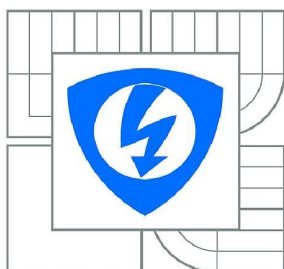


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

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

EXCENTRICITA A PŘERUŠENÉ ROTOROVÉ TYČE U ASYNCHRONNÍHO MOTORU

ECCENTRICITY AND BROKEN ROTOR BARS OF INDUCTION MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

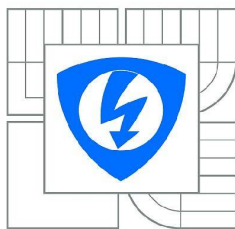
Bc. MATEJ MAGIC

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika

Student: Bc. Matej Magic
Ročník: 3

ID: 139054
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Excentricita a přerušené rotorové tyče u asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s konstrukcí a principem funkce asynchronního motoru, možnými poruchami a s metodami neinvazivní diagnostiky. Popište možnosti detekce excentricity, přerušených rotorových tyčí u asynchronního motoru pomocí analýzy statorového proudu a vibrací.
2. Provedte měření vibrací na zadaném vzorku motorů s různými druhy poruch.
3. Vytvořte zjednodušený 2D model asynchronního motoru s vybranou poruchou v programu Maxwell. Analyzujte výsledky ve frekvenční oblasti, srovnajte s teoretickými předpoklady a s měřením.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Boldea, I., Nasar, S.A. The Induction Machine Handbook. USA: CRC Press, 2002. ISBN 978-0849300042

[2] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore.

[3] Petrov, G.N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia. 1982.

Dále dle pokynu vedoucího práce.

Termín zadání: 27.9.2013

Termín odevzdání: 2.6.2014

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské 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

Práca prezentuje možnosti diagnostiky asynchrónneho motoru pomocou merania vibrácií. Základom práce je sledovanie zmien vibrácií pri vzniku excentricity a prerušenia rotorových tyčí v asynchrónnom motore. Jednou časťou práce je meranie a spracovanie nameraných dát poškodených motorov. Výsledkom práce je porovnanie spracovaných dát s referenčným motorom a počítačovou simuláciou motoru.

Kľúčové slová

Excentricita, prerušenie rotorových tyčí, vibrácie asynchrónneho motoru, diagnostika asynchrónneho motoru

Abstract

Thesis presents the possibilities of diagnostics of induction motor using vibration measurements. Basis of the work is monitoring of vibration changes in case of eccentricity and interruption of rotor bars in induction motor. One part of the thesis is the measurement and processing of measured data from damaged motors. The result should be comparison between processed data, reference induction machine and computer simulation of motor.

Keywords

Eccentricity, interruption of rotor bars, induction motor vibrations, induction motor diagnostics

MAGIC, M. *Excentricita a přerušené rotorové tyče u asynchronního motoru*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na téma Excentricita a prerušené rotorové tyče u asynchronného motoru som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho zákona č. 121/2000 Zb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č 40/2009 Zb.

V Brne dňa

.....

Matej Magic

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Ondřeji Vítkovi, Ph.D. za odbornú pomoc, pedagogické vedenie a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa

.....

Matej Magic

Obsah

Úvod.....	12
1 Teoretické východiská práce.....	13
1.1 Asynchronný motor.....	13
1.2 Poruchy asynchrónnych motorov.....	14
1.2.1 Prenosový systém motoru.....	15
1.2.2 Rozdelenie porúch.....	16
2 Analýzy porúch asynchrónneho motoru.....	18
2.1 Metódy detekcie porúch.....	18
2.1.1 Analýza vibrácií.....	18
Prerušenie rotorových tyčí.....	19
Excentricita.....	21
2.1.2 Analýza statorových prúdov.....	22
Excentricita.....	22
3 Meranie a simulácia.....	23
3.1 Merané stroje.....	23
3.2 Meracie prístroje a priebeh merania.....	24
3.3 Metodika spracovania nameraných hodnôt.....	25
3.4 Simulácia motoru.....	26
4 Namerané a vypočítané hodnoty.....	27
4.1 Excentricita.....	27
4.2 Prerušené rotorové tyče.....	30
5 Výsledky merania a simulácie.....	34
5.1 Vplyv dynamometra.....	34
5.2 Excentricita.....	35

5.2.1 Statická excentricita.....	35
5.2.2 Dynamická excentricita.....	37
5.2.3 Kombinovaná excentricita.....	39
5.3 Prerušené rotorové tyče.....	42
6 Závěr.....	48
7 Použitá literatura.....	49
8 Přílohy.....	51

Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Asynchrónny motor s kotvou nakrátko.....	15
Obrázok 2: Blokové schéma jednoduchého prenosového systému.....	16
Obrázok 3: Excentricita motoru.....	17
Obrázok 4: Prerušenie rotorovej tyče.....	18
Obrázok 5: Priebeh rotorového prúdu v „zdravom“ motore.....	19
Obrázok 6: Nevyrovnanosť prúdu v rotore pri prerušení jednej z tyčí.....	19
Obrázok 7: 50 Hz a 100 Hz frekvenčného spektra zrýchlenia pre rôzne počty prerušených rotorových tyčí	21
Obrázok 8: Vibračné spektrum zdravého a poškodeného motoru pri skluzе 0.10% (vľavo) a 0.16%.....	22
Obrázok 9: Vibračné spektrum zdravého a poškodeného motoru.....	23
Obrázok 10: Prerušenie rotorových tyčí meraných motorov.....	25
Obrázok 11: Blokové schéma zapojenia meracieho pracoviska.....	26
Obrázok 12: Priebeh nameraných hodnôt zrýchlenia vibrácií.....	27
Obrázok 13: Frekvenčné spektrum zrýchlenia vibrácií v oblasti 0 až 100 Hz.....	27
Obrázok 14: Priebeh momentu na hriadieli pri 100% menovitého zaťaženia.....	28
Obrázok 15: Frekvenčné spektrum priebehu momentu na hriadieli.....	28
Obrázok 16: Frekvenčné spektrum motoru naprázdno a po napojení dynamometra.....	36
Obrázok 17: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru so statickou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia.....	36
Obrázok 18: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru so statickou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia pre 100 Hz.....	38
Obrázok 19: Frekvenčné spektrum simulácie momentu pri statickej excentricite.....	38
Obrázok 20: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru s dynamickou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia.....	39
Obrázok 21: Frekvenčné spektrum frekvencií spojených s poruchou dynamickej excentricity.....	41
Obrázok 22: Frekvenčné spektrum simulácie momentu pri dynamickej excentricite.....	41
Obrázok 23: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru s kombinovanou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia.....	41
Obrázok 24: Frekvenčné spektrum simulácie momentu pri kombinovanej excentricite.....	42

Obrázok 25: Frekvenčné spektrum frekvencií pri kombinovanej excentricite.....	42
Obrázok 26: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pri chode motoru naprázdno.....	43
Obrázok 27: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pri 100% menovitého zaťaženia.....	43
Obrázok 28: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pri chode naprázdno.....	44
Obrázok 29: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pre 50 Hz pri chode naprázdno.....	45
Obrázok 30: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pre 50 Hz pri 100% menovitého zaťaženia.....	46
Obrázok 31: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pre 100 Hz pri chode naprázdno.....	47
Obrázok 32: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pre 100 Hz pri 100% menovitého zaťaženia.....	47
Obrázok 33: Frekvenčné spektrum simulácie prerušenia rotorových tyčí motoru pri chode naprázdno, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe.....	48
Obrázok 34: Frekvenčné spektrum simulácie prerušenia rotorových tyčí motoru pri 100% menovitého zaťaženia, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe.....	51
Obrázok 35: Frekvenčné spektrum simulácie prerušenia rotorových tyčí motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe.....	52
Obrázok 36: Frekvenčné spektrum simulácie excentricity motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu statická excentricita, v strede dynamická excentricita, dole kombinovaná excentricita.....	52
Obrázok 37: Frekvenčné spektrum merania prerušenia rotorových tyčí motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe.....	53
Obrázok 38: Frekvenčné spektrum merania excentricity motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu statická excentricita, v strede dynamická excentricita, dole kombinovaná excentricita.....	54

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1: Hodnoty excentricity meraných motorov.....	23
Tabuľka 2: Menovité parametre meraných motorov.....	23
Tabuľka 3: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – referenčný motor.....	26
Tabuľka 4: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – statická excentricita.....	27
Tabuľka 5: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – dynamická excentricita.....	27
Tabuľka 6: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – kombinovaná excentricita.....	27
Tabuľka 7: Percentuálne porovnanie zvýšenia hodnôt efektívneho zrýchlenia aef.....	28
Tabuľka 8: Skluz motorov pri rozdielnom zaťažení.....	28
Tabuľka 9: Statická excentricita – frekvencie určujúce poruchu.....	28
Tabuľka 10: Dynamická excentricita – frekvencia mechanickej rotácie rotoru.....	29
Tabuľka 11: Dynamická excentricita – frekvencie určujúce poruchu.....	29
Tabuľka 12: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – referenčný motor.....	30
Tabuľka 13: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – 1 prerušená rotorová tyč.....	30
Tabuľka 14: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – 2 prerušené rotorové tyče pri sebe	31
Tabuľka 15: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – 2 prerušené rotorové tyče oproti sebe.....	31
Tabuľka 16: Percentuálne porovnanie zvýšenia hodnôt efektívneho zrýchlenia aef.....	31
Tabuľka 17: Skluz motorov pri rozdielnom zaťažení.....	32
Tabuľka 18: Prerušené rotorové tyče – frekvencie určujúce poruchu pri zaťažení.....	32
Tabuľka 19: Prerušené rotorové tyče – frekvencie určujúce poruchu naprázdno.....	33

Prehľad symbolov a skratiek

a_{ef}	efektívna hodnota zrýchlenia vibrácií
a_{max}	maximálna veľkosť zrýchlenia vibrácií
f	frekvencia napájacej siete
f_r	frekvencia mechanického otáčania rotoru
f_{rot}	frekvencia rotoru
$\vec{\mathcal{F}}_{mr}$	vektor magnetomotorickej sily
FFT	Fast Fourier Transformation
$\vec{I}_{cr}$	vektor priebehu rotorového prúdu
n	mechanické otáčky rotoru
n_s	otáčky magnetického póla statoru
N_r	počet rotorových tyčí
p	počet pólov stroja
s	skluz
v_{max}	maximálna veľkosť rýchlosti vibrácií
v_{ef}	efektívna hodnota rýchlosti vibrácií
ω_{syn}	synchrónna uhlová rýchlosť
ω_r	rotorová uhlová rýchlosť

Úvod

Náplňou práce je využitie diagnostickej metódy merania vibrácií motoru pri diagnostike poruchového motoru. Meranie prebiehalo na výrobné prednastavených motoroch s excentricitou a prerušenými rotorovými tyčami. Merali sme sedem motorov – tri s výskytom excentricity, tri s prerušenými rotorovými tyčami a motor referenčný, voči ktorému porovnávame namerané hodnoty.

Zároveň bol vytvorený 2D model asynchrónneho motora na ktorom sme umelo vytvorili merané poruchy a simulovali beh motoru v tomto stave.

Namerané hodnoty vibrácií motorov s poruchou sú porovnávané s hodnotami referenčného motora a hodnotami modelu motora. Cieľom práce je predstaviť možnosti diagnostiky merania vibrácií motoru.

1 Teoretické východiská práce

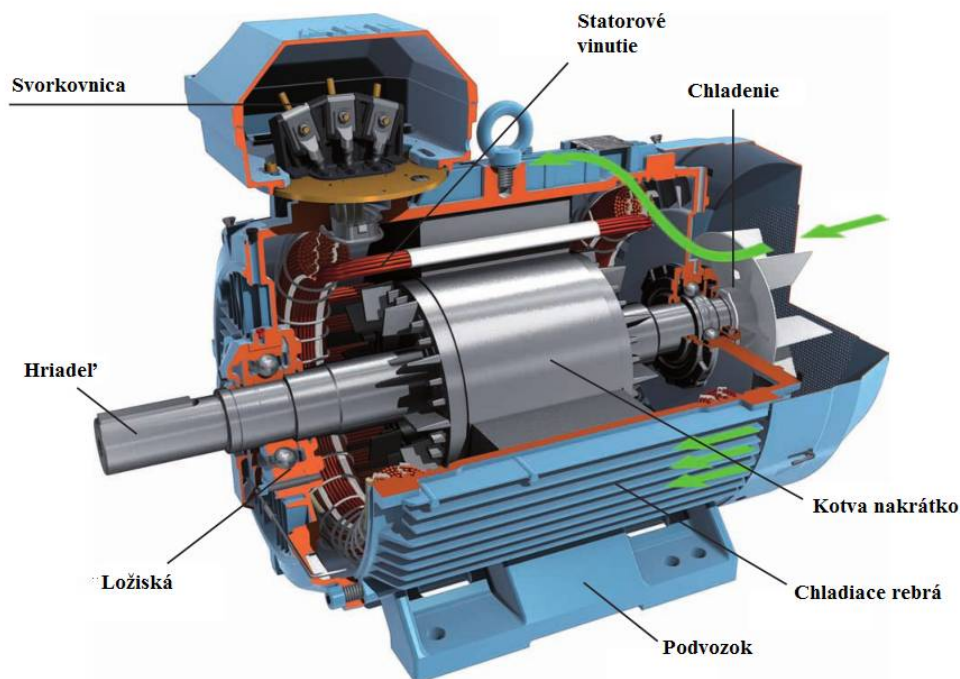
1.1 Asynchronný motor

Hlavnými časťami asynchrónneho motoru sú stator a rotor.

Stator slúži ako hlavná konštrukčná časť motoru, do ktorej sú následne vkladané ostatné časti motoru. Nachádzajú sa v ňom drážky, v ktorých je uložené statorové vinutie. Stator je zložený z izolovaných plechov, ktoré tvoria magnetickú časť elektrického stroja. Trojfázové asynchrónne motory môžu mať statorové vinutie spojené do hviezdy alebo do trojuholníku .

Rotor je uložený v statore. Pri asynchrónnych strojoch môžeme nájsť dva typy rotorov: s kotvou nakrátko a krúžkový (vinutý) rotor. Pri kotve nakrátko sa rotor skladá zo sústavy tyčí, ktoré sú na konci vodivo spojené. Vinutý rotor sa skladá z krúžkov, na ktoré je pripojené trojfázové vinutie. Rotor je napojený na hriadeľ, na ktorú je prenášaný mechanický moment a dokončuje tak elektro-mechanickú premenu energie v stroji.

Medzi motorom a statorom sa nachádza vzduchová medzera. Jej veľkosť je konštrukčne stanovená na čo najmenšiu hodnotu (v rádoch desatinách milimetru) z dôvodu udržania nízkych magnetických strát pri prenose energie zo statoru na rotor. [2]



Obrázok 1: Asynchrónny motor s kotvou nakrátko [2, upravené]

V motore je napätie siete privedené na vstup statorového vinutia. S ohľadom na geometriu vinutia a veľkosť prúdov vinutia vzniká rotačné magnetické pole statoru. Vysoká magnetická vodivosť statorových plechov spôsobí, že prevažná väčšina magnetického toku ostane v magnetickom obvode stroja a iba minimum sa rozptýli do okolia.

Magnetické pole je prenášané cez vzduchovú medzeru. Toto pole pri relatívnom pohybe rotora voči točivému poli statoru indukuje napätie v rotore. Indukcia napätia a spojenie kotvy nakrátko spôsobia vznik elektrického prúdu v rotore.

Prietok prúdu a prítomnosť magnetického poľa umožní vznik elektromagnetickej sily pôsobiacej na rotor. Pôsobenie sily vyvolá otáčanie rotora v smere pôsobiacej sily a vznik mechanického krútiaceho momentu na hriadeli stroja. [1]

Rýchlosť rotácie magnetického poľa statoru určuje počet pólov stroja p nachádzajúcich sa v statorovom vinutí. Počet pólov je vždy reprezentovaný párnym číslom. Otáčky magnetického poľa statoru n_s tak vieme vyjadriť ako

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

kde f predstavuje frekvenciu statorového prúdu a p je počet pólov stroja.

Rozdiel medzi otáčkami poľa statoru n_s a mechanickými otáčkami rotora n vytvára asynchronicitu stroja, ktorú vyjadrujeme pomocou skluzu s

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

Veľkosť mechanických otáčok rotora n vieme z predchádzajúcej rovnice určiť ako

$$n = n_s - s n_s \quad (3)$$

1.2 Poruchy asynchrónnych motorov

Napriek tomu, že asynchrónne motory sú veľmi spoľahlivé, môže pri nich nastať viacero druhov porúch, ktoré môžu v najhoršom prípade viesť až k trvalému poškodeniu motora. Poruchy indukčných motorov vieme detekovať ešte v počiatočnej fáze výroby, čím znižujeme percento chybovosti pri ich nasadení do provozu.

Prieskumy ukazujú, že až 80 percent porúch motorov je mechanickej povahy. Ide prevažne o poruchy statora, rotora a vinutí.

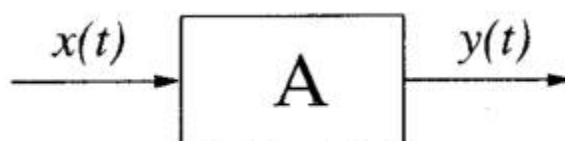
V posledných rokoch sa výrazne zlepšil návrh a výroba statorových vinutí, zatiaľ čo výroba rotorov zaznamenala iba nepatrné zmeny. Vďaka tomuto trendu je prevažná

väčšina mechanických chýb spojená s rotorom. Jedná sa predovšetkým o prerušenie rotorových tyčí, vznik excentricity a porušenie ložísk. [5]

1.2.1 Prenosový systém motoru

Predpokladajme, že jednoduchému systému privedieme na vstup singnál popisovaný rovnicou

$$x(t) = \cos(2\pi f_1 t + \phi_1) + \cos(2\pi f_2 t + \phi_2) \quad (4)$$



Obrázok 2: Blokové schéma jednoduchého prenosového systému [7]

Ak A reprezentuje lineárnu prenosovú funkciu, bude výstup $y(t)$ pracovať s rovnakou frekvenciou a fázou.

Zmena nastane v prípade, že A bude obsahovať kvadratickú prenosovú funkciu. Potom bude $y(t)$ obsahovať rovnakú frekvenciu a fázou ako vstup, ale zároveň sa v signáli vyskytnú frekvencie $2f_1$, $2f_2$ ako aj $f_1 \pm f_2$ s fázami $2\phi_1$, $2\phi_2$ a ďalšie.

