud	219 A	-

Tabulka 11: Parametry soustrojí [18]



Obrázek 47: Soustava inkriminovaného soustrojí

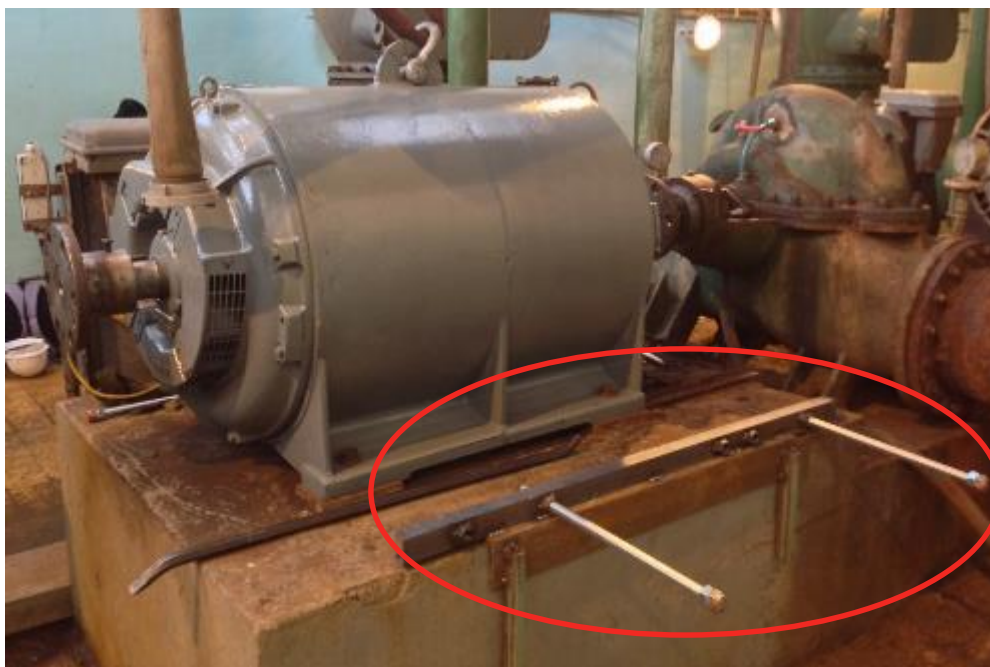
Na obrázku 47 je zobrazeno celé soustrojí motor - čerpadlo. Jako první bylo nutné posoudit, zda má vyměněný motor symetrické magnetické pole, tedy jestli je statorové magnetické pole souměrné, což by se projevilo při měření vibrací. Pro účely měření ve stavu naprázdno bylo nutné motor situovat volným koncem hřídele o 180 stupňů vůči čerpadlu tak, aby byla svorkovnice co nejbližší k rozvodné skříni, protože provozovatelem byly nainstalovány krátké kabely pro napájení motoru. Jak je dále patrné z obrázku soustrojí, vyměněnému motoru chyběly ve

svorkovnici propojovací spojky, jejichž hledání způsobilo zpoždění měření. Také z tohoto důvodu je nutné klást důraz na přípravu měření. Po nalezení spojek a připojení motoru do trojúhelníku nebyl obsluhou změřen izolační stav ve svorkovnici motoru. Soustrojí je provozováno v poměrně vlhkém prostředí, kde na některých místech stéká, kape nebo stříká voda, ne však přímo na motor. Připojení motoru bez měření izolačního stavu proto představuje potenciální nebezpečí zkratu ve svorkovnici při následném provozu stroje. Před měřením je třeba nechat stroj několik minut zaběhnout. Po spuštění motoru naprázdno bylo v okolí motoru slyšet výrazné pištění. Po kontrole ložisek bylo zjištěno, že jedno ložisko je nedostatečně promazané, proto byl mazací tuk doplněn.

Stav stroje	Poškození	Doporučení
Dobrý	0 - 25%	Bez závad.
Uspokojivý	25 - 50%	Výskyt malých závad nebo opotřebení. Zvýšit interval kontrol.
Neuspokojivý	50 - 75%	Výskyt větších závad nebo opotřebení. Připravit stroj na odstávku.
Nepřípustný	75 - 100%	Nadměrné závady nebo opotřebení. Okamžitě zastavit stroj.

*Tabulka 12: Hodnocení technického stavu stroje podle ISO 10816 a podnikových směrnic Hudeczek Service, s.r.o. [18]*

### 4.2.1 Ustavení motoru



*Obrázek 48: Instalace ustavovacího přípravku*

Následovala instalace ustavovacího přípravku, pomocí kterého je možno posouvat motorem po velmi malých úsecích. Přípravek se skládá z ocelových profilů se závity, které jsou umístěny po obou stranách stroje a staženy popruhem pro bezpečné uchycení kolem betonového základu stroje. Strojem se manipuluje díky závitovým tyčím umístěným v závitech profilu a tlačí do patek motoru. Závitové tyče mají malé stoupání závitů, což umožňuje preciznější ustavení stroje.



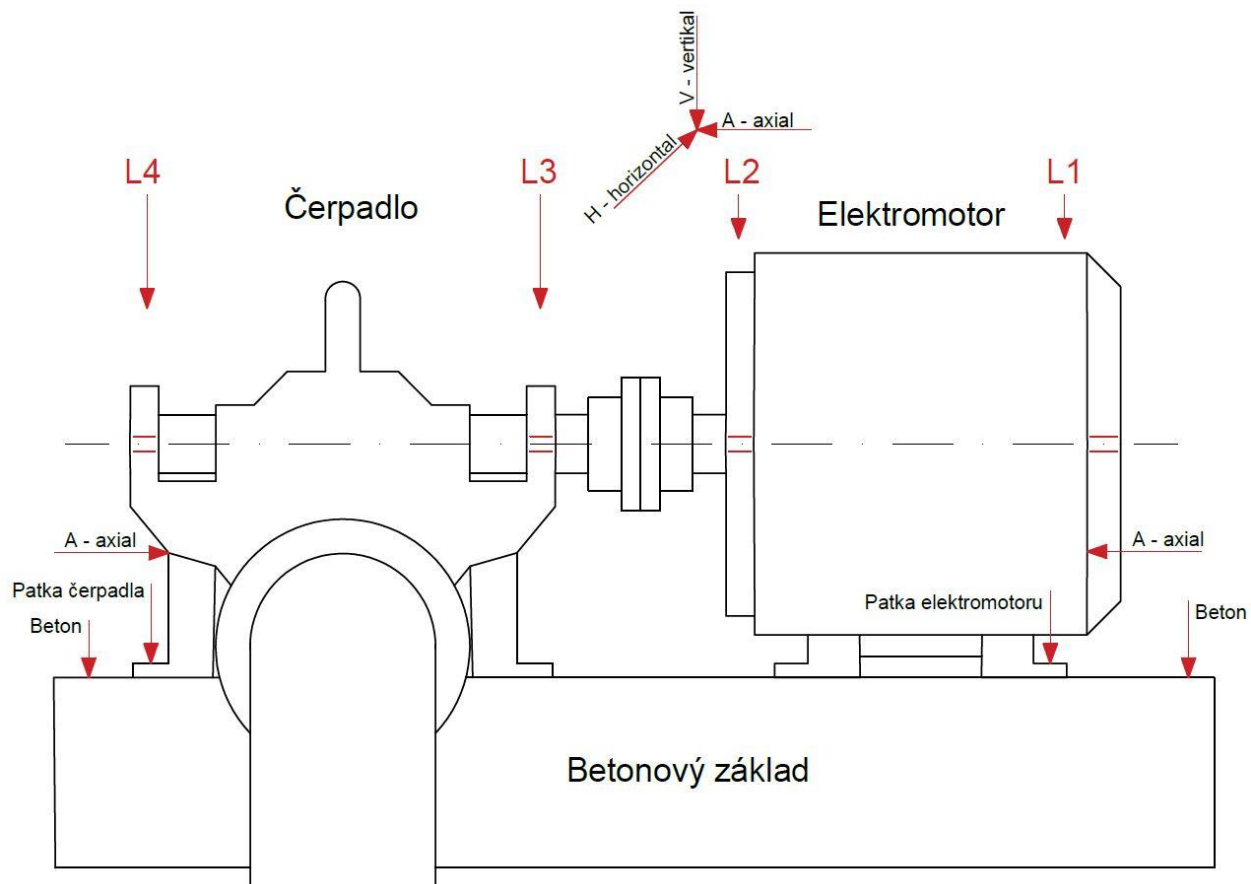


*Obrázek 49: Laserové ustavení stroje*

Následovalo ustavení stroje pomocí přístroje Optaling Plus. Samotný vyhodnocovací přístroj Optaling Plus je propojen s laserem, který zároveň obsahuje snímač laserového paprsku odraženého od přípravku se zrcátkem. Laser i zrcátko se umísťují na konce hřídelí u společné spojky tak, aby se laserový paprsek odrážel od zrcátka zpět do snímače laseru. Přístroj požaduje zadání rozměrů stroje včetně patek a osové výšky stroje. Stroj je nutno pevně ukotvit pomocí šroubů k základu, aby s ním nebylo možné otáčet během měření. Poté se otáčí spojeným koncem hřídele o úhel, který je zobrazován na displeji přístroje Optaling. Ideálně by se mělo provést postupné otočení o celou otáčku, minimálně však o 60°. Pokud není stroj správně ustaven, tedy osy motoru a čerpadla nejsou shodné, dojde při otáčení s laserem k jeho vychýlení na snímači, přístroj vyhodnotí toto vychýlení a zobrazí údaj o změně polohy stroje. Následuje uvolnění šroubů motoru a posunutí stroje v požadovaných směrech, po kterém se motor opět ukotví k základu. Pokud při opětovném měření laserem stále není stroj správně ustaven, opakuje se postup dokud se osy strojů nepřekrývají nebo je vychýlení stroje zanedbatelně malé. V tomto případě byl motor ustaven s odchylkou v řádu desetin mm. [18]

### 4.2.2 Výsledky měření

Diagnostika soustrojí byla provedena pomocí měření vibrací přístrojem ADASH 4300 v měřících bodech na ložiscích podle následujícího obrázku.



Obrázek 50: Měřící body pro měření vibrací

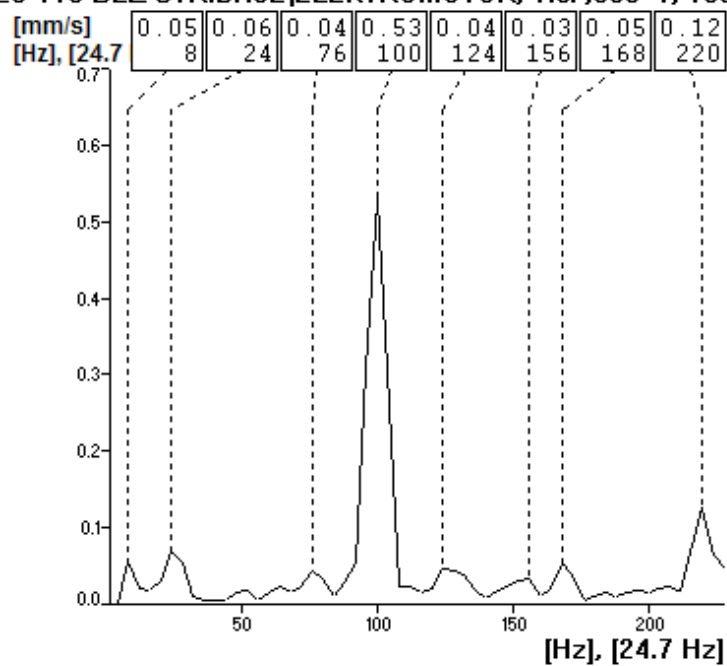
Legenda: L1 - volný konec motoru, L2 - motor na straně spojky,  
L3 - čerpadlo na straně spojky, L4 - volný konec čerpadla

	Měřicí bod	Bez střídače v [ $\text{mms}^{-1}$ ]	Se střídačem v [ $\text{mms}^{-1}$ ]
Elektromotor	Patka	0,24	0,31
	Beton	0,18	0,15
	L1H	0,78	0,74
	L1V	0,54	0,66
	L1A	0,29	0,54
	L2H	0,41	0,88
	L2V	0,58	0,80
Čerpadlo	Patka	0,30	0,20
	Beton	0,18	0,15
	L3H	3,16	2,25
	L3V	2,80	2,07
	L4H	2,90	2,53
	L4V	2,98	2,92
	L4A	3,38	2,92

*Tabulka 13: Naměřené hodnoty vibrací [18]*

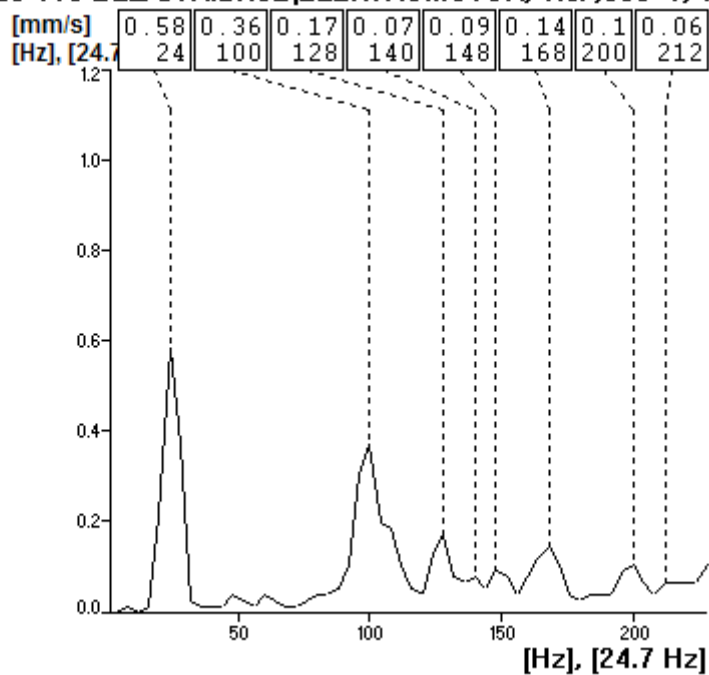
Naměřené hodnoty rychlosti vibrací motoru i čerpadla při zatížení jsou uspokojivé a nevykazují projevy závad nebo nadměrného opotřebení strojních dílů. Na následujících obrázcích jsou znázorněny exportované frekvenční spektra vibrací motoru v bodě L2V z měřiče vibrací. [18]

## ČERPADLO VT5 BEZ STŘÍDAČE ELEKTROMOTOR, v.č. ,500 V, 160 kV

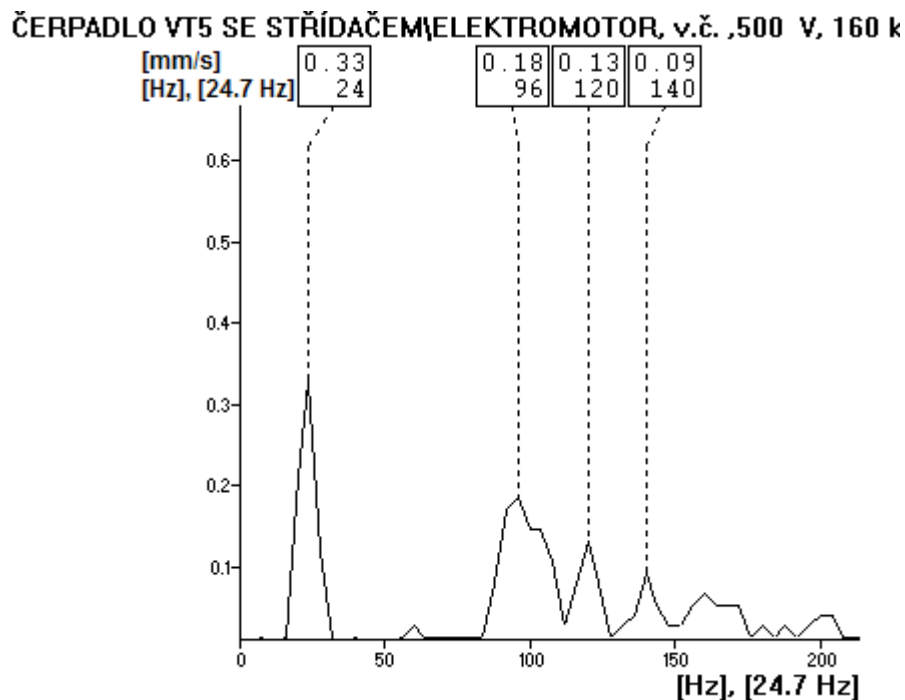


Obrázek 51: Frekvenční spektrum vibrací nezatíženého motoru bez střídače v bodě L2V [18]

## ČERPADLO VT5 BEZ STŘÍDAČE ELEKTROMOTOR, v.č. ,500 V, 160



Obrázek 52: Frekvenční spektrum vibrací zatíženého motoru bez střídače v bodě L2V [18]



Obrázek 53: Frekvenční spektrum vibrací zatíženého motoru se střídačem v bodě L2V [18]