Ak A bude reprezentovať kubickú prenosovú funkciu, bude $y(t)$ obsahovať všetky predchádzajúce frekvenčné zložky doplnené o frekvencie $3f_1$, $3f_2$, $2f_1 \pm f_2$ a $2f_2 \pm f_1$ s fázami $3\phi_1$, $3\phi_2$, $2\phi_1 \pm \phi_2$ a $2\phi_2 \pm \phi_1$. [7]

Asynchrónny stroj môžeme modelovať ako jednoduchý systém podobný systému zobrazenému na obrázku č. 2. V prípade motoru budeme za vstup systému považovať veľkosť magnetického toku vo vzduchovej medzere. Výstupom systému budú elektromagnetické vibrácie stroja. Empirické štúdie ukázali, že asynchrónny motor najpresnejšie popisuje kvadratická funkcia A.

To v praxi znamená, že zmena vstupných hodnôt $x(t)$ spôsobí zmenu výstupu $y(t)$ a teda zmena indukcie vo vzduchovej medzere spôsobí zmenu elektromagnetických vibrácií motoru. Toto nám umožní rozpoznať a analyzovať poruchy motoru.

Analýzou magnetomotorickej sily bolo zistené, že poruchy asynchrónnych strojov sa prejavujú v zmene magnetického toku vo vzduchovej medzere. Výskyt chyby spôsobí vytvorenie nových frekvenčných zložiek v magnetickom toku vzduchovej medzery, ktorých veľkosť bude priamo úmerná rozsahu poškodenia. [7]

1.2.2 Rozdelenie porúch

Poruchy, ktoré sa vyskytujú v elektrických motoroch môžeme rozdeliť na [3]

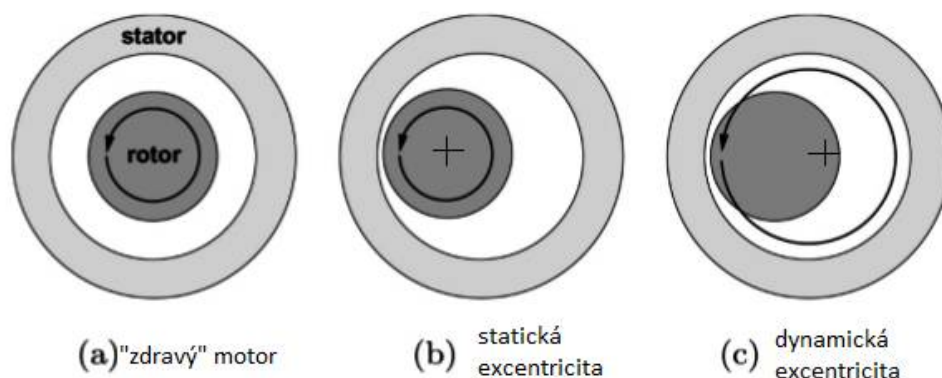
- **dynamická a statická excentricita** (spôsobená chybami vo výrobe)
- **poruchy rotoru** (zlomené tyče alebo prerušenie krúžkov)
- **poruchy statoru** (vznik skratu, resp. prerušenie alebo spojenie jedného z vinutí)
- **opotrebenie ložísk**

V tejto práci sa budeme ďalej zaoberať excentricitou a prerušenými rotorovými tyčami.

Excentricita

Rozlišujeme dva druhy excentricity

- **statická excentricita** – rotor rotuje bez vychýlenia, jeho os je v ložiskách posunutá k statoru (vid'. Obrázok 3b)
- **dynamická excentricita** – vychýlenie rotorovej osi (vid'. Obrázok 3c)



Obrázok 3: Excentricita motoru [13, upravené]

Najčastejším prípadom je súčasný výskyt oboch typov excentricity. V skutočnosti vždy existuje určitá miera excentricity spôsobená toleranciami výrobného procesu.

V dôsledku excentricity nastáva zmenšenie vzduchovej medzery motoru a vzniká riziko poškodenia statorového vinutia. V súlade so zvyšovaním excentricity vzrastá miera vibrácií motoru.

Vznik statickej excentricity spôsobujú poruchy v ložiskách a chybné zarovnanie konštrukčných častí. Dôsledkom je nevyrovnaný magnetický ťah motoru.

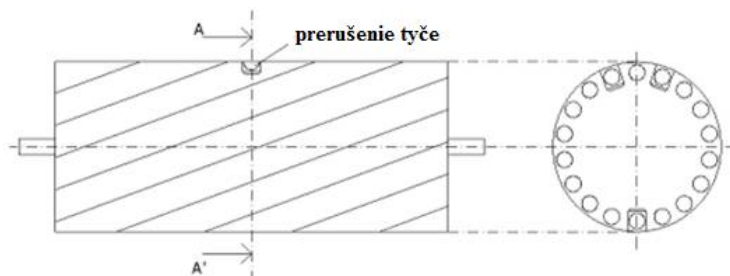
Dynamická excentricita vzniká ohnutím rotorovej hriadele. [13]

Prerušenie rotorových tyčí

Prerušenie rotorovej tyče málokedy spôsobí poškodenie motoru, ktoré by ho ihneď vyradilo z prevádzky. Ak motor obsahuje dostatok rotorových tyčí bude napriek

prerušeniu jednej z nich schopný vyvinúť dostatočný krútiaci moment. Prerušenie rotorovej tyče však vedie k postupnému opotrebovaniu ostatných tyčí, čo sa prejaví v kratšej životnosti. [3]

V prípade zlomu jednej z rotorových tyčí nastáva preťaženie susedných tyčí. V prípade dlhodobého preťaženia nastáva prerušenie susedných tyčí. Tomu sa snažíme zabrániť pravidelnou diagnostikou, ktorá má byť schopná detekovať poruchu ešte v rannom štádiu.

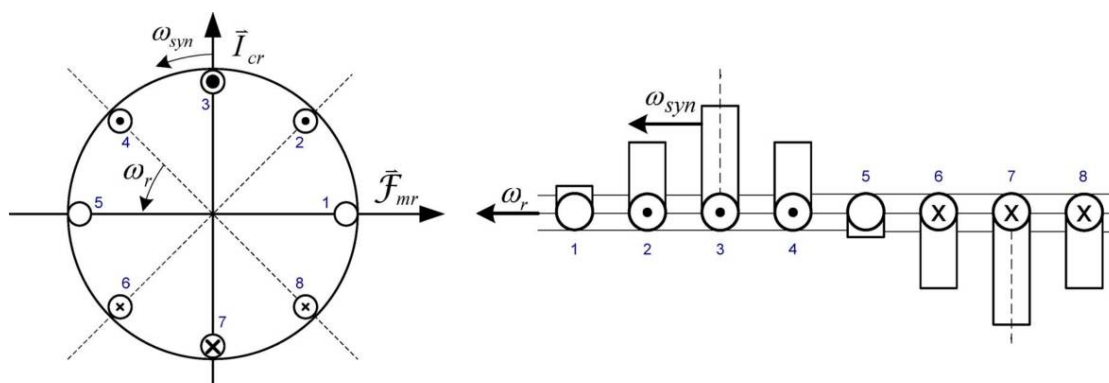


Obrázok 4: Prerušenie rotorovej tyče [3, upravené]

Príčiny prerušenia rotorových tyčí [3]

- **Tepelné namáhanie** v dôsledku prehriatia a nevyváženému rozloženia tepla
- **Mechanické namáhanie** v dôsledku uvoľnených plechov a opotrebených ložísk
- **Dynamické namáhanie** vyplývajúce z pôsobenia odstredivých síl
- **Vplyv prostredia** prostredníctvom chemických znečistení alebo vlhkosti

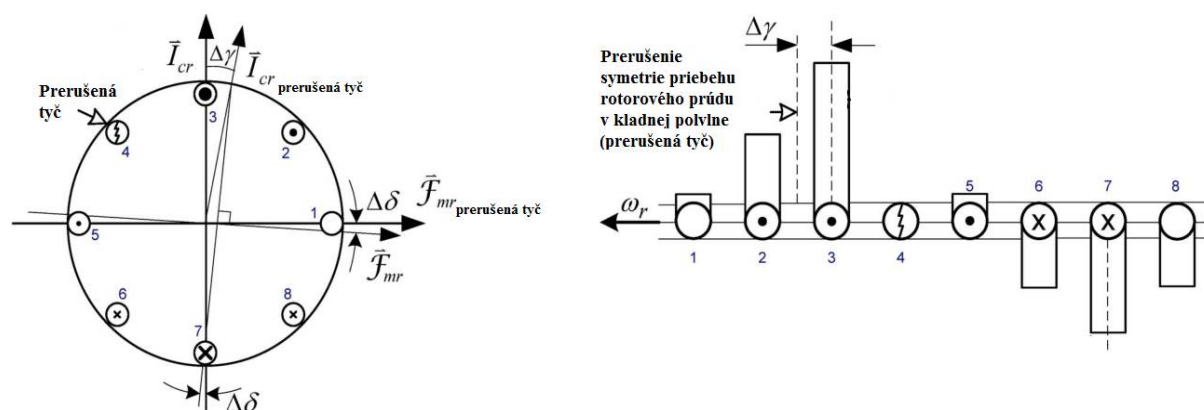
Zmenu vo funkcii asynchrónneho motoru pri prerušení jednej z tyčí môžeme demonštrovať na zjednodušenom modeli dvoj pólového motoru s kotvou nakrátko tvorenou ôsmimi rotorovými tyčami.



Obrázok 5: Pribeh rotorového prúdu v „zdravom“ motore [5]

Na obrázku 5 vľavo vidíme rotáciu rotorového prúdu $\bar{I}_{cr}$ v kotve a priebeh magnetomotorickej sily $\bar{\mathcal{F}}_{mr}$, ktorá reprezentuje rotáciu motoru. Vpravo je zobrazený priebeh rotorového prúdu v jednej z tyčí počas jednej periódy. Prúd v tyčiach rotuje synchronnou uhlovou rýchlosťou ω_{syn} a zároveň rotor rotuje uhlovou rýchlosťou ω_r . Ich vzájomným rozdielom je určená veľkosť skluzu motoru.

Prerušenie rotorovej tyče (viď. obrázok 6) zabráni prietoku prúdu touto tyčou a spôsobí tak zmenu smeru a amplitúdy prúdu v ostatných tyčiach. Zmena prúdu vyvolá posun (resp. nerovnomerné rozloženie) magnetomotorickej sily $\bar{\mathcal{F}}_{mr}$ o $\Delta\delta$. [5]



Obrázok 6: Nevyrovnanosť prúdu v rotore pri prerušení jednej z tyčí [5, upravené]

2 Analýzy porúch asynchrónneho motoru

2.1 Metódy detekcie potúch

2.1.1 Analýza vibrácií

Analýza vibrácií motoru je metóda, ktorá je pri diagnostike strojov používaná niekoľko desaťročí a je pokladaná za najpresnejšiu metódu určovania celkového stavu rotoru. Výskyt poruchy vieme určiť pomocou porovnania signálu chybného a referenčného zariadenia.

Vibračná analýza je primárne využívaná na detekovanie mechanických porúch ložísk, excentricity rotora a jeho hmotnostnej asymetrie. Môžeme ju však použiť aj pre diagnostiku prerušenia rotorových tyčí, keďže táto porucha spôsobuje nerovnomerné rozloženie momentu, ktoré spôsobí vznik vibrácií konštrukcie motoru a tie vieme analyzovať. [6]

Nameraný vibračný signál použitím Fourierovej transformácie prevedieme z časovej oblasti do frekvenčnej oblasti. Týmto spôsobom vieme určiť prítomnosť rušivých harmonických zložiek signálu poukazujúcich na výskyt poruchy.

Prejavy poruchy budeme vedieť vo frekvenčnej oblasti lepšie analyzovať pri zväčšenej záťaži motora, kde budú v prípade poškodeného motoru zreteľné frekvencie naznačujúce prítomnosť poruchy. Dané frekvencie charakteristické pre jednotlivé typy porúch asynchrónnych motorov udáva odborná literatúra a ich prehľad je uvedený v ďalšom texte. [6]

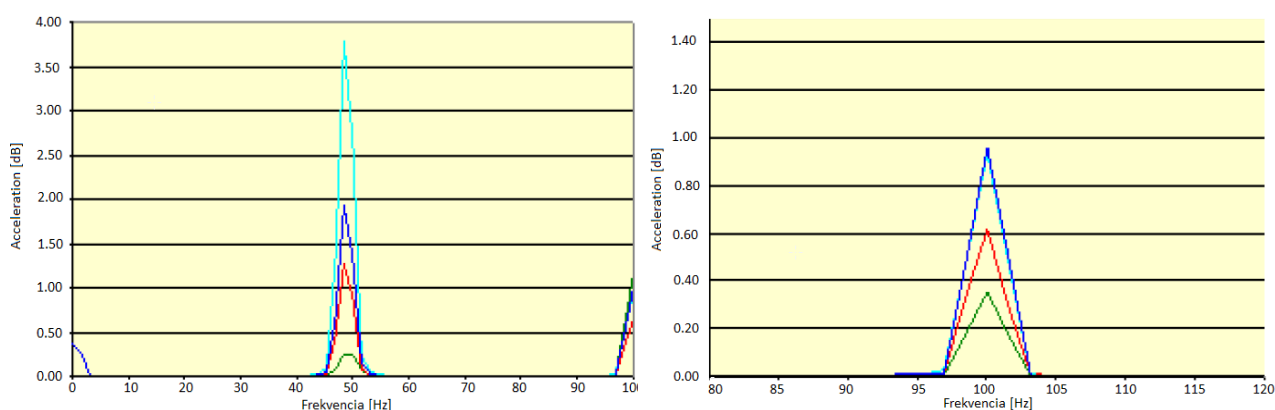
Prerušenie rotorových tyčí

Odborná literatúra [3] udáva frekvencie spojené s prerušením rotorových tyčí pri meraní vibrácií stroja ako

$$f_b = k f \quad (5)$$

kde f je frekvencia napájacej siete a $k = 1, 2, 3, \dots$

Dôležitými frekvenciami sú najmä $f_b = 50 \text{ Hz}$ a $f_b = 100 \text{ Hz}$. Na nich môžeme zreteľne sledovať rozdiel medzi „zdravým“ a poškodeným motorom [3]



Obrázok 7: 50 Hz a 100 Hz frekvenčného spektra zrýchlenia pre rôzne počty prerušených rotorových tyčí [3, upravené]

Zelená farba reprezentuje „zdravý“ motor, červená motor s jednou prerušenou rotorovou tyčou, tmavomodrá motor s dvoma prerušenými tyčami a bledomodrá motor s tromi prerušenými rotorovými tyčami.

Z frekvenčného spektra je v oboch prípadoch zrejmé, že s počtom nárastu zlomených rotorových tyčí narastá množstvo vibrácií motoru (reprezentované zvýšením rýchlosti

vibrácií). Podľa [3] už zvýšenie spektra o 10% percent voči amplitúde „zdravého“ motoru môže znamenať poškodenie rotoru.

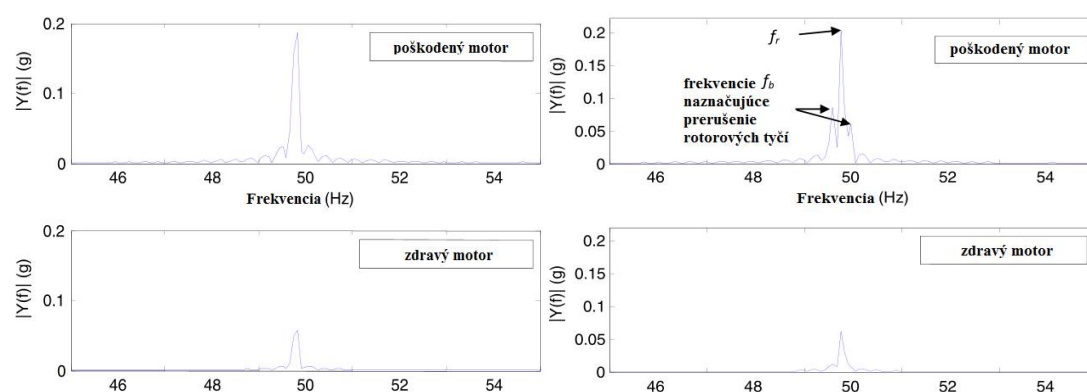
Podľa literatúry [6] vieme pri frekvenčnej analýze vibrácií určiť frekvencie spojené s prerušením rotorových tyčí ako

$$f_b = f_{rot} \pm (f - f_{rot})2p \quad (6)$$

kde $2p$ predstavuje počet pólových dvojíc, f je napájacia frekvencia siete, f_{rot} je frekvencia rotoru ktorú definujeme ako

$$f_{rot} = f(1-s) \quad (7)$$

Z daných rovníc je zrejmé že najpresnejšie výsledky dosiahneme pri vysokom zaťažení (a teda väčšom skluzu) motoru, lebo sa nám hľadané frekvencie na frekvenčnej ose „vzdialia“ od rotorovej frekvencie f_{rot} . Nasledujúcu situáciu demonštruje obrázok 8.



Obrázok 8: Vibration spectrum of healthy and damaged motor at slip 0.10% (left) and 0.16% [6, modified]

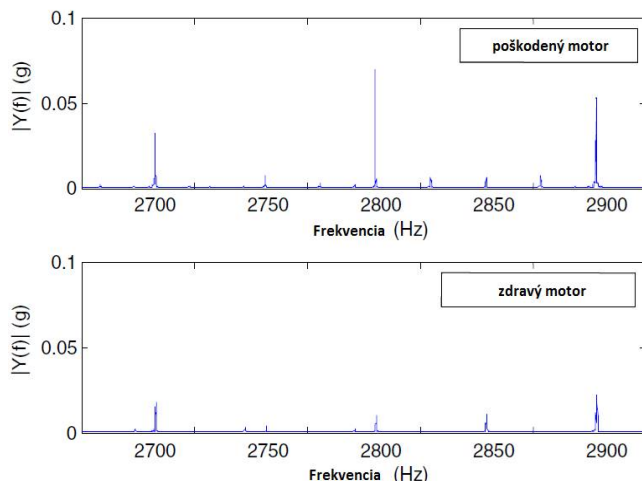
Obe merania boli spravené použitím dvoj pólového motoru napájaného frekvenciou 50 Hz. V prvom prípade bol motor zaťažený na 35%, v druhom na 60% nominálnej hodnoty zaťaženia. Zmeraním veľkosti skluzu (0,10%, resp. 0,16%) pomocou stroboskopu, pri poznaní frekvencie siete bola vypočítaná frekvencia rotácie rotoru f_{rot} ako 49,95 Hz, resp. 49,9 Hz. [6]

V prípade nutnosti analýzy prerušenia rotorových tyčí pri nízkej hodnote skluzu môžeme analyzovať frekvencie [6]

$$f_{bs} = f_{rot} N_r \pm 2f \quad (8)$$

kde f_{rot} je frekvencia rotoru podľa rovnice (7), N_r je počet rotorových tyčí a f je napájacia frekvencia siete.