Z frekvenčních spekter vibrací motoru je zřejmé, že nově nasazený motor má nesymetrické elektromagnetické pole. Tato porucha se naprázdno neprojevuje typicky výraznou 1. harmonickou 25 Hz, ale zvýšenými vibracemi o frekvenci 2-násobku frekvence sítě, tedy na 100 Hz. Výrazná 1. harmonická při zatížení stroje signalizuje nevyváženost rotujících hmot a vede k vyvažování stroje, čímž je možné snížit vibrace asi o 20 %, přičemž stroj stále generuje nevyhovující hodnoty vibrací. Proto je nezbytné analyzovat vibrace i ve stavu naprázdno, kdy se projeví výrazná harmonická o frekvenci 100 Hz. Nesymetrie elektromagnetického pole motoru může být způsobena například nevhodným nahříváním plechů při bourání vinutí. Při bourání vinutí je třeba nahřát stator na teplotu, při které měkne impregnační lak na vinutí. Tato teplota je ale blízko teplotě, při které plechy začínají ztrácet své původní garantované magnetické vlastnosti. Jako naprosto nevhodná se jeví metoda přímého nahřívání pomocí hořáků, kdy dochází k lokálnímu překročení mezní teploty a toto místo ztrácí své magnetické vlastnosti. V důsledku toho rostou magnetické ztráty statoru a klesá moment motoru. Tyto nevhodné metody bourání vinutí byly používány u starších elektromotorů v minulosti. [18]

Při porovnání spekter zatíženého motoru napájeného bez střídače a napájeného ze střídače je patrné, že střídač má pozitivní vliv na velikost vibrací. Frekvenční spektra jsou si podobná, ale amplitudy výrazných harmonických jsou téměř poloviční. Díky tomu je soustrojí mechanicky méně namáháno. Další výhodou použití střídače je automatická regulace výkonu motoru. Při napájení ze střídače byl naměřen proud motoru při plném zatížení 184 A a bez střídače 201 A.

Na čerpadle byly frekvenční analýzou zjištěny mírně uvolněné kotvící šrouby, ale žádné závažné závady nebyly odhaleny. Po výměně starého motoru a ustavení pomocí laseru se soustrojí čerpadla vrátilo do provozu s doporučením pravidelné kontroly mazání ložisek. [18]

## 5 ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo seznámit se s teorií bezpečnosti, principem funkce asynchronního motoru a také teoretický i praktický rozbor poruchových stavů el. motorů. Problematiku bezpečnosti jsem zúžil na problematiku asynchronních motorů. Analýzou poskytnutých vzorků poškozených částí el. motorů, které pro tento účel poskytl Ing. Leoš Kuchař, bylo zjištěno několik závad. Závady viditelné pouhým okem byly například neúplně odlité klece asynchronního a reluktančního motoru nebo vadný statorový plech, které byly vyřazeny v průběhu výroby a jsou neopravitelné. Vady vzorků, které by bylo možné opravit, se většinou týkaly vinutí, například mezizávitový či mezifázový zkrat, nebo se jednalo o zadřená ložiska, která by mohla být lépe vnímána spíše sluchem než pohledem. Některé vadné vzorky ovšem není možné analyzovat pohledem, ale je nutné použít vhodné měřicí přístroje. Jednalo se o izolaci statorového vinutí poškozenou rázovou vlnou při elektrickém zkoušení izolačních vlastností, přerušené vinutí nebo přehřívající se motor. Popsané závady se při výrobě el. strojů vyskytují v malém měřítku, řádově se jedná o desetiny procent z celkové produkce. Další částí analýzy vzorků byla analýza poskytnuté dokumentace z archivu firmy Hudeczek Service, s.r.o.

V rámci praktické části práce jsem se uvedenou problematikou seznámil v laboratoři i v praxi. Při praktickém ověřování vlivu velikosti simulované nevyváhy na vibrace motoru byly ověřeny teoretické předpoklady vlivu velikosti nevyváhy. Protože se nevyváha rotujících hmot projevuje ve frekvenčním spektru stejně jako nesymetrické elektromagnetické pole statoru při zatížení stroje, sloužila tato úloha také jako simulace následné diagnostiky a ustavení čerpadla v čerpací stanici odpadních vod, která byla realizována ve spolupráci s firmou Hudeczek Service, s.r.o. Dílčí vyhodnocení analýz vzorků a praktického měření bylo prováděno vždy na koncích konkrétních kapitol.

Práce byla pro mě přínosem z pohledu nabytí a lepšího osvojení si zkušeností se stavbou, poruchovými stavy a vibrodiagnostikou asynchronního motoru. Věřím, že tyto poznatky využiji ve své praxi.

## LITERATURA

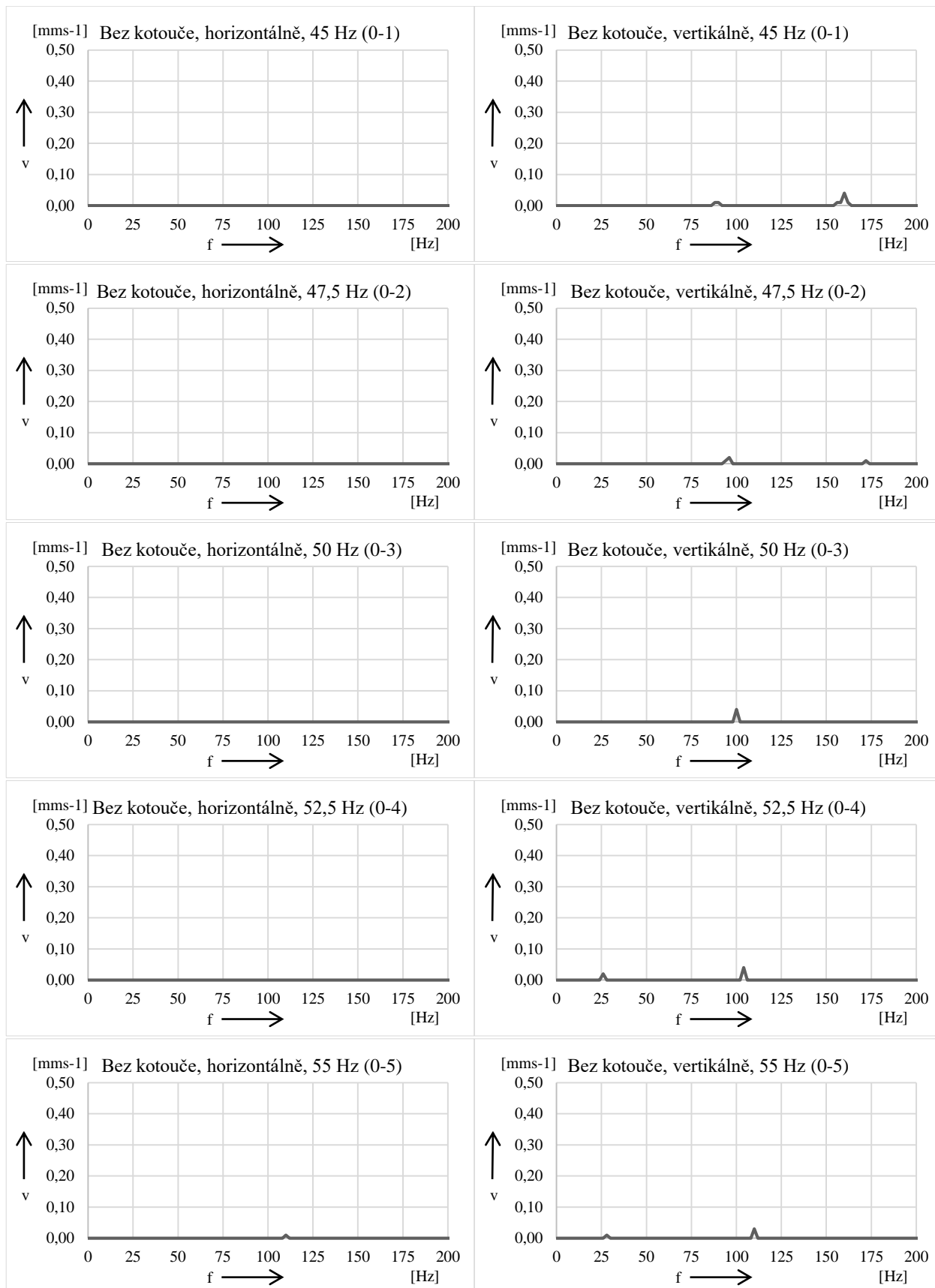
- [1] BABĚRÁD.: Vyšetřování řádu kmitání r elektrických strojů: PZ 071. In: *TES VUES*. 1966, s. 11.
- [2] BABĚRÁD.: První návrh základní specifikace norem pro vyhodnocování chvění strojů: PZ 080. In: *TES VUES*. 1966, s. 4.
- [3] *Poruchy asynchronních strojů: Presentace k úlohám předmětu MLSP* [online]. VUT Brno, 2015 [cit. 2015-11-10].
- [4] KOLÁŘSKÝ: Ověření metody pro hodnocení kvality odlévání hliníkových rotorových klecí velkých asynchronních motorů: PZ 072. In: *TES VUES*. 1966, s. 4.
- [5] HONYS, V.: *Bezpečná elektrotechnika*. Vyd. 1. Praha: IN-EL, 1998, 276 s. Knižnice Elektro. ISBN 80-862-3000-7
- [6] KALÁB, P., STEINBAUER, M., VESELÝ, M.: *Bezpečnost v elektrotechnice: pracovní sešit*. Vyd. 3., přeprac. V Brně: Vysoké učení technické, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav teoretické a experimentální elektrotechniky, 2004, 85 s. ISBN 80-214-2727-2
- [7] HUDECZEK, M.: *Zvyšování spolehlivosti asynchronních elektromotorů včetně poháněných strojů: (technická diagnostika)*. Vyd. 1. Albrechtice: Hudeczek Service, 2011, 299 s. ISBN 978-80-905032-0-5
- [8] *Negativní vlivy měničů frekvence na asynchronní motor*. Ostrava, 2006. Autoreferát doktorské dizertační práce. VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta elektrotechniky a informatiky. Vedoucí práce Doc. Ing. Karel Chmelík.
- [9] ONDRŮŠEK, Č.: *Elektrické stroje* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-11-12]. Skriptum předmětu BESB. VUT Brno.
- [10] HAMATA, V.: *Hluk elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: Academia, 1987, 171 s.
- [11] *Trojfázové asynchronní motory* [online]. In: . 2015-11-13, s. 19 [cit. 2015-11-13]. Dostupné z:  
[http://31.192.69.147:81/studijni/lipova/data\\_li/278\\_Asynchronni%20trifazovy%20motor%20-%20Ulmann.pdf](http://31.192.69.147:81/studijni/lipova/data_li/278_Asynchronni%20trifazovy%20motor%20-%20Ulmann.pdf)
- [12] *Ložiskové proudy a jejich degradační působení. ELEKTRO: Časopis pro elektrotechniku* [online]. 2003 [cit. 2015-11-16]. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/loziskove-proudy-a-jejich-degradacni-pusobeni--14367>
- [13] DOSTÁLEK, M.: *Měření teplotních polí v elektrických strojích*[online]. VUT Brno, 2010, 2015-11-17 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z:  
[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=26825](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=26825). Diplomová práce. VUT Brno. Vedoucí práce Marcel Janda.
- [14] KRÁTKÝ, M.: *Simulátor poruch elektrických strojů* [online]. VUT Brno, 2012, 2015-11-17 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z:

[https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=55455](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=55455).  
Bakalářská práce. VUT Brno. Vedoucí práce Jan Šlezinger.

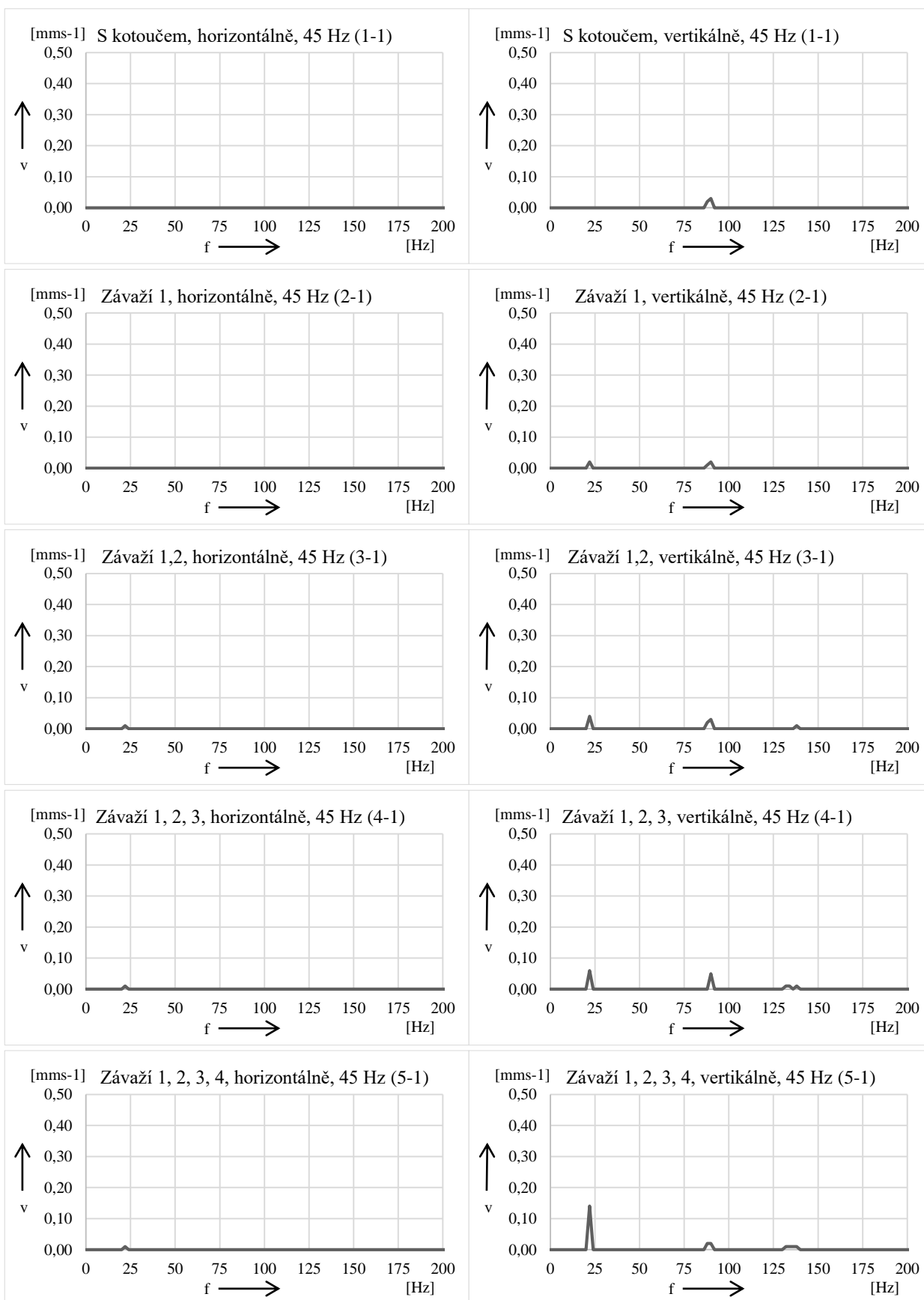
- [15] BABĚRÁD, BURIAN: Bezpečnost svorkovnice elektrických strojů vysokého napětí. In: *TES VUES*. 1970, s. 10.
- [16] Vliv nesymetrického napájení na trojfázové asynchronní motory nakrátko. *Elektroprůmysl.cz* [online]. 2012 [cit. 2015-11-17]. Dostupné z: <http://www.elektroprumysl.cz/pohony-menice-a-energetika/vlivy-nesymetrickeho-napajeni-na-trojfazove-asynchronni-motory-nakratko-3>
- [17] VESELKA, F.: Poskytnuté podkladové materiály, Brno, 2015.
- [18] HUDECZEK, M.: Poskytnuté podkladové materiály firmy Hudeczek Service, s.r.o., Albrechtice u Českého Těšína, 2015.
- [19] KUCHARŤ, L.: Poskytnuté podkladové materiály, Brno, 2015.