Použitie je výhodné pri nižšom počte rotorových tyčí, nakoľko pri veľkom počte tyčí budeme musieť analyzovať vysoké frekvencie s menšími amplitúdami a nižšou presnosťou. [6]



Obrázok 9: Vibračné spektrum zdravého a poškodeného motoru [6, upravené]

Excentricita

Statická excentricita

Podľa experimentálnych výsledkov v [12] môžeme nájsť prejavy statickej excentricity vo vibračnom spektre na frekvenciách

$$f_{es} = 2f \quad (9)$$

$$f_{es} = 2f \pm f_r \quad (10)$$

kde f je frekvencia siete a f_r je frekvencia mechanického otáčania rotoru podľa (11)

$$f_r = \frac{(1-s)}{p} f \quad (11)$$

kde f je napájacia frekvencia siete a s je skluz motoru.

Podľa [12] by sme mali nájsť prejavy statickej excentricity najzreteľnejšie na frekvencii dvojnásobku napájacej frekvencie siete $2f$.

Dynamická excentricita

Jej prítomnosť vieme vo vibračnom harmonickom spektre pozorovať na frekvenciách vyjadrených nasledujúcimi rovnicami [12]

$$f_{ed} = 2f \pm f_r \quad (12)$$

$$f_{ed} = 2f_r \quad (13)$$

$$f_{ed} = 2(f \pm f_r) \quad (14)$$

kde f je napájacia frekvencia siete a f_r je frekvencia mechanického otáčania rotoru podľa (11)

2.1.2 Analýza statorových prúdov

Vďaka svojej praktickosti a jednoduchosti použitia je najpoužívanejšou technikou detekovania porúch asynchrónnych motorov. Pomocou nej sledujeme zmeny vo frekvenčnom spektre statorových prúdov.

Prerušenie rotorových tyčí

Pomocou analýzy statorových prúdov vieme frekvenčné zložky poukazujúce na prerušenie rotorových tyčí nájsť v okolí sieťovej frekvencie [3]

$$f_b = (1 \pm 2s)f \quad (15)$$

kde f je frekvencie siete, a s je skluz motoru

Vznikajú však aj vyššie frekvencie vyjadrené rovnicou [3]

$$f_b = (1 \pm 2ks)f \quad (16)$$

kde f je frekvencie siete, s je skluz motoru a $k = 1, 2, 3, \dots$

Excentricita

Excentricitu vo frekvenčnej oblasti statorových prúdov hľadáme na frekvenciách [14]

$$f_e = \left(\frac{k}{p} (1-s) \pm 1 \right) f \quad (17)$$

kde f je frekvencie siete, s je skluz motoru a $k/p = 1, 3, 5, \dots$

3 Meranie a simulácia

3.1 Merané stroje

Meranie excentricity

Prítomnosť excentricity sme merali na štyroch motoroch. Tri motory mali výrobné zvýšenú mieru excentricity, štvrtý motor slúžil ako referenčný (miera excentricity v norme). Veľkosť miery excentricity jednotlivých motorov udáva **tabuľka č.**

Tabuľka 1: Hodnoty excentricity meraných motorov

Označenie motoru	Statická excentricita	Dynamická excentricita
	[mm]	[mm]
1	0 - 0,015	0 - 0,015
2	0 - 0,015	0,040 - 0,050
3	0,040 - 0,050	0 - 0,015
4	0,040 - 0,050	0,040 - 0,050

Hodnoty nepresahujúce 0.015 mm uvažujeme v rámci tolerancií výrobného procesu za nezávadné.

Podľa tabuľky je motor s číslom 1 referenčný. Motor č. 2 vykazuje statickú a motor č. 3 dynamickú excentricitu, ktorá prekračuje normu. Motor č. 4 má kombinovanú excentricitu – súčasný výskyt statickej a dynamickej excentricity.

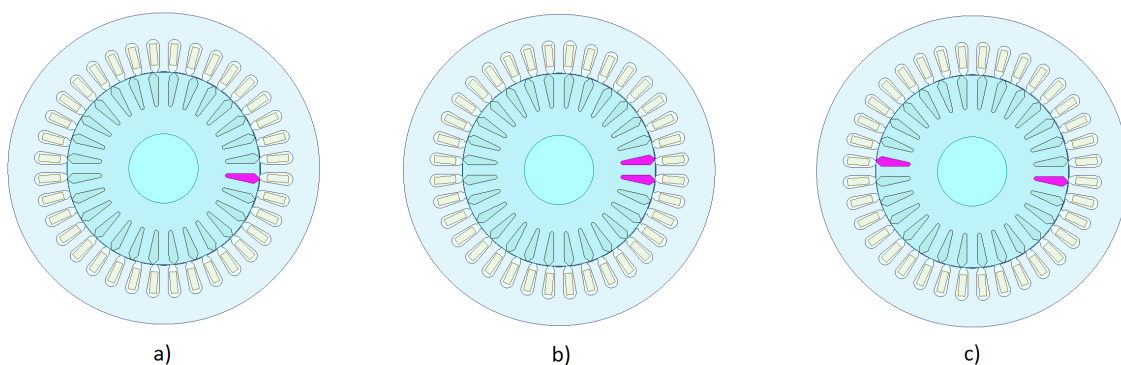
Všetky motory sú štvorpólové asynchrónne motory s rovnakými menovitými parametrami, ktoré uvádza tabuľka 2.

Tabuľka 2: Menovité parametre meraných motorov

	Výkon	Otáčky	Moment	Napätie	Účinník
TM90-4S IP54	1100 W	1400 min ⁻¹	7,5 Nm	230/400 V, 50 Hz	0,8

Meranie prerušenia rotorových tyčí

Prerušenie rotorových tyčí sme merali na troch motoroch. Prerušenie rotorových tyčí demonštruje Obrázok 10 .



Obrázok 10: Prerušenie rotorových tyčí meraných motorov

Motor a) má prerušenú jednu tyč, motor b) dve susedné tyče a motor c) má prerušené dve proti sebe ležiace tyče.

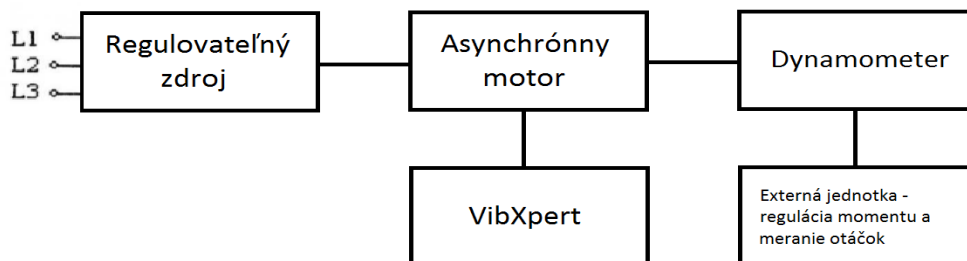
Motory s prerušenými rotorovými tyčami mali menovité parametre zhodné s motormi so zvýšenou mierou excentricity (viď. tabuľka 2). Referenčný motor bol teda v oboch prípadoch rovnaký.

V prípade merania prerušenia rotorových tyčí sme menili iba rotory pri použití rovnakého statoru.

3.2 Meracie prístroje a priebeh merania

Na meranie vibrácií bol použitý merač vibrácií VibXpert II od firmy Pruftechnik. Prístroj sme pomocou magnetického úchopu umiestnili na konštrukciu motora tak, aby jeho os bola v pravom uhle k motorovej hriadieli. Pokiaľ by sme motor umiestnili do počiatku Euklidovského súradnicového systému, tak meriame veľkosť zmeny v z-vej osi sústavy.

V prípade excentricity aj prerušenia rotorových tyčí sme pomocou vibrometra merali rýchlosť v a zrýchlenie a vibrácií.



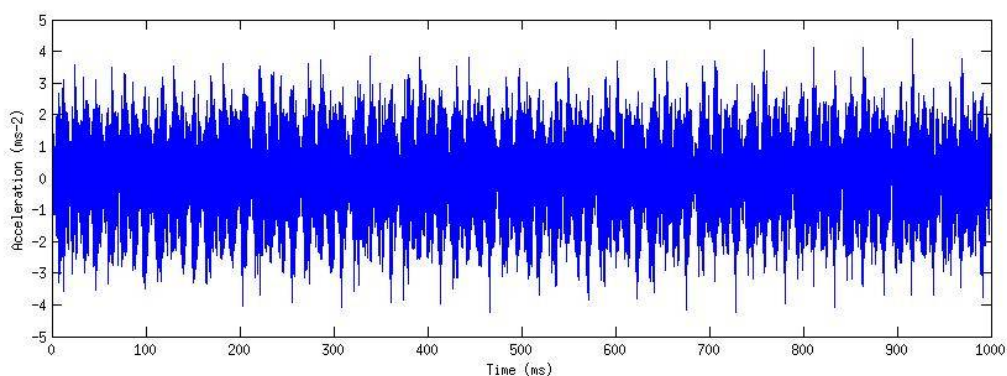
Obrázok 11: Blokové schéma zapojenia meracieho pracoviska

V teoretickom úvode práce bolo odvodené, že presnosť detekcie oboch porúch sa značne mení s veľkosťou zaťaženia motoru. Preto sme meranie oboch porúch robili pri rôznych zaťaženiach motoru: naprázdno s napojením na dynamo, s zaťažovacím momentom 50% a 100%.

Vibrácie sme tiež merali naprázdno bez napojenia na dynamometer pre posúdenie vplyvu napojenia na úroveň vibrácií. VibXpert bol pri meraní nastavený na vzorkovaciu frekvenciu 16 kHz.

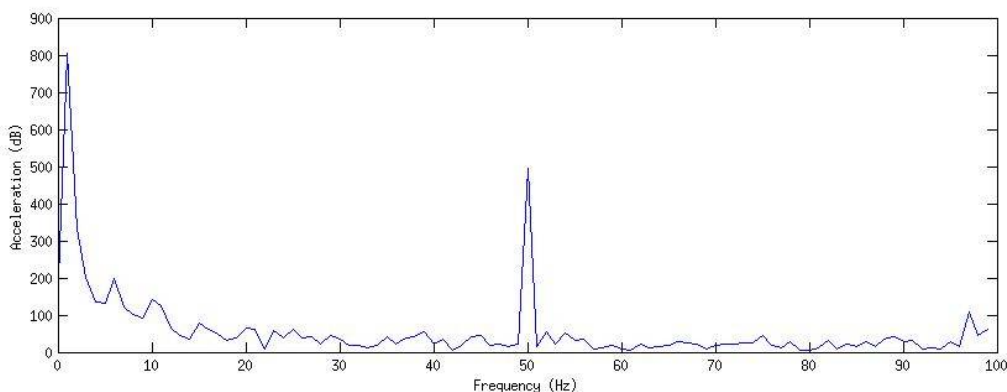
3.3 Metodika spracovania nameraných hodnôt

Namerané hodnoty boli exportované z vibrometru a následne spracované v programe Matlab.



Obrázok 12: Priebeh nameraných hodnôt zrýchlenia vibrácií

Pre určenie veľkosti frekvenčných zložiek bolo potrebné previesť signál pomocou FFT (Fast Fourier Transformation) z časovej oblasti do oblasti frekvenčnej.



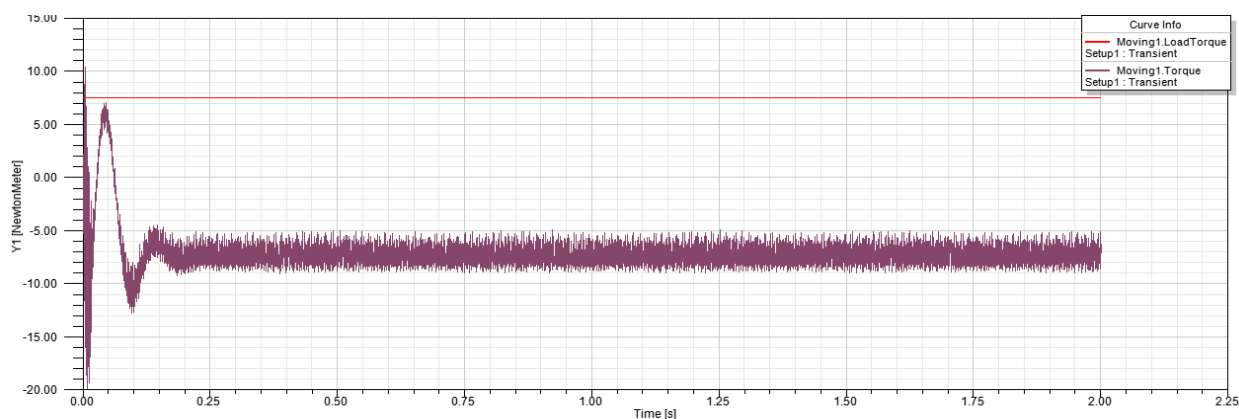
Obrázok 13: Frekvenčné spektrum zrýchlenia vibrácií v oblasti 0 až 100 Hz

Prevedenie do frekvenčnej oblasti umožňuje využitie rovníc, ktoré sú uvádzané v teoretickej časti práce, s pomocou ktorých budeme analyzovať konkrétne vypočítané frekvencie spektra jednotlivu pre každú poruchu.

Súčasťou merania bolo aj určenie maximálnej veľkosti rýchlosti a zrýchlenia vibrácií v_{max} a a_{max} , a určenie efektívnej hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií v_{ef} a a_{ef} , ktorých hodnota by pri meraní v teréne (bez potreby detailnejšej analýzy) porovnaním s normovanými hodnotami umožňovala určiť veľkosť poruchy motoru.

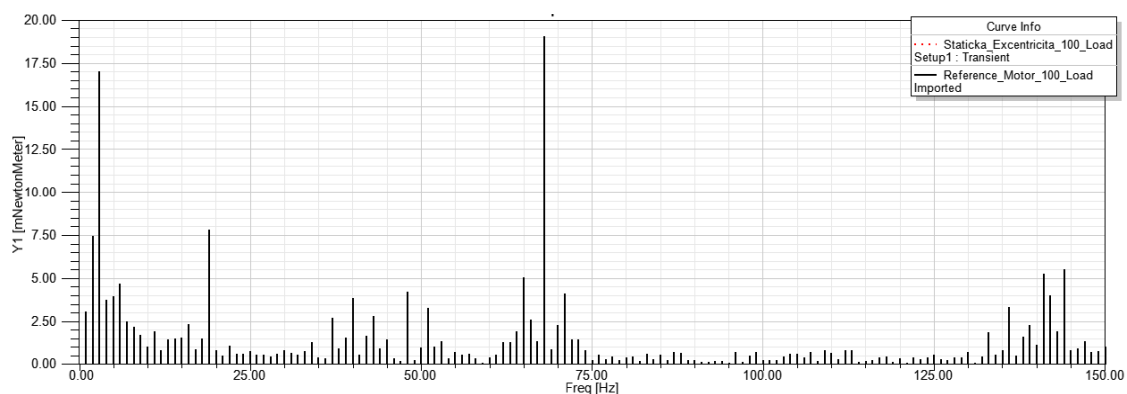
3.4 Simulácia motoru

Návrh 2D modelu motoru bol spracovaný v programe ANSYS Maxwell s využitím modulu RMxpt. Do modelu boli zadane menovité parametre a rozmery motoru udávané výrobcom v internej dokumentácii.



Obrázok 14: Pribeh momentu na hriadeli pri 100% menovitého zaťaženia

Program využíva výpočtovú metódu konečných prvkov a umožňuje simulovať časový priebeh momentu na hriadeli aj priebeh statorových prúdov. Nebudeme teda simulovať priamo vibrácie, ale priebeh momentu, ktorého frekvenčné zložky poruchy by mali vykazovať zvýšenie amplitúdy na rovnakých frekvenciách ako v prípade vibrácií.



Obrázok 15: Frekvenčné spektrum priebehu momentu na hriadeli

4 Namerané a vypočítané hodnoty

4.1 Excentricita

Tabuľka 3: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – referenčný motor

Motor č.1 - referenčný motor (bez poruchy)					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	V_{ef}	V_{max}	n
	[ms^{-2}]	[ms^{-2}]	[ms^{-1}]	[ms^{-1}]	[min^{-1}]
Naprázdno	1,496	4,268	0,346	0,951	1497
Naprázdno s dynamometrom	0,726	2,486	0,405	1,189	1497
50 % menovitého zaťaženia	0,803	3,431	0,365	1,41	1469
100 % menovitého zaťaženia	1,096	4,307	0,337	1,355	1434

Tabuľka 4: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – statická excentricita

Motor č.2 - statická excentricita					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	V_{ef}	V_{max}	n
	[ms^{-2}]	[ms^{-2}]	[ms^{-1}]	[ms^{-1}]	[min^{-1}]
Naprázdno	2,3	7,332	0,459	1,405	1498
Naprázdno s dynamometrom	3,22	11,517	0,544	1,762	1498
50 % menovitého zaťaženia	5,513	15,988	1,001	3,074	1471
100 % menovitého zaťaženia	8,268	20,776	1,524	2,64	1437

Tabuľka 5: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – dynamická excentricita

Motor č.3 - dynamická excentricita					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	V_{ef}	V_{max}	n
	[ms^{-2}]	[ms^{-2}]	[ms^{-1}]	[ms^{-1}]	[min^{-1}]
Naprázdno	2,154	6,039	0,42	1,16	1498
Naprázdno s dynamometrom	1,048	3,753	0,318	1,165	1498
50 % menovitého zaťaženia	1,017	3,345	0,258	0,941	1470
100 % menovitého zaťaženia	1,506	4,686	0,351	1,312	1436

Tabuľka 6: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – kombinovaná excentricita

Motor č.4 - kombinovaná excentricita					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	V_{ef}	V_{max}	n
	[ms^{-2}]	[ms^{-2}]	[ms^{-1}]	[ms^{-1}]	[min^{-1}]
Naprázdno	2,426	7,654	0,488	1,642	1498
Naprázdno s dynamometrom	5,455	7,758	0,488	1,484	1498
50 % menovitého zaťaženia	2,62	9,822	0,525	2,2	1470
100 % menovitého zaťaženia	4,41	13,831	0,867	2,793	1436

Predchádzajúce tabuľky ukazujú namerané maximálne hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií v_{max} a a_{max} , a efektívne hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií v_{ef} a a_{ef} .

Zatiaľ čo sa veľkosť a_{max} zo zvyšovaním záťaže pri referenčnom motore vzhľadom na stav naprázdno a_{max} 2,486 ms⁻² zväčší na a_{max} 4,307 ms⁻² pri maximálnom zaťažení a predstavuje nárast o približne 75 % pôvodnej hodnoty, pri motore so statickou excentricitou znamená zväčšenie z a_{max} 7,332 ms⁻² pri stave naprázdno na a_{max} 20,776 ms⁻² pri maximálnom zaťažení nárast o takmer 183 % pôvodnej hodnoty.

Tabuľka 7: Percentuálne porovnanie zvýšenia hodnôt efektívneho zrýchlenia a_{ef}

Stav motora / Meraný motor	Referenčný motor	Statická excentricita	Dynamická excentricita	Kombinovaná excentricita
Naprázdno	100 %	154 %	144 %	162 %
Naprázdno s dynamometrom	100 %	434 %	144 %	751 %
50 % menovitého zaťaženia	100 %	686 %	127 %	326 %
100 % menovitého zaťaženia	100 %	754 %	137 %	402 %

Oveľa dôležitejšie ako zmena veľkosti a_{max} pri náraste zaťaženia je zmena efektívnej hodnoty zrýchlenia a_{ef} motorov s poruchou vzhľadom na referenčný motor. Z tabuľky 7 vidíme, že pri statickej a kombinovanej excentricite nastáva nárast amplitúdy rýchlosti vibrácií voči referenčnému motoru v rádoch stoviek percent.

Frekvenčné zložky indikujúce poruchu

Pomocou rovnice (1) sme pre 4-pólový motor určili otáčky statorového poľa s veľkosťou $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$. Následne využitím vzorca (2) určíme skluz s motoru pre jednotlivé stavy zaťaženia.

Tabuľka 8: Skluz motorov pri rozdielnom zaťažení

Číslo motoru	1		2		3		4	
Stav motora / Meraná veličina	n	s	n	s	n	s	n	s
	[min ⁻¹]	[%]	[min ⁻¹]	[%]	[min ⁻¹]	[%]	[min ⁻¹]	[%]
Naprázdno	1497	0,20	1498	0,13	1498	0,13	1498	0,13
Naprázdno s dynamometrom	1497	0,20	1498	0,13	1498	0,13	1498	0,13
50 % menovitého zaťaženia	1469	2,07	1471	1,93	1470	2,00	1470	2,00
100 % menovitého zaťaženia	1434	4,37	1437	4,20	1436	4,27	1436	4,25

Skluz nám nepriamo vyjadruje veľkosť záťaže motoru – s narastajúcou záťažou veľkosť skluzu pri asynchrónnom motore stúpa.

Po vypočítaní hodnôt skluzu môžeme použitím rovníc (9) a (10) v prípade statickej excentricity a (12), (13) a (14) v prípade dynamickej excentricity určiť frekvencie na ktorých by sa nám vo frekvenčnom spektre mala prejavíť prítomnosť poruchy.

Tabuľka 9: Statická excentricita – frekvencie určujúce poruchu

	2f [Hz]	2f ± f _r [Hz]			
Stav motora / Meraný motor	1,2,3,4	1	2	3	4
Naprázdno	100	112,48 87,52	112,48 87,52	112,48 87,52	112,48 87,52
Naprázdno s dynamometrom	100	112,48 87,52	112,48 87,52	112,48 87,52	112,48 87,52
50 % menovitého zaťaženia	100	112,24 87,76	112,26 87,74	112,25 87,75	112,25 87,75
100 % menovitého zaťaženia	100	111,95 88,04	111,98 88,01	111,97 88,02	111,97 88,02

kde f je napájacia frekvencia siete, f_r je frekvencia mechanickej rotácie rotoru určená rovnicou (11)

Hodnoty hľadaných frekvenčných zložiek nám vyšli pri všetkých štyroch motoroch veľmi podobné, čo je spôsobené tým, že sa jedná o motory s rovnakými menovitými parametrami. Pri skúmaní statickej excentricity sa teda zameriame na tri frekvencie: **100 Hz** a frekvencie blízke **112 Hz** a **88 Hz**.

Tabuľka 10: Dynamická excentricita – frekvencia mechanickej rotácie rotoru

Stav motora / Meraný motor	2f _r [Hz]			
	1	2	3	4
Naprázdno	24,95	24,97	24,97	24,97
Naprázdno s dynamometrom	24,95	24,97	24,97	24,97
50 % menovitého zaťaženia	24,48	24,52	24,5	24,5
100 % menovitého zaťaženia	23,91	23,95	23,93	23,94

Tabuľka 11: Dynamická excentricita – frekvencie určujúce poruchu

Stav motora / Meraný motor	2f ± f _r , 2f ± 2f _r [Hz]							
	1		2		3		4	
Naprázdno	112,48 87,52	124,95 75,05	112,48 87,52	124,97 75,03	112,48 87,52	124,97 75,03	112,48 87,52	124,97 75,03
Naprázdno s dyn. metr.	112,48 87,52	124,95 75,05	112,48 87,52	124,97 75,03	112,48 87,52	124,97 75,03	112,48 87,52	124,97 75,03
50 % men. zaťaženia	112,24 87,76	124,48 75,52	112,26 87,74	124,52 75,48	112,25 87,75	124,5 75,5	112,25 87,75	124,5 75,5
100 % men. zaťaženia	111,95 88,04	123,91 76,09	111,98 88,01	123,95 76,05	111,97 88,02	123,93 76,07	111,97 88,02	123,94 76,16

Vo frekvenčnom spektre budeme pri dynamickej excentricite porovnávať frekvenčné zložky frekvencií v okolí **25 Hz, 75 Hz, 88 Hz, 112 Hz a 125 Hz**.

Kombinovaná excentricita

Pri skúmaní dynamickej excentricity budeme vychádzať z toho, že sa jedná o súčasný výskyt statickej a dynamickej excentricity. Budeme teda porovnávať všetky frekvencie, ktoré sme určili pri oboch predchádzajúcich poruchách a to: **25 Hz, 75 Hz, 88 Hz, 100 Hz, 112 Hz a 125 Hz**.

4.2 Prerušené rotorové tyče

Nasledujúce tabuľky ukazujú namerané maximálne hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií v_{max} a a_{max} , a efektívne hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií v_{ef} a a_{ef} pri motoroch s prerušenými rotorovými tyčami.

Tabuľka 12: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – referenčný motor

Motor č.1 - referenčný motor (bez poruchy)					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	v_{ef}	v_{max}	n
	[ms ⁻²]	[ms ⁻²]	[ms ⁻¹]	[ms ⁻¹]	[min ⁻¹]
Naprázdno	1,496	4,268	0,346	0,951	1497
Naprázdno s dynamometrom	0,726	2,486	0,405	1,189	1497
50 % menovitého zaťaženia	0,803	3,431	0,365	1,41	1469
100 % menovitého zaťaženia	1,096	4,307	0,337	1,355	1434

Tabuľka 13: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – 1 prerušená rotorová tyč

Motor č.5 - 1 prerušená tyč					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	V_{ef}	V_{max}	n
	[ms^{-2}]	[ms^{-2}]	[ms^{-1}]	[ms^{-1}]	[min^{-1}]
Naprázdno	1,076	6,247	0,589	2,899	1498
Naprázdno s dynamometrom	0,624	2,780	1,255	2,853	1498
50 % menovitého zaťaženia	0,728	2,915	1,695	2,397	1467
100 % menovitého zaťaženia	1,536	5,413	4,185	5,919	1432

Tabuľka 14: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – 2 prerušené rotorové tyče pri sebe

Motor č.6 - 2 susedné prerušené tyče					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	V_{ef}	V_{max}	n
	[ms^{-2}]	[ms^{-2}]	[ms^{-1}]	[ms^{-1}]	[min^{-1}]
Naprázdno s dynamometrom	0,562	2,817	0,276	0,898	1498
50 % menovitého zaťaženia	0,903	4,161	0,901	1,998	1469
100 % menovitého zaťaženia	1,706	6,488	0,810	2,248	1433

Tabuľka 15: Hodnoty rýchlosti a zrýchlenia vibrácií – 2 prerušené rotorové tyče oproti sebe

Motor č.7 - 2 proti sebe ležiace prerušené tyče					
Stav motora / Meraná veličina	a_{ef}	a_{max}	V_{ef}	V_{max}	n
	[ms^{-2}]	[ms^{-2}]	[ms^{-1}]	[ms^{-1}]	[min^{-1}]
Naprázdno s dynamometrom	0,902	3,94	0,343	1,209	1498
50 % menovitého zaťaženia	1,777	7,168	0,707	2,024	1468
100 % menovitého zaťaženia	3,717	8,709	1,018	2,772	1430

Podobne ako pri excentricite môžeme sledovať, že rýchlosť rastu hodnoty v_{max} a a_{max} s postupným zaťažovaním motoru je rýchlejšia v prípade motoru s poruchov. V prípade referenčného motoru sa napríklad v_{max} zmení zaťažením z $0.951 ms^{-2}$ na $1.355 ms^{-2}$, čo predstavuje nárast o 42 % pôvodnej hodnoty.

Nárast v_{max} pri motore s jednou prerušenou tyčou však oproti stavu narázdno bude 103 % , pri prerušení dvoch proti sebe ležiacich tyčí 129 % a pri prerušení dvoch susedných tyčí až 150 %.

Tabuľka 16: Percentuálne porovnanie zvýšenia hodnôt efektívneho zrýchlenia a_{ef}

Stav motora / Meraný motor	Referenčný motor	1 tyč	2 susedné tyče	2 tyče oproti sebe
Naprázdno s dynamometrom	100 %	86 %	77 %	124 %
50 % menovitého zaťaženia	100 %	91 %	112 %	221 %
100 % menovitého zaťaženia	100 %	140 %	156 %	339 %

Pri prerušených rotorových tyčiach je možné pozorovať výraznejšiu zmenu efektívnej hodnoty zrýchlenia a_{ef} až pri plnom menovitom zaťažení.

Z nameraných hodnôt tiež vidíme, že meraním efektívnych a maximálnych hodnôt rýchlosti a zrýchlenia síce môžeme určiť poruchovosť motoru, ale už nie je také jednoduché rozlíšiť presnú príčinu poruchy. Preto je pre väčšiu presnosť výhodné použiť detailnejšiu frekvenčnú analýzu.

Frekvenčné zložky indikujúce poruchu

Ako bolo uvedené v teoretickom úvode bude nás pri skúmaní frekvenčného spektra vibrácií prerušeným rotorových tyčí zaujímať amplitúda na frekvenčných zložkách **50 Hz** a **100 Hz**. Dosadením do rovníc (6) a (8) dostaneme ďalšie frekvencie určujúce možný výskyt poruchy stroja.

Zatiaľ čo rovnicu (6) budeme používať v prípade vyšších hodnôt skluzu (50 a 100 % zaťaženie), rovnicu (8) využijeme pre výpočet v stave naprázdno. Podobne ako v prípade excentricity musíme najskôr z rovnice (2) určiť veľkosť skluzu motora v prípade jednotlivých zaťažení. Otáčky statorového poľa ostávajú stále rovnaké $n_s = 1500 \text{ min}^{-1}$.

Tabuľka 17: Skluz motorov pri rozdielnom zaťažení

Číslo motoru	1		5		6		7	
Stav motora / Meraná veličina	n	s	n	s	n	s	n	s
	[min ⁻¹]	[%]	[min ⁻¹]	[%]	[min ⁻¹]	[%]	[min ⁻¹]	[%]
Naprázdno s dynamometrom	1497	0,20	1498	0,13	1498	0,13	1498	0,13
50 % menovitého zaťaženia	1469	2,07	1467	2,2	1469	2,07	1468	2,13
100 % menovitého zaťaženia	1434	4,37	1432	4,53	1433	4,47	1430	4,67

Pri prerušení rotorových tyčí nebudeme počítať rozličné frekvenčné zložky v závislosti na počte prerušených tyčí. S počtom prerušených tyčí by sa nám na vypočítanej frekvencii mala meniť veľkosť amplitúdy.

Výpočtom rovníc (6) a (7) dostávame nasledovné frekvencie

Tabuľka 18: Prerušené rotorové tyče – frekvencie určujúce poruchu pri zaťažení

	f_{rot} [Hz]		
Stav motora / Meraný motor	5	6	7
Naprázdno s dynamometrom	49,94	49,94	49,94
50 % menovitého zaťaženia	48,9	48,97	48,94
100 % menovitého zaťaženia	47,74	47,77	47,67

	$f_{rot} \pm (f - f_{rot})2p$ [Hz]		
Stav motora / Meraný motor	5	6	7
50 % menovitého zaťaženia	53,3	53,09	53,18
	44,5	44,85	44,7
100 % menovitého zaťaženia	56,78	56,69	56,99
	38,7	38,85	38,35

f je frekvencia napájacej siete, v našom prípade 50 Hz a $2p=4$.

Pri prerušených rotorových tyčiach budeme sledovať frekvencie v závislosti na zaťažení v okolí **49 a 48 Hz**, v ktorých okolí by sa mali vyskytovať frekvencie charakteristické pre poruchu s hodnotou **44 a 53 Hz**, resp. **38 a 57 Hz**.

Pre chod naprázdno použijeme výpočet rovnice (8)

Tabuľka 19: Prerušené rotorové tyče – frekvencie určujúce poruchu naprázdno

	$f_{rot} N_r \pm 2f$ [Hz]
Stav motora / Meraný motor	5,6,7
Naprázdno s dynamometrom	1498,32
	1298,32

kde N_r je celkový počet rotorových tyčí, v našom prípade pre všetky motory platí, že $N_r = 28$.

Pri meraní nám v prípade stavu naprázdno s dynamom vyšli vo všetkých prípadoch rovnaké otáčky, resp. skluz a preto sú $f_{rot} N_r$ a jeho bočné frekvencie pre všetky tri motory rovnaké a to **1398,32 Hz**, resp. **1498, 32 a 1298,32 Hz**.

5 Výsledky merania a simulácie

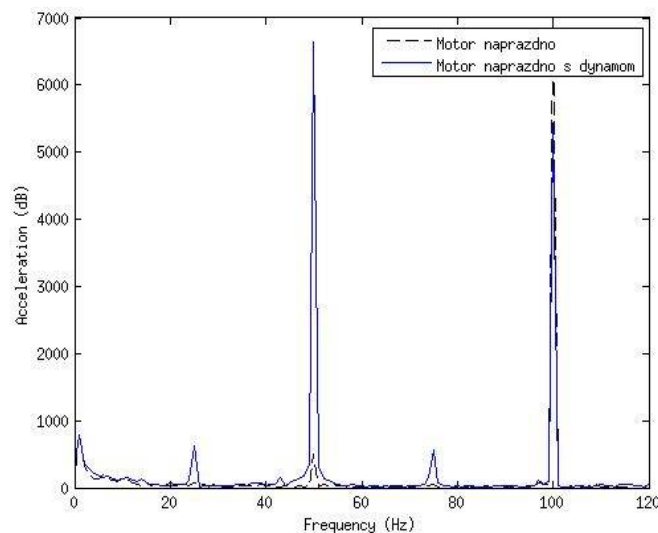
V tejto časti budeme aplikovať výsledky výpočtov z predchádzajúcej kapitoly na namerané hodnoty a simuláciu. Pôjde predovšetkým o overenie alebo vyvrátenie predpokladu, že poruchu motoru vieme diagnostikovať vo frekvenčnej oblasti pri uvažovaní zmeny amplitúd na vypočítaných frekvenciách.

Budeme porovnávať jednak namerané hodnoty poruchových motorov voči referenčnému motoru a zároveň porovnávať merané hodnoty s hodnotami simulovanými.

Vzhľadom na veľký počet výsledných grafov a doporučený rozsah práce sú prezentované vybrané priebehy pri chode motoru naprázdno a pri 100 % menovitom zaťažení, ktoré by mali najlepšie demonštrovať prítomnosť poruchy motoru. Detailnejšie priebehy je možné nájsť v prílohe práce.

5.1 Vplyv dynamometra

Pripojenie dynamometra sa nám prejaví na zmene harmonických spektra. Na obrázku 16 je vidieť veľký nárast prvej harmonickej na 50 Hz a vytvorenie peakov na frekvenciách v okolí 25 a 75 Hz. Druhá harmonická naopak po pripojení mierne poklesla. S týmito zmenami v spektre musíme počítať pri vyhodnocovaní výsledkov merania.