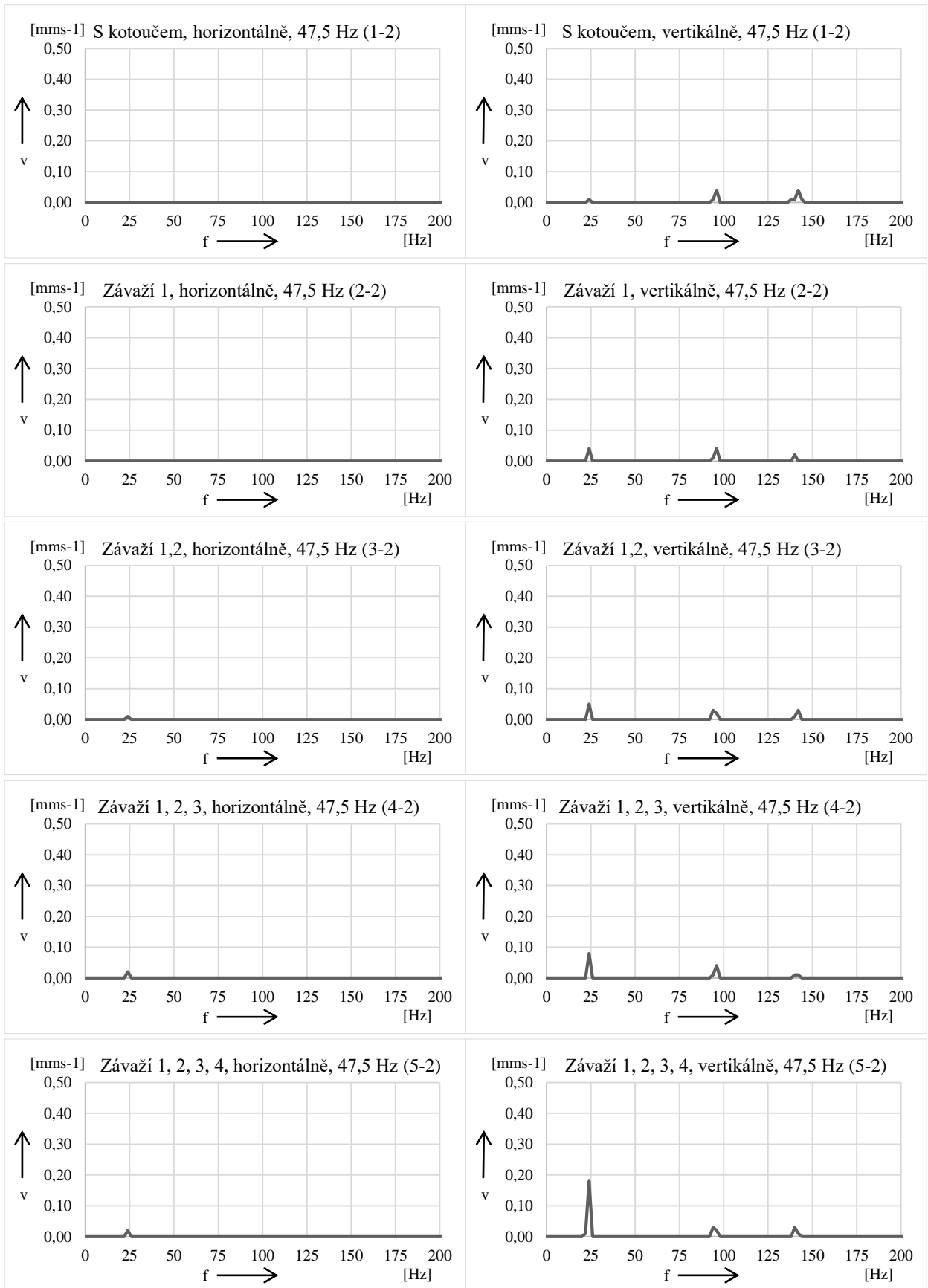
## 6 PŘÍLOHY



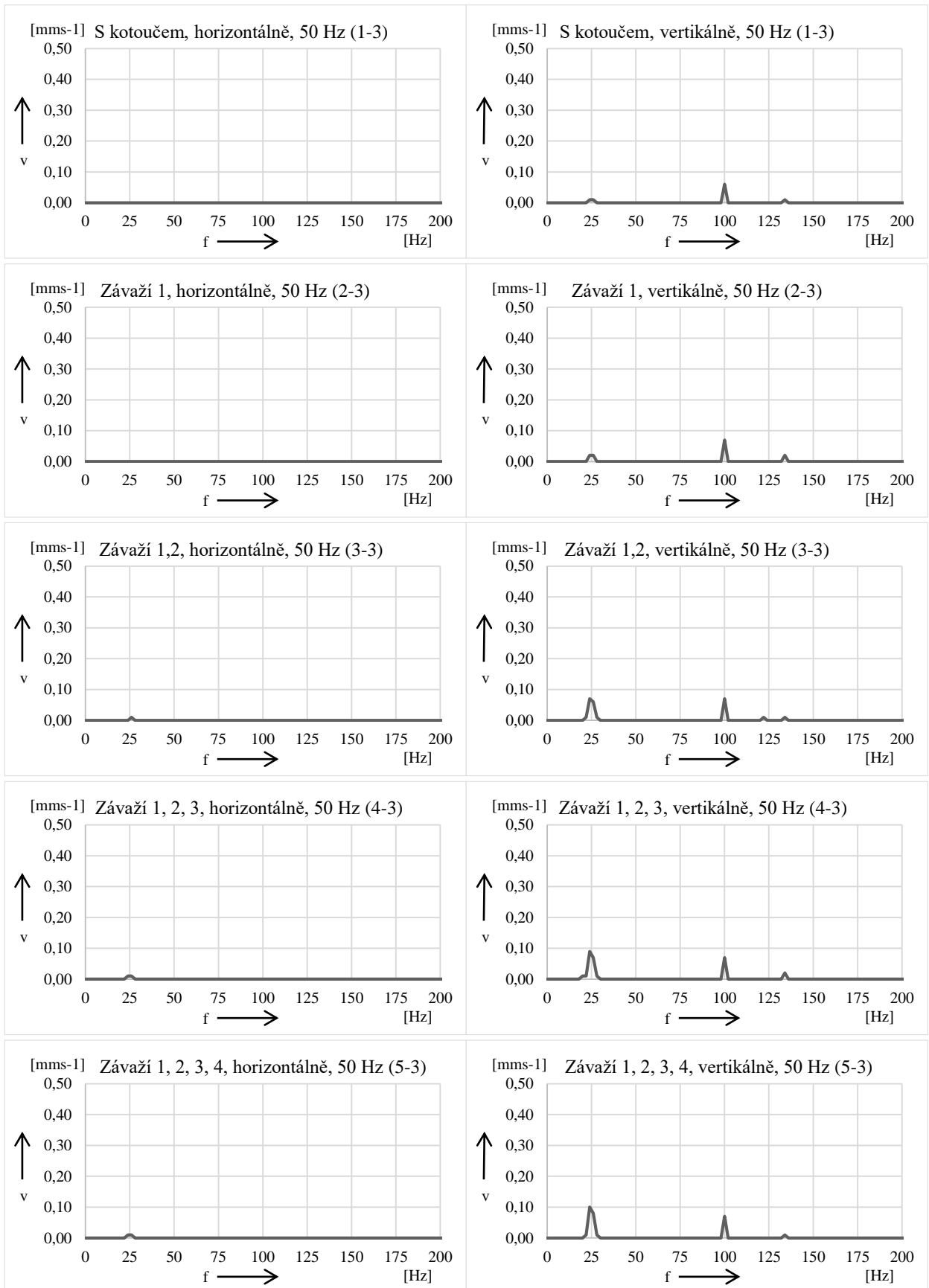
Obrázek 54: Frekvenční spektra vibrací motoru bez kotouče pro různé napájecí frekvence