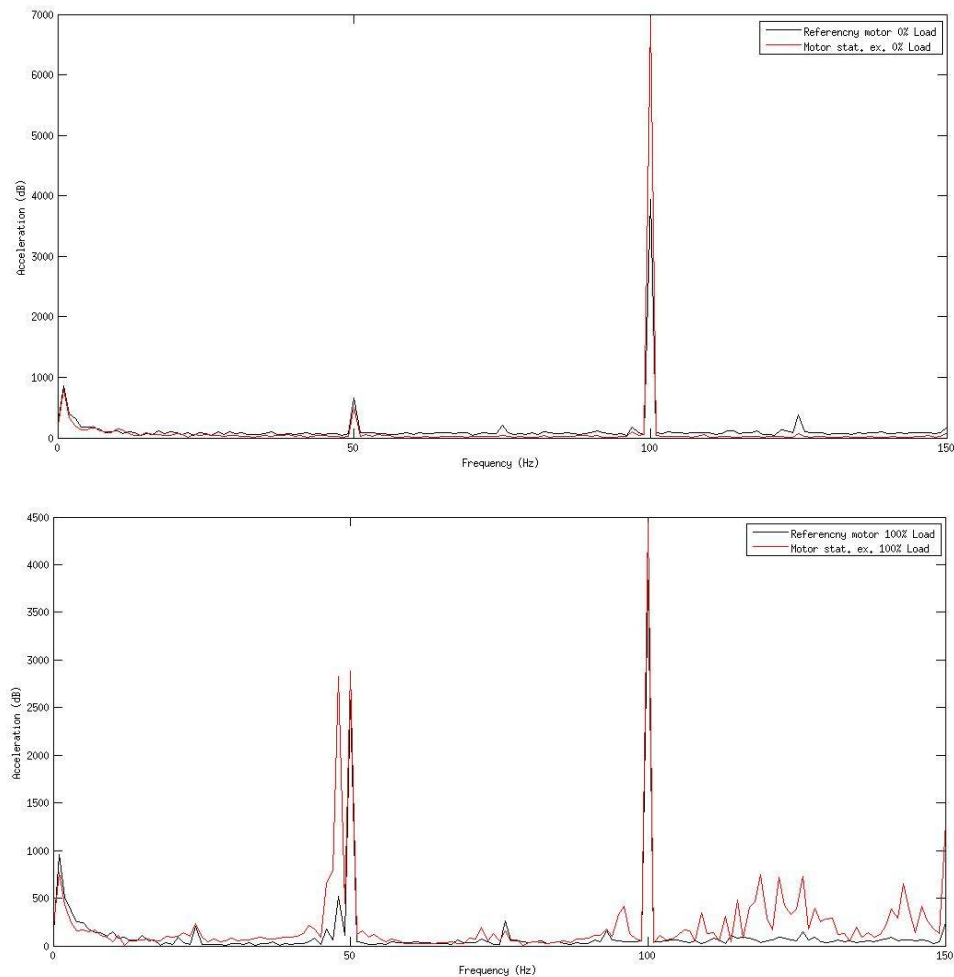


Obrázok 16: Frekvenčné spektrum motoru naprázdno a po napojení dynamometra

5.2 Excentricita

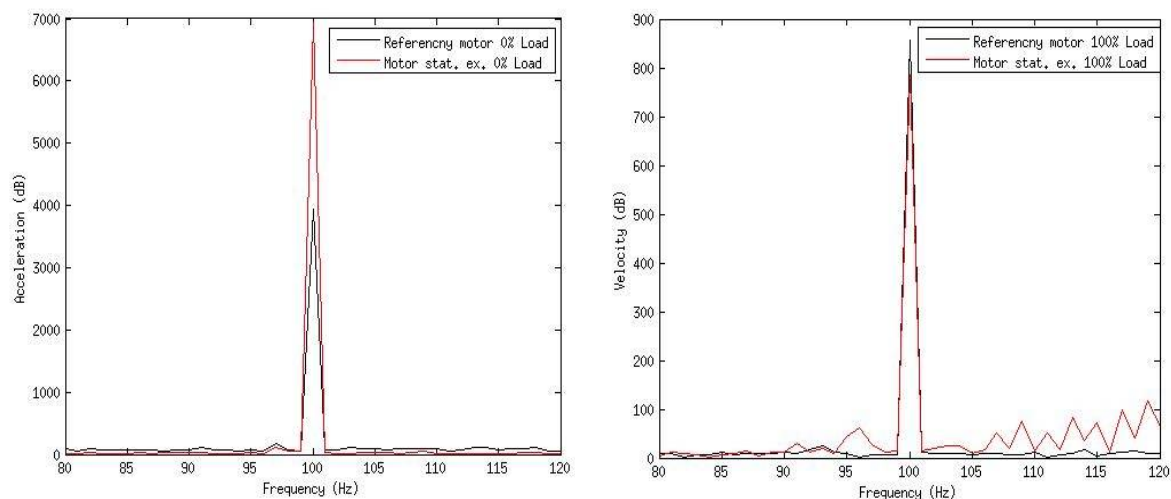
5.2.1 Statická excentricita

Frekvencie spojené s výskytom statickej excentricity sme v predošlom texte určili s hodnotami **100 Hz** a **112 Hz** a **88 Hz**, ktoré by sa v spektre mali prejaviť ako „side band frequencies“. Následne budeme porovnávať amplitúdy na jednotlivých frekvenčných zložkách pri rozdielnom type zaťaženia.

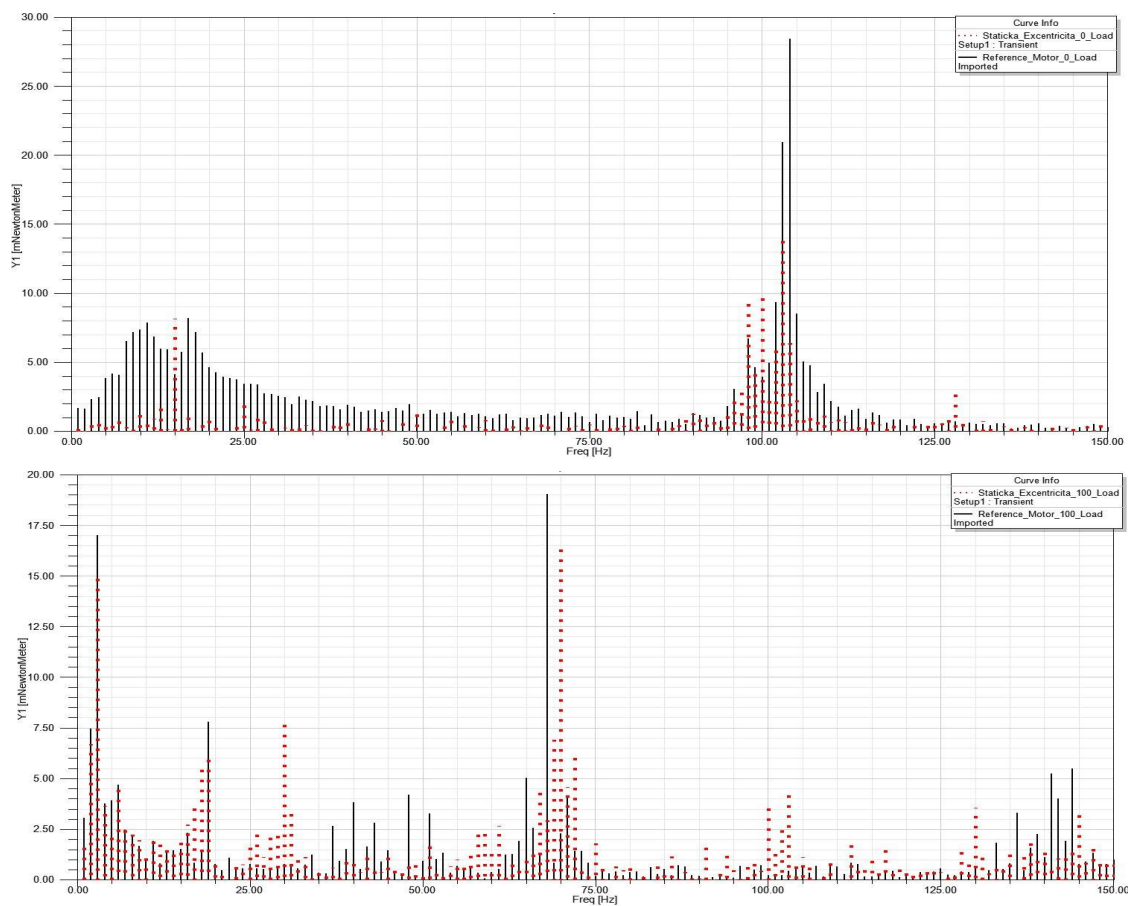


Obrázok 17: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru so statickou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia

Na obrázku 17 vidíme, že statická excentricita sa vo frekvenčnej oblasti prejaví až pri plnom zaťažení motoru. Pri 100% menovitého zaťaženia vidíme prejavy frekvencie $f(1-s)$, ktorá nám vytvára „peak“ pred prvou harmonickou. Na obrázku 19 vidíme výsledky simulácie, kde je zrejмый nárast amplitúdy pri zaťažení na frekvenciách v okolí 100 Hz.



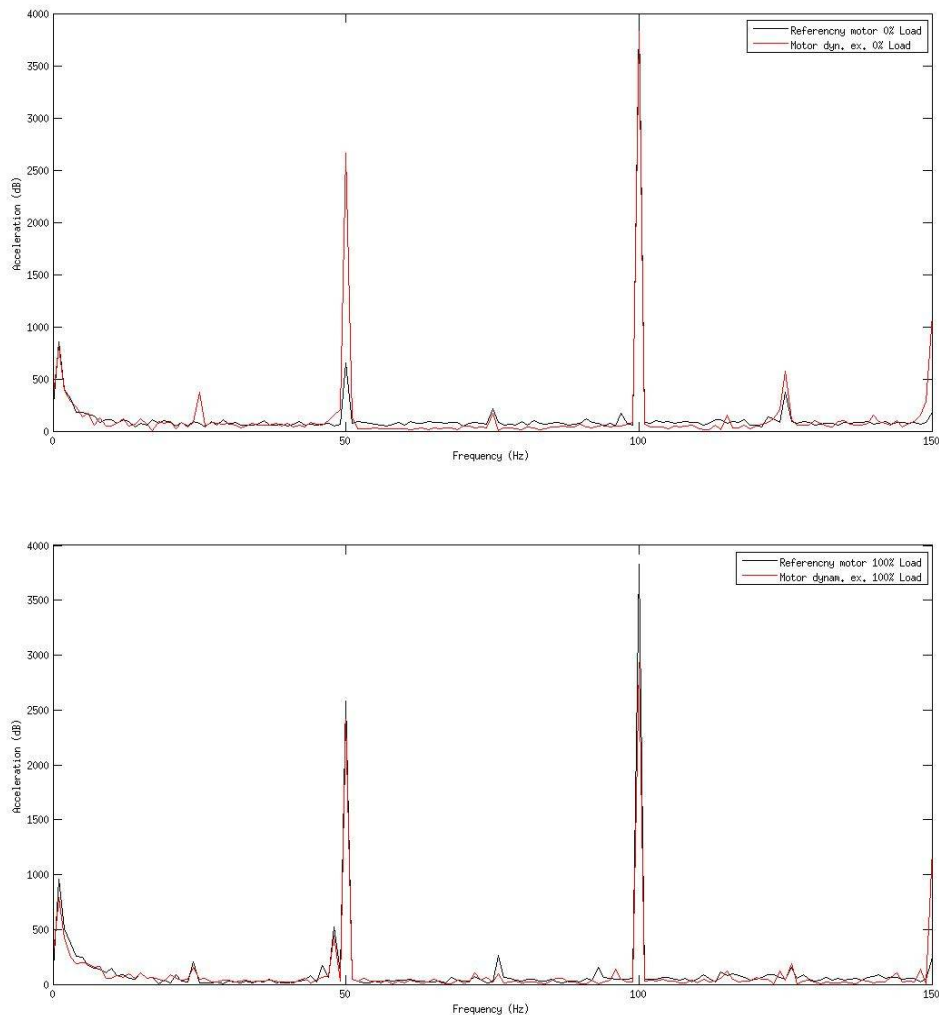
Obrázok 18: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru so statickou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia pre 100 Hz



Obrázok 19: Frekvenčné spektrum simulácie momentu pri statickej excentricite

5.2.2 Dynamická excentricita

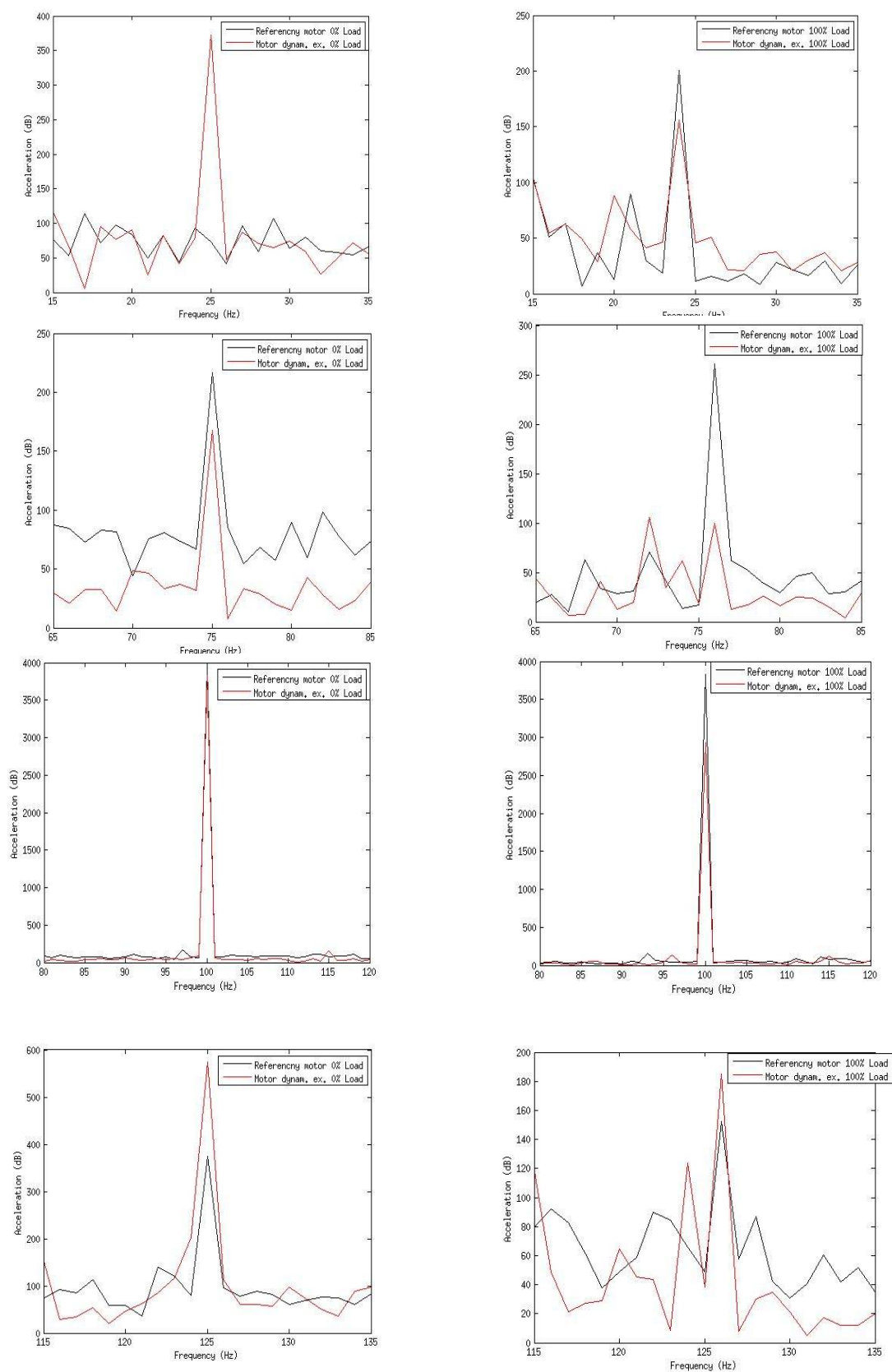
Frekvencie spojené s výskytom statickej excentricity sme v predošlom texte určili s hodnotami **25 Hz, 75 Hz, 88 Hz, 112 Hz a 125 Hz**.



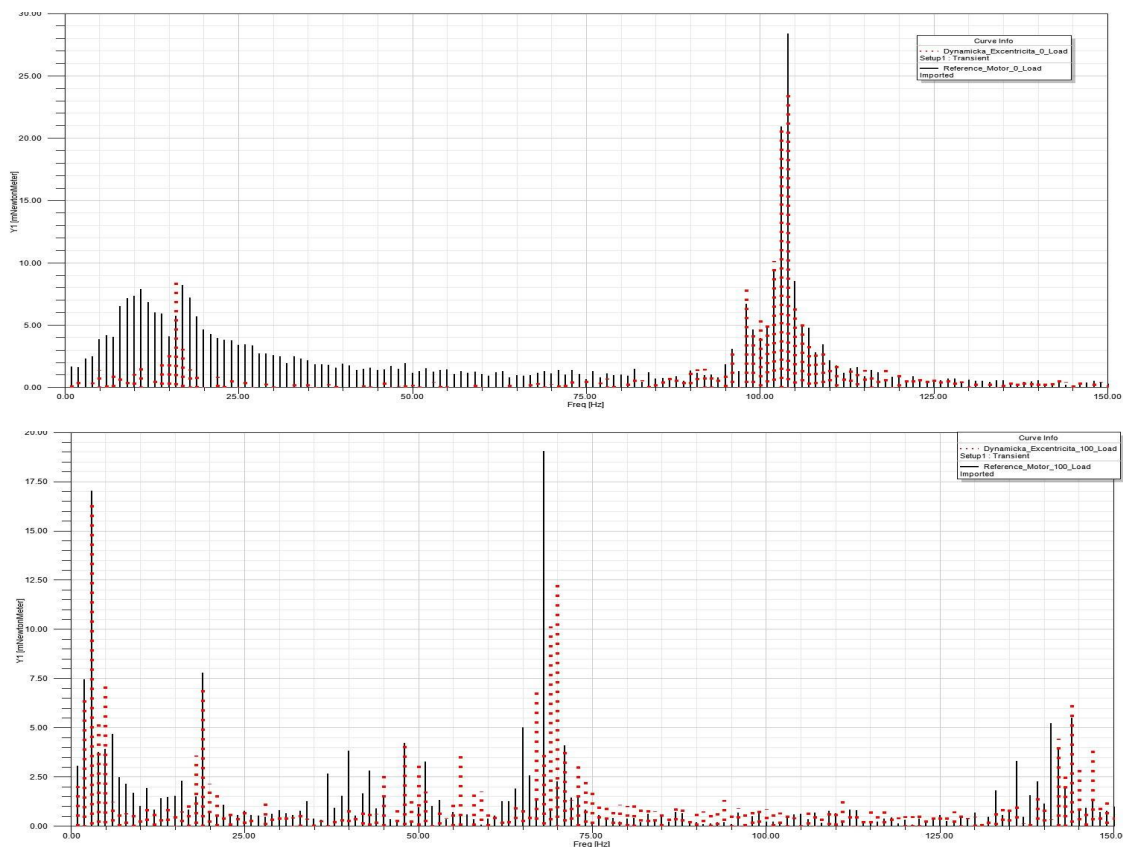
Obrázok 20: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru s dynamickou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia

Prejavy dynamickej excentricity sú oveľa menej výrazné ako prejavy excentricity statickej. Bolo to vidieť na nameraných hodnotách zrýchlenia a rýchlosti vibrácií (viď. tabuľka 7) a potvrdilo sa to aj pri frekvenčnej analýze. Nie sú výrazné žiadne veľké zmeny amplitúdy pri zaťažení motoru.

Pri simulovaní počítačovým modelom sa nám zobrazil nárast amplitúd na frekvenčných zložkách v okolí 75 Hz.