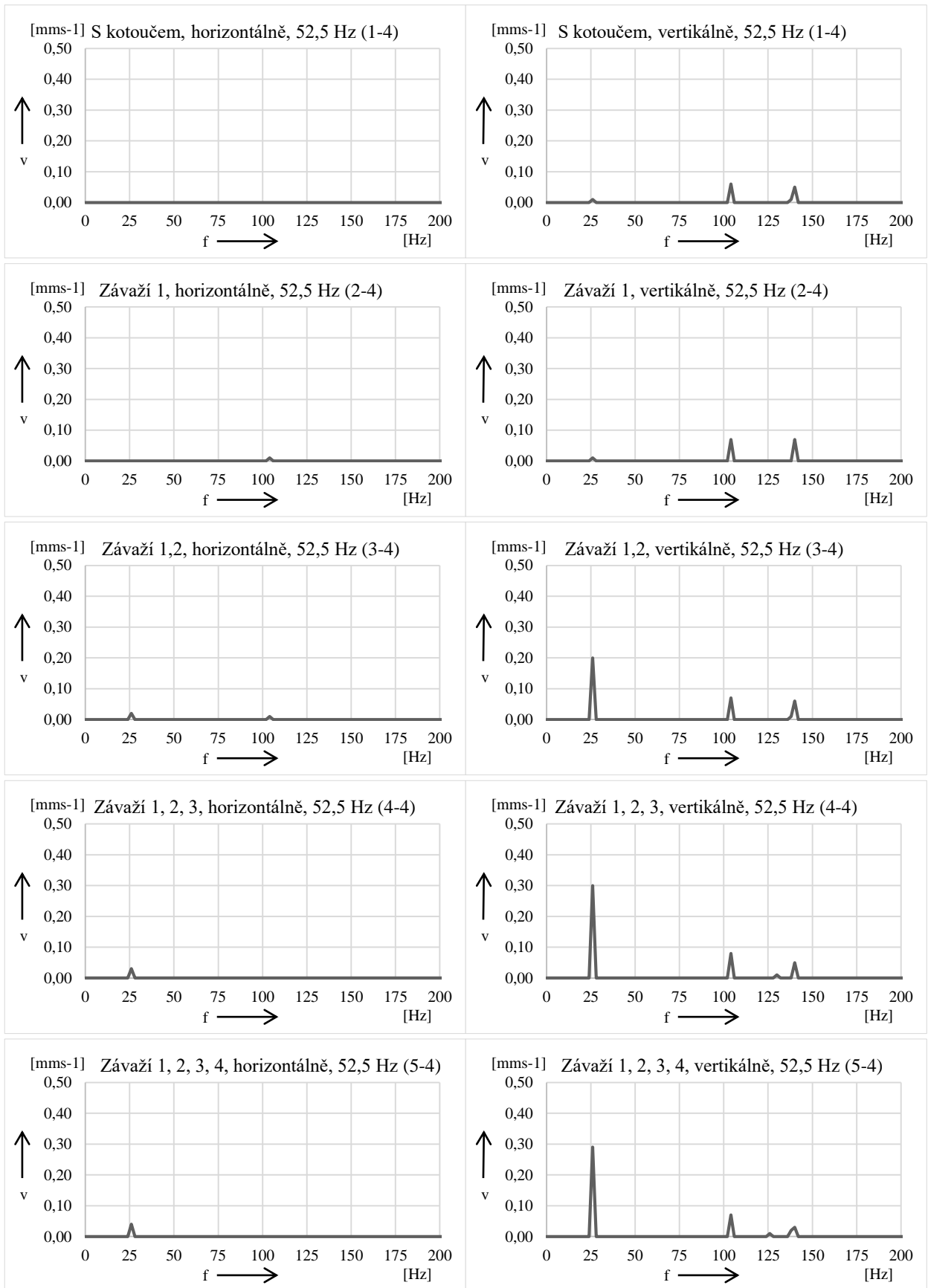
Obrázek 55: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 45 Hz a různé nevývahy



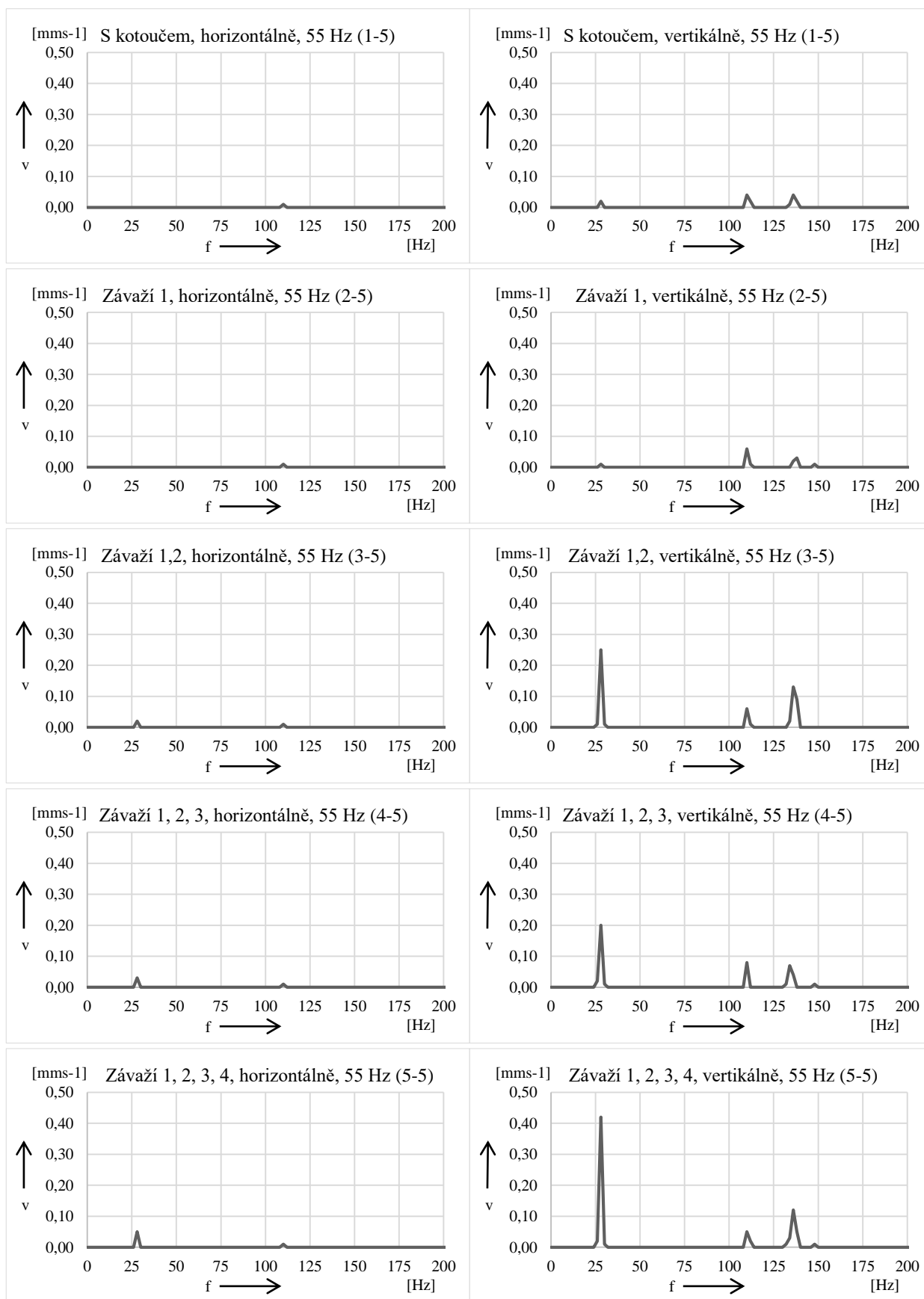
Obrázek 56: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 47,5 Hz a různé nevývahy



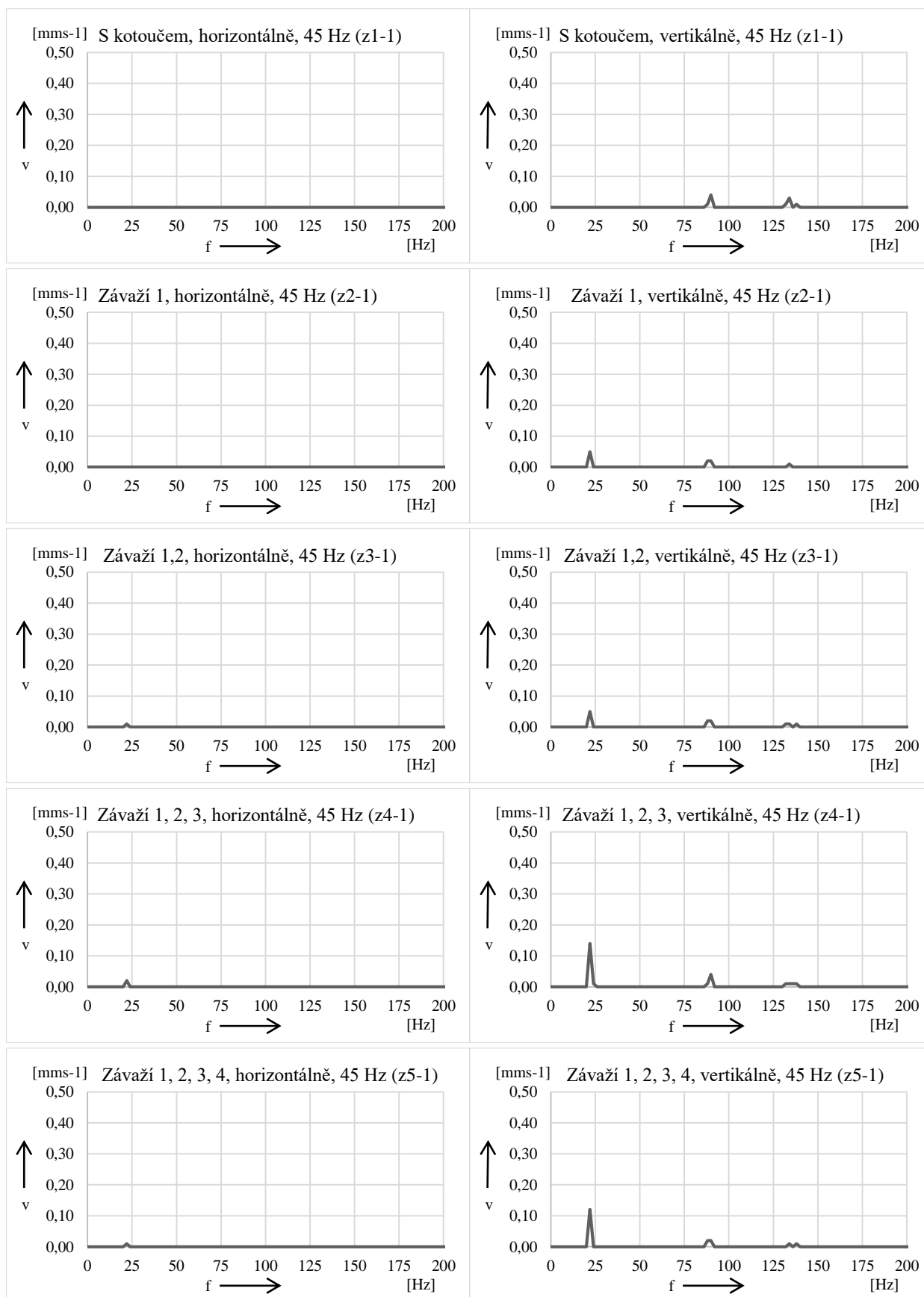
Obrázek 57: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 50 Hz a různé nevyváhy