Obrázok 21: Frekvenčné spektrá pri dynamickej excentricite



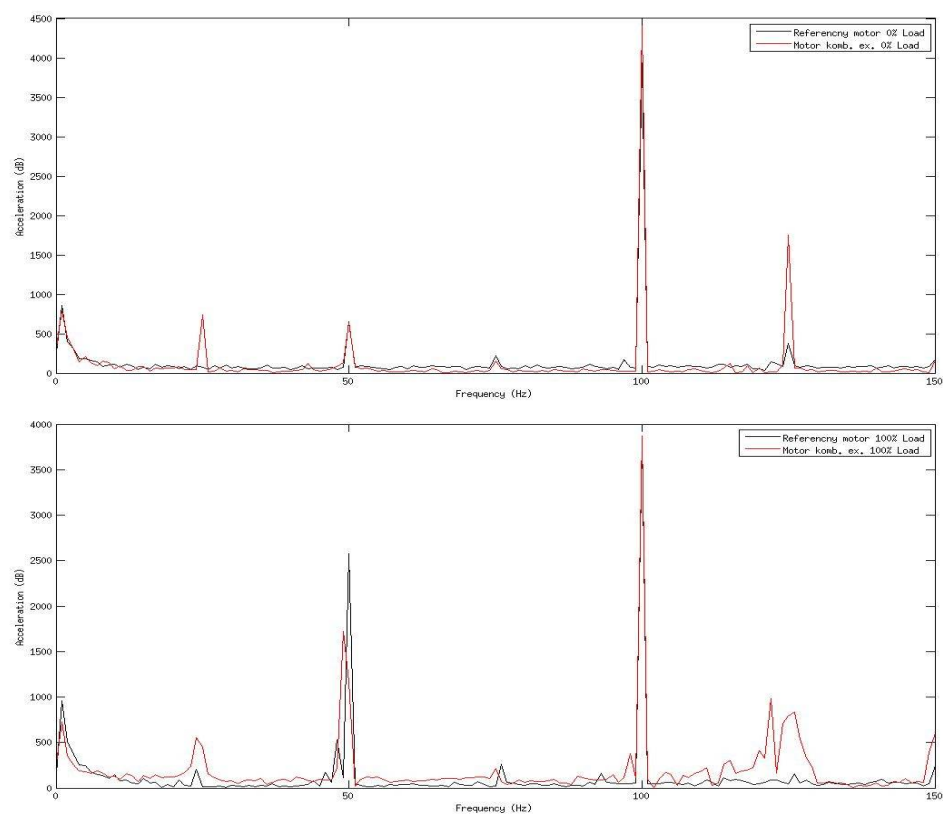
Obrázok 22: Frekvenčné spektrum simulácie momentu pri dynamickej excentricite

5.2.3 Kombinovaná excentricita

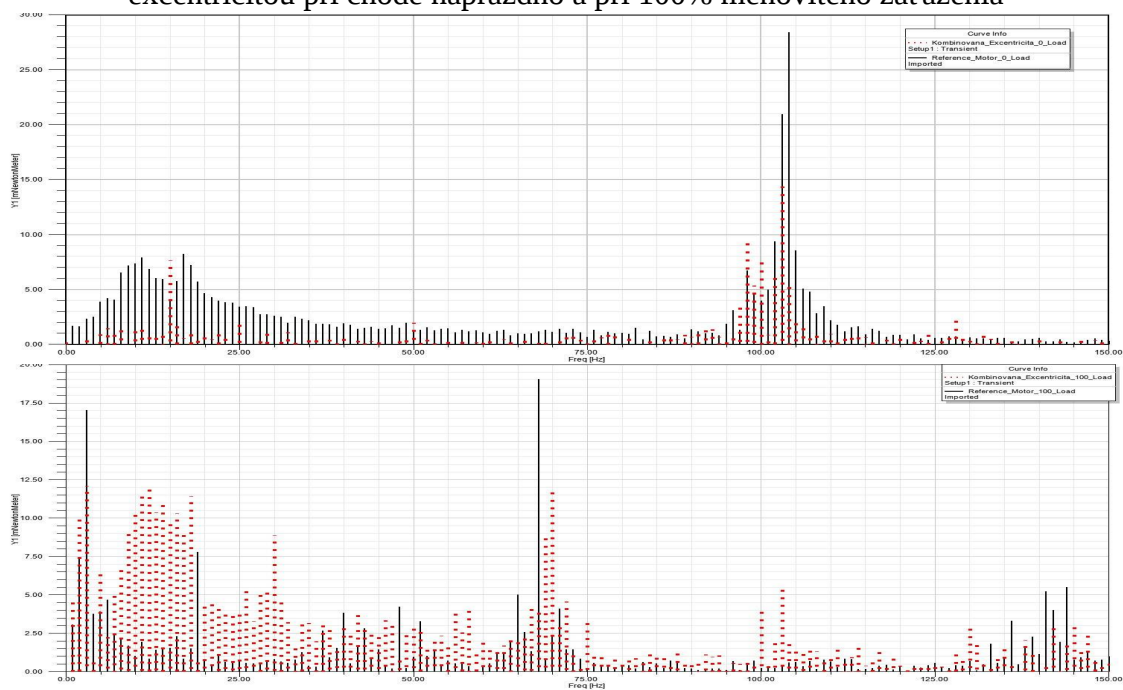
Frekvencie spojené s výskytom statickej excentricity sme v predošlom texte určili s hodnotami **25 Hz, 75 Hz, 88 Hz, 100 Hz, 112 Hz a 125 Hz**.

Dynamická excentricita by mala mať najvýraznejší vplyv na mieru vibrácií motora a teda aj najväčšiu zmenu amplitúdového spektra pri zaťažení motora. Toto sa potvrdilo predovšetkým v prípade počítačového modelu, kde je nárast amplitúd najvýraznejší. Môžeme pozorovať nárast na frekvencii 50, 75 aj 100 Hz.

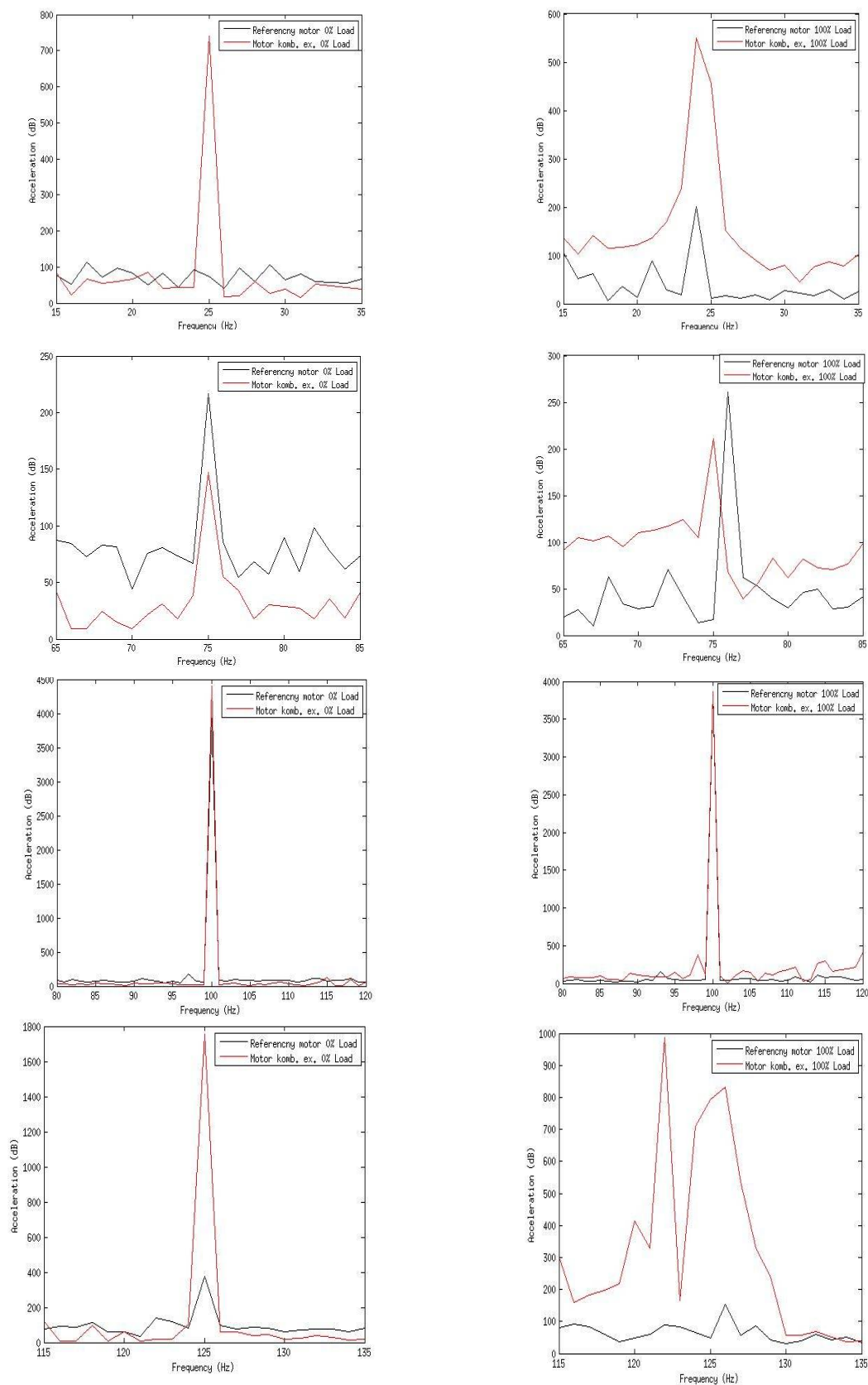
V nameraných hodnotách je výrazný „peak“ na frekvencii 25 Hz a na frekvenciách v okolí 125 Hz. Z detailnejšie vykreslených hodnôt na Obrázku 25 navyše vidíme, že pri zaťažení nastáva „posun“ frekvencie 25 Hz a 125 Hz na blízku nižšiu frekvenciu – 24 Hz, resp. 121 Hz, čo približne odpovedá hodnotám, ktoré sme dostali výpočtom (viď tabuľka 10 a 11)



Obrázok 23: Frekvenčné spektrum referenčného motoru a motoru s kombinovanou excentricitou pri chode naprázdno a pri 100% menovitého zaťaženia



Obrázok 24: Frekvenčné spektrum simulácie momentu pri kombinovanej excentricite



Obrázok25:
Frekvénčné spektrum frekvencií pri kombinovanej excentricite

5.3 Prerušené rotorové tyče

Pri prerušení rotorových tyčí budeme sledovať zmenu amplitúdy na vybraných frekvenciách frekvenčného spektra v súvislosti s počtom prerušených rotorových tyčí.

Budeme porovnávať predovšetkým zmeny na **50 Hz** a **100 Hz**, resp. na frekvenciách v okolí **49** a **48 Hz** ako aj frekvencie charakteristické pre poruchu s hodnotou **44** a **53 Hz**, resp. **38** a **57 Hz**. Pre stav naprázdno analyzujeme možné zvýšenie amplitúdy na frekvenciách **1498,32** a **1298,32 Hz**.

Na Obrázku 26 vidíme, že už pri chode motoru naprázdno sú veľmi zreteľné zvýšenia amplitúdy na 50 Hz, kde navyše ako “side band frequencies” vystupujú frekvencie 25 a 75 Hz. Najvýraznejšie je toto zvýšenie pri prerušení jednej rotorovej tyče. Ďalší peak môžeme sledovať na frekvencii 125 Hz.

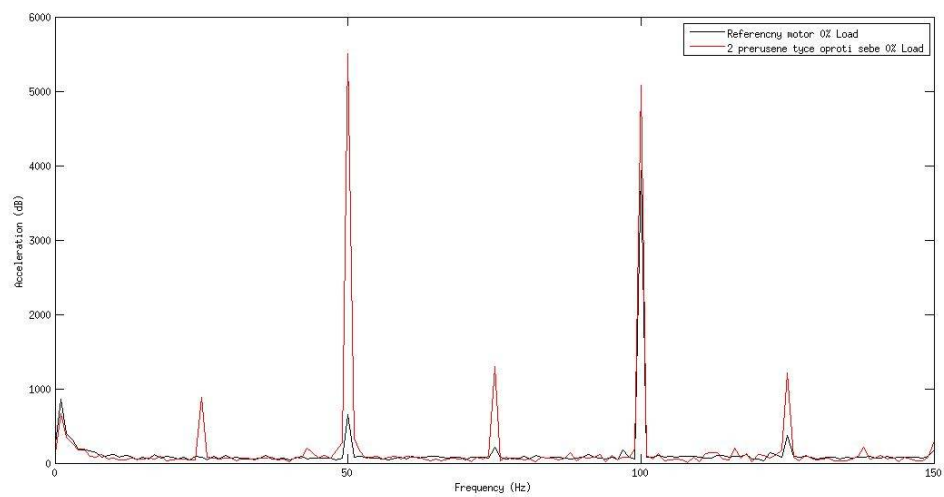
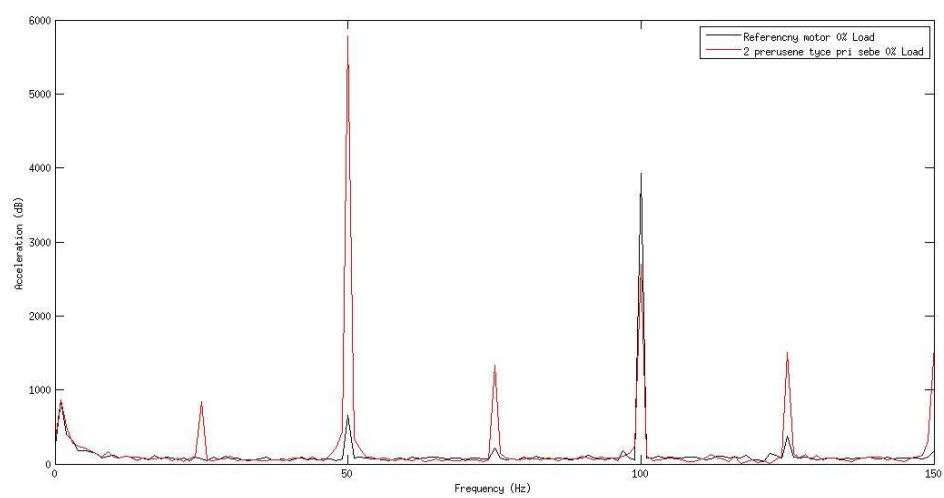
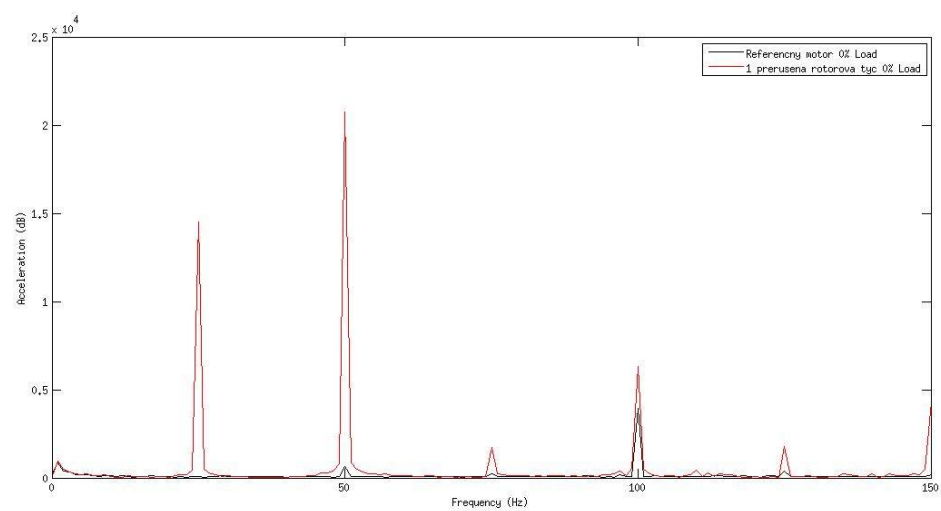
So zaťažením motoru sa situácia mení a nastáva veľmi výrazné zväčšenie a “posun” frekvencií (viď. Obrázok 27). Na rozdiel od stavu naprázdno kedy bol najväčší nárast amplitúd na nami skúmaných frekvenciách pri jednej prerušenej rotorovej tyči, tu vidíme na frekvencii 48 Hz maximum takmer 16 000 dB pri dvoch susedných prerušených tyčiach (v porovnaní s cca 2 500 dB pri jednej prerušenej rotorovej tyči). Dve oproti sebe prerušené tyče majú hodnotu amplitúdy s veľkosťou 6 000 dB.

Jedna prerušená tyč sa nám však prejaví na frekvencii cca 95,5 Hz (viď Obrázok 29 a 30) kde bude jej amplitúda dosahovať hodnoty 10 000 dB zatiaľ čo dve prerušené tyče pri sebe hodnoty 2 500 dB a dve prerušené tyče oproti sebe hodnoty 1 000 dB.

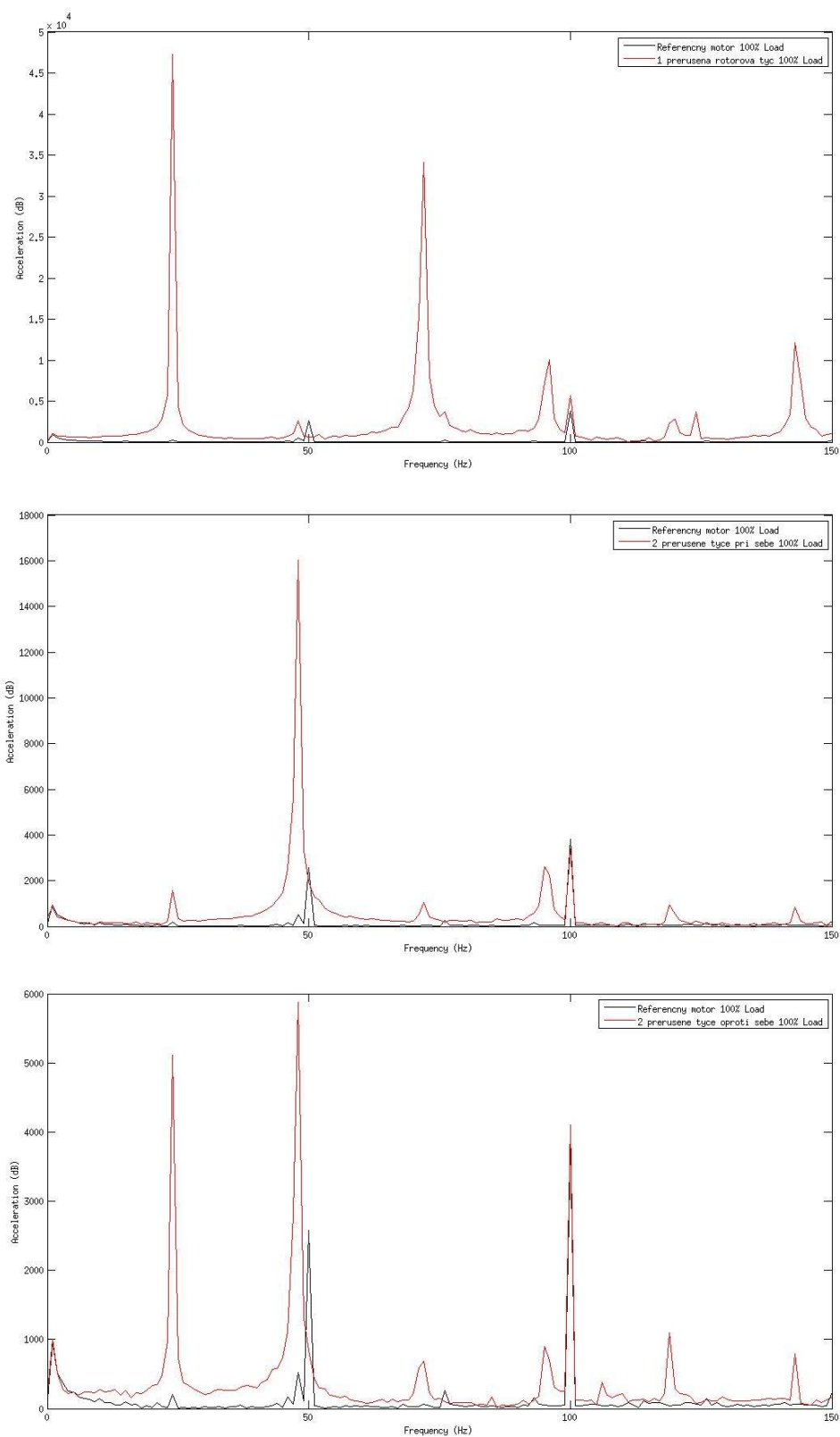
Skúmanie vyšších frekvencií nad 1200 Hz neukázalo nárast amplitúdy na žiadnej z hľadaných frekvencií (viď. Obrázok 28).