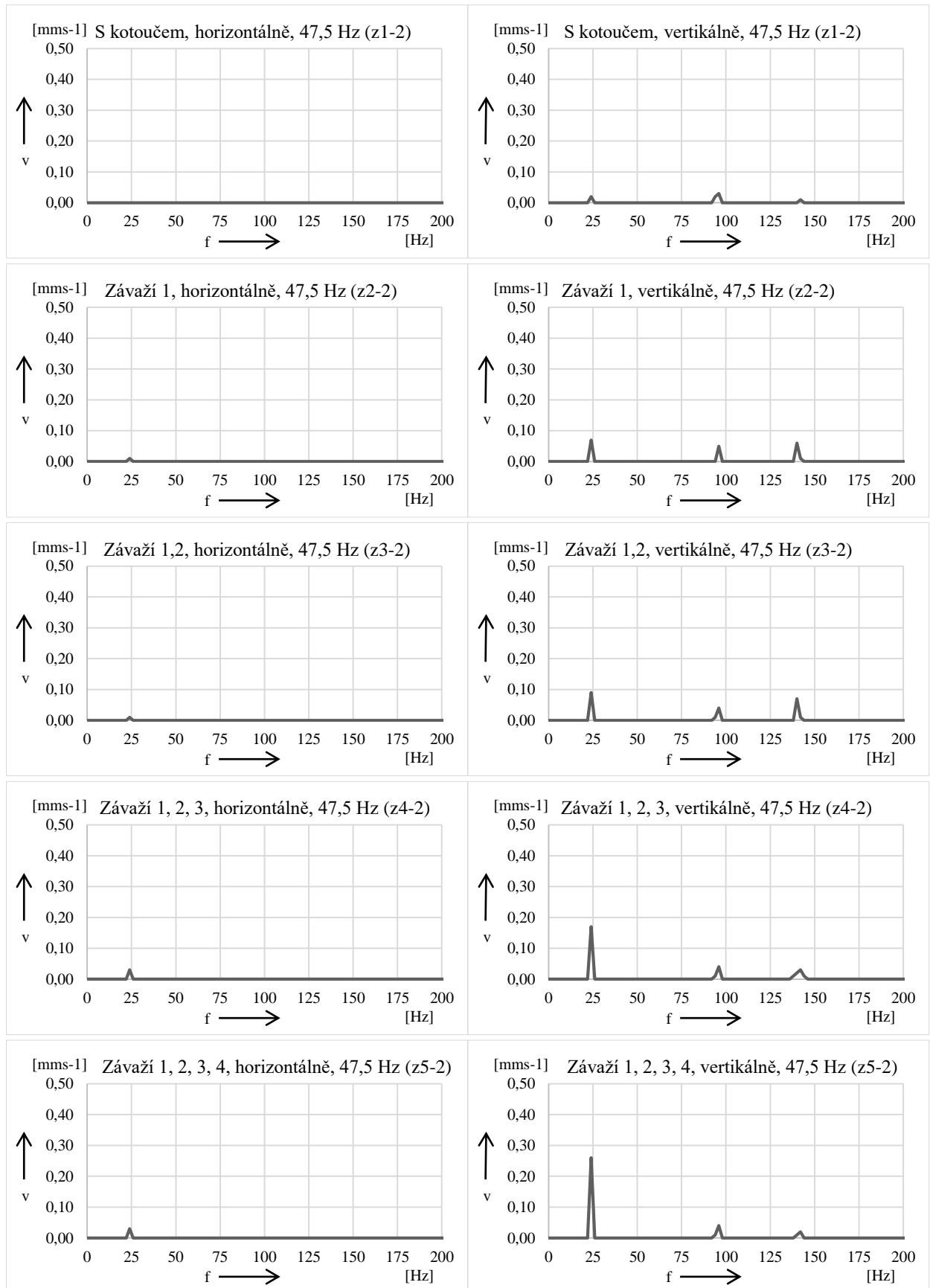
Obrázek 58: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 52,5 Hz a různé nevývahy



Obrázek 59: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 55 Hz a různé nevyváhy

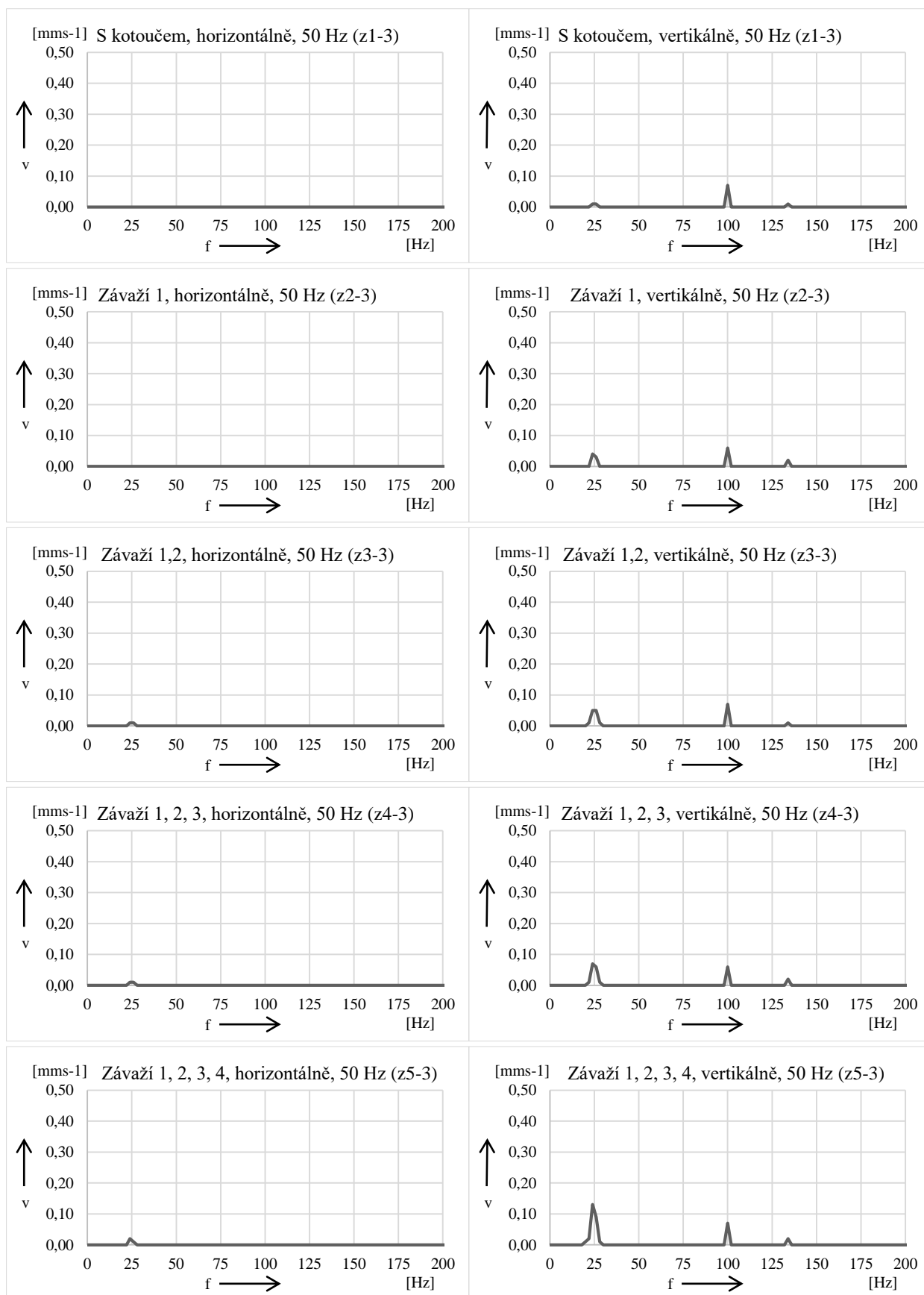


Obrázek 60: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 45 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4

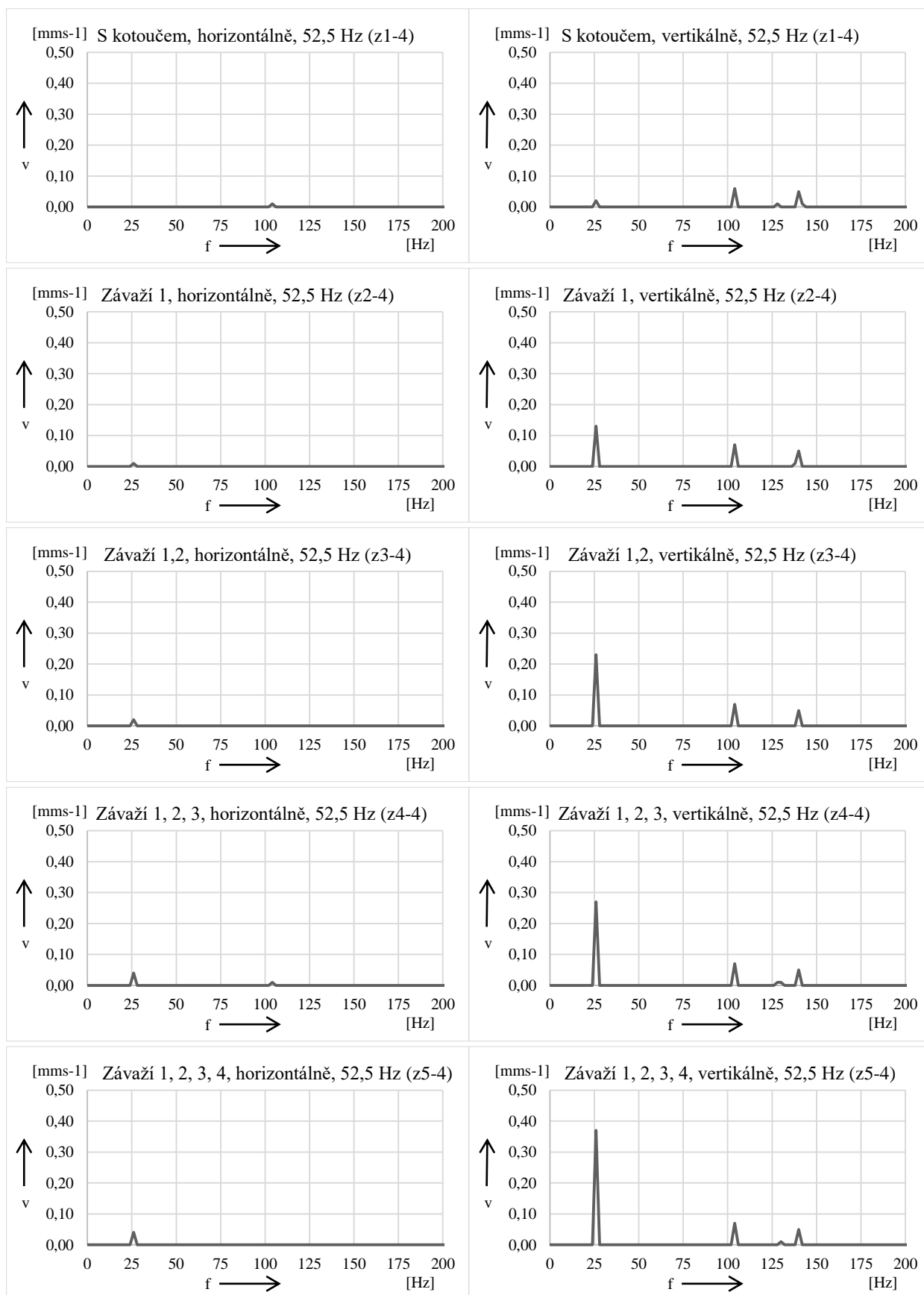


Obrázek 61: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 47,5 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4

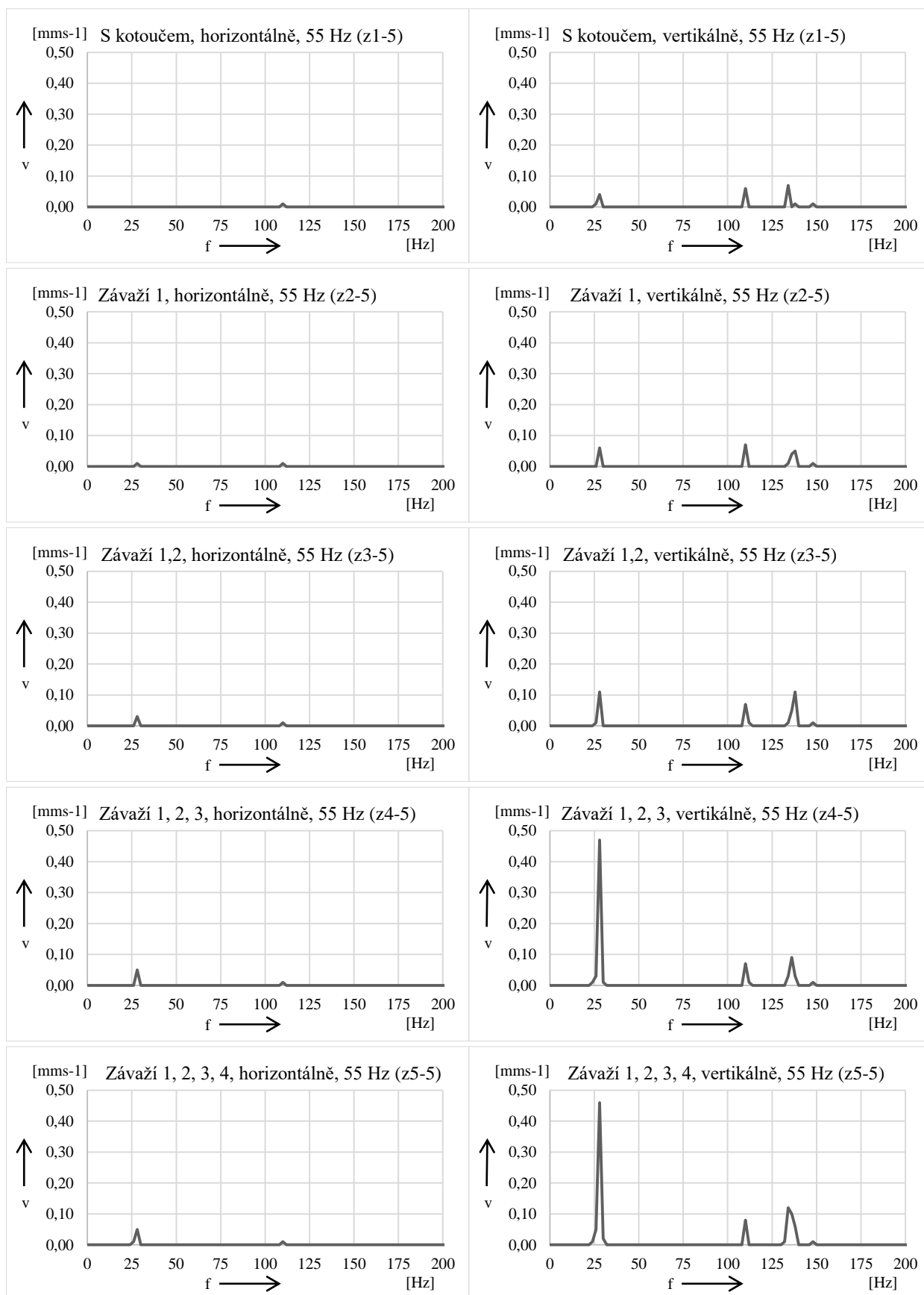




Obrázek 62: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 50 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4



Obrázek 63: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 52,5 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4



Obrázek 64: Frekvenční spektra vibrací motoru pro napájecí frekvenci 55 Hz a různé nevývahy pro opakované měření se závažími v polohách z1 – z4