V prípade simulácie sa nám frekvencie v okolí 100 Hz zvýšili iba v prípade prerušenia jednej rotorovej tyče. Nastal však nárast v oblasti nízkych frekvencií.

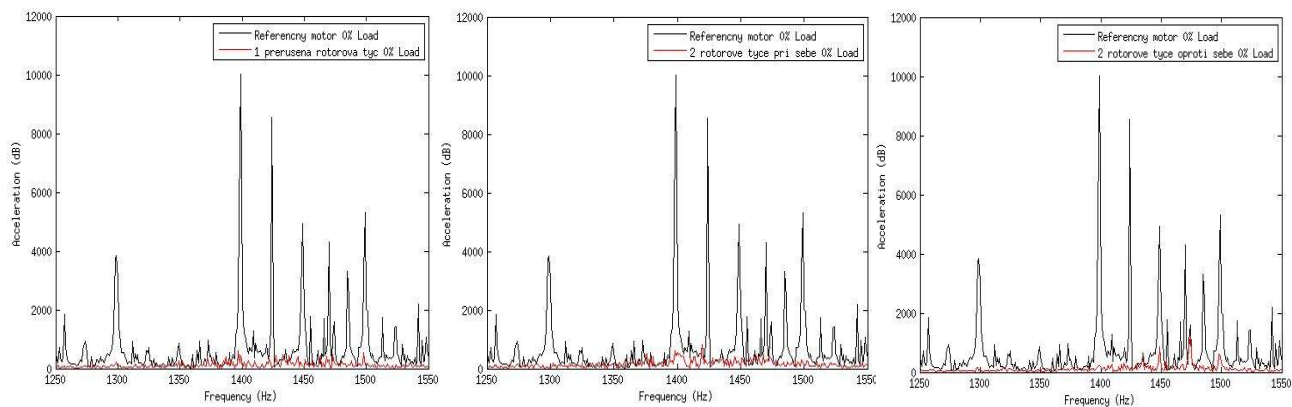
Celkovo môžeme zhrnúť, že pri meraných hodnotách je veľmi jasne vidieť prerušenie rotorovej tyče. Vo všetkých prípadoch je zrejmé “posunutie” frekvencie 50 a 100 Hz a taktiež nárast “side band frequencies” s hodnotami 25, 75 a 125 Hz.



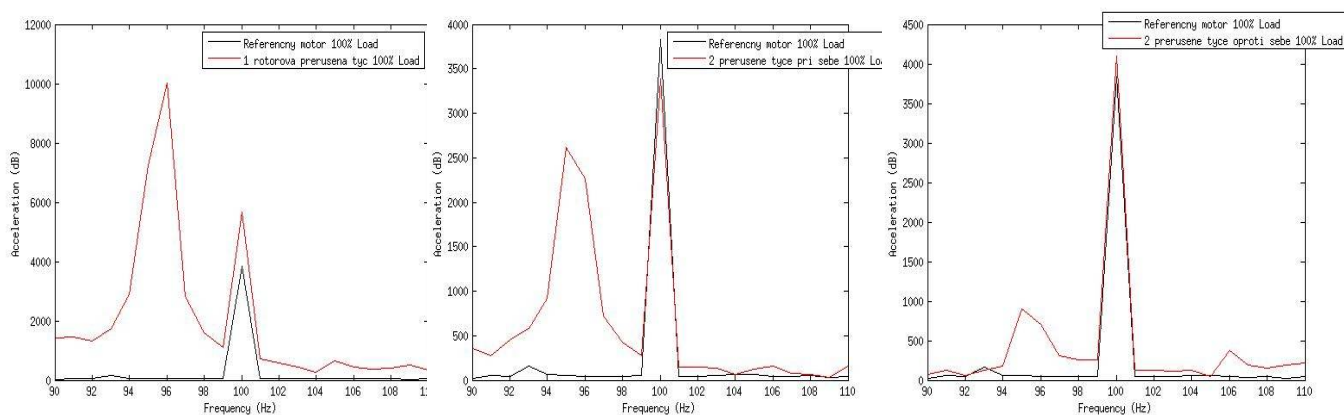
Obrázok 26: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pri chode motoru naprázdno



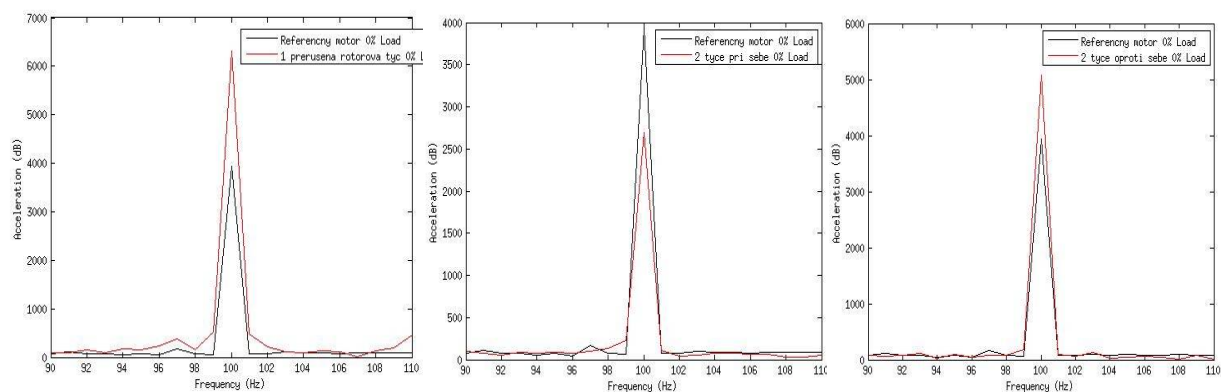
Obrázok 27: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pri 100% menovitého zaťaženia



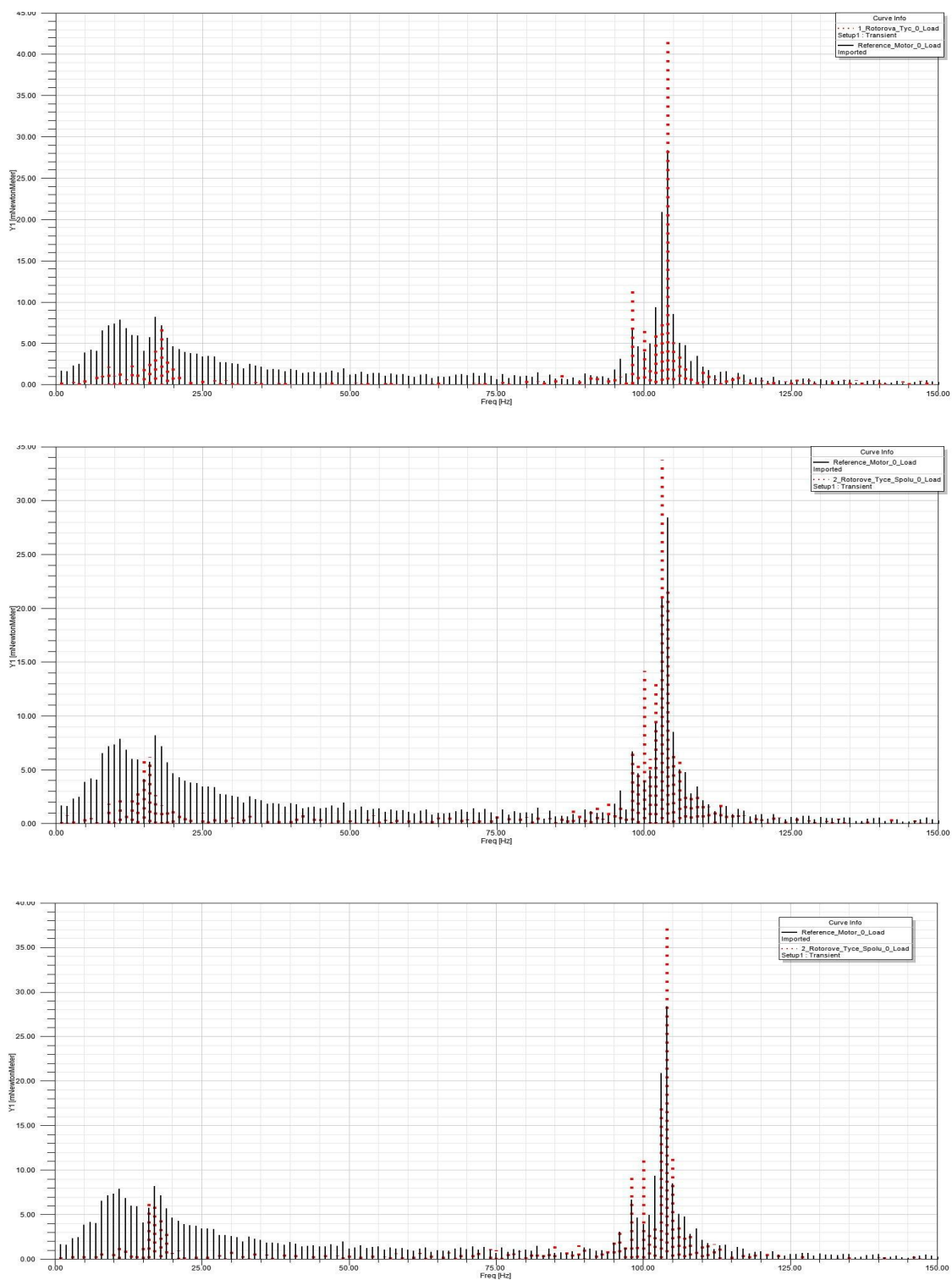
Obrázok 28: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pri chode naprázdno



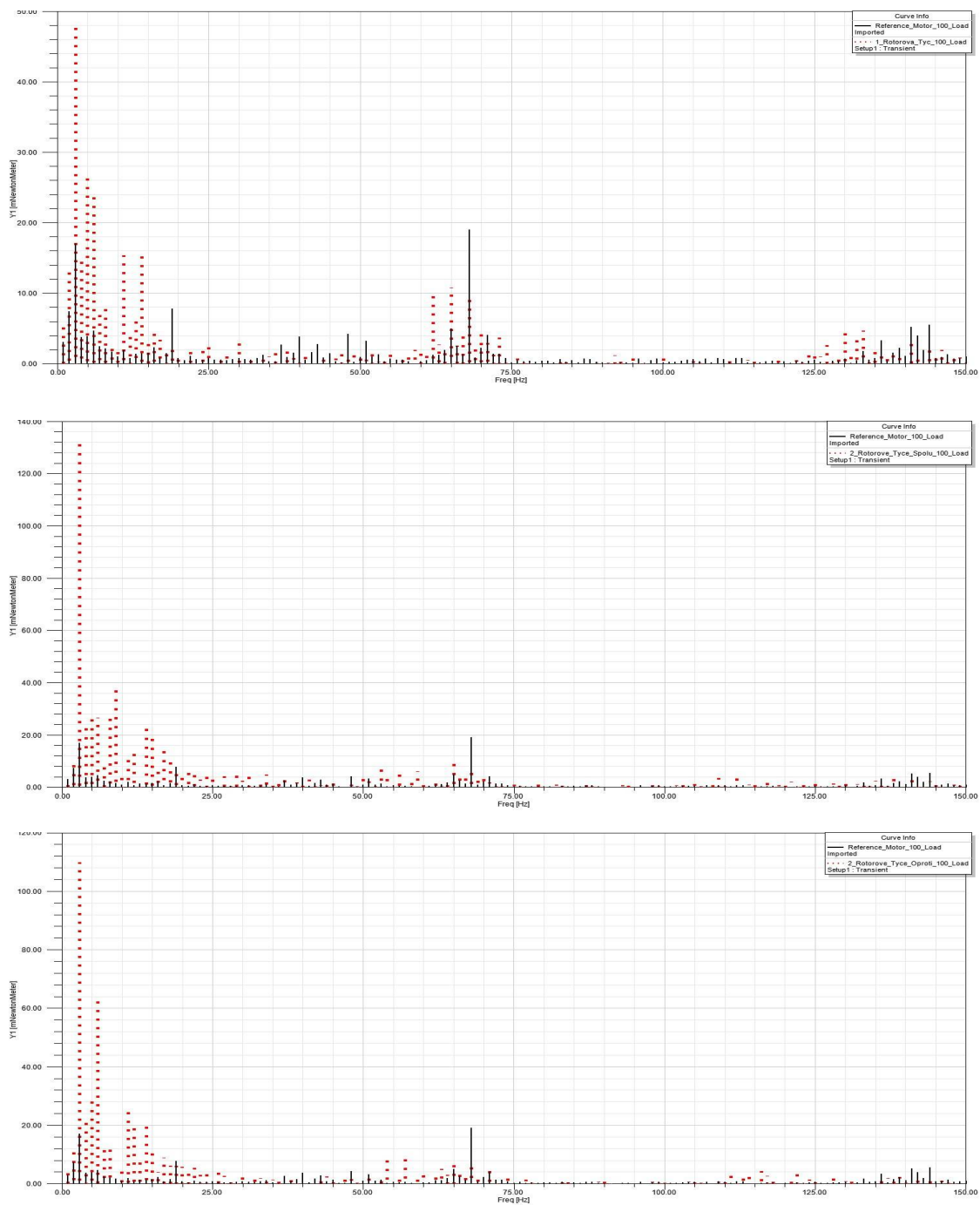
Obrázok 29: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pre 100 Hz pri 100% menovitého zaťaženia



Obrázok 30: Frekvenčné spektrum prerušených rotorových tyčí pre 100 Hz pri chode naprázdno



Obrázok 31: Frekvenčné spektrum simulácie prerušenia rotorových tyčí motoru pri chode naprázdno, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe



Obrázok 32: Frekvenčné spektrum simulácie prerušenia rotorových tyčí motoru pri 100% menovitého zaťaženia, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe

6 Záver

V tejto práci sme skúmali diagnostiku asynchrónneho motoru formou merania vibrácií motoru. Porovnávali sme frekvenčné charakteristiky referenčného a poruchových motorov. Bola vytvorená počítačová simulácia motora na ktorej sme porovnávali vplyv jednotlivých chýb na priebeh momentu hriadele.

Vyhodnotením jednotlivých meraní môžeme povedať, že pri diagnostike excentricity aj prerušenia rotorových tyčí motoru vieme pri meraní maximálnej a efektívnej hodnoty rýchlosti a zrýchlenia veľmi presne diagnostikovať poruchu motoru.

V prípade statickej a kombinovanej excentricity vychádzali tieto hodnoty pri maximálnom menovitom zaťažení 4 až 7 krát vyššie ako hodnoty referenčného motora. Dynamická excentricita mala menší nárast iba asi 1,5 násobok referenčných hodnôt. Pri prerušení rotorových tyčí boli pri maximálnom menovitom zaťažení pre jednu prerušenú rotorovú tyč aj pre dve prerušené susedné rotorové tyče asi 1,5 násobné nárasty oproti referenčnej hodnote. Motor s dvomi prerušenými tyčami oproti sebe zaznamenal až približne 3,5 násobný nárast hodnôt.

Napriek tomu, že výskyt poruchy by sme mohli s dobrou presnosťou (na základe literatúry môže byť poruchou motora už 10% zvýšenie oproti referenčnej hodnote) určiť už pri meraní rýchlosti a zrýchlenia, je užitočné využiť fourierovu analýzu pomocou ktorej môžeme skúsiť určiť druh poruchy.

Analýzou nameraných hodnôt vidíme, že prerušenie rotorových tyčí sa nám vo frekvenčnom spektre prejaví oveľa výraznejšie ako excentricita. Na rozdiel od excentricity sme videli pri všetkých kombináciách prerušenia rotorových tyčí nárast amplitúd na vybraných frekvenciách spektra (25, 75 a 125 Hz a v závislosti na veľkosti skluzu frekvencie v blízkosti 50 a 100 Hz). Z excentricity sa nám naopak napr. dynamická excentricita prejavila vo frekvenčnej oblasti iba minimálne. Statická a dynamická excentricita zaznamenali zmeny amplitúd na frekvenciách s hodnotou 25, 125 a okolí 50 Hz.

Prácou sme tiež zistili, že simuláciu momentu na hriadeli pomocou programu Maxwell a jej následné prevedenie do frekvenčnej oblasti vykazuje nárast na rozdielnych frekvenciách spektra ako to bolo v prípade nameraných hodnôt.

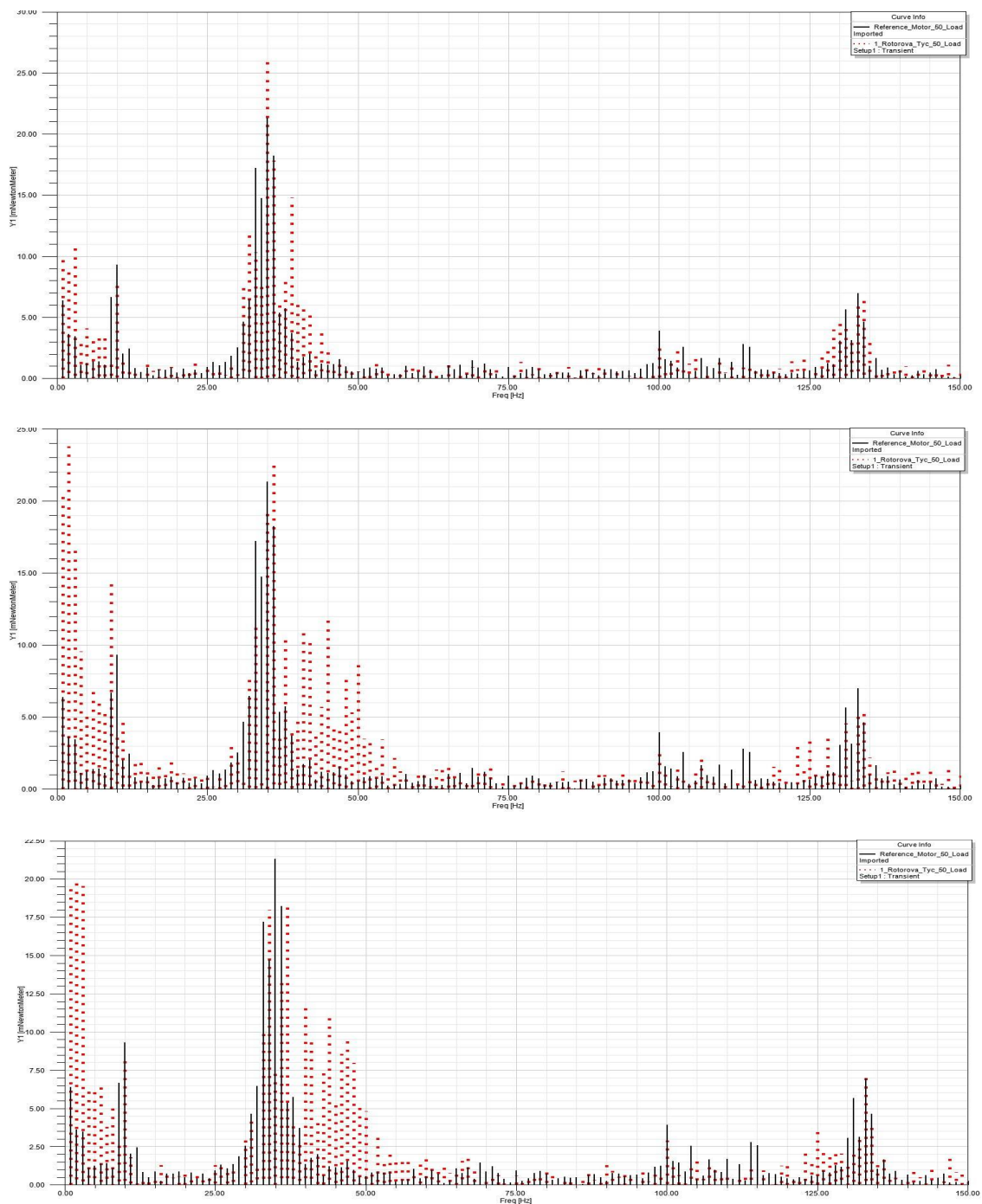
Záverom môžeme povedať, že sme prácou ukázali ako je pomocou merania vibrácií a ich analýzou možné určiť poruchu motora.

7 Použitá literatura

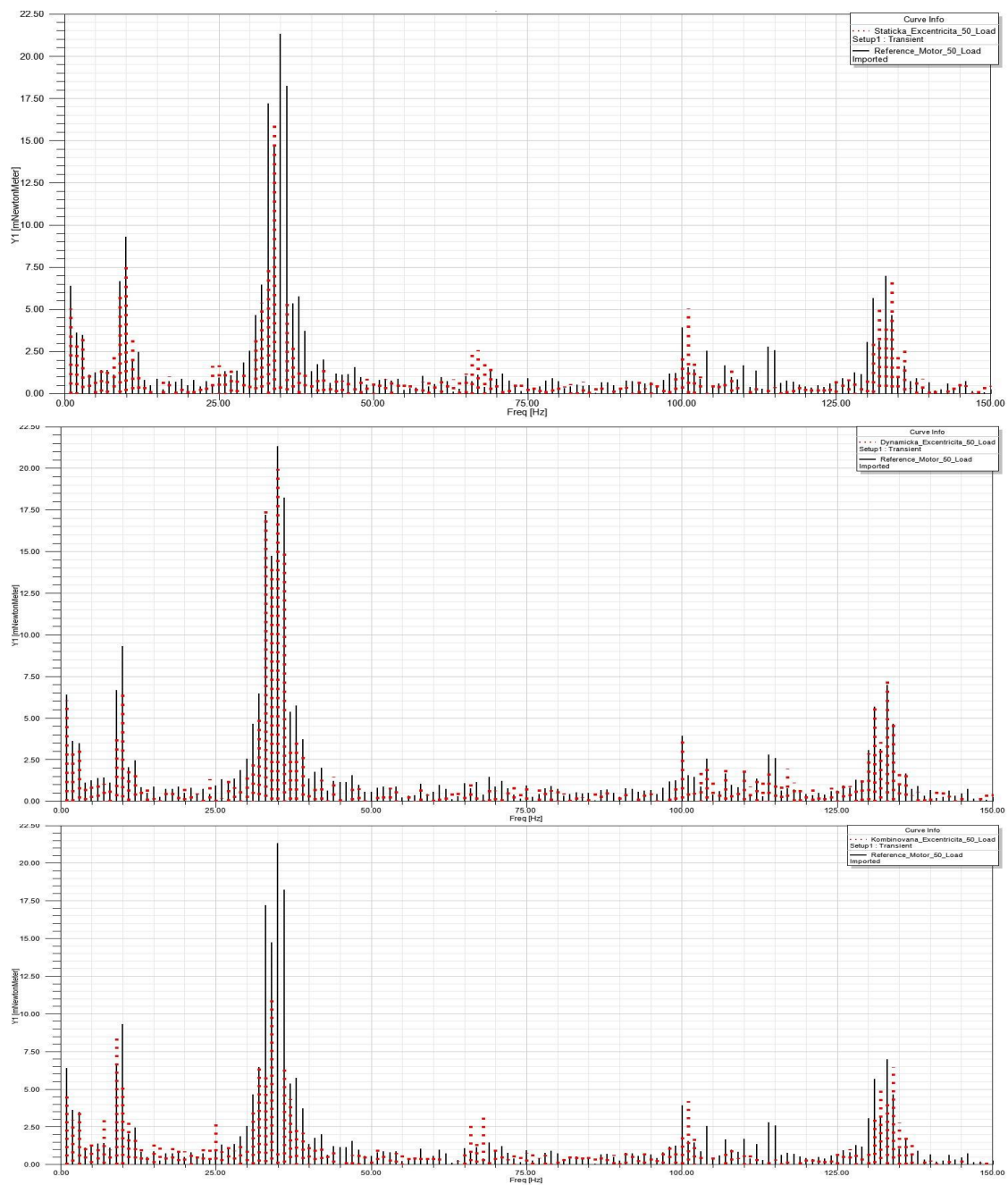
1. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Umans, S.: *Electric Machinery*, McGraw-Hill, 2002
2. Three-phase asynchronous motors: Generalities and ABB proposals for the coordination of protective devices
3. Iorgulescu, M.; Beloiu, R.; Popescu, M.O., "Rotor bars diagnosis in single phase induction motors based on the vibration and current spectrum analysis," *Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2010 12th International Conference on , vol., no., pp.364,370, 20-22 May 2010
4. Korkua, S.; Jain, H.; Wei-Jen Lee; Chiman Kwan, "Wireless health monitoring system for vibration detection of induction motors," *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, 2010 IEEE , vol., no., pp.1,6, 9-13 May 2010
5. Sizov, G.Y.; Sayed-Ahmed, A.; Chia-Chou Yeh; Demerdash, N. A O, "Analysis and Diagnostics of Adjacent and Nonadjacent Broken-Rotor-Bar Faults in Squirrel-Cage Induction Machines," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.56, no.11, pp.4627,4641, Nov. 2009
6. Kanovic, Z.; Matic, D.; Jelcic, Z.; Rapaic, M.; Jakovljevic, B.; Kapetina, M., "Induction motor broken rotor bar detection using vibration analysis — A case study," *Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED)*, 2013 9th IEEE International Symposium on , vol., no., pp.64,68, 27-30 Aug. 2013
7. Arthur, N.; Penman, J.; McLean, A.; Parsons, A., "Induction machine condition monitoring with higher order spectra. I. Fundamentals and fixed frequency operation," *Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE* , vol.3, no., pp.1889,1894 vol.3, 31 Aug-4 Sep 1998
8. Armenta-Loredo, M.A.; Ibarra-Manzano, O.G., "Application of higher order spectral analysis for faults detection in induction motors," *Electronics, Communications and Computing (CONIELECOMP)*, 2013 International Conference on , vol., no., pp.144,148, 11-13 March 2013
9. Werner, U., "Theoretical analysis of shaft vibrations in two-pole induction machines considering static rotor eccentricity," *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM)*, 2010 International Symposium on , vol., no., pp.853,860, 14-16 June 2010

10. Cameron, J.R.; Thomson, W.T.; Dow, A.B., "Vibration and current monitoring for detecting airgap eccentricity in large induction motors," *Electric Power Applications, IEE Proceedings B* , vol.133, no.3, pp.155,163, May 1986
11. El Hachemi Benbouzid, M., "A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* , vol.47, no.5, pp.984,993, Oct 2000
12. Dorrell, D.G.; Thomson, W.T.; Roach, S., "Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic airgap eccentricity in 3-phase induction motors," *Industry Applications, IEEE Transactions on* , vol.33, no.1, pp.24,34, Jan/Feb 1997
13. Christoph Schlensok, Gerhard Henneberger, (2004) "Comparison of static, dynamic, and static-dynamic eccentricity in induction machines with squirrel-cage rotors using 2D-transient FEM", *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 23 Iss: 4, pp.1070 – 1079
14. Georgakopoulos, I.P., Mitronikas, E.D., Safacas, A.N., Tsoumas, I.P. *Detection of Eccentricity in Inverter-Fed Induction Machines using Wavelet Analysis of the Stator Current*, Power Electronics Specialists Conference, IEEE 2008, ISBN 978-1-4244-1667-7

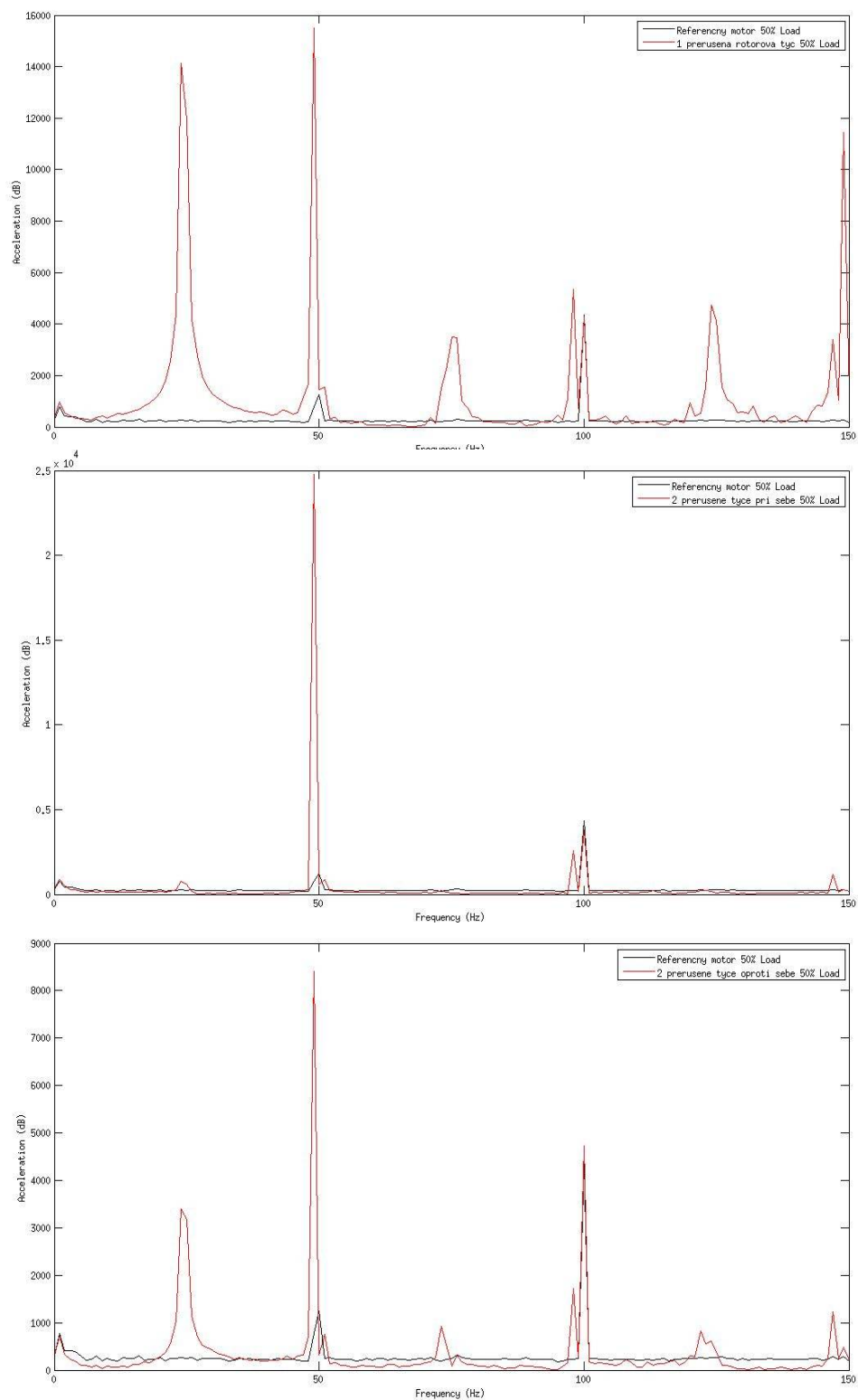
8 Prílohy



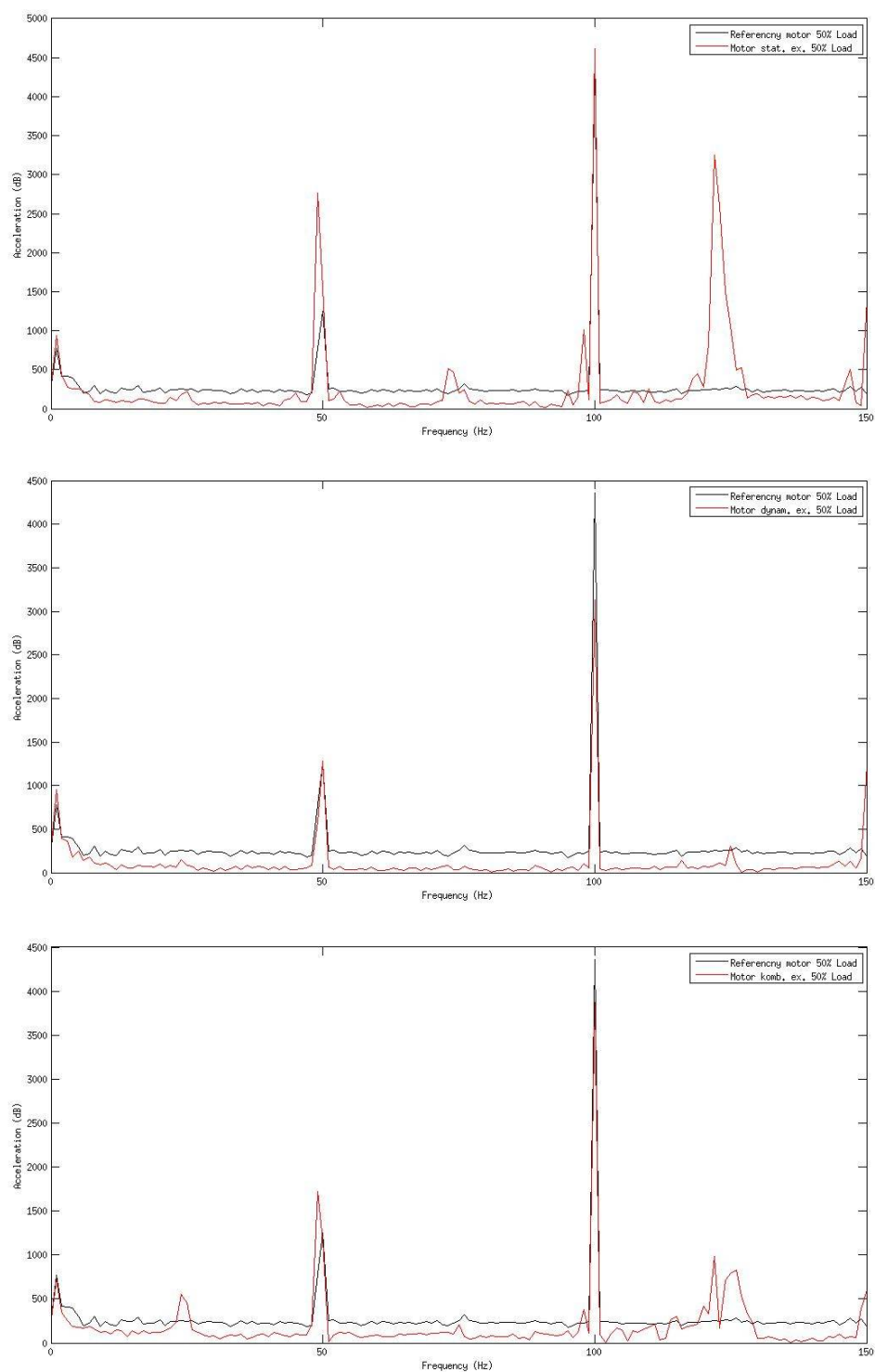
Obrázok 33: Frekvenčné spektrum simulácie prerušenia rotorových tyčí motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe



Obrázok 34: Frekvenčné spektrum simulácie excentricity motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu statická excentricita, v strede dynamická excentricita, dole kombinovaná excentricita



Obrázok 35: Frekvenčné spektrum merania prerušenia rotorových tyčí motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu 1 prerušená tyč, v strede 2 prerušené tyče pri sebe, dole 2 prerušené tyče oproti sebe



Obrázok 36: Frekvenčné spektrum merania excentricity motoru pri 50% menovitého zaťaženia, navrchu statická excentricita, v strede dynamická excentricita, dole kombinovaná excentricita